

Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo

Arley David Celis Vargas
Ing. Civil

Trabajo de grado para optar al título de magíster en ingeniería civil

Director
Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Ing. MSc. PhD.
Profesor asociado de la Universidad Industrial de Santander

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Civil
Bucaramanga
2022

Tabla de contenido

Resumen.....	008
1. Introducción	008
2. Justificación	011
2.1. Componente político, normativo e institucional.....	011
2.2. Componente académico	012
2.3. Componente social	013
3. Objetivos	013
3.1. Objetivo general	013
3.2. Objetivos específicos	014
4. Revisión bibliográfica	014
4.1. Marco conceptual	014
4.1.1. Páramos	014
4.1.2. Unidad hidrográfica	016
4.1.3. Servicios ecosistémicos hidrológicos	017
4.1.3.1.Regulación hídrica	018
4.1.3.2.Abastecimiento hídrico	018
4.1.4. Cambios de uso de suelo y cobertura.....	019
4.1.5. Enfoque de cuencas pareadas para el análisis hidrológico de los cambios en los suelos	019
4.1.6. Índices hidrológicos para evaluar los servicios de abastecimiento y regulación hídrica	021
4.2. Estado del arte	021
4.2.1. Metodología sistemática	022
4.2.2. Métricas generales	022
4.2.3. Enfoques para la evaluación de los efectos de los cambios de uso de suelo y cobertura, sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por ecosistemas de páramo	023
4.2.3.1.Enfoque de cuencas experimentales.....	024
4.2.3.1.1. Etapa de caracterización geomorfológica.....	024
4.2.3.1.2. Etapa de caracterización hidrometeorológica.....	027
4.2.3.1.3. Etapa de evaluación de impactos.....	031
4.2.3.2.Otros enfoques	035
5. Metodología	036
5.1. Sitio de estudio.....	037
5.2. Caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas.....	039
5.2.1. Caracterización morfológica.....	039
5.2.2. Caracterización de suelos.....	043
5.2.3. Caracterización de coberturas del suelo	043
5.2.4. Caracterización de usos del suelo.....	046
5.2.5. Caracterización geológica.....	046
5.3. Caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas.....	046
5.3.1. Caracterización pluviométrica	048
5.3.2. Caracterización hidrométrica.....	049
5.3.3. Caracterización meteorológica	050

5.3.4. Caracterización de extracciones hídricas	050
5.4. Evaluación de los impactos hidrológicos sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica	051
5.4.1. Selección de métodos e índices hidrológicos	051
5.4.2. Estimación de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.....	053
5.4.3. Discusión de resultados	053
6. Resultados y discusión	054
6.1. Caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas.....	054
6.1.1. Caracterización morfológica.....	054
6.1.2. Caracterización de suelos.....	059
6.1.3. Caracterización de coberturas del suelo.....	061
6.1.4. Caracterización de usos del suelo.....	066
6.1.5. Caracterización geológica.....	069
6.2. Caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas.....	070
6.2.1. Caracterización pluviométrica.....	070
6.2.2. Caracterización hidrométrica.....	075
6.2.3. Caracterización meteorológica	079
6.2.4. Caracterización de extracciones hídricas.....	082
6.3. Evaluación de los impactos hidrológicos sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica	086
6.3.1. Aplicación y análisis de métodos hidrológicos para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.....	086
6.3.1.1. Análisis de eventos en hietogramas e hidrogramas.....	086
6.3.1.2. Análisis de curvas acumuladas.....	089
6.3.1.3. Análisis de curvas de duración de caudales.....	091
6.3.2. Aplicación y análisis de índices hidrológicos para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.....	097
6.3.3. Disertación del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por las dos unidades hidrográficas de estudio.....	105
6.3.4. Recomendaciones para futuras investigaciones	107
7. Conclusiones	109
Agradecimientos	113
Referencias.....	114

Lista de figuras

Figura 1. Naciones con biomas paramunos. Adaptado de Hofstede et al. (2003).....	014
Figura 2. Localización geográfica de los páramos. Adaptado de Hofstede et al. (2003)	015
Figura 3. La unidad hidrográfica como un sistema hidrológico. Adaptado de Chow et al. (1994)	016
Figura 4. Tipos de divisorias. Adaptado de Monsalve (2008)	016
Figura 5. Tipos de unidades hidrográficas según su conducción final.....	017
Figura 6. Factores que promueven el abastecimiento y la regulación hídrica en los páramos. Adaptado de Vásquez y Buitrago (2011)	018
Figura 7. Experimento de cuencas pareadas. Adaptado de Hewlett y Pienaar (1973) usando un modelo de elevación de Google Earth Pro.....	020
Figura 8. Análisis general de la muestra. A) Publicaciones en el tiempo. B) Investigaciones según el tipo de documento. C) Sitios de estudio reportados.....	022
Figura 9. Participación de autores en las publicaciones revisadas.....	022
Figura 10. Marcos de referencia y enfoques metodológicos inherentes al tema de investigación	023
Figura 11. Metodología aplicada en la investigación.....	036
Figura 12. Panorama geográfico, administrativo y ambiental del sitio de estudio.....	037
Figura 13. Unidades hidrográficas de estudio.....	038
Figura 14. Etapas de la caracterización morfológica de las dos unidades hidrográficas.....	042
Figura 15. Etapas de la clasificación de coberturas de las dos unidades hidrográficas.....	044
Figura 16. Localización de los monitoreos considerados. A) Monitoreos implementados por este proyecto. B) Monitoreos implementados por el IDEAM.....	047
Figura 17. Detalle de los períodos e intervalos de monitoreo de los sistemas automáticos.....	048
Figura 18. Sistema de monitoreo de lluvia instalado. A) Pluviómetro montado en la base de la estación meteorológica. B) Detalle interno del pluviómetro. C) Especificaciones del equipo...048	
Figura 19. Etapas preliminares. A) Predimensionamiento. B) Construcción. C) Instalación.....	049
Figura 20. Sistema de monitoreo de caudales instalado. A) Estaciones hidrométricas en el cierre de las unidades. B) Detalle del interior de las estaciones. C) Detalle de los dos transductores sumergidos. D) Detalle del transductor externo. E) Especificaciones de los transductores.....	049
Figura 21. Sistema de monitoreo meteorológico instalado. A) Estación automática. B) Detalles de la estación	050
Figura 22. Metodología para la caracterización de las extracciones hídricas. A) Trayectorias de las salidas de campo para la identificación del sistema. B) y C) Aforos volumétricos.....	051
Figura 23. Histogramas de valores de altimetría de las unidades.....	056
Figura 24. Curvas hipsométricas.....	057
Figura 25. Perfiles topográficos de los cauces de las corrientes principales.....	057
Figura 26. Histogramas de valores de pendiente de las unidades	058
Figura 27. Tipos de suelo identificados en las inmediaciones del sitio de estudio.....	059
Figura 28. Mapa de coberturas de las dos unidades hidrográficas.....	062
Figura 29. Mapa de usos de las dos unidades hidrográficas	067
Figura 30. Mapa geológico del área de estudio. Adaptado de Bejarano y Navas (2018)	069
Figura 31. Cortes del mapa geológico de la Figura 30. Adaptado de Bejarano y Navas (2018) ...	069
Figura 32. Régimen promedio anual de la precipitación en la zona de estudio.....	070

Figura 33. Precipitación mensual registrada por el pluviómetro instalado en las unidades hidrográficas y las estaciones El Picacho y Berlín.....	071
Figura 34. Precipitación diaria registrada por el pluviómetro instalado en las unidades	072
Figura 35. Variación intradiaria de la precipitación monitoreada.....	073
Figura 36. Curvas de intensidad y duración de las lluvias registradas. A) Máxima. B) Promedio.	073
Figura 37. Histograma de los eventos registrados en el período de monitoreo.....	074
Figura 38. Caudales medios mensuales monitoreados en las dos unidades hidrográficas.....	075
Figura 39. Caudales medios mensuales normalizados por el área de cada unidad hidrográfica...	075
Figura 40. Caudales medios diarios monitoreados en las dos unidades hidrográficas.....	076
Figura 41. Caudales medios diarios normalizados por el área de cada unidad hidrográfica.....	076
Figura 42. Caudales monitoreados en las dos unidades hidrográficas a escala de registro (5 y 15 min)	077
Figura 43. Caudales normalizados por el área de cada unidad hidrográfica a escala de registro (5 y 15 min)	077
Figura 44. Variaciones intradiarias de los caudales de las dos unidades hidrográficas.....	078
Figura 45. Radiación solar. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.....	079
Figura 46. Humedad relativa. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.....	080
Figura 47. Temperatura del aire. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.....	080
Figura 48. Velocidad del viento. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.....	081
Figura 49. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia de las unidades hidrográficas	081
Figura 50. Descripción del sistema de extracciones hídricas.....	083
Figura 51. Análisis estadístico de los caudales aforados en cada punto de extracción.....	085
Figura 52. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de eventos de precipitación acontecidos en un mes seco (diciembre de 2019)	086
Figura 53. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de un evento de precipitación acontecido en un mes seco (febrero de 2020)	087
Figura 54. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de eventos de precipitación acontecidos en un mes húmedo (octubre de 2020)	088
Figura 55. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de eventos de precipitación acontecidos en un mes húmedo (abril de 2021)	088
Figura 56. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el primer período continuo de registros (desde noviembre de 2019 hasta febrero de 2020)	089
Figura 57. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el segundo período continuo de registros (desde febrero de 2020 hasta marzo de 2020)	089
Figura 58. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el tercer período continuo de registros (desde mayo de 2020 hasta septiembre de 2020)	090
Figura 59. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el cuarto período continuo de registros (desde septiembre de 2020 hasta abril de 2021)	090
Figura 60. Curvas de duración de caudales de las dos unidades hidrográficas.....	091
Figura 61. Comparación de las curvas de duración de caudales de las dos unidades de estudio, con respecto a unidades referentes no intervenidas identificadas en la revisión de literatura.....	093
Figura 62. Comparación de las curvas de duración de caudales de las dos unidades de estudio, con respecto a unidades referentes intervenidas identificadas en la revisión de literatura	095
Figura 63. Histogramas de los caudales normalizados de las dos unidades hidrográficas.....	103

Lista de tablas

Tabla 1. Síntesis de la caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas.....	025
Tabla 2. Síntesis de la caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas.....	028
Tabla 3. Síntesis de los métodos e índices hidrológicos identificados para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica	031
Tabla 4. Síntesis de los resultados encontrados en la evaluación de los impactos hidrológicos...	033
Tabla 5. Características generales de las dos unidades hidrográficas de estudio	039
Tabla 6. Parámetros geométricos	040
Tabla 7. Parámetros de forma	040
Tabla 8. Parámetros de relieve.....	041
Tabla 9. Parámetros de la red de canales	041
Tabla 10. Detalles de la ejecución de los sobrevuelos.....	042
Tabla 11. Características del suelo estudiadas.....	043
Tabla 12. Métodos e índices hidrológicos seleccionados para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica	052
Tabla 13. Parámetros geométricos.....	054
Tabla 14. Parámetros de forma.....	055
Tabla 15. Parámetros de relieve.....	055
Tabla 16. Parámetros de la red de canales.....	059
Tabla 17. Características de las asociaciones taxonómicas identificadas.....	060
Tabla 18. Descripción de las clases de coberturas identificadas.....	063
Tabla 19. Áreas de las clases identificadas en la clasificación de coberturas.....	065
Tabla 20. Descripción de los usos del suelo identificados.....	066
Tabla 21. Detalle de los puntos más importantes del sistema de extracciones.....	084
Tabla 22. Resultados del IUA e IVH de la Unidad Hidrográfica Intervenida.....	085
Tabla 23. Resultados de los índices hidrológicos considerados para la evaluación del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.....	098

Lista de apéndices

Apéndice A. Metodología y resultados de la aplicación de la revisión sistemática de literatura...	129
Apéndice B. Características del vehículo aéreo no tripulado (UAV) usado en los sobrevuelos...	130
Apéndice C. Mapa de concentración de las fotografías e informe de procesamiento del MDE...	131
Apéndice D. Correcciones al MDE y delimitación de las unidades hidrográficas de estudio.....	132
Apéndice E. Metodología para el cálculo de los parámetros morfológicos.....	133
Apéndice F. Características de las tres bandas y especificaciones de la cámara digital.....	134
Apéndice G. Informe de construcción del ortomosaico en Agisoft Metashape.....	135
Apéndice H. Metodología general para el registro de los objetos de entrenamiento.....	136
Apéndice I. Pasos para la clasificación supervisada de las coberturas usando el algoritmo MLC.	137
Apéndice J. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de las dos unidades.....	138
Apéndice K. Sitios asignados para el chequeo de la clasificación de las coberturas.....	139
Apéndice L. Procedimiento de calibración de las estaciones hidrométricas.....	140
Apéndice M. Etapas para la caracterización de las extracciones hídricas.....	141
Apéndice N. Llenado de los registros de precipitación de marzo y abril de 2020 para el pluviómetro instalado en las dos unidades hidrográficas.....	143
Apéndice O. Análisis de la variación intradiaria asociada al patrón oscilatorio de los caudales..	144
Apéndice P. Estimación del IUA e IVH para la unidad hidrográfica sometida a intervención....	147
Apéndice Q. Indicadores de los tiempos asociados a las constantes de recesión de eventos.....	149
Apéndice R. Indicadores asociados a la cantidad y duración de los flujos altos y bajos.....	154
Apéndice S. Indicadores restantes para el análisis de los servicios de regulación y abastecimiento hídrico	155
Apéndice T. Caudales medios horarios monitoreados en las dos unidades hidrográficas.....	156

Resumen

Los páramos son ecosistemas de alta montaña con características especiales que prestan servicios ecosistémicos de abastecimiento y regulación hídrica. A pesar de ello, el establecimiento de actividades antrópicas en sus territorios puede causar alteraciones negativas en los dos servicios. Considerando su vulnerabilidad, en esta investigación se evaluaron los efectos que las transformaciones en las coberturas y los usos de los suelos de páramo, generan sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por dos unidades hidrográficas con diferentes niveles de conservación, denominadas «Intervenida y No Intervenida». Para cumplir este objetivo se usó como metodología central el enfoque adaptado de cuencas pareadas, el cual se llevó a cabo a partir de: (i) una revisión de literatura, realizada mediante un método sistemático; (ii) una caracterización geomorfológica, ejecutada por medio de sobrevuelos, revisiones documentales y el uso de herramientas de SIG; (iii) una caracterización hidrometeorológica, realizada a través de la instalación de sistemas de monitoreo y el análisis de sus registros; y (iv) una evaluación de impactos, ejecutada por medio de la aplicación de índices y métodos hidrológicos para el estudio de las afectaciones sobre los dos servicios. Como resultado, en general se encontró que la Unidad Intervenida, presentó declives de 55.6 y 32.2% en la oferta de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, respectivamente, en comparación con la Unidad No Intervenida. Finalmente, se emitieron algunas recomendaciones para el desarrollo de futuras investigaciones en el área de estudio, con el fin de dar continuidad a nuevos proyectos que profundicen en la temática de los efectos hidrológicos causados por la alteración de los suelos.

Palabras clave: páramos; servicios ecosistémicos; abastecimiento hídrico; regulación hídrica; cambio de uso y cobertura del suelo; cuencas pareadas; índices hidrológicos; métodos hidrológicos.

1. Introducción

Los ecosistemas de montaña son considerados territorios estratégicos para el desarrollo sostenible global, debido a que poseen una capacidad notable de proveer bienes y servicios ecosistémicos para el bienestar de la humanidad (Wehrli, 2014). Se estima que el 12% de la población mundial vive en zonas de montaña y más del 50% depende de manera directa o indirecta de estos ecosistemas (Ariza et al., 2013). La variedad de servicios ecosistémicos que proveen las montañas es extensa; sin embargo, son ampliamente reconocidas por su relación con el agua (Egan y Price, 2014). Un ejemplo de ello es que, aunque los ecosistemas de montaña ocupan el 24% de la superficie del planeta, proporcionan cerca del 80% del agua dulce de la Tierra (Torres et al., 2014).

Las montañas presentan una variabilidad sobresaliente, se encuentran desde el ecuador hasta en los polos y ocupan elevaciones que van desde la vecindad del mar, hasta los lugares más altos del planeta (Price, 1998). Las montañas albergan diferentes tipos de ecosistemas según la franja latitudinal y altitudinal que se considere. En este contexto, en la zona tropical de América, sobre el límite forestal y bajo la línea de nieves perpetuas, es posible encontrar unos ecosistemas naturales con unas características hidrológicas especiales, conocidos bajo la denominación de páramos (Hofstede, 1995).

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores, los páramos se encuentran en países andinos como Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, formando un corredor insular sobre la cordillera de los Andes que termina en el sur con la presencia de tres complejos aislados en Panamá, Costa Rica y la Sierra Nevada de Santa Marta (Llambí et al., 2012). A pesar de que todos los complejos de páramo desempeñan un papel clave en cada país, Colombia cuenta con alrededor de 2906137 hectáreas de páramo, distribuidas en 36 complejos que ocupan alrededor del 2.5% del territorio continental y suman el 50% de los páramos del mundo (Sarmiento et al., 2013).

Los páramos son ecosistemas multifuncionales con características únicas que permiten la oferta de una gama amplia de servicios ecosistémicos, la cual incluye servicios culturales, de soporte, aprovisionamiento y regulación, entre los cuales, es posible destacar a dos servicios hidrológicos por su importancia en la subsistencia de las personas, específicamente, los servicios de abastecimiento y la regulación hídrica (Cortés y Ortiz, 2017). El servicio de abastecimiento hídrico se refiere a la cantidad de agua que descarga una unidad hidrográfica durante un intervalo de tiempo dado, para el uso en actividades antrópicas y el sostenimiento del ecosistema fluvial (OMM, 2012). Metafóricamente, en este servicio se suele considerar a los páramos como fábricas capaces de producir cantidades de agua, a través del bajo consumo hídrico de la vegetación y las frecuentes precipitaciones (Hofstede, 2011). Con respecto al servicio de regulación hídrica, este se puede definir como la capacidad que tiene el ecosistema de páramo de almacenar agua en períodos de precipitación para luego liberarla de forma controlada en tiempos de estiaje (Cárdenas y Tobón, 2017). En este servicio, el páramo se comporta como una esponja que, por medio de sus características topográficas y suelos, es capaz de almacenar cuidadosamente el agua con el objetivo de ofertar un suministro sostenido en el tiempo (Llambí et al., 2012). En resumen, se puede considerar al abastecimiento hídrico como un servicio asociado a la cantidad y, a la regulación hídrica, como un servicio relacionado con la liberación de esas cantidades.

Una de las problemáticas asociadas a estos dos servicios hidrológicos, es el riesgo que presentan ante actividades antrópicas relacionadas con la transformación de los territorios, como los cambios en el uso y la cobertura de los suelos, alteraciones que no son ajenas a los páramos (Buytaert et al., 2006B). En este sentido, varias investigaciones desarrolladas en páramos andinos han demostrado que la agricultura, el pastoreo y la urbanización, son algunas de las actividades que impactan notablemente a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.

En relación con la agricultura, el estudio adelantado por Buytaert et al. (2007), evidenció que las Curvas de Duración de Caudales (CDC) de las unidades hidrográficas cultivadas suelen presentar inclinaciones mayores y caudales medios y bajos menores que las curvas de unidades sin intervención. Estos comportamientos se han asociado a cambios en el servicio de regulación y abastecimiento hídrico respectivamente, causados por la exposición de los suelos tras la remoción de las coberturas vegetales, la destrucción de su estructura natural, la alteración de sus propiedades hidrofísicas (p. ej., humedad, densidad, retención hídrica y conductividad hidráulica) y el aumento en los requerimientos de agua para riego, entre otros (Buytaert et al., 2006B).

Con respecto al pastoreo, se ha identificado que los impactos causados a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica dependen de la magnitud con que se desarrolla la actividad. De esta manera, se han diferenciado los impactos causados por dos tipos de pastoreo, el extensivo y el intensivo. Según las investigaciones adelantadas por Montenegro-Díaz et al. (2019) y Ochoa-Tocachi et al. (2016A), los efectos del pastoreo extensivo sobre los dos servicios no son significativos, debido a que este tipo de pastoreo no genera alteraciones notables en las propiedades de los suelos, haciendo que la escorrentía y el contenido de agua en el suelo en condiciones medias, resulte similar al de una unidad hidrográfica sin alteración. En contraste, según los estudios realizados por Ochoa-Tocachi et al. (2016A) y Podwojewski et al. (2002), el pastoreo intensivo sí suele producir efectos significativos sobre los dos servicios, puesto que al generar cambios en los suelos como: el aumento en la compactación, el retiro de la cobertura vegetal, la creación de rutas preferenciales para la escorrentía, la disminución de la capacidad de retención hídrica y el aumento de la erosión eólica, las CDC de estas unidades hidrográficas se desplazan hacia abajo y sus hidrogramas presentan caudales picos más altos y de duraciones menores.

Acerca de la urbanización, los páramos han sido históricamente sitios poblados por comunidades indígenas, europeas y rurales, que han basado sus actividades de supervivencia en los recursos ofrecidos por el ecosistema (Hofstede et al., 2003). En la actualidad los páramos siguen siendo sitios habitados que albergan grandes poblaciones. Un ejemplo de ello, corresponde al informe publicado por el DANE (2020), donde se manifiesta la existencia de 37874 viviendas, 23201 hogares y 76218 personas en los páramos colombianos. La cuestión consiste en que estas poblaciones hacen uso del servicio de abastecimiento hídrico para su consumo y el desarrollo de sus actividades diarias, pudiendo incluso provocar escenarios de desabastecimiento y presiones sobre las unidades hidrográficas locales. Este comportamiento fue evidenciado por el estudio adelantado por González et al. (2015), quienes encontraron valores altos en el Índice de Uso de Agua (IUA) para algunas veredas del páramo de Guerrero. De otro lado, en relación con el servicio de regulación hídrica, en la literatura no se evidenciaron impactos causados por la presencia de grandes centros poblados, excepto por la construcción de reservorios que pueden mejorar el servicio (Harden, 2006).

En Colombia, los páramos conforman los orígenes de las cuencas hidrográficas que nutren al país, suministrando agua para cerca del 70% de la población nacional (Cabrera y Ramírez, 2014). A pesar de ello, los páramos de Colombia se encuentran sometidos a transformaciones alarmantes en el uso y la cobertura de los suelos. Una de las situaciones más críticas se encuentra en los páramos de la cordillera oriental, lugar en el cual, alrededor del 21% del área de los páramos presenta actividades relacionadas con la agricultura, el pastoreo y la urbanización, ocasionando los impactos mencionados en los estudios anteriores, a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica (IAvH, 2016). Por otra parte, estos páramos también se encuentran sometidos a otras presiones que impactan directa o indirectamente a los dos servicios hidrológicos, como lo son el cambio climático (Buytaert et al., 2014) y los procesos asociados a sus delimitaciones (L. Calderón, 2014). Frente a este contexto, el país ha suscrito políticas globales que aportan directrices para la gestión de estos ecosistemas, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) que, en un sentido general, tienen como finalidad gestionar estos territorios de manera sostenible a partir de la toma de decisiones basada en evidencias.

Teniendo en cuenta todos los componentes de la problemática descrita, esta investigación evalúa los efectos que las transformaciones de los suelos de páramo generan sobre los dos servicios hidrológicos. Específicamente, en este estudio se aborda la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es el estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica de dos unidades hidrográficas de páramo, sometidas a diferentes niveles de alteración en el uso y la cobertura de los suelos? Para dar respuesta a este requerimiento, en este estudio se adaptó como metodología general el enfoque de cuencas pareadas, el cual se aplicó a partir de la ejecución de tres etapas. La primera, que consistió en la caracterización geomorfológica de las dos unidades hidrográficas mediante la realización de sobrevuelos, revisiones documentales y la aplicación de técnicas relacionadas con el área de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La segunda, que se basó en la caracterización hidrometeorológica de las dos unidades, llevada a cabo a través de la ejecución de monitoreos periódicos y el análisis de sus registros. Y la tercera, que consistió en la evaluación de los impactos causados a los dos servicios, por medio de la aplicación de métodos e índices hidrológicos, el análisis y la discusión de los resultados. Como hipótesis, se espera que la unidad sometida a las transformaciones en el uso y la cobertura de los suelos, presente alteraciones significativas en el estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, en relación con el estado de los servicios de la unidad hidrográfica de control.

2. Justificación

El desarrollo de la justificación se llevó a cabo a partir de tres componentes: el normativo, que aborda políticas de gestión en distintos niveles espaciales; el académico, que se refiere a soportes científicos; y el social, que aborda las problemáticas colectivas que existen en el sitio de estudio.

2.1. Componente político, normativo e institucional

Los ecosistemas de montaña han sido focos de atención en políticas globales, regionales, nacionales y locales. El compromiso global hacia estos ecosistemas y el reconocimiento de su rol en el bienestar humano y el desarrollo sostenible, fueron declarados en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD) (ONU, 1992). Posteriormente, se enfatizó en la relevancia de estos ecosistemas en los acuerdos de la Conferencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible (Río+20) (ONU, 2012). En ambos casos, se definieron marcos, políticas y objetivos esenciales que se encuentran alineados con este estudio.

En CNUMAD, se hizo énfasis a la promoción del aprovechamiento integrado de las cuencas hidrográficas, estableciendo objetivos como: la realización de estudios acerca del uso de los recursos hídricos; la creación y mantenimiento de bases de datos que faciliten la evaluación ambiental; y la generación de conocimiento que permita el análisis de los riesgos relacionados con el aprovechamiento de las tierras. En el caso de Río+20, se dedicaron tres párrafos a los ecosistemas de montaña, los cuales se pueden sintetizar en que estos ecosistemas desempeñan un papel crucial en la provisión de recursos hídricos y son vulnerables al cambio climático y la degradación de los suelos. Debido a ello, en Río+20 se manifestó la necesidad de que los gobiernos hagan esfuerzos en la conservación de estos ecosistemas, adoptando políticas con enfoques holísticos, sostenibles y a largo plazo.

Continuando en el contexto global, es posible referirse a otros dos enfoques que han marcado hitos importantes en la conservación de los ecosistemas de montaña, los cuales corresponden a la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (ONU, 2002; 2015). Como en los casos anteriores, esta investigación está en consonancia con los principios y objetivos de ambos enfoques.

En el caso de la GIRH, el enfoque ha dispuesto objetivos que consisten en promover la gestión y el desarrollo coordinado del agua y las tierras asociadas al recurso, maximizar el bienestar social sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas, conservar la cantidad de agua de las cuencas y reducir su vulnerabilidad frente al cambio climático (Astorga, 2013; GWP, 2008). En cuanto a los ODS, la iniciativa que cuenta con 17 objetivos desglosados en 169 metas, está vinculada directamente con esta investigación a través del sexto objetivo que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua. Concretamente, se vincula por medio de la meta 6.4 que fomenta el uso eficiente de los recursos hídricos, la sostenibilidad de las extracciones y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez hídrica (ONU, 2017). De igual manera, este estudio también se relaciona indirectamente con el cumplimiento de otras metas asociadas al sexto y décimo quinto ODS (ONU, 2017).

Las estrategias enunciadas por los programas anteriores (CNUMAD, Río+20, GIRH y ODS), han sido adoptadas por iniciativas regionales y nacionales, a nivel de la cordillera de los Andes y la nación colombiana, respectivamente. En el caso regional de los Andes, el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN), ha liderado redes de investigación para la ejecución de proyectos de sostenibilidad relacionados con el agua y los suelos de páramo. Usando como insumo las experiencias recopiladas, CONDESAN publicó un libro de buenas prácticas para la gestión de los páramos (CONDESAN, 2012). El cual, se encuentra alineado con

algunas de las prácticas fomentadas en este estudio, como el monitoreo hidrometeorológico y el intercambio de saberes para la gestión de los territorios.

En cuanto a Colombia, se han planteado políticas y legislaciones con la finalidad de adaptar las iniciativas globales y regionales mencionadas. De las distintas propuestas desarrolladas en el país, las más relacionadas con el soporte de esta investigación, son: la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) (MinAmbiente, 2010); la Política para la Gestión Sostenible del Suelo (PGSS) (MinAmbiente, 2016); y las legislaciones que reconocieron a los páramos como objetos de protección especial y ecosistemas prioritarios de delimitación para su conservación (Congreso Nacional, 1993; 2010). En resumen, estas normativas tienen como objetivos la conservación de los páramos y sus procesos hidrológicos, y la promoción del uso sostenible de los suelos con el fin de preservar sus servicios ecosistémicos. En este sentido, los objetivos mencionados justifican el problema de investigación abordado en este estudio.

Con respecto al contexto local, la zona de páramo en la que se desarrolla este proyecto, fue declarada como Distrito de Manejo Integrado (DMI) por dos Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) (CDBM y CORPONOR, 2007). La declaración de esta figura de protección obedeció a la necesidad de reducir el deterioro del ecosistema e impulsar procesos de investigación como aporte para su conservación, restauración y uso sostenible (CDBM y CORPONOR, 2008).

En síntesis, esta investigación se encuentra justificada en las distintas estrategias y normativas planteadas a nivel global, regional, nacional y local. Las cuales, tienen como finalidad impulsar el conocimiento coordinado de los páramos, con el fin de promover el desarrollo sostenible y la conservación de sus bienes y servicios ecosistémicos, frente a presiones como el cambio climático y la transformación de las tierras.

2.2. Componente académico

En la revisión de literatura se identificaron premisas académicas que justifican este estudio, las cuales se pueden resumir en: el atendimento a un llamado de la comunidad científica, el aporte a vacíos de conocimiento específicos y la articulación de este proyecto con otras investigaciones que se han adelantado en la zona de estudio.

En primer lugar, varios investigadores que han estudiado los páramos andinos, han destacado la importancia de investigar urgentemente los impactos que las transformaciones en los suelos producen sobre su hidrología (Buytaert et al., 2006B; Harden, 2006). Las razones que plantean se basan en que estos ecosistemas tan escasos, soportan una cantidad importante de personas, flora y fauna, a través de servicios ecosistémicos como el abastecimiento y la regulación hídrica, los cuales, son impactados por alteraciones antrópicas en el uso y la cobertura de los suelos. Por ello múltiples investigadores han unido esfuerzos para conocer cómo estas actividades afectan el estado de estos dos servicios (p. ej., Buytaert et al., 2004; 2006A; Daza et al., 2014; Espinosa y Rivera, 2016; Hofstede, 1995).

Aunque la investigación ha aumentado en los últimos años, aún no existe un conocimiento completo del funcionamiento ecohidrológico de los páramos, sobre todo si se tiene en cuenta la variabilidad hidrometeorológica y física de estos ecosistemas (Cárdenas y Tobón, 2017). Esto repercute en que los resultados pueden depender en gran medida del sitio y no ser fácilmente extrapolables a otros lugares (Marín et al., 2019). La relevancia de estudiar estas cuestiones específicamente radica en evitar efectos como el desabastecimiento de las cuencas y el deterioro de las propiedades hidrofísicas de sus suelos, los cuales pueden traer otros problemas como conflictos por el agua, liberación de carbono, aumento en la erosión, deterioro de la calidad hídrica y pérdida en la adaptabilidad al cambio climático y la biodiversidad (Buytaert et al., 2006B).

En segundo lugar, este proyecto se justifica en el aporte a vacíos de conocimiento específicos. La revisión de literatura permitió identificar que, si bien se ha abordado la problemática de los impactos hidrológicos causados por alteraciones en los suelos, hay otros aspectos en los que no se ha profundizado tanto, como: el estudio de páramos que no son húmedos; la caracterización geomorfológica detallada de las cuencas; y la presencia de extracciones hídricas en las corrientes. Frente a lo mencionado, en esta investigación se estudia un ecosistema de páramo que es considerado seco, condición que solo representa al 6% de los páramos de Colombia (CDMB y CORPONOR, 2008; Díaz-Granados et al., 2005). De otro lado, en este estudio se realizan procesos de caracterización geomorfológica a niveles de detalle específicos, mediante el análisis de imágenes de alta resolución espacial. Además de ello, se analizaron las cantidades de agua que se extraen de las corrientes hídricas, a través de una metodología basada en monitoreos e indicadores.

En tercer lugar, este proyecto se justifica en la articulación que tiene con otros estudios que ha venido realizando el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), con el objetivo de estudiar de manera holística la zona de páramo que se aborda en esta investigación. Algunas de estas investigaciones corresponden a los estudios desarrollados en las siguientes áreas del saber: hidrogeología (Cetina, 2019); modelación y simulación hidrológica (Duarte, 2022); edafología (Patiño, 2020); y evapotranspiración (Gómez, 2022).

2.3. Componente social

El sitio de estudio de esta investigación, hace parte de un contexto social en el que se presentan confrontaciones entre sus habitantes y autoridades ambientales (Duarte-Abadía y Boelens, 2016). En particular, estas diferencias se han generado a causa de conflictos entre las normativas territoriales y los usos productivos de los suelos que allí coexisten (Avellaneda-Torres et al., 2015).

Por una parte, la zona de páramo en la que se encuentra el sitio de estudio es el sustento económico de múltiples familias que, llevan a cabo actividades productivas basadas en los cultivos de cebolla de rama y papa. Tal es la producción, que los municipios que más representan el DMI involucrado en esta investigación (Tona y Silos), generan en conjunto cerca de 57000 y 32000 toneladas por año de cebolla de rama y papa, respectivamente (MinAgricultura, 2017A; 2017B).

Por otra parte, este estudio se realiza en una pequeña porción del complejo de páramos conocido como Jurisdicciones Santurbán – Berlín (CJSB), el cual ha sido objeto de numerosas discusiones acerca de su demarcación, entre las cuales se puede destacar la derogación de una delimitación por no haber considerado la participación de las comunidades locales (Corte Constitucional, 2017). Esta es una problemática que a la fecha sigue sin definirse puesto que, aunque la última disposición habilitó lineamientos para el establecimiento de programas de reconversión y sustitución de actividades agrícolas de alto impacto (Díaz et al., 2020), aún no hay certeza de las áreas definitivas que harán parte de esta categoría (p. ej., WRadio, 2021).

Ante este contexto, este estudio hace parte de un proyecto de mayor jerarquía que involucra a los habitantes de la zona, a través de una metodología participativa (GPH et al., 2018). De esta manera, se generan espacios de intercambio de conocimiento que promueven el empoderamiento de la comunidad, para la participación en las decisiones que involucren la gestión de sus territorios.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar los efectos del cambio de uso de suelo y sus coberturas sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo mediante enfoque de cuencas pareadas.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar geomorfológicamente las unidades hidrográficas de estudio, sus coberturas y usos de suelo a partir de técnicas de mapeo y visitas de campo.
- Analizar el comportamiento de variables hidrometeorológicas que describen los componentes principales del ciclo del agua mediante la selección, diseño e instalación de sistemas de monitoreo.
- Estimar los impactos producidos por el cambio en el uso del suelo y sus coberturas sobre el rendimiento y la regulación hídrica.

4. Revisión bibliográfica

En esta sección se presenta inicialmente, el marco conceptual, el cual describe los conceptos, términos y enfoques que sustentan este estudio y, posteriormente, el estado del arte que caracteriza y discute las metodologías que se han aplicado para, el estudio de los impactos de la transformación de las tierras sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.

4.1. Marco conceptual

4.1.1. Páramos

Definir a los páramos es una tarea compleja, debido a la dificultad para estandarizar sus límites a causa de variaciones naturales o antrópicas, y a la existencia de distintas percepciones e intereses de los actores que se relacionan con estos ecosistemas (Reyes et al., 1995). Por ende los páramos pueden ser entendidos como ecosistemas, biomas, paisajes, áreas geográficas, zonas productivas, símbolos, hogares o estados del clima (Hofstede et al., 2003). Sin embargo, de manera estricta los ecosistemas paramunos se distribuyen en la Tierra bajo el cumplimiento de dos condiciones: latitudes pequeñas y altitudes grandes (Vásquez y Buitrago, 2011). En este sentido, es posible encontrarlos en la alta montaña tropical de América, Asia, África y Oceanía, sobre la franja que va desde los 8° sur hasta los 11° norte (Figura 1) (Luteyn, 1999).



Figura 1. Naciones con biomas paramunos. Adaptado de Hofstede et al. (2003).

A pesar de que los ecosistemas paramunos se presentan en varios continentes, rigurosamente los páramos son exclusivos de Sur y Centro América (Figura 2), lugar donde estos ecosistemas poseen la mayor extensión del planeta (Lauer, 1981). Específicamente, los páramos se encuentran sobre la Cordillera de los Andes, formando un corredor que va desde la Cordillera de Mérida hasta la depresión de Huancabamba, incluyendo países como Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú (Llambí et al., 2012). Aparte de la Cordillera de los Andes, los páramos se encuentran en tres complejos aislados en la Sierra Nevada de Santa Marta, Panamá y Costa Rica (Cortés-Duque y Sarmiento, 2013).

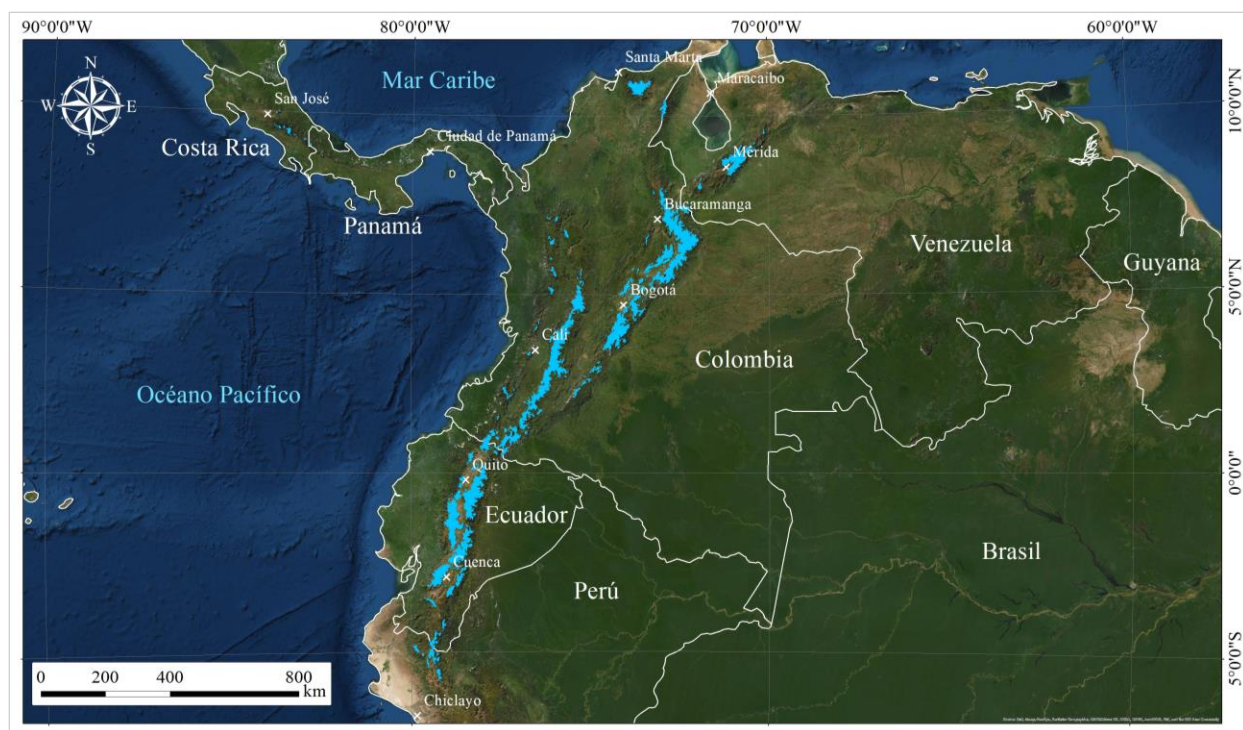


Figura 2. Localización geográfica de los páramos. Adaptado de Hofstede et al. (2003).

Los páramos se ubican entre el límite forestal (3000 – 3800 m s. n. m.) y la línea de nieves perpetuas (4400 – 4800 m s. n. m.) (Hofstede, 1995). Estos ecosistemas han sido tradicionalmente zonificados en tres franjas altitudinales, conocidas como: subpáramo, páramo y superpáramo (Morales et al., 2007). En Colombia, Cuatrecasas (1958) y Rangel (2000) enunciaron que: el subpáramo, está conformado por matorrales y vegetación arbustiva con la posible presencia de zonas de ecotonía; en el páramo, aunque se encuentran casi todos los tipos de vegetación, predominan las gramíneas, los frailejonales, los pajonales y los chuscales; mientras que, en el superpáramo la cobertura y la diversidad vegetal disminuyen grandemente, siendo común encontrar prados y suelos desnudos. En general, el subpáramo puede localizarse de 3200 a 3500 m s. n. m., el páramo de 3500 a 4100 m s. n. m., y el superpáramo desde los 4100 m s. n. m. hasta el límite nival (Rangel, 2000). A pesar de ello, las condiciones bióticas y abióticas pueden dinamizar los límites de las franjas. Sarmiento y León (2015) destacaron a la latitud, la topografía, los suelos, el efecto antrópico, el clima y la competencia intra e interespecífica como los motivos.

Los páramos constituyen barreras geográficas que modifican las condiciones climáticas mediante la interacción topográfica con las masas de viento (p. ej., barlovento y sotavento), propiciando así, ambientes húmedos o secos mediante la precipitación (IAvH, 2010). En este sentido, los páramos pueden definirse en siete categorías según lo sugerido por Rangel (2000), quién recopiló valores de precipitación en 74 estaciones de diferentes complejos de páramo. Según los valores de precipitación media anual, los páramos pueden ser catalogados como: (i) secos (entre 623.5 y 1196.5 mm); (ii) semihúmedos (entre 1197 y 1770 mm); (iii) húmedos (entre 1771 y 2344 mm); (iv) muy húmedos (entre 2345 y 2918 mm); (v) superhúmedos (entre 2919 y 3492 mm); (vi) superhúmedos-pluviales (entre 3493 y 4066 mm); y (vii) pluviales (mayor de 4061 mm). Sin embargo, en algunos lugares pueden darse precipitaciones distintas a las que caracterizan la región, puesto que la variabilidad de las lluvias en estos ecosistemas es alta (Buytaert et al., 2006C).

4.1.2. Unidad hidrográfica

Los fenómenos hidrológicos suelen estudiarse a través de los conceptos de sistema y volumen de control. De esta manera, un sistema hidrológico puede ser entendido como un volumen limitado por una frontera, al cual ingresan ciertas cantidades de agua que son procesadas internamente y luego expulsadas en otras proporciones (Figura 3) (Chow et al., 1994). Bajo este enfoque surge el concepto de unidad o cuenca hidrográfica, que corresponde a una superficie topográfica en la que idealmente la lluvia que se precipita es conducida hacia un mismo punto de salida (Aparicio, 2005).

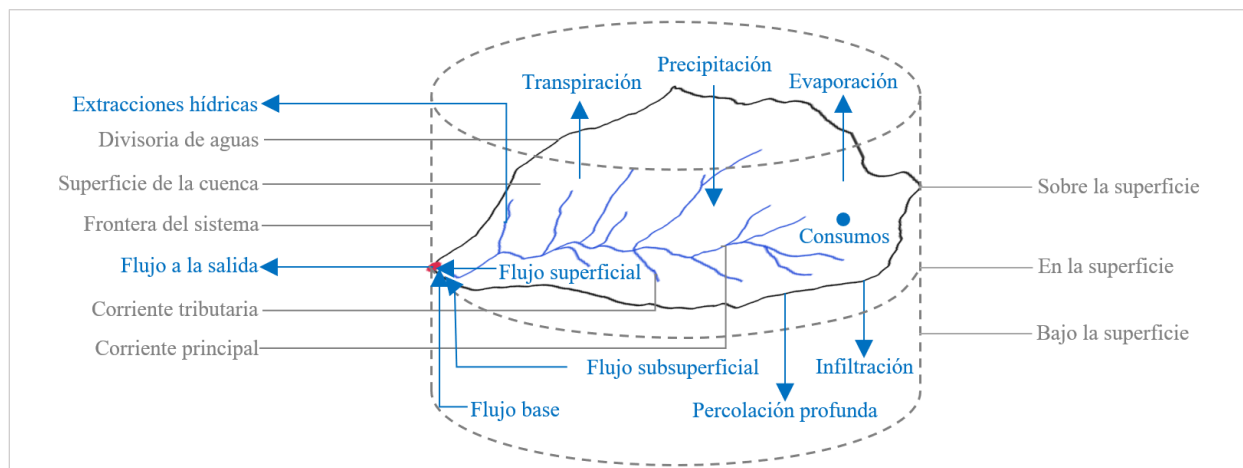


Figura 3. La unidad hidrográfica como un sistema hidrológico. Adaptado de Chow et al. (1994).

Las unidades están separadas entre sí por divisorias, las cuales son líneas imaginarias trazadas bajo ciertos criterios. En este aspecto se debe diferenciar el concepto de unidad hidrográfica del de unidad subterránea, ya que la primera es superficial y está limitada por una divisoria topográfica, mientras que la otra, es la responsable del caudal base y está acotada por una divisoria subyacente que depende del nivel freático y la geología de la zona (Figura 4) (Monsalve, 2008).

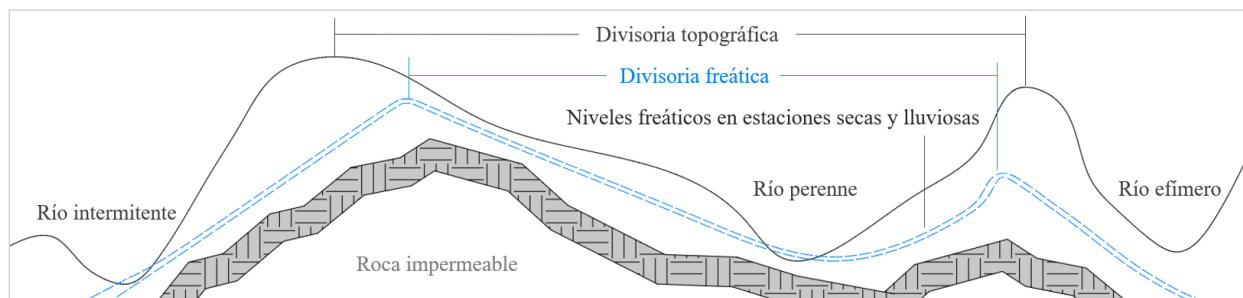


Figura 4. Tipos de divisorias. Adaptado de Monsalve (2008).

La ramificación de los sistemas de drenaje hace que unidades hidrográficas más grandes sean abastecidas por unidades más pequeñas. En consecuencia, las unidades son clasificadas de manera decreciente en cuencas, subcuencas, microcuencas y quebradas (Ordoñez, 2011). En la revisión de literatura se encontró que no existe consenso acerca de las áreas para clasificar a las unidades según su extensión, aunque uno de los criterios más aplicados sugiere tamaños de: cuencas, entre 60000 y 300000 ha; subcuencas, entre 10000 y 60000 ha; y microcuencas para áreas menores a 10000 ha (Verdugo, 2017). Sin embargo, con la finalidad de no involucrar el debate citado, en este documento se usan los términos genéricos de unidad hidrográfica o en su defecto unidad.

Según su red de drenaje y punto de desfogue, las unidades hidrográficas pueden ser clasificadas en cuatro categorías como se ilustra en la Figura 5. En este sentido, las unidades pueden ser: arréicas, cuando no drenan a ríos, mares o lagos y sus aguas se pierden por evaporación e infiltración; exorréicas, si sus vertientes escurren a sistemas mayores como ríos y mares; criptorréicas, cuando sus corrientes fluyen como ríos subterráneos; o endorréicas, si sus flujos drenan a embalses o lagos (WV, 2004).

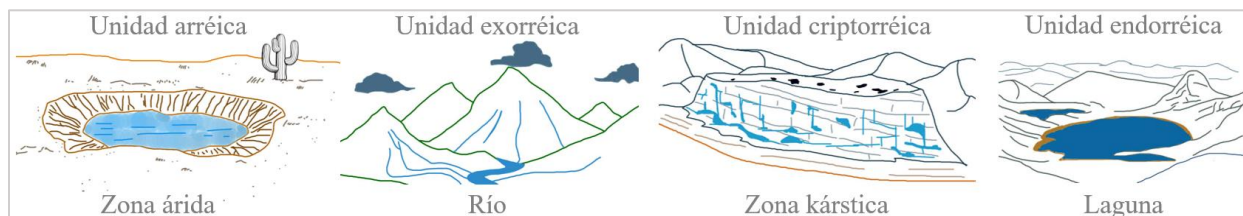


Figura 5. Tipos de unidades hidrográficas según su conducción final.

Otra manera de caracterizar las unidades hidrográficas es a través de parámetros geomorfológicos como el área, la forma, el relieve, la red de canales, las coberturas, los usos del suelo y las características edáficas y geológicas (Posada, 1994). El estudio de los aspectos anteriores permite inferir patrones acerca de la respuesta hidrológica de las unidades, pues estos factores inciden en los componentes del ciclo hidrológico y en la manera en que las unidades gestionan los flujos de entrada, sus procesamientos internos y salidas (Aparicio, 2005).

Finalmente, en la definición del concepto de unidad hidrográfica también es relevante resaltar el componente socioeconómico, puesto que casi toda la población mundial habita estos sistemas hidrológicos y los transforma según sus dinámicas poblacionales, sistemas de vida, intereses, normas y políticas (FAO, 2007). Tal es la relación entre los seres humanos y las unidades, que la GIRH resalta la importancia de procesos coordinados que involucren el agua, la tierra y sus recursos para optimizar el bienestar de las comunidades sin arriesgar los ecosistemas (GWP, 2009).

4.1.3. Servicios ecosistémicos hidrológicos

Los servicios ecosistémicos hidrológicos pertenecen a un marco superior conocido como servicios ecosistémicos, el cual fue inicialmente esbozado bajo el concepto de servicios de la naturaleza por Westman (1977), con el fin de tasar monetariamente los servicios para tomar decisiones óptimas, informadas y equitativas. Desde su concepción, los servicios ecosistémicos han sido objeto de múltiples discusiones y definiciones (Bekessy et al., 2018; Danley y Widmark, 2016); a pesar de ello, el marco de referencia más aceptado ha sido el planteado por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA) (Camacho y Ruiz, 2012).

En relación con lo planteado, la MEA (2003) los definió como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y, los clasificó en las cuatro categorías siguientes: (i) servicios de soporte, como los servicios que sustentan a los otros servicios ecosistémicos (p. ej., la formación de suelo y el ciclo de nutrientes); (ii) servicios de aprovisionamiento, como los beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas (p. ej., los alimentos y el agua); (iii) servicios de regulación, como los servicios que mantienen las condiciones de vida adecuadas para el bienestar humano (p. ej., la regulación del agua y el clima); y (iv) servicios culturales, como los responsables de beneficios inmateriales (p. ej., la recreación y el ecoturismo).

Debido a la relevancia que tiene el agua dulce en el bienestar de las personas y al riesgo que presenta ante diferentes proyectos e intervenciones, del enfoque de los servicios ecosistémicos emergió el marco denominado servicios ecosistémicos hidrológicos, como una estrategia especial dedicada a la valoración y gestión sostenible de este recurso (Harrison-Atlas et al., 2016). En este

contexto, Brauman et al. (2007) definieron a los servicios ecosistémicos hidrológicos como los beneficios que la población recibe de la interacción de los ecosistemas terrestres con el agua dulce.

Algunos ejemplos de servicios ecosistémicos hidrológicos corresponden a: suministro de agua, regulación hídrica, recarga de acuíferos, estabilización de laderas, recreación en ríos y regulación de la calidad hídrica (Mokondoko et al., 2018). En cuanto a los servicios mencionados, no todos son producidos por un ecosistema en particular, por el contrario, la prestación de los servicios varía en función de las características de cada uno. Como ejemplo es posible destacar a los páramos, pues estos ecosistemas a través de sus condiciones físicas y biológicas (Figura 6), son capaces de proveer dos servicios ecosistémicos hidrológicos esenciales para la vida, como lo son: la regulación y el abastecimiento hídrico.

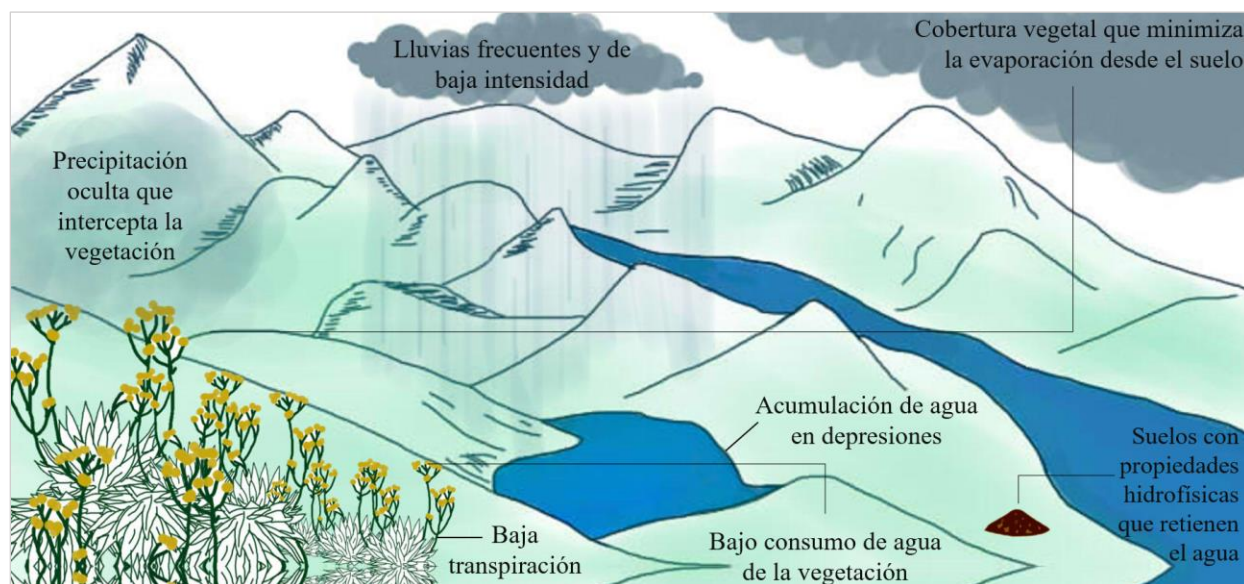


Figura 6. Factores que promueven el abastecimiento y la regulación hídrica en los páramos. Adaptado de Vásquez y Buitrago (2011).

4.1.3.1. Regulación hídrica

La regulación hídrica es un servicio ecosistémico hidrológico que hace referencia a la capacidad de los ecosistemas de almacenar agua y liberarla controladamente, de acuerdo a las temporadas de lluvia y sequía, respectivamente (Nieto et al., 2015). En otras palabras, este servicio consiste en la atenuación de las variaciones del caudal que puede descargar una unidad hidrográfica, como resultado del almacenamiento hídrico en sus reservorios naturales (OMM, 2012).

En términos específicos, una unidad hidrográfica con una baja capacidad de regulación se caracteriza por responder ante eventos de precipitación en tiempos menores, con caudales pico de magnitudes mayores, hidrogramas de crecidas más esbeltos y recesiones más inclinadas que promueven caudales de estiaje más bajos, en comparación con una unidad hidrográfica con un mejor nivel de regulación (Ochoa-Tocachi et al., 2016A).

4.1.3.2. Abastecimiento hídrico

El abastecimiento hídrico es un servicio ecosistémico hidrológico que se refiere a la cantidad de agua que libera una unidad hidrográfica en un período determinado, para el uso en actividades antrópicas y el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos (IDEAM, 2015; OMM, 2012). En este orden de ideas, este servicio ha sido abordado por medio del volumen de agua normalizado por el

área, que descarga en promedio anualmente una unidad hidrográfica en su punto de desfogue (Ochoa-Tocachi et al., 2016B).

En una misma unidad hidrográfica el servicio de abastecimiento está fuertemente vinculado al servicio de regulación. Un ejemplo de ello es que, si se establecen amplias áreas de bosque en una unidad en la que antes sus coberturas consumían cantidades bajas de agua, se estaría privilegiando a la regulación hídrica, pero también se generarían declives en el caudal a la salida, lo cual podría resultar en una menor capacidad de la unidad para prestar el servicio de abastecimiento (Best et al., 2003; Ochoa-Tocachi et al., 2016A). Ejemplos como el anterior, resaltan la importancia de abordar las problemáticas desde una visión sistémica, en la cual los servicios no se comportan de manera aislada, sino que interactúan permanentemente a través de relaciones positivas y negativas de retroalimentación (Nieto et al., 2015).

4.1.4. Cambios de uso de suelo y cobertura

El interés por la transformación de la superficie terrestre surgió a causa de temas como el cambio climático, el crecimiento poblacional y la escasez de energía, pues estas problemáticas generaron múltiples investigaciones acerca del impacto de los cambios medioambientales, siendo el análisis de los cambios en los usos y las coberturas de los suelos, un área indispensable en todos los estudios (Liu y Deng, 2010).

Los términos cobertura y uso del suelo son frecuentemente utilizados de manera indiscriminada a pesar de que cada uno posee una definición distinta. En este sentido, la cobertura del suelo se refiere explícitamente al tipo de revestimiento físico (p. ej., áreas de bosque), mientras que el uso del suelo hace referencia a la actividad que los humanos realizan en dicha porción de tierra (p. ej., pastoreo intensivo) (Kundu et al., 2017). Según la definición anterior, existen cuatro posibilidades de transformación de los suelos, las cuales consisten en: (i) cambio de cobertura y permanencia de uso; (ii) cambio de uso y permanencia de cobertura; (iii) cambio de uso y cobertura; y (iv) permanencia de uso y cobertura.

En términos metodológicos, la cobertura del suelo y sus cambios suele estudiarse a través de datos de detección remota, como el uso de imágenes satelitales y ortomosaicos, mientras que la información acerca del uso del suelo comúnmente se obtiene mediante visitas de campo que involucran censos agrícolas y estrategias de trabajo social (Lambin et al., 2006). En lo posible, ambas metodologías deben aplicarse en conjunto para analizar el fenómeno de la transformación de las tierras desde una perspectiva integral.

Con respecto a la transformación de los usos y las coberturas de los suelos de páramo, como se ha mencionado anteriormente en la introducción y justificación de este documento, esta es una problemática que es frecuente en estos ecosistemas y debe evaluarse con urgencia, debido a los impactos negativos que produce sobre los servicios hidrológicos de abastecimiento y regulación hídrica, entre otros (Buytaert et al., 2006B).

4.1.5. Enfoque de cuencas pareadas para el análisis hidrológico de los cambios en los suelos

Las cuencas pareadas constituyen una de varias metodologías englobadas en un enfoque superior, denominado cuencas experimentales. El enfoque de cuencas experimentales es un conjunto de técnicas hidrológicas que consiste en la selección estratégica de una o más unidades hidrográficas, con la finalidad de estudiar los efectos que se producirían en estas, si se modificaran algunas de sus características (Toebe y Ouryvaev, 1970). Existen cuatro tipos de experimentos en este enfoque, que se conocen como: estudios de correlación; análisis de cuencas individuales; pruebas en pares de cuencas anidadas; y estudios de cuencas pareadas (Hewlett y Pienaar, 1973).

Los experimentos de cuencas pareadas involucran el análisis de dos unidades hidrográficas adyacentes, con características similares en términos de pendiente, aspecto, área, suelos, precipitación y vegetación (Best et al., 2003). Este enfoque no realiza comparaciones a partir de registros de monitoreos hidrológicos existentes, sino que considera el diseño completo del experimento bajo condiciones controladas antes y después del tratamiento. Concretamente, el experimento inicia con un período de calibración en el cual las dos unidades permanecen intactas, posteriormente, se aplica un tratamiento que consiste en cambiar una característica específica (p. ej., la cobertura) en una de las dos unidades, mientras que la unidad restante se preserva como unidad de control, esto con la finalidad de calcular el efecto hidrológico producido por el tratamiento (Zégre et al., 2010). La Figura 7 ilustra los detalles del enfoque de cuencas pareadas.

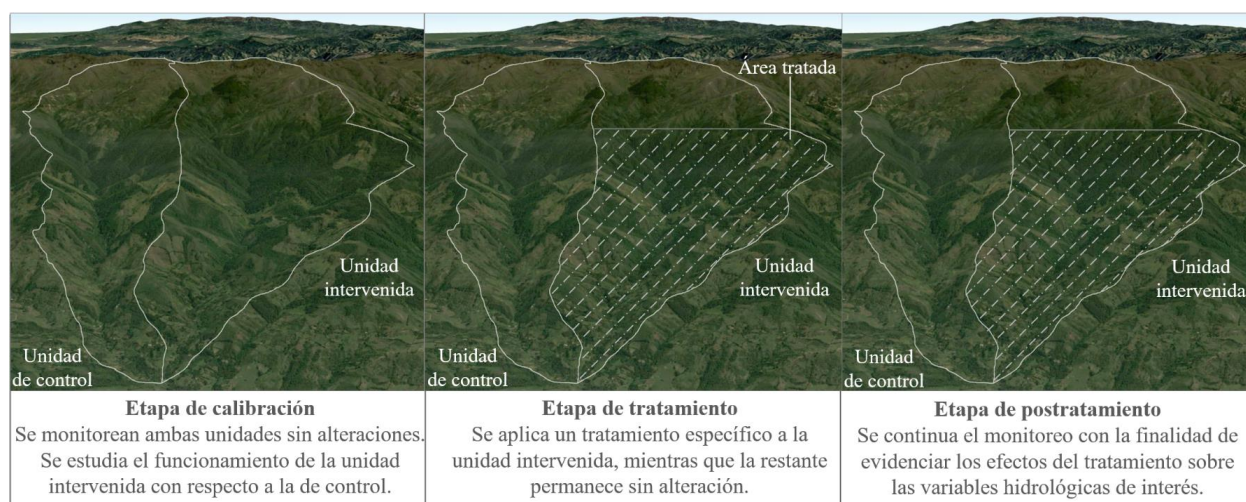


Figura 7. Experimento de cuencas pareadas. Adaptado de Hewlett y Pienaar (1973) usando un modelo de elevación de Google Earth Pro®.

El enfoque de cuencas pareadas es considerado un enfoque que produce evidencia sólida, ya que involucra la variabilidad climática en el análisis, lo cual permite separar los impactos producidos por el cambio de interés de los efectos generados por el clima (Bosch y Hewlett, 1982). Otra ventaja de este enfoque es la versatilidad para evaluar los impactos producidos por una amplia gama de alteraciones. Aunque inicialmente los experimentos en cuencas evaluaban los cambios en el rendimiento hídrico, posteriormente el enfoque empezó a examinar procesos físicos, químicos y biológicos acerca del ciclo de nutrientes y la calidad del agua (Neary, 2016). En este sentido, algunos de los impactos más estudiados corresponden a cambios como: forestación, deforestación, rebrote, conversión forestal, infestación de insectos, incendios y urbanización (Bonneau et al., 2018; Brown et al., 2005; Buytaert et al., 2007; Liu et al., 2004; Watson et al., 2001).

En cuanto a la metodología matemática aplicada, el método más común ha sido usar regresiones lineales entre las descargas anuales de las dos unidades en el período de calibración, con el objetivo de predecir el comportamiento de la unidad tratada en la etapa de postratamiento (Brown et al., 2005). De esta manera, es posible evaluar el efecto del tratamiento mediante la diferencia entre los valores observados y predichos.

Generalmente se reconoce el enfoque de cuencas pareadas como se describió anteriormente; sin embargo, la literatura académica evidencia la existencia de una adaptación conocida como *trading space for time*, o bajo la misma denominación de cuencas pareadas. Este enfoque es usado principalmente en contextos donde se necesita avanzar rápidamente en el conocimiento y la gestión

de los territorios, razón por la cual, no se realiza una etapa de pretratamiento en la que ambas unidades estén sometidas a las mismas condiciones naturales (Ochoa-Tocachi et al., 2016B). Otro motivo por el que no se incluye la etapa de pretratamiento, es que en algunos sitios de estudio (p. ej., los páramos), la obtención de permisos para afectar áreas es muy restringida, pues pertenecen a ecosistemas protegidos que sostienen servicios fundamentales para las personas; por lo cual, es más viable aplicar un enfoque en el cual se estudien afectaciones que ya existen en el territorio.

Otra característica que diferencia a este enfoque de la metodología original de cuencas pareadas, es que al no considerar período de pretratamiento no es posible aplicar regresiones matemáticas que sean comparables con regresiones de la etapa de postratamiento, en vez de ello, los autores suelen usar principalmente índices hidrológicos (Buytaert et al., 2004; Espinosa y Rivera, 2016; Ochoa-Tocachi et al., 2016A; 2016B). Por lo demás, este enfoque adaptado preserva las otras características de la metodología original de cuencas pareadas; es decir, la selección de dos unidades semejantes en términos de área, altitud, topografía, forma, suelos, localización y clima, manteniendo la diferencia en la alteración que se quiere evaluar.

4.1.6. Índices hidrológicos para evaluar los servicios de abastecimiento y regulación hídrica

Existe una gran cantidad de evidencia que soporta la premisa de que los seres humanos generan alteraciones a escalas locales, regionales y globales sobre el ciclo hidrológico, mediante la presencia de actividades asociadas a la gestión de los territorios, como los procesos de urbanización, agricultura y pastoreo (Rost et al., 2008; Vörösmarty y Sahagian, 2000). Debido a la problemática anterior, Richter et al. (1996) propusieron un método denominado indicadores de alteración hidrológica, como una estrategia para cuantificar los cambios inducidos por el hombre sobre los recursos hídricos, con la finalidad de soportar planes de manejo que puedan preservar y restaurar los ecosistemas.

Desde la proposición de los indicadores, el estudio del régimen hidrológico de las corrientes se ha abordado a través de cinco componentes ampliamente aceptados, denominados: (i) magnitud; (ii) frecuencia; (iii) duración; (iv) *timing*; y (v) tasa de cambio en eventos de flujo (Ochoa-Tocachi et al., 2016B). El vínculo entre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, con el enfoque de los indicadores hidrológicos se ha dado a través de las cinco categorías planteadas. La razón consiste en que los indicadores que cada categoría contiene, estudian comportamientos específicos de los hidrogramas, tales como: el coeficiente de rendimiento hídrico, la magnitud y la duración de las crecidas, los cuales están muy vinculados a los servicios de abastecimiento y regulación.

En el caso de los páramos, investigaciones como las realizadas por: Buytaert et al. (2004); Cárdenas y Tobón (2017); Espinosa y Rivera (2016); Lazo et al. (2019); y Ochoa-Tocachi et al. (2016A) y (2016B), han sido los estudios más relevantes que han usado el enfoque de los indicadores, como evaluadores del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.

En relación con la metodología necesaria para usar el enfoque de los indicadores, esta consiste en primero seleccionar los índices que se ajustan a las condiciones particulares de los objetivos de estudio, teniendo en cuenta evitar la elección de indicadores redundantes (Olden y Poff, 2003). Posteriormente, se deben calcular los índices seleccionados a partir del uso de registros hidrometeorológicos, para así finalmente, discutir los impactos hallados sobre los servicios involucrados en el análisis (Ochoa-Tocachi et al., 2016B).

4.2. Estado del arte

Este apartado consiste en la revisión analítica del conocimiento acumulado sobre los impactos producidos por el cambio de uso de suelo y cobertura, sobre los servicios de abastecimiento y

regulación hídrica en páramos. Inicialmente, se presenta la metodología sistemática usada para la búsqueda, clasificación, caracterización y gestión de los documentos recopilados. Posteriormente, se abordan los enfoques metodológicos utilizados por otras investigaciones para dar respuesta a la problemática de interés, además de sus resultados y conclusiones principales.

4.2.1. Metodología sistemática

Debido a la existencia de numerosas investigaciones disponibles en bases de datos académicas, para la elaboración del estado del arte se aplicó una metodología conocida como revisión sistemática de literatura. Esta metodología consiste en una inspección exhaustiva que se realiza de manera metódica, de acuerdo con un protocolo preestablecido que busca minimizar el sesgo y sintetizar la información recopilada (Hanley y Cutts, 2013).

En función de lo anterior, para la aplicación del enfoque sistemático se siguieron las etapas sugeridas por Pati y Lorusso (2018), Harris et al. (2014) y Piper (2013), las cuales de manera general consistieron en: (i) identificar la pregunta central de la investigación; (ii) definir criterios de inclusión y exclusión; (iii) realizar búsquedas en bases de datos bibliográficas; (iv) caracterizar los documentos encontrados; (v) descartar artículos por títulos y resúmenes; (vi) revisar y ponderar los documentos preservados; y (vii) discutir la información publicada en los estudios compilados.

Como resultado de la aplicación del procedimiento descrito, se consolidó un conjunto de 51 documentos que abordaron la temática de investigación; es decir, la de los efectos de los cambios del uso del suelo y sus coberturas, sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica en unidades hidrográficas de páramo. Otros detalles más específicos de la aplicación del enfoque sistemático y sus resultados pueden ser revisados al final de este documento (Apéndice A).

4.2.2. Métricas generales

Tras la aplicación de la metodología sistemática, se caracterizaron los 51 documentos mediante procedimientos estadísticos básicos. En este sentido, se presenta la descripción de la muestra en términos de: cantidad de publicaciones en el tiempo, tipos de publicación, revistas más distintivas, autores comunes y países en los que se llevaron a cabo las investigaciones (Figuras 8 y 9).

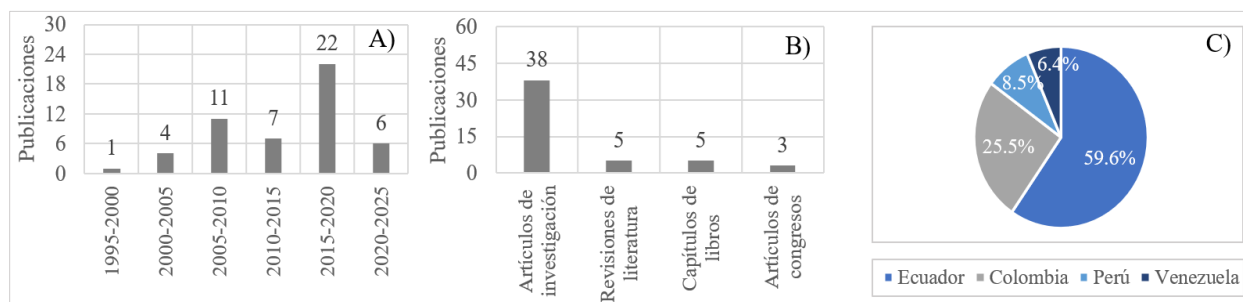


Figura 8. Análisis general de la muestra. A) Publicaciones en el tiempo. B) Investigaciones según el tipo de documento. C) Sitios de estudio reportados.

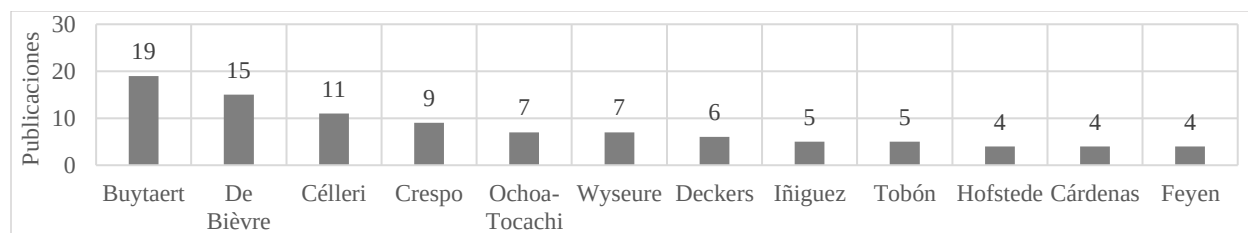


Figura 9. Participación de autores en las publicaciones revisadas.

En general, de las figuras anteriores se lograron inferir patrones y comportamientos interesantes. En primer lugar, se visualizó la tendencia al crecimiento que ha tenido la temática del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, frente a las transformaciones de los suelos de páramo. En segundo lugar, se evidenció que la mayoría de las publicaciones recopiladas correspondieron a artículos de investigación, los cuales adelantaron sus estudios principalmente en países como Ecuador y Colombia. Finalmente, al revisar las revistas académicas en las que más se ha escrito acerca de la temática, se encontró que las más representativas han sido *Hydrological Processes* y *Journal of Hydrology*.

4.2.3. Enfoques para la evaluación de los efectos de los cambios de uso de suelo y cobertura, sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por ecosistemas de páramo

En esta sección, se presenta una síntesis objetiva de los marcos de referencia y enfoques metodológicos identificados en la revisión sistemática. Estos marcos y enfoques se organizaron en niveles que van de lo general a lo particular, como se presenta en el diagrama de la Figura 10.



Figura 10. Marcos de referencia y enfoques metodológicos inherentes al tema de investigación.

En general, se identificaron tres marcos de referencia globales que representan los orígenes de la temática involucrada en esta investigación. La problemática surgió del estudio de la relación que existe entre las personas y los ecosistemas, cuestión que luego fue abordada a través del paradigma de conservación denominado: personas y naturaleza. El cual, consiste en la visión de la relación como un vínculo multidimensional e interdisciplinario, que involucra conceptos clave como resiliencia, cambio ambiental, sistemas socioecológicos y ciclos de realimentación (Mace, 2014). Bajo este enfoque, se consolidó el marco de referencia que fundamenta a esta investigación, conocido como servicios ecosistémicos. En la actualidad este marco es ampliamente aceptado, ya que se ha afianzado como una estrategia clave para la gestión de los sistemas socioecológicos y el bienestar humano (Agarwala et al., 2014; Caro-Caro y Torres-Mora, 2015).

Dentro del marco de los servicios ecosistémicos, se encontró otro más específico que corresponde a los servicios ecosistémicos hidrológicos, del cual hacen parte los dos servicios estudiados en este documento; es decir, el abastecimiento y la regulación hídrica (definidos en los numerales 4.1.3.1 y 4.1.3.2). Con respecto a estos dos servicios, la revisión de literatura evidenció que se encuentran fuertemente vinculados a los páramos, y que son impactados por la dinámica de transformación de tierras que estos ecosistemas presentan.

Debido a la problemática anterior, surgieron enfoques metodológicos concretos para la evaluación de los efectos que los cambios en el uso del suelo y sus coberturas, generan sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica en unidades hidrográficas de páramo. En este

contexto, se identificaron los cinco enfoques siguientes: (i) cuencas experimentales; (ii) evaluación de las propiedades de los suelos; (iii) modelamiento y simulación hidrológica; (iv) estudios biológicos; y (v) técnicas de trabajo social. Con respecto a los documentos recopilados, en la revisión de literatura se encontró que la mayoría de los estudios se concentraron en los enfoques de cuencas experimentales (39.2%) y estudios de las propiedades de los suelos (43.1%). En cuanto a los enfoques restantes, se evidenció una menor cantidad de investigaciones en cada uno (5.9%).

Aunque en la Figura 10, se presentaron los cinco enfoques metodológicos como conjuntos independientes, el análisis documental permitió identificar que existe una tendencia que apunta a desarrollar investigaciones interdisciplinarias, en las cuales los diferentes enfoques se realimenten positivamente. Uno de los ejemplos identificados de este tipo de aplicaciones, corresponde al trabajo realizado por Lazo et al. (2019), quienes discutieron la pregunta de cómo la vegetación, los suelos y las variables hidrometeorológicas influyen en el almacenamiento pasivo y dinámico de una unidad hidrográfica de páramo. En otro caso, Cárdenas y Tobón (2017) a través de análisis hidrometeorológicos y estudios de las propiedades hidrofísicas de los suelos, discutieron el rendimiento y la regulación hídrica con el fin de comprender el funcionamiento y la capacidad de recuperación de los páramos, luego de intervenciones antrópicas. Los documentos publicados por Ochoa-Tocachi et al. (2018) y Nieto et al. (2015), constituyen otros ejemplos de aplicaciones colaborativas de los enfoques. En los dos casos, se trató la problemática del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ante actividades productivas, mediante el uso de estrategias hidrológicas y sociales. En este mismo contexto, otras aplicaciones interdisciplinarias se han llevado a cabo en diferentes estudios (Montenegro-Díaz et al., 2019; Thompson et al., 2021).

4.2.3.1. Enfoque de cuencas experimentales

En cuanto al enfoque de cuencas experimentales, en el cual se clasifica esta investigación, se identificó que la mayoría de los estudios aplicaron una versión metodológica adaptada del concepto de cuencas pareadas. La versión es conocida como un enfoque que intercambia tiempo por espacio, denominada en inglés como *trading space for time* (definida en el numeral 4.1.5). En la lectura de los documentos se detectó que, en términos generales el enfoque consiste en el monitoreo hidrometeorológico de dos o más unidades hidrográficas, preferiblemente pequeñas y prácticamente iguales en términos de clima, parámetros morfológicos, suelos y características geológicas, con la condición de que al menos una de las unidades difiera en el fenómeno que se desea evaluar. Buytaert et al. (2007), Crespo et al. (2014), Ochoa-Tocachi et al. (2016A) y (2016B), adelantaron algunas de las investigaciones más representativas de este enfoque.

Según la revisión detallada de los documentos que representan el enfoque adaptado de cuencas pareadas, se logró identificar que la aplicación de esta metodología se puede dividir en tres etapas, las cuales corresponden a: (i) caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas; (ii) caracterización hidrometeorológica; y (iii) evaluación de los impactos hidrológicos. En este orden de ideas, los resultados específicos de la revisión de literatura con respecto a las tres etapas, se abordan de manera detallada en los tres numerales siguientes.

4.2.3.1.1. Etapa de caracterización geomorfológica

La primera etapa se basa en la caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas, que se desarrolla mediante revisiones documentales y el uso de programas informáticos para la gestión de SIG. De la revisión de los documentos que reportaron información al respecto, se detectó que los insumos que soportaron la caracterización de las unidades correspondieron a: investigaciones afines llevadas a cabo en las unidades; mapas institucionales de curvas de nivel de resoluciones

verticales de 40 y 20 m; y Modelos Digitales de Elevación (MDE) de origen satelital de 5 m de resolución espacial (p. ej., Buytaert et al., 2007; Guzmán et al., 2015; Ochoa-Tocachi et al., 2016B).

En general, a partir del procesamiento de los insumos mencionados, se evidenció que las investigaciones que aplicaron el enfoque adaptado de cuencas pareadas caracterizaron las unidades hidrográficas en términos de su localización, elevación, área, forma, pendiente, tipo de suelo, geología, uso y cobertura, tal como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Síntesis de la caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas.

Ud.	País	Alt.	Área	Forma	Pend.	Suelos	Usos del suelo	Coberturas del suelo	Geología	Ref.
	N/A	m s. n. m.	ha	N/A	N/A o %	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
LLO 01	E	3825 4700	179	OA	MI	Andosol	Pastoreo extensivo Quema	Pajonal (90%) Arbustos (10%)	N/R	1
LLO 02	E	4088 4680	221	OA	I	Andosol Histosol	Pastoreo extensivo Bosque nativo	Pajonal (70%) Bosque nativo (10%) Humedal (20%)	N/R	1
JTU 01	E	4075 4225	65	O	I	Andosol	Pastoreo intensivo	Pajonal (100%)	N/R	1
JTU 02	E	4085 4322	242	O	I	Andosol	Pastoreo intensivo	Pajonal (100%)	N/R	1
JTU 03	E	4144 4500	225	CO	I	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (80%) Arbustos (20%)	N/R	1
JTU 04	E	3990 4530	1605	OA	I	Andosol Histosol	Pastoreo intensivo Natural Restauración	Pajonal (70%) Arbustos (10%) Humedal (05%) Suelo desnudo (15%)	N/R	1
PAU 01	E	3665 4100	263	CO	I	Andosol	Natural	Pajonal (100%)	Volcanoclástica, andesítica y glaciar.	1,2,3,4 y 5
PAU 02	E	2970 3810	100	O	MI	Andosol Histosol	Natural Pastoreo extensivo	Pajonal (80%) Bosque nativo (20%)	Volcanoclástica, andesítica y glaciar.	1,4 y 5
PAU 03	E	3245 3680	59	CO	MI	Andosol Histosol	Bosque de pinos	Pajonal (10%) Bosque de pinos (90%)	Volcanoclástica, andesítica y glaciar.	1,4 y 5
PAU 04	E	3560 3721	155	CO	I	Andosol	Pastoreo intensivo Cultivos	Pajonal (70%) Cultivos de papa (30%)	Volcanoclástica, andesítica y glaciar.	1,2,3,4 y 5
PIU 01	P	3112 3900	660	CO	I	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (75%) Bosque nativo (15%) Laguna (10%)	N/R	1
PIU 02	P	3245 3610	95	CO	MI	Andosol Histosol	Pastoreo intensivo	Pajonal (75%) Suelo desnudo (15%) Laguna (10%)	N/R	1
PIU 03	P	3425 3860	131	CO	MI	Andosol Histosol	Pastoreo intensivo	Pajonal (90%) Laguna (10%)	N/R	1
QUI 01	E	3590 3880	501	OA	22	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (78%) Arbustos (02%) Almohadillas (20%)	Rocas volcánicas y volcanoclásticas	4
CAL 01	E	3585 3870	439	CO	19	Andosol Histosol	Pastoreo extensivo	Pajonal (69%) Arbustos (20%) Almohadillas (11%)	Rocas volcánicas y volcanoclásticas	4
ZHU 01	E	3900 4000*	20	OA*	14	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (85%) Almohadillas (15%)	Rocas volcánicas glaciares.	6
ZHU 02	E	3900 4000*	38	CO*	24	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (87%) Almohadillas (13%)	Rocas volcánicas glaciares.	6
ZHU 03	E	3825 3950*	38	OA*	19	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (78%) Almohadillas (18%) Arbustos (04%)	Rocas volcánicas glaciares.	6
ZHU 04	E	3825 3950*	65	O*	18	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (79%) Almohadillas (18%) Arbustos (03%)	Rocas volcánicas glaciares.	6

ZHU 05	E	3750 4000*	140	OA*	20	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (78%) Almohadillas (17%) Bosque de pinos (04%)	Rocas volcánicas glaciares.	6
ZHU 06	E	3650 4000*	328	O*	18	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (73%) Almohadillas (24%) Arbustos (01%) Bosque de pinos (02%)	Rocas volcánicas glaciares.	6
ZHU 07	E	3500 4000*	753	O*	17	Andosol Histosol	Natural	Pajonal (72%) Almohadillas (24%) Arbustos (02%) Bosque de pinos (02%)	Rocas volcánicas glaciares.	6
BEL 01	C	Prom. 3118	40	CO*	N/R	N/R	Restauración	Suelo desnudo (N/R%) Roca expuesta (N/R%) Vegetación natural (N/R%) Arbustos (N/R%)	Ígnea, metamórfica y volcánica.	7
CHI 01	C	Prom. 3570	750	OA*	N/R	N/R	Natural	Roca expuesta (N/R%) Bosque (N/R%) Vegetación natural (N/R%) Arbustos (N/R%) Humedal (N/R%)	Origen glacial. Areniscas y pizarras.	7
ROM 01	C	Prom. 3840	930	OA*	N/R	N/R	Pastoreo extensivo Cultivos	Suelo desnudo (N/R%) Roca expuesta (N/R%) Bosque (N/R%) Vegetación natural (N/R%) Arbustos (N/R%) Humedal (N/R%)	Macizo volcánico con suelos meteorizados.	7
TAR 01	E	2528 3945	47630	CO*	18	Andosol	Minería Expansión urbana	N/R	Acuífero aluvial volcánico	8
YAN 01	E	2524 4366	41890	OA*	16	Andosol	Natural	N/R	Valle estrecho de origen volcánico.	8
Resumen	Moda	Prom.	Prom.	Moda	Prom.	Modas	Modas	Modas	Modas	Cant.
	E	3584 4067	322** 3613	CO	19 Moda: I	Andosol Histosol	Natural Pastoreo extensivo	Pajonal Arbustos	Rocas de origen volcánico y glaciar	8 docs.

Notas:

El símbolo (*), significa que el valor se estimó a partir de la información reportada. De otro lado, el símbolo doble (**) significa que para el cálculo del resumen no se tuvieron en cuenta los valores atípicos.

N/A: No Aplicable; N/R: No Reportado; E: Ecuador; P: Perú; C: Colombia; OA: Ovalada Alargada; O: Ovalada; CO; Circular a Ovalada; MI: Muy Irregular; I: Irregular.

1: Ochoa-Tocachi et al. (2016A); 2: Buytaert et al. (2006A); 3: Buytaert et al. (2004); 4: Crespo et al. (2014); 5: Buytaert et al. (2007); 6: Lazo et al. (2019); 7: Cárdenas y Tobón (2017); 8: Guzmán et al. (2015).

A pesar de que este tipo de estudios caracterizaron las unidades en varios aspectos relevantes para evaluar sus respuestas hidrológicas, se evidenciaron algunos detalles que no se tuvieron en cuenta y que, según otros autores, podrían influir en el comportamiento hidrológico de las unidades o ser relevantes para la metodología adaptada de cuencas pareadas.

En primer lugar, se pudo identificar que casi todos los documentos revisados en la Tabla 1, identificaron las coberturas de las unidades hidrográficas y cuantificaron sus porcentajes. Aunque la definición de las coberturas y sus porcentajes es acertada en este tipo de investigaciones (Best et al., 2003), diferentes autores han resaltado la importancia de realizar una descripción más detallada, que permita conocer la ubicación de cada tipo de cobertura en la unidad hidrográfica. Por ejemplo, Stednick (1996) enunció que la variabilidad en los resultados del rendimiento hídrico reportado en estudios diferentes, para el mismo porcentaje de área afectada, puede radicar en la ubicación del área alterada dentro de la unidad hidrográfica. En otro caso, Bosch y Hewlett (1982) identificaron que los aumentos en el rendimiento, causados por cortes parciales, estaban relacionados con la ubicación de dichos cortes en la unidad hidrográfica. En otras palabras, según Stednick (1996), Bosch y Hewlett (1982), la respuesta hidrológica no solo depende de la pregunta de cuánto se afecta, sino también de dónde se afecta. Ante esta situación, algunos estudios han

aplicado metodologías de clasificación (p. ej., Cárdenas y Tobón, 2017), con la finalidad de generar mapas de coberturas que permitan localizar cada uno de los recubrimientos en las unidades hidrográficas; sin embargo, en esta revisión se identificó que no fue común la construcción de estos mapas. Principalmente, se evidenció que los mapas de cobertura se generaron en estudios de modelación hidrológica y de propiedades de los suelos (p. ej., Benavides et al., 2018; Espinosa y Rivera, 2016; Fries et al., 2020; Thompson et al., 2021).

En segundo lugar, se pudo evidenciar que todos los documentos revisados en la Tabla 1, identificaron los usos de las diferentes porciones de tierra de las unidades hidrográficas. Como se ha mencionado en este documento (numeral 4.1.4), la dinámica alusiva al cambio de uso y cobertura del suelo consiste en una relación bidireccional compleja. Al respecto se evidenció que, en el estudio de la problemática de los impactos hidrológicos causados por cambios en el territorio, es fundamental considerar ambos aspectos: las coberturas y los usos. En este sentido, los artículos revisados acertaron en la consideración de los dos componentes; sin embargo, es viable caracterizar de manera más detallada los usos del suelo, mediante la aplicación de técnicas colaborativas que permitan generar cartografía al respecto. Un ejemplo de ello es el trabajo realizado por Segarra (2002), quién propuso una metodología de mapeo participativo en la que la comunidad elabora el mapa de usos del suelo, mientras que la organización de apoyo desarrolla el mapa de coberturas. De esta manera, Segarra (2002) planteó que es posible generar mapas neutros que indiquen las relaciones entre las prácticas, las coberturas y los usos que se le dan a los recursos naturales en las unidades hidrográficas. En síntesis, la realización del mapa de usos del suelo, vinculado al mapa de coberturas, permite caracterizar correctamente la dinámica de los cambios en el territorio que generan impactos sobre la hidrología de las unidades hidrográficas.

En tercer lugar, se debe destacar que en todos los casos de la Tabla 1, se caracterizaron las unidades hidrográficas en aspectos relativos a su altitud, área, pendiente y forma. En general, este tipo de caracterización cumple con los requerimientos para la selección de las unidades hidrográficas, según la guía práctica del enfoque de cuencas experimentales (Toebe y Ouryaev, 1970). Sin embargo, según lo planteado por otros autores (Guzmán et al., 2015; Ochoa-Tocachi et al., 2016B; Oudin et al., 2010), existen otros parámetros físicos relacionados a la red de drenaje, el relieve y la geometría de las unidades que también son importantes para comparar la similitud entre las cuencas, describir su respuesta hidrológica e incluso, realizar comparaciones de los resultados con otras investigaciones.

Finalmente, de la revisión de los documentos se logró evidenciar que se caracterizaron las unidades en términos de sus tipos de suelo y características geológicas. Con respecto a ello, se notó que en este tipo de estudios se hicieron descripciones generales basadas en otros más específicos, para sustentar el requisito de seleccionar dos unidades muy similares, como lo hizo Buytaert et al. (2007) con la descripción geológica de Coltorti y Ollier (2000).

4.2.3.1.2. Etapa de caracterización hidrometeorológica

La segunda etapa, según la revisión de los documentos que usaron el enfoque adaptado de cuencas pareadas, se basa en la caracterización de las condiciones hidrometeorológicas de las unidades hidrográficas. En otras palabras, consiste en la planeación, diseño, instalación, mantenimiento y gestión de sistemas automáticos de monitoreo hidrometeorológico, específicamente de: estaciones hidrométricas localizadas en los cierras de las unidades, pluviómetros distribuidos espacialmente en el sitio de estudio y estaciones meteorológicas automáticas. La Tabla 2 presenta una síntesis de la información recopilada, acerca de los aspectos más relevantes de la caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas que hicieron parte de los estudios recopilados.

Tabla 2. Síntesis de la caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas.

Ud.	Monitoreo pluviométrico			Monitoreo hidrométrico			Monitoreo meteorológico			Período de monitoreo	Caudal medio anual	Balance hídrico medio anual			Ref.
	Cant.	Res.	Descripción del pluviómetro	Cant.	Res.	Descripción del vertedero	Cant.	Res.	Descripción de la estación			Lluvia	Descarga	Evapotranspiración	
	N/A	Min.	N/A	N/A	Min.	N/A	N/A	Min.	N/A			mm	mm	mm	
LLO 01	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	1112	6.5	1128	115	972*	1
LLO 02	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	1112	10.1	1091	144	829*	1
JTU 01	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	823	1.2	641	59	798*	1
JTU 02	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	822	4.4	739	57	781*	1
JTU 03	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	825	22.5	849	315	765*	1
JTU 04	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	814	108.9	767	214	817*	1
PAU 01	3	15	Cubeta basculante	1	15	T (90°) con transductores de presión	0	N/A	N/A	1545	81.2	1358	974	937*	1,2,3, 4 y 5
PAU 02	2	15	Cubeta basculante	1	15	T (90°) con transductores de presión	0	N/A	N/A	1248	14.8	1092	467	1038*	1,4 y 5
PAU 03	2	15	Cubeta basculante	1	15	T (90°) con transductores de presión	0	N/A	N/A	1158	3.8	1014	201	987*	1,4 y 5
PAU 04	3	15	Cubeta basculante	1	15	T (90°) con transductores de presión	0	N/A	N/A	717	33.8	1123	688	935*	1,2,3, 4 y 5
PIU 01	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	890	308.5	2239	1474	1275*	1
PIU 02	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	890	52.1	2677	1729	1178*	1
PIU 03	2	5-15	Cubeta basculante	1	5-15	T-R con transductores de presión	N/R	N/R	N/R	925	45.8	1869	1103	1165*	1
QUI 01	N/R	N/R	Cubeta basculante	1	5-15	T (90°) con transductores de presión	1	N/R	N/R	733	144.3	1143	908	235	4
CAL 01	N/R	N/R	Cubeta basculante	1	5-15	T (90°) con transductores de presión	1	N/R	N/R	733	114.7	1383	824	559	4
ZHU 01	4	5	Cubeta basculante	1	5	T con transductores de presión	1	N/R	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1096	4.6	1300	729	N/R	6
ZHU 02	4	5	Cubeta basculante	1	5	T con transductores de presión	1	N/R	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1096	8.7	1300	720	N/R	6
ZHU 03	4	5	Cubeta basculante	1	5	T con transductores de presión	1	N/R	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1096	10.1	1293	841	N/R	6
ZHU 04	4	5	Cubeta basculante	1	5	T con transductores de presión	1	N/R	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1096	16.7	1294	809	N/R	6
ZHU 05	4	5	Cubeta basculante	1	5	T con transductores de presión	1	N/R	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1096	34	1267	766	N/R	6

ZHU 06	4	5	Cubeta basculante	1	5	T con transductores de presión	1	N/R	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1096	81.8	1254	786	N/R	6
ZHU 07	4	5	Cubeta basculante	1	5	R con transductores de presión	1	N/R	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1096	206.3	1277	864	N/R	6
BEL 01	1	5	Cubeta basculante	1	5	R con transductores de presión	1	15	Marcas Davis y Campbell Scientific de variables básicas	730	11.2	1478	886	434	7
CHI 01	1	5	Cubeta basculante	1	5	R con transductores de presión	1	15	Marcas Davis y Campbell Scientific de variables básicas	730	470.7	3098	1979	245	7
ROM 01	2	5	Cubeta basculante	1	5	R con transductores de presión	1	15	Marcas Davis y Campbell Scientific de variables básicas	730	112.1	970	380	273	7
TAR 01	2	N/R	Cubeta basculante	2	5	Estaciones de nivel	1	N/R	De variables básicas	4755	12083	3147	800	2154	8
YAN 01	2	N/R	Cubeta basculante	2	5	Estaciones de nivel	1	N/R	Marca Davis de variables básicas	1600	24627	3343	1854	1697	8
Resumen	Moda	Moda	Moda	Moda	Moda	Moda	Moda	Moda	Moda	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Cant.
	2	5	Cubeta basculante	1	5	T con transductores de presión	1	15	Marca Campbell Scientific de variables básicas	1132 (3.1 años)	76.3** 18355	1486.4	766.1	903.7	8 docs.

Notas:

El símbolo (*), significa que el valor se refiere a la evapotranspiración de referencia. De otro lado, el símbolo doble (**) significa que para el cálculo del resumen no se tuvieron en cuenta los valores atípicos.

N/A: No Aplicable; N/R: No Reportado; T: Vertedero Triangular; R: Vertedero Rectangular.

1: Ochoa-Tocachi et al. (2016A); 2: Buytaert et al. (2006A); 3: Buytaert et al. (2004); 4: Crespo et al. (2014); 5: Buytaert et al. (2007); 6: Lazo et al. (2019); 7: Cárdenas y Tobón (2017); 8: Guzmán et al. (2015).

Con respecto al tema del monitoreo pluviométrico, la revisión de los documentos de la Tabla 2 permitió evidenciar que, los equipos instalados correspondieron a medidores automáticos de lluvia que operaron bajo el sistema de cubeta basculante. También se identificó que en los sitios de estudio generalmente se dispuso una cantidad de dos pluviómetros por cada unidad hidrográfica (1 cada 150 ha en promedio), los cuales típicamente capturaron información en intervalos de 5 minutos. El sistema de monitoreo de lluvias identificado, según otros estudios, es adecuado para el cumplimiento de los objetivos propuestos por este tipo de investigaciones desarrolladas en páramos. Un ejemplo de ello, corresponde a la investigación adelantada por Buytaert et al. (2006C), quienes a través del estudio de la variabilidad espacial y temporal de las lluvias en una zona de páramo concluyeron que, aunque existe una buena correlación entre pluviómetros ubicados a menos de 4000 metros, la variabilidad espacial en la precipitación media puede ser alta. Por esta razón sugirieron que como regla general, se dispongan dos pluviómetros en unidades hidrográficas con áreas menores a 100 ha (Ochoa-Tocachi et al., 2018). En cuanto al tipo de pluviómetros basados en el sistema de cubeta basculante, la guía de cuencas experimentales reconoce estos sistemas como los más adecuados para la captura de la precipitación (Toebe y Ouryvaev, 1970). Finalmente, los intervalos de captura de datos también resultaron ser adecuados según Ochoa-Tocachi et al. (2018), quienes plantearon que debido a la rápida respuesta hidrológica de unidades pequeñas, el intervalo de registro debe ser mínimo de 15 e idealmente de 5 minutos.

En relación con las estaciones hidrométricas, en la revisión documental (Tabla 2) se identificó que en casi todos los casos correspondieron a vertederos de pared delgada de geometría simple (triangular) o compuesta (triangular y rectangular), los cuales se dispusieron en el cierre de las unidades con la finalidad de realizar las mediciones de caudal. Además de los vertederos, se identificó que las estaciones contaron con transductores de presión que permitieron el monitoreo de los niveles en intervalos entre 5 y 15 minutos. En cuanto a la idoneidad de estos sistemas para

este tipo de investigaciones, se puede mencionar que son adecuados teniendo en cuenta los referentes siguientes. Por ejemplo, la selección de las secciones geométricas de los vertederos, se puede sustentar en documentos hidráulicos como los publicados por Sotelo (1994), quien planteó que este tipo de formas simples y compuestas, son adecuadas para el aforo de caudales pequeños y grandes, respectivamente. En otro ejemplo, Gualpa y Céleri (2013) acreditaron el uso de transductores de presión como sistemas que permiten el monitoreo del tirante a través de una diferencia de presiones (absoluta y atmosférica). En cuanto a los intervalos de medición, como se comentó en el párrafo del monitoreo pluviométrico, la captura de datos en períodos entre 5 y 15 minutos es deseable debido a la rápida respuesta del flujo ante eventos de lluvia (Buytaert et al., 2006A; Torres y Proaño, 2018). En síntesis, el sistema de monitoreo hidrométrico identificado en la revisión resultó ser adecuado; sin embargo, como un detalle menor se evidenció que en la mayoría de los documentos no se presentaron especificaciones acerca de su diseño y precisión, como sí se hizo en el estudio publicado por Rosero-López et al. (2020). Conocer estos detalles puede resultar relevante, debido a que las especificaciones sirven de guía para otras investigaciones en el área y dan insumos para que se pueda discutir la certidumbre de los registros monitoreados.

En cuanto al monitoreo meteorológico, en la revisión de los documentos (Tabla 2) se identificó que existe una carencia importante de estos sistemas en los sitios de estudio, tal como lo han evidenciado otras revisiones de literatura (Buytaert et al., 2006B; Céleri y Feyen, 2009). A pesar de ello, se lograron identificar otras zonas de estudio en las cuales sí se pudo contar con estos equipos de monitoreo. En estos casos, los equipos correspondieron principalmente a estaciones meteorológicas automáticas que monitorearon las variables básicas en intervalos de 15 minutos, como: precipitación, temperatura, humedad, radiación solar, velocidad y dirección del viento.

Ante este panorama, acerca de la situación de los sistemas de monitoreo, se plantean dos observaciones. La primera, consiste en que no es esencial el monitoreo meteorológico para el desarrollo de investigaciones de cuencas pareadas con enfoque adaptado, siempre y cuando se basen en el estudio de la relación lluvia-escorrentía (p. ej., Buytaert et al., 2004) o en balances hídricos simplificados (p. ej., Buytaert et al., 2007). Y la segunda, consiste en que hay ciertos casos en los que sí es necesaria la instalación de sistemas de monitoreo meteorológico, como en los casos de balances hídricos detallados (p. ej., Buytaert et al., 2006A; Lazo et al., 2019), donde se quiera caracterizar mejor las unidades hidrográficas (p. ej., Cárdenas y Tobón, 2017), o en estudios especializados en temas de suelos y vegetación (p. ej., Fries et al., 2020).

Adicionalmente, la revisión de los documentos mostró que en ninguno se abordó explícitamente el monitoreo de las extracciones hídricas. Esta labor usualmente se lleva a cabo con la finalidad de desviar el flujo para usos relacionados al consumo humano y el riego de cultivos. Del análisis realizado, aunque en ningún documento se menciona este aspecto, se consideró que las extracciones hídricas no fueron tenidas en cuenta debido a dos motivos: el primero, que se puede relacionar con la ausencia de viviendas y áreas de riego en las unidades hidrográficas; y el segundo, que se puede relacionar con la baja incidencia de la cantidad de agua extraída con respecto al caudal total de la unidad. Independientemente de cuál sea el motivo, es común que los usos del suelo relacionados con el asentamiento de hogares y la agricultura basada en cultivos de regadío, provoquen patrones de sustracción importantes de agua en las unidades (Carreño, 2019). Ante este panorama, debe caracterizarse este fenómeno puesto que las extracciones impactan directamente a los hidrogramas monitoreados en los cierres, los cuales son el insumo principal para las metodologías que cuantifican los impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.

Con respecto al balance hídrico, la revisión permitió concluir que las investigaciones se han realizado en unidades hidrográficas de páramo con características muy distintas. En la Tabla 2, las

columnas de caudal medio, lluvia, descarga y evapotranspiración, evidenciaron un rango amplio de condiciones, incluyendo: unidades muy secas, como en el caso de J TU 01; unidades de condiciones medias, como BEL 01; y unidades muy húmedas, como en el caso de YAN 01.

Finalmente, en cuanto al período de monitoreo, se encontró que los valores mínimo, medio y máximo, correspondieron a 2, 3 y 13 años respectivamente. Según Bosch y Hewlett (1982), debido a la gran variabilidad de las precipitaciones de un año a otro, además de la influencia de fenómenos oscilatorios (Poveda et al., 2002), se necesitan años adicionales de calibración y tratamiento para medir el efecto de los años húmedos frente a los secos, en los cambios esperados en el caudal de las corrientes. Ante esta premisa, los autores enunciaron que la aplicación del enfoque adaptado de cuencas pareadas, tiene validez al basarse en principios comparativos, al desarrollarse en ecosistemas clave, poco estudiados, limitados con respecto al monitoreo hidrometeorológico y sometidos a la necesidad urgente de gestiones oportunas (Castaño-Urbe, 2002; Ochoa-Tocachi et al., 2018; 2016B; Sarmiento et al., 2017).

4.2.3.1.3. Etapa de evaluación de impactos

La tercera etapa se refiere a la evaluación de los efectos de los cambios de uso y cobertura del suelo, sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo. En esta etapa, la revisión de literatura permitió identificar las metodologías que aplicaron en otros contextos y los resultados principales que encontraron para un grupo de unidades hidrográficas.

En cuanto a las metodologías, la revisión evidenció que correspondieron a índices hidrológicos en las categorías de soporte y caracterización, servicios de abastecimiento y regulación hídrica. Además de métodos hidrológicos diferentes a los índices, que también permitieron la evaluación y el análisis de los impactos. La Tabla 3 presenta los índices y métodos hidrológicos identificados.

Tabla 3. Síntesis de los métodos e índices hidrológicos identificados para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.

Cat.	Denominación	Unidad	Id.	Descripción
Soporte y caracterización	Lluvia media anual	mm/año	RMY	Promedio anual de las cantidades de lluvia que se precipitaron en una cantidad determinada de años.
	Variabilidad de la lluvia	N/A	PVAR	Coefficiente de variación de la lluvia diaria durante el período monitoreado.
	Índice de estacionalidad	N/A	SINDX	Índice entre 0 (lluvia mensual uniforme) y 1 (lluvia anual concentrada en un mes).
	Días sin lluvia	N/A	DAYP0	Porcentaje de días con lluvias iguales a cero (es decir, no registradas por la resolución del pluviómetro) con respecto al número total de días monitoreados.
	Relación de escorrentía	N/A	RR	Proporción entre el volumen de descarga promedio y el volumen de lluvia promedio durante el período monitoreado.
	Evapotranspiración de referencia	mm/año	ET0	Evapotranspiración de referencia basada en la ecuación de Penman-Monteith.
	Evapotranspiración media anual	mm/año	EMY	Cantidad de evapotranspiración media en el año. Hallada a través de métodos aplicados a un grupo determinado de registros anuales.
Métodos de análisis hidrológico	Curva de duración de caudal	N/A	CDC	Curva que indica el porcentaje de tiempo durante el cual, los caudales fueron igualados o excedidos con respecto a un valor de referencia.
	Curva de intensidad máxima y duración de la lluvia	N/A	MIDC	Gráfico que indica las intensidades máximas de la lluvia registradas en cada duración.
	Análisis de hidrogramas	N/A	AHIDRO	Hace referencia a los análisis posibles de los hidrogramas monitoreados. Pueden variar en escala temporal, analizando eventos, días o meses.
	Análisis de hietogramas	N/A	AHIETO	Hace referencia a los análisis posibles de los hietogramas monitoreados. Pueden variar en escala temporal, analizando eventos, días o meses.
	Balance hídrico simplificado	N/A	BHS	Corresponde a la aplicación de balances hídricos durante el período monitoreado, basados en una relación entre la descarga, la lluvia y la evapotranspiración.
	Balance hídrico detallado	N/A	BHD	Mantiene la misma definición que el BHS; sin embargo, incluye otras variables (p. ej., flujos subterráneos, infiltración y cambios en el almacenamiento, entre otras).
	Curvas acumuladas	N/A	CACUM	Se refiere a la construcción de curvas, basadas en la acumulación de las variables básicas del balance hídrico (p. ej., precipitación y descarga).
	Separación del flujo base	N/A	SEP	Corresponde a la aplicación de métodos hidrológicos basados en algoritmos numéricos para la separación del caudal base.

Servicio de abastecimiento hídrico	Caudal mínimo	$\frac{1}{s * km^2}$	QDMIN	Corresponde al flujo diario mínimo, registrado en el período de monitoreo.
	Caudal medio	$\frac{1}{s * km^2}$	QDMY	Corresponde al flujo diario promedio del período monitoreado.
	Caudal del quincuagésimo percentil	$\frac{1}{s * km^2}$	Q50	Hace referencia al valor de caudal que es superado por el 50% de los caudales registrados en la CDC.
	Caudal medio del mes más seco	$\frac{1}{s * km^2}$	QMDRY	Corresponde al caudal medio diario, registrado en el mes más seco del período monitoreado.
	Caudal máximo	$\frac{1}{s * km^2}$	QDMAX	Corresponde al flujo diario máximo, registrado en el período monitoreado.
	Caudal del quinto percentil	$\frac{1}{s * km^2}$	Q95	Se refiere al valor de caudal que es superado por el 95% de los caudales registrados en la CDC.
	Caudal del nonagésimo percentil	$\frac{1}{s * km^2}$	Q10	Corresponde al valor de caudal que, es superado por el 10% de los caudales registrados en la CDC.
	Coefficiente de cultivo	N/A	Kc	Se refiere al coeficiente de cultivo descrito por el método de evapotranspiración de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
	Descarga media anual	mm/año	DMY	Hace referencia al promedio anual de la cantidad de agua descargada por las unidades en el cierre.
	Descarga del mes más seco	mm/mes	DMDRY	Corresponde a la cantidad de agua descargada por las unidades en el cierre para el mes más seco.
	Descarga del mes más húmedo	mm/mes	DMWET	Corresponde a la cantidad de agua descargada por las unidades en el cierre para el mes más húmedo.
	Rendimiento hídrico	N/A	RH	Coefficiente entendido como la proporción de precipitación que se convierte en caudal.
Servicio de regulación hídrica	Variabilidad del flujo	N/A	QVAR	Coefficiente de variación de los flujos diarios durante el período monitoreado.
	Índice de caudal base	N/A	BFI	Índice de flujo base definido como la relación entre el caudal base y el caudal total.
	Constante de recesión general	N/A	K	Corresponde a la pendiente de la recta formada por la curva maestra de recesión en escala logarítmica.
	Tiempos asociados a las constantes de recesión de eventos	Hora	T	Se refiere al inverso de las pendientes correspondientes a los tres tramos de los hidrogramas de eventos, según el concepto del reservorio lineal. Normalmente, se promedian a partir del análisis de muchos eventos en las unidades hidrográficas.
	Rango de descarga	N/A	RANGE	Corresponde a la relación entre el caudal diario máximo (QDMAX) y mínimo (QDMIN).
	Rango de descarga de la curva de duración de caudal	mm/día	RANGQ	Corresponde a la diferencia entre los extremos del flujo registrados en la CDC.
	Rango entre los percentiles alto y bajo	mm/día	RANHL	Diferencia entre los percentiles 75 y 25 de los registros de caudal diario.
	Pendiente de la curva de duración de caudal	N/A	R2FDC	Pendiente que se asocia al tercio medio de la CDC.
	Índice de regulación hidrológica	N/A	IRH	Es un índice asociado al régimen de las unidades hidrográficas que, califica la capacidad de retención y regulación hídrica a través de la forma de la CDC.
	Índice anual <i>flashiness</i> de Richards-Baker	N/A	RB1	Estos índices cuantifican las oscilaciones del caudal en relación con el flujo total. Además, proporcionan una caracterización útil de la forma en que las unidades, procesan las entradas de agua en sus salidas, para las escalas anual o estacional.
	Índice estacional <i>flashiness</i> de Richards-Baker	N/A	RB2	
	Cantidad de flujos bajos	N/A	FL	Se refiere a la cantidad de caudales valle (bajo el percentil 25), contados en el hidrograma de la unidad hidrográfica.
	Cantidad de flujos altos	N/A	FH	Se refiere a la cantidad de caudales pico (sobre el percentil 75), contados en el hidrograma de la unidad hidrográfica.
	Duración promedio de flujos bajos	Día	DLQ75	Se refiere a la duración promedio de los caudales bajo el percentil 25 de los registros del hidrograma.
	Duración promedio de flujos altos	Día	DHQ25	Se refiere a la duración promedio de los caudales sobre el percentil 75 de los registros del hidrograma.
	Proporción de días con incremento de flujo	N/A	RA	Proporción de días con respecto al período monitoreado, donde el caudal diario resulta ser más alto que el del día inmediatamente anterior.
	Simetría de los flujos	N/A	SIMQD	Hace referencia al coeficiente de simetría de los flujos diarios. Se estima como una relación entre la media y la mediana.

Notas:

N/A: No Aplicable.

Adaptado de: Allen et al. (2006); Baker et al. (2004); Bloomfield et al. (2009); Buytaert et al. (2004; 2006A; 2007); Cárdenas y Tobón (2017); Gomez-Isidro y Gómez-Ríos (2016); IDEAM (2019); Ochoa-Tocachi et al. (2016A; 2016B); y Olden y Poff (2003).

En cuanto a los resultados, la revisión de literatura de los estudios con enfoques similares permitió identificar y sintetizar los valores encontrados para un grupo de 11 índices hidrológicos. Los cuales, se adoptaron en seis investigaciones que incluyeron en total un número de 22 unidades hidrográficas (Tabla 4). Cabe mencionar que debido a que cada investigación utilizó su propia metodología para dar respuesta a sus objetivos, no fue posible recopilar todos los resultados de sus métodos e indicadores. En vez de ello, se optó por sintetizar los resultados de los índices que más se usaron y que mejor se reportaron en los documentos.

Tabla 4. Síntesis de los resultados encontrados en la evaluación de los impactos hidrológicos.

Unidad hidrográfica	QDMAX	QDMIN	SINDX	DAYP0	PVAR	RH	QVAR	R2FDC	IRH	DLQ75	DHQ25	Referencia
	$\frac{1}{s * km^2}$	$\frac{1}{s * km^2}$	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Día	Día	N/A
LLO 01	N/R	N/R	0.32	0.52	1.95	0.10	0.54	-0.46	0.74	8.80	8.56	1
LLO 02	N/R	N/R	0.31	0.51	1.91	0.13	0.57	-0.60	0.71	14.00	9.58	1
JTU 01	N/R	N/R	0.23	0.35	1.99	0.09	0.31	-0.41	0.91	13.13	7.56	1
JTU 02	N/R	N/R	0.22	0.27	1.81	0.08	1.44	-0.99	0.46	8.87	4.18	1
JTU 03	N/R	N/R	0.20	0.22	1.70	0.37	0.86	-0.59	0.63	7.52	4.74	1
JTU 04	N/R	N/R	0.22	0.27	1.85	0.28	1.05	-0.32	0.63	12.60	5.88	1
PAU 01	N/R	N/R	0.14	0.20	1.40	0.72	0.85	-0.70	0.63	19.60	5.13	1, 2, 3, 4 y 5
PAU 02	N/R	N/R	0.17	0.27	1.48	0.43	0.79	-0.73	0.62	10.45	8.16	1, 4 y 5
PAU 03	N/R	N/R	0.17	0.28	1.61	0.20	1.14	-1.12	0.47	8.60	15.39	1, 4 y 5
PAU 04	N/R	N/R	0.13	0.13	1.38	0.61	1.33	-1.05	0.43	7.33	3.10	1, 2, 3, 4 y 5
PIU 01	N/R	N/R	0.19	0.24	1.58	0.66	1.09	-1.28	0.46	5.55	3.07	1
PIU 02	N/R	N/R	0.21	0.26	1.62	0.65	1.15	-1.32	0.44	19.35	3.98	1
PIU 03	N/R	N/R	0.22	0.23	1.68	0.59	1.85	-1.63	0.18	5.67	54.50	1
QUI 01	1019.4	2.8	N/R	N/R	N/R	0.79	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	4
CAL 01	971.4	4.4	N/R	N/R	N/R	0.60	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	4
ZHU 01	1039.0	0.7	N/R	N/R	N/R	0.56	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	6
ZHU 02	762.9	1.2	N/R	N/R	N/R	0.55	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	6
ZHU 03	894.2	2.3	N/R	N/R	N/R	0.65	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	6
ZHU 04	741.2	4.2	N/R	N/R	N/R	0.62	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	6
ZHU 05	905.7	1.5	N/R	N/R	N/R	0.60	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	6
ZHU 06	930.4	1.2	N/R	N/R	N/R	0.63	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	6
ZHU 07	777.9	1.9	N/R	N/R	N/R	0.68	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	6
Resumen	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Cant.
	893.6	2.2	0.21	0.29	1.69	0.48	1.00	-0.86	0.56	10.88	10.29	6 docs.

Notas:

Al igual que en las Tablas 1 y 2, la Tabla 4 mantiene el mismo orden vertical en las unidades hidrográficas; sin embargo, se excluyeron las últimas cinco (BEL 01, CHI 01, ROM 01, TAR 01 y YAN 01) debido a que no reportaron información al respecto de los índices considerados.

N/A: No Aplicable; N/R: No Reportado.

1: Ochoa-Tocachi et al. (2016A); 2: Buytaert et al. (2006A); 3: Buytaert et al. (2004); 4: Crespo et al. (2014); 5: Buytaert et al. (2007); 6: Lazo et al. (2019).

En general, de los valores compilados es posible mencionar que representan un conjunto de unidades hidrográficas con características dispares, pues sus resultados muestran una variabilidad importante (Tabla 4). A pesar de ello, es válido destacar algunos aspectos relevantes, por ejemplo: que la unidad sin intervención antrópica PAU 01, presentó mejores niveles de regulación que su unidad análoga sometida a cultivos PAU 04. Esto se puede evidenciar en que los valores de los índices QVAR y R2FDC resultaron ser menores en el caso de PAU 01, además de que, los índices IRH, DLQ75 y DHQ25 resultaron ser mayores en la misma unidad. En otro ejemplo, se encontró que la unidad sin intervención PAU 02 descargó mucha más agua que la unidad forestada con pinos PAU 03, teniendo en cuenta los valores del índice RR.

De esta manera, es posible analizar de forma comparativa los resultados encontrados en los demás índices y unidades hidrográficas; sin embargo, con la finalidad de sintetizar las conclusiones halladas por los investigadores citados en la Tabla 4, a continuación, se plantean algunas de las premisas más relevantes para el tema de las alteraciones provocadas por los cultivos y el pastoreo.

1. Según Ochoa-Tocachi et al. (2016A), en cuanto a los efectos de los cultivos sobre la regulación hídrica, plantearon que las unidades cultivadas responden a eventos de lluvia con caudales pico más altos y rápidos, con curvas de recesión que caen más rápido y sostienen caudales base menores. Además, los índices DLQ75 y DHQ25 suelen ser más bajos en las unidades con cultivos, lo que puede significar un régimen de flujo más veloz. Estos patrones son indicadores de declives en la capacidad de regulación, que también se reflejan en CDC más pronunciadas.
2. Según Ochoa-Tocachi et al. (2016A), acerca del impacto de los cultivos sobre el abastecimiento hídrico, afirmaron que los impactos en el rendimiento hídrico y el índice RR son más difíciles de identificar, pues normalmente se presentan valores apenas menores en las unidades sometidas a agricultura. Lo cual hace que estas diferencias se enmascaren en la variabilidad natural de las unidades hidrográficas.
3. Según Buytaert et al. (2007), los efectos de los cultivos sobre la regulación hídrica son notorios en las CDC, ya que los caudales altos suelen ser similares, pero los bajos suelen reducirse notablemente. Esto da como resultado una CDC con una pendiente más empinada que indica un cambio desde el flujo base al flujo máximo. Este comportamiento implica una pérdida en la capacidad de regulación de la unidad, la cual se suele atribuir a una mayor conductividad hidráulica y la introducción de drenajes artificiales en los suelos, pues ambos mecanismos mejoran el desagüe de los suelos cultivados.
4. Según Buytaert et al. (2007), sobre el impacto de los cultivos al servicio de abastecimiento hídrico, plantearon que los caudales medios de las unidades cultivadas con respecto a las de referencia, no suelen presentar cambios significativos, ya que normalmente se encuentran entre los valores naturales.
5. Según Buytaert et al. (2004), acerca de los impactos de los cultivos sobre el servicio de regulación hídrica, manifestaron que la respuesta en unidades hidrográficas sometidas a cultivos, es más rápida que en unidades naturales. En consecuencia, la capacidad de almacenamiento es mucho más pequeña en la unidad con agricultura que en la de referencia.
6. Según Montenegro-Díaz et al. (2019), con respecto a los efectos del pastoreo sobre el abastecimiento y la regulación hídrica, establecieron que los impactos sobre los servicios pueden ser despreciables si se trata de un pastoreo extensivo, puesto que esta actividad no altera significativamente las propiedades de los suelos ni el rendimiento hídrico de las unidades.
7. Según Ochoa-Tocachi et al., (2016A), Hofstede (1995) y Podwojewski et al., (2002), el pastoreo intensivo afecta notablemente al abastecimiento y la regulación hídrica, debido a que: compacta los suelos, reduce al mínimo las coberturas vegetales y favorece rutas de drenaje, lo cual resulta en menores retenciones hídricas, desabastecimiento y pérdida en la regulación de eventos.

En general, las conclusiones y resultados anteriores son insumos relevantes, ya que permiten enmarcar los resultados generados en este estudio, con los hallados en otras investigaciones involucradas en la misma temática de interés; es decir, la de los impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica causados por las transformaciones de los suelos de páramo.

4.2.3.2. Otros enfoques

Como se enunció anteriormente (Figura 10), la revisión de literatura permitió evidenciar otras cuatro perspectivas o enfoques metodológicos a través de los cuales se abordó la pregunta específica de esta investigación. En términos generales, los enfoques identificados correspondieron a estudios en las áreas de edafología, modelación hidrológica, biología y trabajo social. Teniendo en cuenta que hay otras alternativas para evaluar la misma problemática, en esta sección se presentan cada uno de los cuatro enfoques; sin embargo, se hace un énfasis especial en que se abordan de manera general pues, aunque son enfoques tan válidos e importantes como el de las cuencas experimentales, no son el foco de atención para esta investigación.

El primer enfoque identificado, correspondió a la aplicación de metodologías relativas a las ciencias de los suelos. En la revisión se evidenció que las propiedades más estudiadas fueron: textura, pH, humedad, permeabilidad, densidad real y aparente, porosidad, contenido de carbono orgánico, contenido de materia orgánica, profundidad de los horizontes, color, estructura, capacidad de retención hídrica, conductividad hidráulica, tamaño de partículas, porcentajes de arcilla, limo y arena, tasas de infiltración y contenido de elementos químicos como aluminio, fósforo, nitrógeno y potasio. A través de la estimación de estas propiedades, las investigaciones abordaron los servicios de abastecimiento y regulación hídrica de los ecosistemas de páramo. En este sentido, la revisión de literatura permitió identificar algunas de las investigaciones más representativas de esta categoría (p. ej., Buytaert et al., 2005; Daza et al., 2014; Harden et al., 2013; Hofstede, 1995; Marín et al., 2019; Montenegro-Díaz et al., 2019; Otero et al., 2011).

El segundo enfoque identificado, correspondió a la generación de modelos virtuales hidrológicos que tuvieron como finalidad representar con cierto nivel de exactitud, las condiciones reales de las unidades hidrográficas. La revisión permitió identificar que, tras la generación de los modelos, se llevaron a cabo simulaciones basadas en directrices globales y locales, como el cambio climático, políticas de ordenamiento territorial y dinámicas en el uso y las coberturas de los suelos. Normalmente, estos modelos operan con ecuaciones de balance hídrico que estiman cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera, los estudios abordaron los impactos causados a los servicios de regulación y abastecimiento hídrico. Gil y Tobón (2016), Espinosa y Rivera (2016) y Flores-López et al. (2016), son algunos ejemplos de este tipo de enfoque.

El tercer enfoque identificado, correspondió a la aplicación de técnicas biológicas que permitieron abordar los servicios de regulación y abastecimiento hídrico a través de estudios basados en la vegetación de los páramos. En la revisión de literatura no se evidenció una gran cantidad de publicaciones al respecto, sin embargo, es posible mencionar tres investigaciones que ejemplificaron este componente (p. ej., Avellaneda-Torres et al., 2020; Cárdenas et al., 2018; Valencia-Leguizamón y Tobón, 2017).

Finalmente, el cuarto enfoque identificado, se refiere al uso de metodologías participativas de trabajo social. Este tipo de enfoque no se evidenció de gran manera en la revisión de literatura; sin embargo, es posible resaltar el trabajo desarrollado por una investigación en particular. El estudio al que se hace referencia, fue llevado a cabo por Quiroz et al. (2018), quienes a través de la identificación de las partes interesadas y la posterior aplicación de entrevistas semiestructuradas, utilizaron análisis cualitativos para explorar y contrastar las percepciones acerca de los impactos negativos y positivos de las plantaciones de pino, en los servicios de regulación y abastecimiento hídrico. De igual manera, otro par de documentos identificados hicieron parte de este tipo de metodologías (p. ej., Nieto et al., 2015; Ochoa-Tocachi et al., 2018).

5. Metodología

El proyecto se desarrolló en tres etapas que corresponden a: (i) caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas; (ii) caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas; y (iii) evaluación de los impactos a los servicios de regulación y abastecimiento. Teniendo en cuenta lo anterior, la Figura 11 presenta el panorama metodológico usado en esta investigación. Además de ello, se aplicó el enfoque adaptado de cuencas pareadas, el cual como se definió anteriormente (numeral 4.1.5), consiste en la selección de dos unidades hidrográficas similares en términos de sus características físicas, con la excepción de que una se somete a un tipo de afectación, mientras que la restante permanece inalterada como unidad de control.

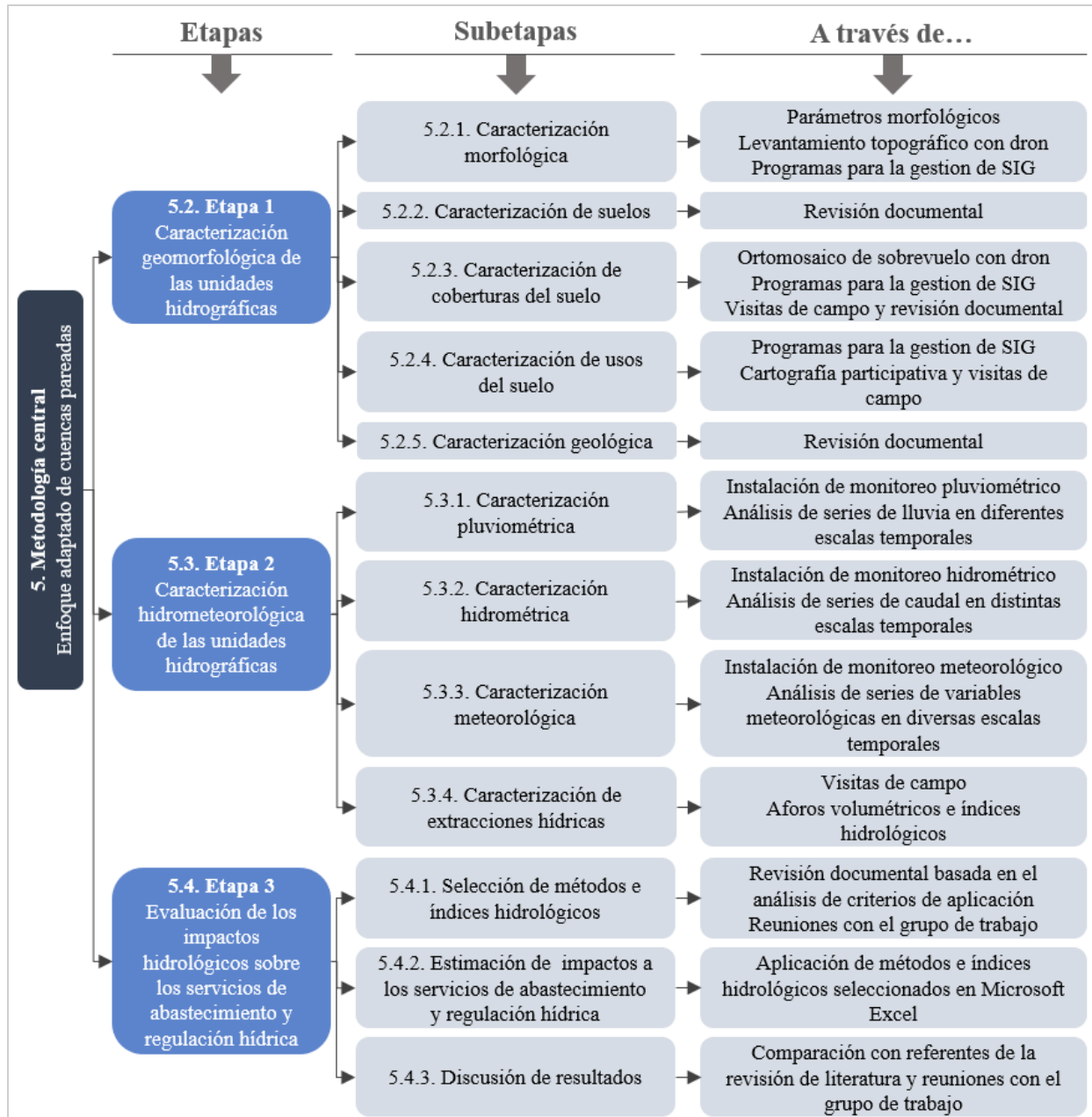


Figura 11. Metodología aplicada en la investigación.

5.1. Sitio de estudio

En esta sección del documento, se presentan las dos unidades hidrográficas (Intervenida y No Intervenida) seleccionadas para el desarrollo de la investigación. Inicialmente, se realiza una síntesis del procedimiento de elección de las unidades y, posteriormente, se describen sus características principales.

En general, la literatura académica plantea que la selección se debe soportar en el juicio de expertos y la consideración de criterios cualitativos, por ejemplo: que las unidades sean pequeñas, accesibles, físicamente similares y se diferencien únicamente por la perturbación antrópica que se quiere evaluar (Best et al., 2003; Van Loon et al., 2019). Teniendo en cuenta lo enunciado, la selección de las unidades hidrográficas, además de las recomendaciones anteriores, se llevó a cabo a partir de: (i) la revisión de literatura, que permitió identificar las clases de unidades consideradas en estos estudios (Tablas 1 y 2); (ii) las recomendaciones emitidas por guías institucionales, que permitieron identificar criterios cuantitativos para la selección (p. ej., Toebe y Ouryvaev, 1970); (iii) las salidas de campo y discusiones académicas que se adelantaron con el equipo de trabajo del proyecto; y (iv) la consecución de permisos para la realización de la investigación en predios privados.

Tras haber considerado los criterios mencionados, se realizó la elección definitiva de las dos unidades hidrográficas (Figuras 12 y 13). Las unidades hidrográficas se encuentran localizadas en la vereda conocida como Parra y Juan Rodríguez, que hace parte del municipio de Tona (departamento de Santander, Colombia). Con respecto al contexto administrativo que gestiona el ecosistema que contiene al sitio de estudio, cabe mencionar que las dos unidades pertenecen al complejo de páramos conocido como Jurisdicciones Santurbán – Berlín (CJSB), que está en proceso de delimitación por las autoridades ambientales colombianas (Semana, 2021). Adicionalmente, el área donde se ubican las dos unidades hidrográficas, pertenece a una figura de protección denominada Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables del Páramo de Berlín (DMI de Berlín) (CDMB y CORPONOR, 2008). El DMI habilita el uso de las tierras de la zona de estudio, como áreas para el desarrollo agropecuario con la existencia de restricciones ambientales, aunque se debe tener en cuenta que según el proceso de delimitación actual esta situación podría cambiar.

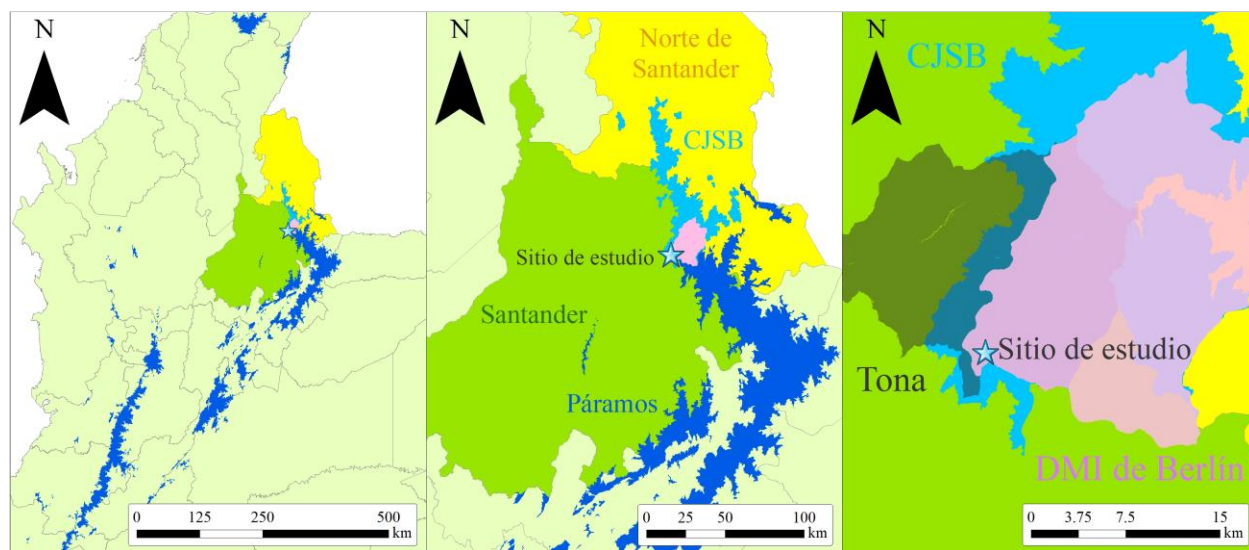


Figura 12. Panorama geográfico, administrativo y ambiental del sitio de estudio.

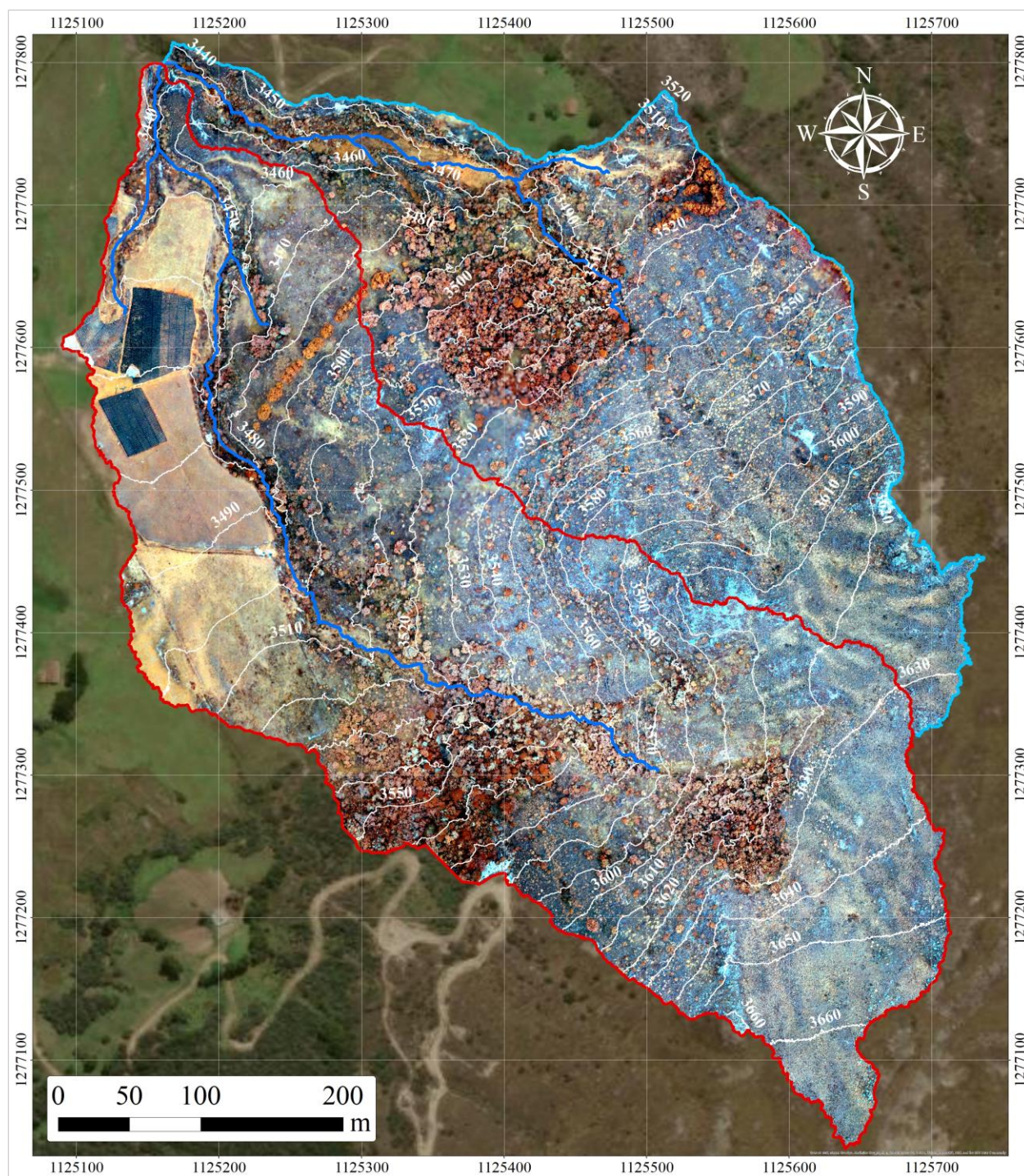


Figura 13. Unidades hidrográficas de estudio.

La Figura 13 presenta las dos unidades hidrográficas de estudio. En relación con la leyenda que identifica a las unidades, el polígono delimitado en color rojo hace referencia a la Unidad Hidrográfica Intervenida, mientras que el polígono delimitado en color celeste corresponde a la Unidad Hidrográfica No Intervenida. Otros detalles generales acerca de las dos unidades hidrográficas se pueden visualizar en la Tabla 5.

Tabla 5. Características generales de las dos unidades hidrográficas de estudio.

Categoría	Variable	Unidad	Unidad Intervenida	Unidad No Intervenida
Características geomorfológicas	Área	ha	18.911	11.130
	Perímetro	m	3018.794	2347.394
	Latitud	° ‘ ‘’	7° 6’ 11.66’’ N	7° 6’ 18.10’’ N
	Longitud	° ‘ ‘’	72° 56’ 33.14’’ O	72° 56’ 29.99’’ O
	Altitud media	m s. n. m.	3549.696	3538.093
	Pendiente media	°	24.259	27.118
	Tipos de intervenciones	N/A	Zonas cultivadas Extracciones hídricas Pastoreo extensivo	Pastoreo extensivo mínimo
	Tipos de suelos	N/A	Typic Humitropepts (45%) Typic Dystropepts (35%) Lithic Humitropepts (20%)	Typic Humitropepts (45%) Typic Dystropepts (35%) Lithic Humitropepts (20%)
	Geología general	N/A	Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (JRcs)	Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (JRcs)
Características pluviométricas	Precipitación anual**	mm	1090.1	1090.1
Características hidrométricas	Caudal medio diario*	l/s	2.614	2.811
Características meteorológicas	Radiación solar media* (6 a. m. – 6 p. m.)	W/m ²	447.39	447.39
	Humedad relativa media*	%	86.20	86.20
	Temperatura media*	°C	8.41	8.41
	Velocidad media del viento*	km/h	5.13	5.13
	Dirección del viento*	N/A	NE a SO (36% del tiempo) SE a NO (41% del tiempo) SO a NE (16% del tiempo) NO a SE (7% del tiempo)	NE a SO (36% del tiempo) SE a NO (41% del tiempo) SO a NE (16% del tiempo) NO a SE (7% del tiempo)
	Punto de rocío medio*	°C	5.94	5.94

Notas:

N/A: No Aplicable.

El símbolo (*), significa que el valor se estimó para el período monitoreado por los equipos instalados en el proyecto (Figura 17).

El símbolo (**), significa que el valor se estimó para el año 2020, mediante los equipos instalados en el proyecto y el llenado de datos de las dos estaciones cercanas (Figuras 16 y 17).

5.2. Caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas

La caracterización geomorfológica de las Unidades Hidrográficas Intervenida y No Intervenida, incluyó: (i) la morfología; (ii) los tipos de suelo; (iii) las coberturas; (iv) los usos del suelo; y (v) la geología (Monsalve, 2008). A continuación, se enuncian las distintas metodologías aplicadas para la caracterización geomorfológica.

5.2.1. Caracterización morfológica

La caracterización morfológica consiste en el estudio de las propiedades relacionadas con la geometría, la forma, el relieve y la red de canales de las dos unidades hidrográficas (Posada, 1994). Para caracterizar las unidades en los cuatro componentes mencionados, se llevó a cabo una revisión de literatura que permitió identificar los parámetros y métodos utilizados en investigaciones similares. La revisión de literatura también incluyó libros del área de hidrología como referentes para la caracterización. En este sentido, se procedieron a identificar, organizar y calcular los parámetros morfológicos enunciados en las Tablas 6, 7, 8 y 9, para la caracterización morfológica de las Unidades Hidrográficas Intervenida y No Intervenida.

Tabla 6. Parámetros geométricos.

Parámetro		Ud.	Descripción
Localización	Lat.	° ′ ″	Ángulo que forma la línea entre el centro del planeta y el centroide geométrico de la unidad hidrográfica con respecto al plano ecuatorial.
	Long.	° ′ ″	Ángulo que indica la posición del centroide de la unidad hidrográfica con respecto al meridiano de Greenwich.
Área		ha	Área generada a partir de la proyección horizontal de la superficie delimitada por el parteaguas de la unidad.
Perímetro		m	Longitud calculada a partir de la proyección horizontal de la línea conformada por el parteaguas de la unidad.
Longitud		m	Longitud de la línea recta horizontal que va desde el punto de cierre de la unidad hasta el punto más lejano sobre el parteaguas. La línea seleccionada debe seguir la tendencia general de la corriente principal de la unidad.
Ancho		m	Distancia calculada a partir de la relación entre el área de la unidad hidrográfica y su longitud. Matemáticamente resulta: $Ancho = \frac{\text{Área}}{\text{Longitud}}$

Adaptado de: Camino et al. (2018); Ochoa-Tocachi et al. (2016B); y Posada (1994).

Tabla 7. Parámetros de forma.

Parámetro	Ud.	Descripción
Índice de alargamiento	N/A	Índice que relaciona la longitud de la unidad hidrográfica con el ancho más largo medido en dirección perpendicular.
Coeficiente de compacidad de Gravelius	N/A	Parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la unidad hidrográfica con el perímetro de un círculo equivalente de la misma área de la unidad. Matemáticamente la ecuación corresponde a: $Coef. Gravelius = \frac{0.282 * Perímetro}{\sqrt[2]{Área}}$
Factor de forma de Horton	N/A	Cociente entre el área de la unidad hidrográfica y su longitud al cuadrado. Matemáticamente la expresión resulta: $Factor Horton = \frac{Área}{Longitud^2}$
Relación de elongación	N/A	Relación entre el diámetro de un círculo con la misma área que la unidad hidrográfica y su longitud. En términos matemáticos la ecuación resulta: $Relación de elongación = 1.128 \frac{\sqrt[2]{Área}}{Longitud}$
Relación de circularidad	N/A	Coeficiente que corresponde a la división entre el área de la unidad y la del círculo cuyo perímetro es equivalente al perímetro de la unidad. Su fórmula resulta: $Relación de circularidad = \frac{4\pi * Área}{Perímetro^2}$
Dimensión larga del rectángulo equivalente	m	Corresponde a la longitud de un rectángulo equivalente a la unidad hidrográfica. Este rectángulo debe tener la misma área y perímetro que la unidad.
Dimensión corta del rectángulo equivalente	m	Corresponde al ancho de un rectángulo equivalente a la unidad hidrográfica. El rectángulo debe tener la misma área y perímetro que la unidad.
Factor de forma del rectángulo equivalente	N/A	Corresponde al factor de forma de Horton aplicado al rectángulo equivalente de la unidad hidrográfica.

Notas:

N/A: No Aplicable.

Adaptado de: Cruz et al. (2015); Díaz et al. (1999); Horton (1932); Ochoa-Tocachi et al. (2016B); y Schumm (1956).

Tabla 8. Parámetros de relieve.

Parámetro	Ud.	Descripción
Altitud máxima	m s. n. m.	Cota más alta de la unidad hidrográfica.
Altitud mínima	m s. n. m.	Cota más baja de la unidad hidrográfica.
Altitud media	m s. n. m.	Cota calculada a partir del promedio de todas las cotas asociadas a todos los puntos de la superficie de la unidad.
Rango de altitud	m	Diferencia entre las cotas máxima y la mínima.
Nonagésimo quinto percentil (95 th) de altitud	m s. n. m.	Cota correspondiente al percentil 0.95; es decir, corresponde a un valor altitudinal bajo el cual se encuentra el 95% de las cotas de la unidad.
Quinto percentil (5 th) de altitud	m s. n. m.	Cota correspondiente al percentil 0.05; es decir, corresponde a un valor altitudinal bajo el cual se encuentra el 5% de las cotas de la unidad.
Histograma de valores de altimetría	m s. n. m. y %	Gráfico de barras que representa la frecuencia relativa de las altitudes de la unidad, para un número de clases definido.
Curva hipsométrica	N/A	Gráfico de líneas que representa la relación entre las curvas de nivel relativas al desfogue y el rango altitudinal, en función de las áreas parciales asociadas a tales contornos con respecto al área total de la unidad. En otras palabras, la curva hipsométrica responde a la pregunta: ¿qué porcentaje del área total de la unidad, se puede encontrar sobre cierto porcentaje de altitud?
Perfil topográfico de la corriente principal	m s. n. m. y m	Gráfico de líneas que representa los valores de las cotas del cauce principal con respecto a sus abscisas.
Pendiente máxima de la unidad	°	Pendiente más grande de la unidad hidrográfica.
Pendiente mínima de la unidad	°	Pendiente más pequeña de la unidad hidrográfica.
Pendiente media de la unidad	°	Pendiente calculada a partir del promedio de todas las pendientes asociadas a la unidad hidrográfica.
Pendiente media del cauce de la corriente principal	°	Promedio aritmético del conjunto de pendientes que hacen parte del cauce de la corriente principal. Para este caso, se calcula a partir de la división en tramos iguales de la longitud proyectada horizontalmente de la corriente. La operación se realiza partiendo del perfil topográfico de la corriente.
Histograma de valores de pendiente	° y %	Gráfico de barras que representa la frecuencia relativa de las pendientes de la unidad, para un número determinado de clases.

Notas:

N/A: No Aplicable.

Adaptado de: Aparicio (2005); Ochoa-Tocachi et al. (2016B); y Posada (1994).

Tabla 9. Parámetros de la red de canales.

Parámetro	Ud.	Descripción
Caracterización de la red de canales	N/A	Descripción cualitativa del modelo de erosión que más se asemeja al generado por la red de canales de la unidad hidrográfica.
Jerarquización de la red fluvial	N/A	Clasificación numérica de las corrientes perennes que describe el grado de bifurcación dentro de la unidad hidrográfica.
Relación de bifurcación	N/A	Relación entre el número de corrientes hidrográficas de un orden seleccionado, con respecto al número de corrientes del orden inmediatamente superior.
Longitud de las corrientes	m	Longitud calculada a partir de la sumatoria de las proyecciones horizontales de las corrientes hídricas perennes de la unidad hidrográfica.
Longitud de la corriente principal	m	Longitud calculada a partir de la proyección horizontal de la corriente hídrica principal de la unidad.
Densidad de drenaje	1/m	Relación entre la longitud total de las corrientes hídricas perennes de la unidad, con respecto a su propia área. La ecuación que describe la densidad de drenaje corresponde a: $\text{Densidad de drenaje} = \frac{\text{Longitud de las corrientes}}{\text{Área}}$
Tiempo de concentración	min	Tiempo que tarda en drenar una gota de lluvia desde el punto más alejado de la unidad hasta el punto de desfogue. Se estima a partir de la expresión empírica siguiente: $\text{Tiempo de concentración} = 0.0078 * \text{Long. Cauce. Cte. Ppal en pies}^{0.77} * \text{Pend. Cte. Ppal}^{-0.385}$

Notas:

N/A: No Aplicable.

Adaptado de: Camino et al. (2018); Chow et al. (1994); Howard (1967); Posada (1994); y Vélez y Gutiérrez (2011).

Para la estimación de los parámetros morfológicos, se usaron dos sobrevuelos realizados por un vehículo aéreo no tripulado (UAV) como los insumos principales para la generación de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) de las dos unidades hidrográficas. El cálculo de los parámetros morfológicos se realizó mediante el uso de programas informáticos para la gestión de datos geoespaciales. En detalle, la Figura 14 presenta los pasos considerados en este estudio para la aplicación de la metodología enunciada.



Figura 14. Etapas de la caracterización morfológica de las dos unidades hidrográficas.

En cuanto a la primera etapa de la Figura 14, esta se basó en la preparación del talento humano, los equipos técnicos y las actividades necesarias para la ejecución de los sobrevuelos en la zona de estudio. Los sobrevuelos fueron realizados por dos integrantes certificados como pilotos profesionales, ambos asociados al equipo de trabajo del proyecto de investigación. El UAV usado para la generación del MDE fue el modelo conocido como UAV Mapper, distribuido por la compañía estadounidense Tuffwing (Apéndice B).

Con respecto a la segunda etapa de la Figura 14, esta se fundamentó en los detalles relativos a la ejecución de los sobrevuelos en las dos unidades hidrográficas. Los sobrevuelos se llevaron a cabo el 23 de enero de 2020, siguiendo un plan de vuelo basado en dos etapas: la primera, que tardó 27 minutos y se realizó en las altitudes más bajas de las unidades; y la segunda, que duró 17 minutos y se desarrolló en las partes más altas de las unidades hidrográficas. Otras características específicas de la ejecución de los sobrevuelos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Detalles de la ejecución de los sobrevuelos.

Característica	Resultado
Cantidad de fotografías	304
Altitud media de vuelo	224 m con respecto a la superficie de las unidades
Resolución espacial obtenida	7.5 cm/píxel
Cobertura del mapa en planta	1.39 km ²
Cantidad de puntos de control localizados en suelo	10

En relación con la tercera etapa de la Figura 14, esta consistió en el procesamiento en oficina de los datos y fotografías capturadas en la ejecución de los sobrevuelos, mediante el uso del programa computacional Agisoft Metashape® (versión 1.4.5) (Agisoft, 2021). En este programa se realizaron los procesamiento fotogramétricos de las imágenes capturadas y se generaron los MDE de las dos unidades hidrográficas. Las ubicaciones de la cámara, el mapa de superposición de las fotografías y los detalles del informe de procesamiento, se pueden consultar en el Apéndice C.

En cuanto a la cuarta etapa de la Figura 14, esta se basó en la edición del MDE generado en la etapa anterior. Inicialmente, se corrigieron las zonas arbustivas que al generar el MDE fueron

consideradas parte del terreno. Posteriormente, se aplicaron algoritmos hidrológicos en el programa informático ArcMap™ (ESRI, 2020), para la corrección de zonas con píxeles mal definidos en el MDE, y el trazado de los parteaguas de las Unidades Hidrográficas Intervenida y No Intervenida. Los detalles de los procedimientos descritos se resumen en el Apéndice D.

Finalmente, la última etapa se basó en la aplicación de algoritmos en programas informáticos para el cálculo de los parámetros morfológicos de ambas unidades hidrográficas (Tablas 6, 7, 8 y 9). Para la aplicación de los algoritmos se usaron los siguientes programas: el paquete gratuito de RStudio® (versión 1.3.1093) (RStudio, 2020) y el ya mencionado ArcMap (versión 10.5) (ESRI, 2020). La metodología seguida en los dos programas para el cálculo de los parámetros se presenta en el Apéndice E.

5.2.2. Caracterización de suelos

Para la caracterización de los suelos se revisó el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Santander (IGAC, 2003). La metodología consistió en revisar detalladamente el texto y la información cartográfica digital del estudio (en escala 1:100000). De este modo, para las dos unidades se abordaron las características del suelo de la Tabla 11.

Tabla 11. Características del suelo estudiadas.

Categoría	Característica	Descripción
General	Cantidad de suelos	Enuncia la cantidad de los tipos de suelo encontrados en las unidades.
	Distribución	Hace referencia a los porcentajes de los tipos de suelo en las unidades.
Clasificación	Taxonomía	Se refiere a la clasificación taxonómica de los tipos de suelo.
	Orden	Se refiere al orden al que pertenece cada uno de los tipos de suelo identificados (p. ej., Entisol, Histosol, Inceptisol, etc.).
	Símbolo	Consiste en la simbología asignada a los tipos de suelo.
Ambiental	Paisaje	Hace referencia al tipo de paisaje característico de los suelos resultantes.
	Clima	Describe el clima ambiental típico de los tipos de suelo encontrados.
	Vegetación natural	Se refiere al tipo de vegetación predominante en los suelos.
Perfil	Clima edáfico	Hace referencia al clima interno de los tipos de suelo.
	Litología	Enuncia los tipos de rocas que predominan en las unidades de suelo.
	Drenaje	Alude de manera cualitativa a la capacidad de drenaje de los suelos.
	Profundidad efectiva	Profundidad de los suelos en la que las raíces de las plantas penetran fácilmente.
	Horizontes	Alude a los horizontes de los suelos con propiedades iguales y medibles.
	Detalle del perfil	Se refiere a los estratos del perfil de los suelos (hasta 1.50 m).
	Granulometría	Consiste en la distribución por tamaño de grano de los suelos encontrados.
	Limitantes de uso	Limitaciones que presentan los tipos de suelo para ciertas actividades.
Orografía	Tipo de relieve	Caracteriza el relieve geográfico según la orografía predominante.
	Grado de pendiente	Se refiere a la pendiente del terreno de los suelos identificados.

Adaptado de IGAC (2003).

5.2.3. Caracterización de coberturas del suelo

En esta investigación se usó un UAV con una cámara digital a bordo, para realizar el registro fotográfico y clasificar las coberturas de las unidades de manera supervisada, mediante el uso del programa informático ArcMap. La Figura 15 presenta las etapas metodológicas seguidas para la clasificación de las coberturas.

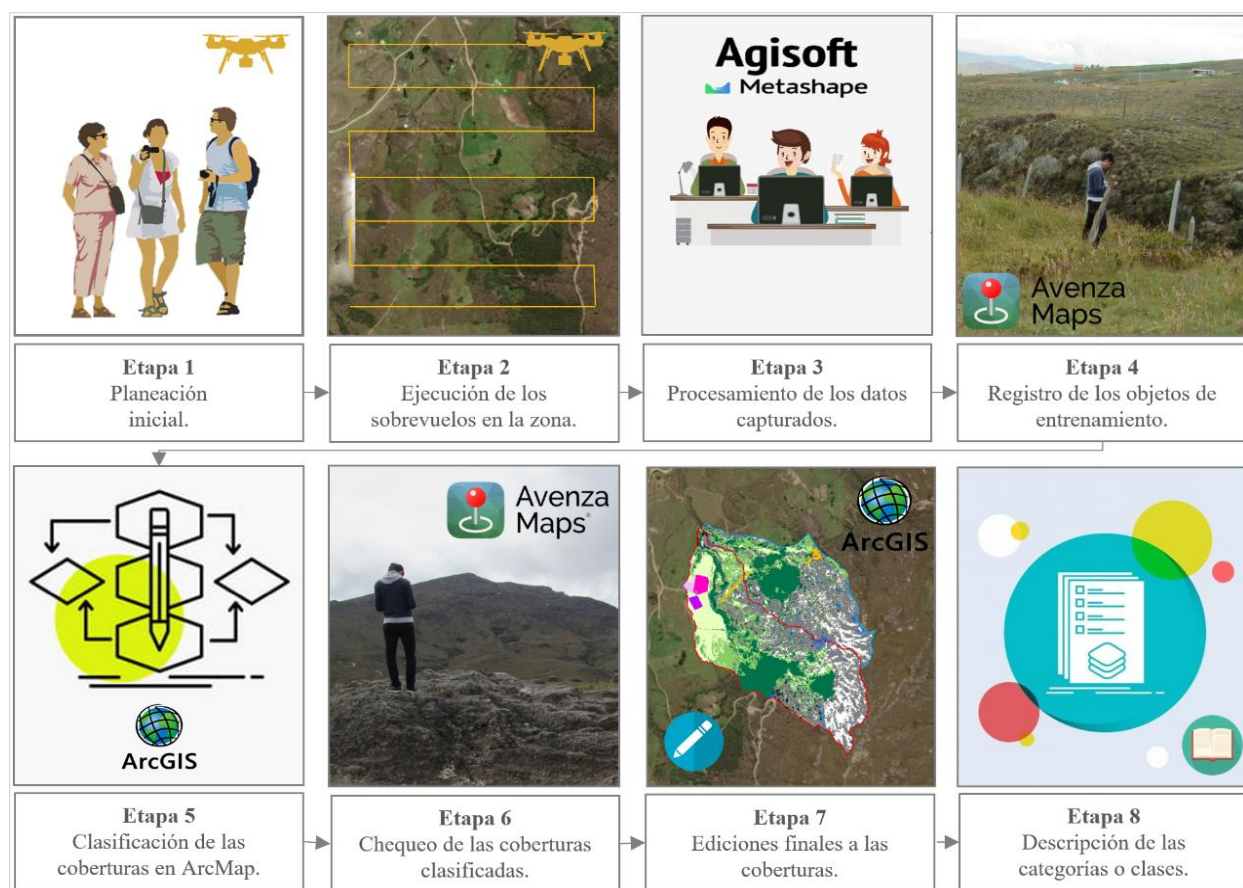


Figura 15. Etapas de la clasificación de coberturas de las dos unidades hidrográficas.

La primera y la segunda etapa de la clasificación de las coberturas (Figura 15), consistieron en los mismos procedimientos ejecutados en las dos primeras etapas de la generación del MDE (Figura 14); es decir, se realizaron por los mismos pilotos profesionales, con el mismo modelo de UAV y a través de los mismos sobrevuelos descritos en la Tabla 10. La única diferencia es que para la generación del ortomosaico, el cual es el insumo principal del proceso de clasificación, se utilizó el modelo de cámara digital Canon S110 NIR. Este modelo incorpora dos de los tres canales convencionales rojo, verde y azul (RGB), haciendo un reemplazo de la última banda por una variante de infrarrojo cercano (NIR). En detalle, las características de las tres bandas del sensor y las especificaciones de la cámara digital se presentan en el Apéndice F.

La tercera etapa de la clasificación de las coberturas (Figura 15), se basó en el procesamiento de las imágenes capturadas en los sobrevuelos. Esta etapa se ejecutó de manera similar al procedimiento para la generación del MDE, usando el programa Agisoft Metashape, utilizando como insumos las mismas ubicaciones de la cámara, y el mapa de superposición de fotografías para la creación de la nube de puntos densa (Apéndice C). Como resultado se obtuvo una imagen fotogramétricamente ortorectificada y con distorsiones geométricas corregidas, cuyo informe de procesamiento se presenta en el Apéndice G.

La cuarta etapa de la clasificación de las coberturas (Figura 15), consistió en el registro de los objetos de entrenamiento necesarios para la ejecución de la clasificación supervisada. Para ello, es necesario que el usuario identifique previamente los sitios más representativos de cada clase de cobertura presente en las unidades hidrográficas para que, posteriormente, el algoritmo de

clasificación tome la preselección realizada como criterio para clasificar las zonas restantes (NASA, 2017). En este estudio, los objetos de entrenamiento correspondieron a círculos trazados a través de: recorridos de campo; la captura de puntos en el aplicativo móvil Avenza Maps®; y el procesamiento de la información capturada en los programas ArcMap y Google Earth Pro. Los detalles específicos de la aplicación de este procedimiento se enuncian en el Apéndice H.

En la quinta etapa de la clasificación de las coberturas (Figura 15), se aplicó un algoritmo para la ejecución de la clasificación supervisada de las dos unidades. Este procedimiento se puede llevar a cabo a través de diferentes alternativas, como: el clasificador de máxima verosimilitud (MLC); el algoritmo contextual secuencial máximo (SMAP); el clasificador perceptrón basado en redes neuronales (MLP); y el algoritmo basado en árboles de decisión (RF) (Del Toro et al., 2015; García y Mas, 2008). A pesar que cada algoritmo ofrece distintas ventajas y desventajas, en esta investigación se usó el algoritmo de máxima verosimilitud (MLC) debido a que: se ajusta bien a la distribución normal de los datos capturados, se ha demostrado su efectividad en estudios similares (p. ej., Espinosa y Rivera, 2016), y el grupo de investigación tiene experiencia en la aplicación de esta alternativa en la zona de estudio (p. ej., Macias y Omaña, 2018).

En general, para la aplicación del algoritmo MLC se llevaron a cabo cuatro pasos en el programa ArcMap, los cuales consistieron en: (i) la aplicación de ajustes preliminares al archivo ráster del ortomosaico; (ii) la creación de un archivo de firma a partir de los datos de los objetos de entrenamiento definidos; (iii) la asignación de clases de cobertura a cada píxel del ortomosaico; y (iv) la corrección de imperfecciones del archivo ráster de clasificación generado. El detalle de los pasos anteriores se describe de manera detallada en el Apéndice I.

La sexta etapa de la clasificación de las coberturas (Figura 15), consistió en el chequeo de la clasificación generada en la etapa anterior, por medio de dos visitas a las unidades de estudio. Para ello, inicialmente se realizó una inspección visual en ArcMap, usando como criterio el conocimiento del sitio, los puntos de entrenamiento registrados, el ortomosaico y un ráster del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El NDVI se generó en ArcMap mediante la herramienta conocida como calculadora ráster (*Raster Calculator*), usando como insumos la banda roja y la de infrarrojo cercano. De esta manera, se propusieron 90 sitios para su posterior chequeo en campo. Los mapas del NDVI y los sitios propuestos para la revisión se visualizan en los Apéndices J y K respectivamente.

La séptima etapa de la clasificación de las coberturas (Figura 15), se basó en la edición final del mapa de coberturas chequeado. Teniendo en cuenta la revisión de las coberturas realizada en campo, se procedió a editar los polígonos que presentaban desaciertos en la asignación de clases. En general, no se realizaron correcciones significativas al producto final, pues las modificaciones se basaron principalmente en la corrección de límites y la reasignación de clases de pequeñas superficies. Todo el procedimiento de corrección de los polígonos se llevó a cabo en ArcMap usando la herramienta de edición conocida como *Edit Features* o *Editor*. Posteriormente, tras la edición de los polígonos, se procedió a generar el mapa en la vista de diseño del programa, teniendo en cuenta la asignación de rejilla, rótulo, símbolo de orientación cardinal, convenciones y escala.

Finalmente, la octava etapa de la clasificación de las coberturas (Figura 15), consistió en el nombramiento de las categorías de las coberturas identificadas. Este procedimiento se realizó usando como marco de referencia la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, definida por el IDEAM (2010) como resultado de la adaptación de la metodología *Corine Land Cover* (CLC) para el país. Esta metodología presenta algunas limitaciones, como que: (i) funciona bien para la generación de cartografía a escala 1:100000; (ii) se estableció pensando en la interpretación visual de imágenes satelitales; y (iii) usó como referencia la leyenda desarrollada para una cuenca

específica del país (Cauca-Magdalena). Por ello, además del uso de la leyenda generada por la metodología CLC, se usó un estudio que identificó de manera específica la vegetación de las dos unidades hidrográficas, el cual fue llevado a cabo por Löwer (2020).

En síntesis, la estrategia se basó en usar como soporte general para la denominación de las coberturas, el documento de la leyenda nacional del IDEAM (2010), mientras que, para las descripciones específicas se utilizó la información puntual descrita en el estudio de Löwer (2020). Cabe enunciar que la aplicación de esta metodología, se soportó en otras investigaciones que optaron por esta alternativa (Gallego, 2001; IAvH, 2014).

5.2.4. Caracterización de usos del suelo

Para la caracterización de los usos del suelo de las dos unidades hidrográficas, se adaptó una técnica de trabajo social conocida como cartografía participativa, la cual ha demostrado ser efectiva en el mapeo de estas actividades (Diez et al., 2012; Ojeda-Trejo et al., 2014). La aplicación de la metodología consistió en recorridos de campo, entrevistas semiestructuradas e interpretación de fotografías aéreas. Las actividades mencionadas se realizaron con la participación de los habitantes de las unidades hidrográficas, quienes realizaron el trazado de los usos del suelo y generaron un mapa en físico de las dos unidades, en el que se describen las actividades que se realizan en cada porción de tierra. Finalmente, en el programa computacional ArcMap se generó como resultado el mapa de usos de suelo definitivo, a partir de la información recopilada con los habitantes.

5.2.5. Caracterización geológica

En esta investigación se caracterizó la geología de las dos unidades hidrográficas, con la finalidad de involucrar este análisis como un componente clave en la discusión de los resultados. En función de lo anterior, la metodología aplicada se basó en la revisión de proyectos realizados en la misma área de estudio, específicamente, se consideraron los trabajos adelantados por: Bejarano y Navas (2018); Cetina (2019); Franco (2009); e Hincapié y Veloza (2009). Como resultados de la revisión se generaron mapas y descripciones de las formaciones geológicas de las dos unidades.

5.3. Caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas

La caracterización hidrometeorológica consiste en la captura y descripción de las variables más distintivas, que intervienen en las fases atmosférica y terrestre del ciclo hidrológico de las unidades de estudio (OMM, 2012). En esta caracterización, se generan los registros necesarios para el análisis del impacto de los cambios en los suelos, sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica de las dos unidades hidrográficas.

En función de lo anterior, las variables hidrometeorológicas consideradas y el registro de sus valores se llevó a cabo a través de: (i) un monitoreo pluviométrico automático, que consistió en un pluviómetro instalado por este estudio y dos adicionales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para el registro de las cantidades de lluvia; (ii) un monitoreo hidrométrico automático, que se basó en la instalación de dos canales de acrílico para la medición de los caudales en el cierre de las dos unidades; (iii) un monitoreo meteorológico automático, que residió en la instalación de sensores de temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa; y (iv) un monitoreo manual de extracciones hídricas, que consistió en la ejecución de aforos volumétricos al caudal del sistema de extracciones de la Unidad Intervenida. Según lo mencionado, el monitoreo considerado para el registro de las variables se detalla en la Figura 16.

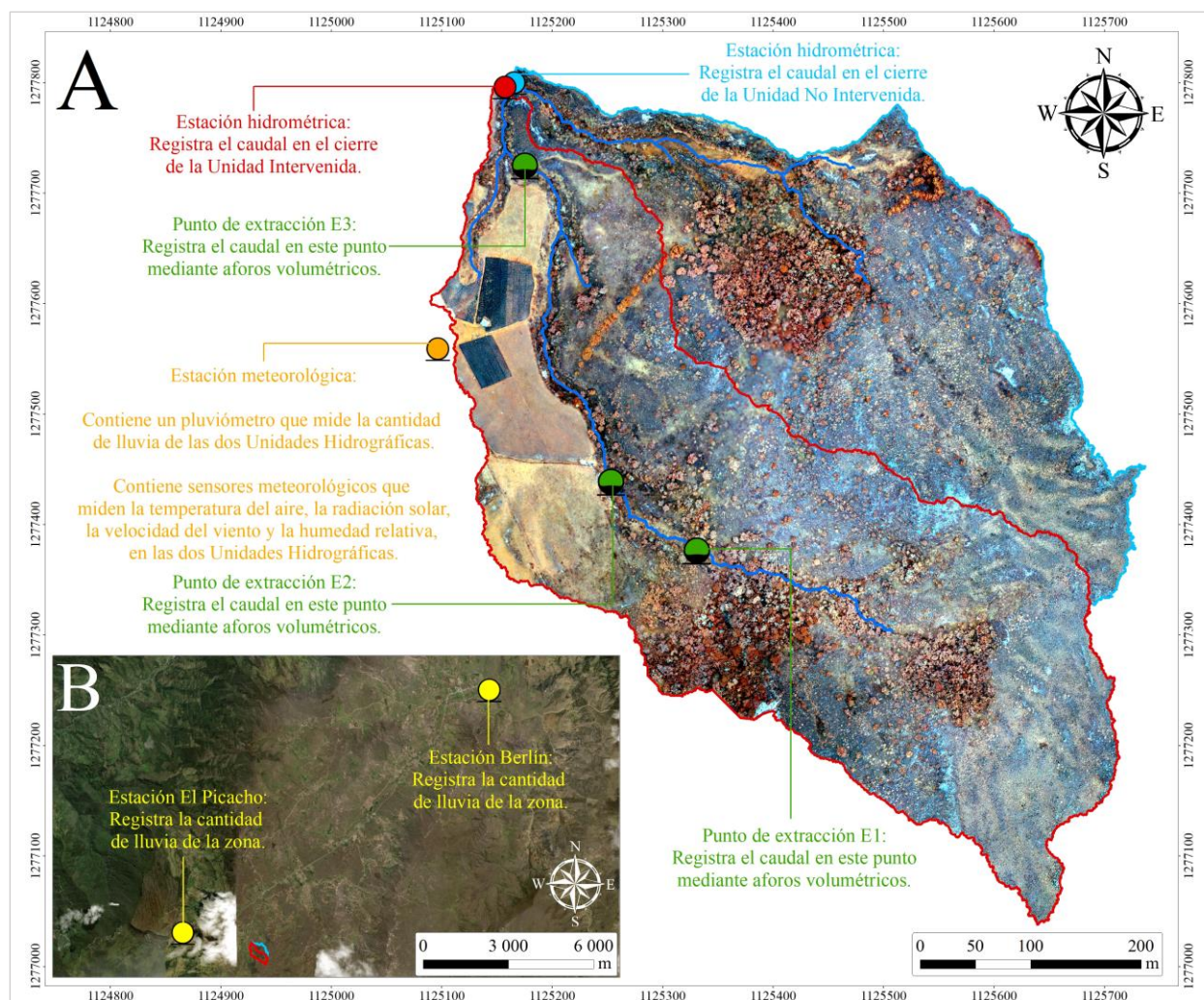


Figura 16. Localización de los monitoreos considerados. A) Monitoreos implementados por este proyecto. B) Monitoreos implementados por el IDEAM.

En cuanto a los intervalos de captura de las variables monitoreadas, los sistemas automáticos instalados (Figura 16A), registraron la información inicialmente en intervalos de 5 minutos y posteriormente en franjas de 15. La decisión del cambio se basó en las dificultades logísticas causadas por la pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2. Debido a ello, se ampliaron los intervalos con el objetivo de disminuir el número de datos, ampliar la duración del llenado de las memorias de los equipos y la frecuencia de las visitas. A pesar de ello, los registros presentan discontinuidades en algunos períodos, esto a causa de problemas técnicos relacionados con el funcionamiento del equipo y a la mencionada pandemia que saturó las memorias. Con respecto a las estaciones pluviométricas El Picacho y Berlín (Figura 16B), y a los monitoreos manuales realizados al sistema de extracciones (Figura 16A), en el primer caso los registros se reportaron a escala diaria, mientras que, en el segundo los aforos se realizaron en fechas específicas.

En función de lo planteado anteriormente, la Figura 17 sintetiza los intervalos de captura y las fechas límite consideradas en los períodos de monitoreo. Además de ello, en los siguientes tres numerales se presentan los detalles específicos de los equipos y monitoreos considerados, al igual que la metodología seguida para el análisis de los registros de las variables capturadas.

Estaciones hidrométricas (Figura 16A)	5 minutos		Sin datos		5 minutos		Sin datos		15 minutos		Sin datos		15 minutos	
	01/11/2019	20/02/2020	25/02/2020	19/03/2020	19/05/2020	08/09/2020	23/09/2020	30/04/2021						
Estación meteorológica (Figura 16A)	5 minutos			Sin datos			5 minutos			15 minutos				
	20/07/2019	19/03/2020			18/04/2020			18/05/2020			31/05/2021			
Estación El Picacho (Figura 16B)	24 horas													
	01/07/1967	31/05/2021												
Estación Berlín (Figura 16B)	24 horas													
	01/09/1969	31/05/2021												

Figura 17. Detalle de los períodos e intervalos de monitoreo de los sistemas automáticos.

5.3.1. Caracterización pluviométrica

Para la medición de la cantidad de lluvia en las dos unidades hidrográficas se instaló el pluviómetro de cubeta basculante WatchDog 1120 (ítem 3554WD1). Tal como se mencionó, el pluviómetro se montó en la estación meteorológica que además sostuvo a los demás sensores que monitorearon el tiempo. Las características del pluviómetro instalado se presentan en la Figura 18.

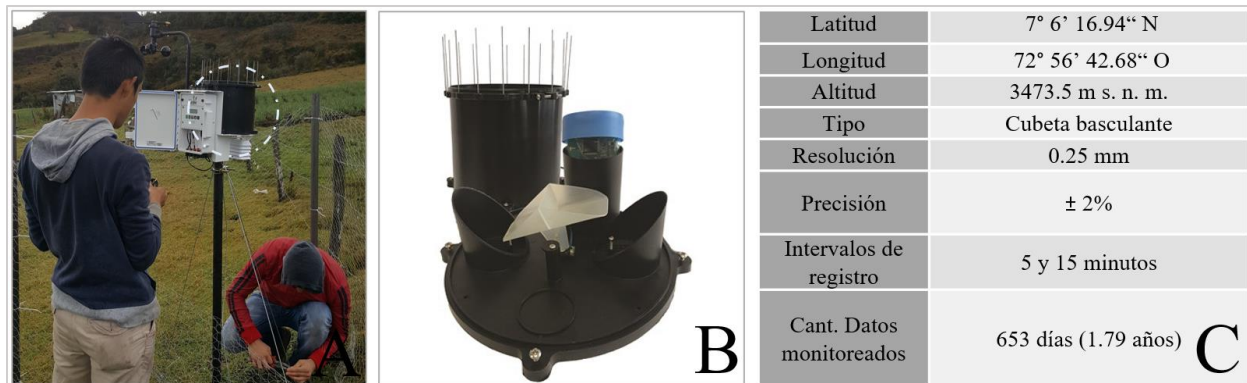


Figura 18. Sistema de monitoreo de lluvia instalado. A) Pluviómetro montado en la base de la estación meteorológica. B) Detalle interno del pluviómetro. C) Especificaciones del equipo.

La elección de la localización del equipo se basó en los criterios de disponerlo en un lugar abierto, accesible, sin interferencias de estructuras altas y seguro. En cuanto a la elección del pluviómetro y la cantidad de equipos, estas decisiones se sustentaron en la revisión de literatura. La revisión permitió identificar que para unidades pequeñas y muy cercanas, la captura de eventos para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, se puede hacer correctamente a través de un pluviómetro de cubeta basculante (p. ej., Cárdenas y Tobón, 2017).

De otro lado, en relación con las estaciones El Picacho y Berlín (Figura 16B), cabe mencionar que estas se localizan a una altura de 3310 y 3214 m s. n. m., y a distancias de 2.5 y 12.3 km de las dos unidades hidrográficas de estudio, respectivamente. Los registros de estas estaciones, se consideraron información de soporte para la descripción de la precipitación en la zona de estudio, en una escala espacial superior a las dos unidades hidrográficas.

Con respecto a la descripción de los registros de lluvia monitoreados por el pluviómetro instalado, el procesamiento se llevó a cabo mediante el estudio de las series de precipitación en escalas mensuales, diarias y de registro (5 y 15 minutos), a través de análisis basados en gráficas y estadística descriptiva. En cuanto a los registros de soporte monitoreados por las estaciones El Picacho y Berlín, los análisis se basaron en el régimen de precipitación anual de las lluvias.

5.3.2. Caracterización hidrométrica

La medición de los caudales se ejecutó en tres etapas (Figura 19). La primera, consistió en la construcción de un canal improvisado en polycarbonato para el predimensionamiento de las estructuras finales. La segunda, se basó en el diseño y la construcción de los canales definitivos, los cuales se dimensionaron a partir de: la realización de aforos volumétricos, la estimación del nivel máximo de la corriente y la aplicación de las ecuaciones del vertedero triangular (Sotelo, 1994). Finalmente, la tercera etapa radicó en la instalación de los canales hidráulicos.



Figura 19. Etapas preliminares. A) Predimensionamiento. B) Construcción. C) Instalación.

Posteriormente, la medición de los flujos se realizó mediante dos canales idénticos de acrílico, los cuales contaron con vertederos triangulares de 30° para la captura de los registros, todo ello siguiendo las recomendaciones halladas en la revisión de literatura (p. ej., Ochoa-Tocachi et al., 2018; Rosero-López et al., 2020). Adicionalmente, se instalaron tres transductores de presión absoluta (HOBO, U20L-04); dos sumergidos en el interior de los canales y uno localizado en el exterior. Como resultado el sistema de monitoreo de caudales se presenta en la Figura 20.

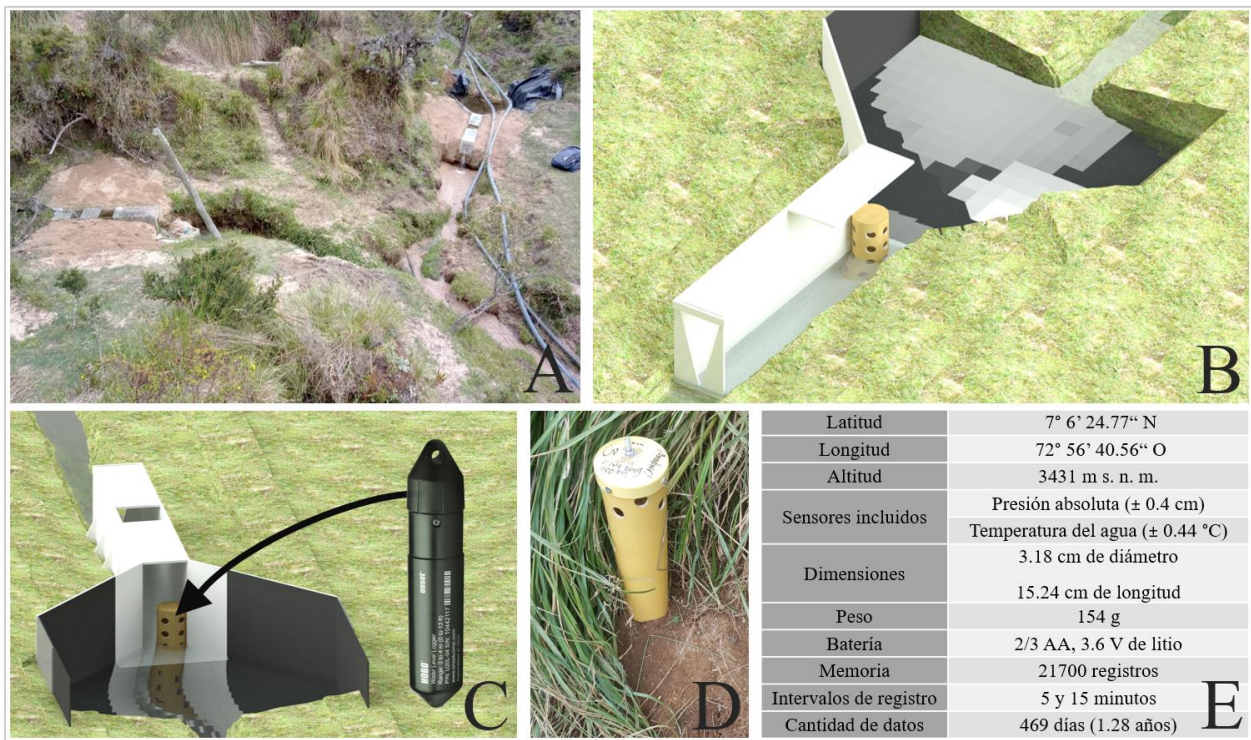


Figura 20. Sistema de monitoreo de caudales instalado. A) Estaciones hidrométricas en el cierre de las unidades. B) Detalle del interior de las estaciones. C) Detalle de los dos transductores sumergidos. D) Detalle del transductor externo. E) Especificaciones de los transductores.

En cuanto al análisis de los registros monitoreados por las dos estaciones hidrométricas, se realizaron actividades de calibración, conversión de niveles en caudales y estudio de las series de datos. La calibración se desarrolló por medio de salidas de campo en las que se realizaron aforos volumétricos y medición de niveles en los transductores, con la finalidad de relacionar estos valores a través del procedimiento descrito por Hamill (2011). Como resultado, se generaron dos ecuaciones hidráulicas asociadas a las dos estructuras de medición, que permitieron la estimación de los caudales a partir del registro de los niveles (Apéndice L).

Finalmente, los valores de los caudales monitoreados se procesaron mediante el análisis de series en escalas de registro (5 y 15 minutos), diarias y mensuales, a través de análisis basados en gráficas y estadística descriptiva.

5.3.3. Caracterización meteorológica

Para la medición de las variables meteorológicas, se instaló la estación automática WatchDog 2900ET (Figura 21). La decisión de instalar este sistema de monitoreo se soportó en la revisión de literatura, pues allí se logró evidenciar que, aunque no es completamente necesario contar con una estación para este tipo de investigaciones, resulta importante instalar a lo sumo una, ya que permite la caracterización meteorológica de las unidades y la estimación de variables involucradas en balances hídricos básicos, como la evapotranspiración de referencia. En cuanto a la selección del modelo, la revisión permitió identificar investigaciones hidrológicas en las que se utilizó la misma referencia y se obtuvieron resultados adecuados (p. ej., Brédy et al., 2020; Ouyang et al., 2017).

	Latitud	7° 6' 16.94" N
	Longitud	72° 56' 42.68" O
	Altitud	3473.5 m s. n. m.
	Tamaño	30 cm x 21.5 cm x 30 cm
	Peso	2.9 kg
	Fuente de poder	4 Baterías AA
	Sensores incluidos	Temperatura del aire (± 0.6 °C)
		Humedad relativa ($\pm 3\%$)
		Radiación solar ($\pm 5\%$)
		Punto de rocío (± 2 °C)
		Dirección del viento ($\pm 4^\circ$)
	Intervalos de registro	5 y 15 minutos
	Cant. Datos monitoreados	653 días (1.79 años)

Figura 21. Sistema de monitoreo meteorológico instalado. A) Estación automática. B) Detalles de la estación.

En relación con el análisis de las variables monitoreadas por los sensores meteorológicos, el procesamiento se realizó mediante la descripción de la evapotranspiración de referencia usando el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006) y el trabajo realizado por Gómez (2022), basados en la información registrada de la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. El procesamiento se realizó usando técnicas de estadística descriptiva y el uso de gráficas, para el estudio de las series intradiarias y/o mensuales de la evapotranspiración de referencia, junto a las cuatro variables que sirvieron de insumos para su cálculo.

5.3.4. Caracterización de extracciones hídricas

La caracterización de extracciones se refiere a la descripción del sistema de suministro hídrico evidenciado en la Unidad Intervenida. Es común que en áreas rurales la distribución del agua se gestione de manera artesanal, empleando elementos como tanques construidos *in situ*, mangueras de polietileno y zanjias con revestimiento natural (Forero y Veloza, 2018). Según la revisión de literatura, esta cuestión no ha sido abordada de manera específica en investigaciones similares a

esta; sin embargo, la caracterización de este fenómeno debe ser considerada, debido a que las extracciones hídricas perturban el hidrograma de la Unidad Intervenida, pues al desviar los flujos naturales una cantidad de agua de la unidad no es contabilizada en el cierre. Por ello, dado que los métodos que evalúan el abastecimiento y la regulación hídrica toman como insumo el hidrograma monitoreado por la estación hidrométrica, se podrían generar enmascaramientos en los impactos.

Ante este panorama, a través de reuniones con el equipo de trabajo se diseñó una metodología para abordar la problemática descrita (Figura 22). En general, la metodología consistió en las tres etapas siguientes: (i) la identificación de los sistemas de extracción, realizada a través de recorridos de campo; (ii) el registro de caudales, ejecutado mediante aforos volumétricos realizados en fechas distintas; y (iii) el análisis de los flujos aforados, por medio del Índice de Uso de Agua (IUA), el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH) y el uso de estadística descriptiva. Los detalles de la ejecución de cada etapa se pueden consultar en el Apéndice M.

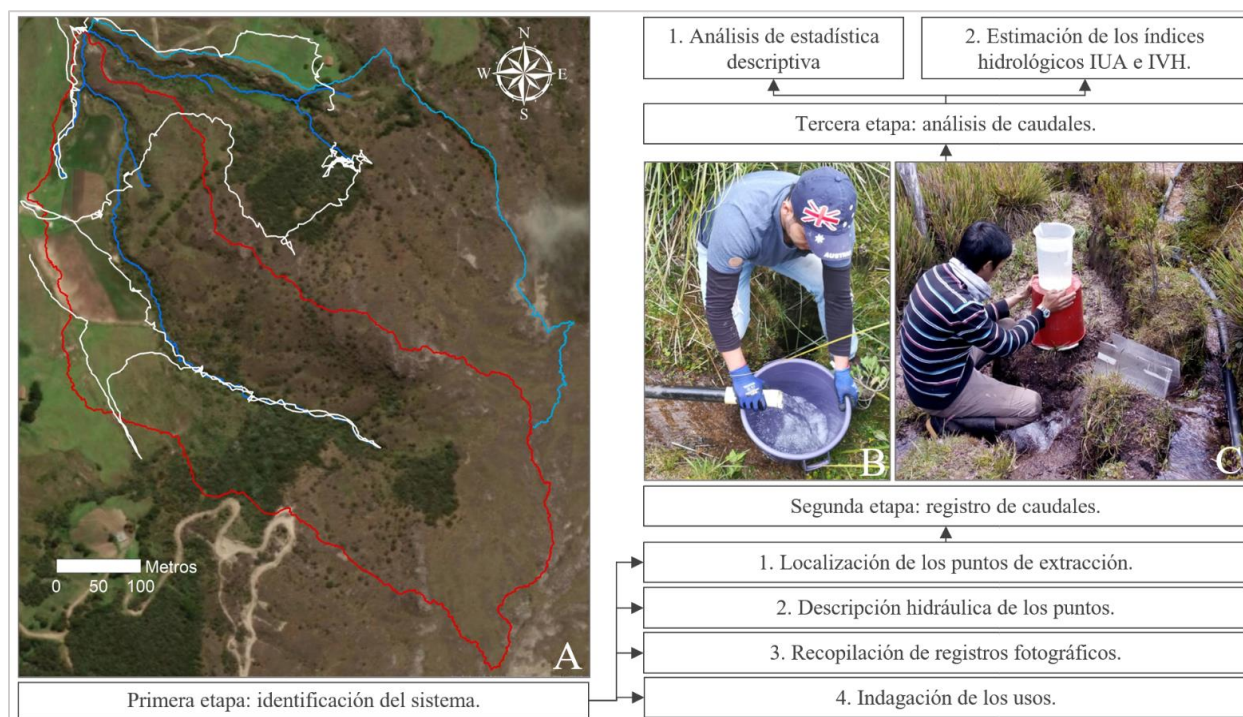


Figura 22. Metodología para la caracterización de las extracciones hídricas. A) Trayectorias de las salidas de campo para la identificación del sistema. B) y C) Aforos volumétricos.

5.4. Evaluación de los impactos hidrológicos sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica

Para la evaluación de los impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, causados por las alteraciones en los usos y las coberturas de los suelos de las dos unidades, se aplicó una serie de métodos e índices hidrológicos que, a partir de los registros monitoreados por los sistemas instalados, permitieron describir el estado de los dos servicios en ambas unidades hidrográficas. En la evaluación se usaron tres etapas: una de selección, otra de estimación y una de discusión. Con respecto a ello, la metodología de las tres etapas se presenta en los numerales siguientes.

5.4.1. Selección de métodos e índices hidrológicos

La primera etapa consistió en el establecimiento de pautas para la elección de los métodos e índices hidrológicos más apropiados, con el fin de evaluar el estado de los servicios de abastecimiento y

regulación hídrica en las dos unidades hidrográficas. Para ello, se establecieron criterios basados en: (i) la revisión de literatura (Tabla 3), que a partir de sus resultados permitió identificar los métodos e índices que se han usado en investigaciones similares; (ii) la coherencia con el objetivo central de la investigación, puesto que algunos métodos e índices estudian aspectos diferentes a los relacionados con los servicios de abastecimiento y regulación hídrica; (iii) la aplicabilidad en función de las variables y períodos monitoreados, ya que algunos métodos e índices necesitan información muy específica con la que no se cuenta en esta investigación; y (iv) las recomendaciones establecidas por Olden y Poff (2003), que se basan en la elección de índices no redundantes que representen las diferentes facetas de los regímenes de flujo. Tras la consideración de los criterios descritos, se consolidó la lista de métodos e índices hidrológicos seleccionados para la evaluación de los impactos, tal como se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Métodos e índices hidrológicos seleccionados para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.

Cat.	Denominación	Unidad	Id.	Descripción
Métodos hidrológicos	Curva de duración de caudal	N/A	CDC	Curva que indica el porcentaje de tiempo en el cual, los caudales fueron igualados o excedidos con respecto a un valor específico.
	Análisis de hidrogramas	N/A	AHIDRO	Hace referencia a los análisis posibles de los hidrogramas monitoreados. Pueden variar en escala temporal, analizando eventos, días o meses.
	Análisis de hietogramas	N/A	AHIETO	Hace referencia a los análisis posibles de los hietogramas monitoreados. Pueden variar en escala temporal, analizando eventos, días o meses.
	Curvas acumuladas	N/A	CACUM	Se refiere a la construcción de curvas, basadas en la acumulación de las variables básicas del balance hídrico (p. ej., precipitación y descarga).
Servicio de abastecimiento hídrico	Caudal mínimo	$\frac{l}{s * ha}$	QDMIN	Corresponde al flujo diario mínimo, registrado en el período de monitoreo.
	Caudal medio	$\frac{l}{s * ha}$	QDMY	Corresponde al flujo diario promedio del período monitoreado.
	Caudal del quincuagésimo percentil	$\frac{l}{s * ha}$	Q50	Hace referencia al valor de caudal que es superado por el 50% de los caudales registrados en la CDC.
	Caudal medio del mes más seco	$\frac{l}{s * ha}$	QMDRY	Corresponde al caudal medio diario, registrado en el mes más seco del período monitoreado.
	Caudal medio del mes más húmedo	$\frac{l}{s * ha}$	QMWET	Se refiere al caudal medio diario, registrado en el mes más húmedo del período monitoreado.
	Caudal máximo	$\frac{l}{s * ha}$	QDMAX	Corresponde al flujo diario máximo, registrado en el período monitoreado.
	Caudal del quinto percentil	$\frac{l}{s * ha}$	Q95	Se refiere al valor de caudal que es superado por el 95% de los caudales registrados en la CDC.
	Caudal del nonagésimo percentil	$\frac{l}{s * ha}$	Q10	Corresponde al valor de caudal que es superado por el 10% de los caudales registrados en la CDC.
	Descarga general	mm	DG	Hace referencia a la cantidad de agua normalizada y descargada por las unidades en el cierre, durante el período monitoreado.
	Descarga del mes más seco	$\frac{mm}{mes}$	DMDRY	Corresponde a la cantidad de agua normalizada y descargada por las unidades en el cierre, para el mes más seco.
	Descarga del mes más húmedo	$\frac{mm}{mes}$	DMWET	Corresponde a la cantidad de agua normalizada y descargada por las unidades en el cierre, para el mes más húmedo.
	Rendimiento hídrico	N/A	RH	Coficiente entendido como la proporción de precipitación que se convierte en caudal.

Servicio de regulación hídrica	Variabilidad del flujo	N/A	QVAR	Coefficiente de variación de los flujos diarios durante el período monitoreado.
	Tiempos asociados a las constantes de recesión de eventos	Hora	T	Se refiere al inverso de las pendientes correspondientes a los tres tramos de los hidrogramas de eventos, según el concepto del reservorio lineal. Normalmente, se promedian a partir del análisis de muchos eventos en las unidades hidrográficas.
	Rango de descarga	N/A	RANGE	Corresponde a la relación entre el caudal diario máximo (QDMAX) y mínimo (QDMIN).
	Rango de descarga de la curva de duración de caudal	$\frac{1}{s * ha}$	RANGQ	Corresponde a la diferencia entre los extremos del flujo registrados en la CDC.
	Rango entre los percentiles alto y bajo	$\frac{1}{s * ha}$	RANHL	Diferencia entre los percentiles 75 y 25 de los registros de caudal diario.
	Pendiente de la curva de duración de caudal	N/A	R2FDC	Pendiente que se asocia al tercio medio de la CDC.
	Índice de regulación hidrológica	N/A	IRH	Es un índice asociado al régimen de las unidades hidrográficas que, califica la capacidad de retención y regulación hídrica a través de la forma de la CDC.
	Índice <i>flashiness</i> de Richards-Baker	N/A	RB3	Índice que cuantifica las oscilaciones del caudal en relación con el flujo total. Además, proporciona una caracterización útil de la forma en que las unidades, procesan las entradas de agua en sus salidas en el período de monitoreo.
	Cantidad de flujos bajos	N/A	FL	Se refiere a la cantidad de caudales valle (bajo el percentil 25), contados en el hidrograma de la unidad hidrográfica.
	Cantidad de flujos altos	N/A	FH	Se refiere a la cantidad de caudales pico (sobre el percentil 75), contados en el hidrograma de la unidad hidrográfica.
	Duración promedio de flujos bajos	Día	DLQ75	Se refiere a la duración promedio de los caudales bajo el percentil 25 de los registros del hidrograma.
	Duración promedio de flujos altos	Día	DHQ25	Se refiere a la duración promedio de los caudales sobre el percentil 75 de los registros del hidrograma.
	Proporción de días con incremento de flujo	N/A	RA	Proporción de días con respecto al período monitoreado, donde el caudal diario resulta ser más alto que el del día inmediatamente anterior.
	Simetría de los flujos	N/A	SIMQD	Hace referencia al coeficiente de simetría de los flujos diarios. Se estima como una relación entre la media y la mediana.

Notas:

N/A: No Aplicable.

Adaptado de la Tabla 3.

5.4.2. Estimación de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica

La estimación de los impactos hidrológicos causados por los cambios en el uso y la cobertura de los suelos, se llevó a cabo mediante la aplicación de los métodos e indicadores seleccionados (Tabla 12). La aplicación se realizó a través del procesamiento de los registros en el programa computacional Microsoft Excel®, teniendo en cuenta los requerimientos y las particularidades de cada método e índice hidrológico. Finalmente, los resultados generados se analizaron por medio del uso de gráficas y técnicas de estadística descriptiva, tales como: gráficos de dispersión; diagramas de barras; análisis de proporciones; líneas de tendencia; diagramas de cajas; y análisis de frecuencias, entre otros.

5.4.3. Discusión de resultados

Tras la selección de los métodos e índices hidrológicos y la estimación de sus valores, se llevó a cabo el proceso de discusión de resultados. La discusión se realizó teniendo en cuenta: (i) la revisión de literatura, que permitió comparar los resultados con los de otras investigaciones

similares realizadas en páramos (investigaciones de las Tablas 2 y 4); (ii) las caracterizaciones geomorfológica e hidrometeorológica de las unidades, a través de las cuales se soportaron los resultados y sus posibles relaciones; (iii) la información secundaria del sitio de estudio; y (iv) la opinión de expertos en el área, quienes a través de su experiencia realimentaron el proceso.

6. Resultados y discusión

En esta sección del documento se presentan y discuten los resultados acerca del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, ofertados por las Unidades Hidrográficas Intervenida y No Intervenida. Tal como se planteó en la metodología (numeral 5), en este apartado se incluyen los resultados de las caracterizaciones geomorfológica e hidrometeorológica, además de la evaluación de los impactos hidrológicos a los dos servicios.

6.1. Caracterización geomorfológica de las unidades hidrográficas

En esta parte se discuten los resultados de la metodología para la caracterización geomorfológica de las dos unidades hidrográficas (numeral 5.2). Los resultados incluyen la caracterización morfológica de las unidades, de sus tipos de suelo, sus coberturas, sus usos y aspectos geológicos.

6.1.1. Caracterización morfológica

En relación con los parámetros geométricos (Tabla 13), los resultados evidenciaron que el sitio de estudio está representado por dos unidades hidrográficas cercanas, pequeñas, largas y angostas. La distancia entre la localización de los centroides de las unidades según la fórmula de Haversine (Antunez y Hernández, 2011), resultó ser de apenas 221 m. Según el área, las unidades se clasificaron como cuencas muy pequeñas o microcuencas (Verdugo, 2017). Con respecto a la longitud y el ancho, los resultados demostraron que las dos unidades tienden a ser más largas que anchas, en factores de 4.31 y 4.57 para las Unidades Intervenida y No Intervenida respectivamente.

Tabla 13. Parámetros geométricos.

Parámetro		Unidad	Unidad Intervenida	Unidad No Intervenida
Localización	Lat.	° ‘ ‘ ’’	7°6’11.66’’ N	7°6’18.10’’ N
	Long.	° ‘ ‘ ’’	72°56’33.14’’ O	72°56’29.99’’ O
Área		ha	18.911	11.130
Perímetro		m	3018.794	2347.394
Longitud		m	902.556	713.209
Ancho		m	209.527	156.055

En comparación con los parámetros geométricos recopilados en la revisión bibliográfica (Tabla 1), las áreas de las dos unidades se ubicaron entre los valores más bajos del conjunto de datos. Según Toebe y Ouryvaev (1970) esto no constituye una desventaja, por el contrario, seleccionar unidades menores que 4 km² facilita el control y monitoreo de las variables hidrometeorológicas. Por otra parte, el hecho de que las unidades no tengan exactamente el mismo tamaño no es una razón de preocupación, debido a que la relación entre las áreas de las unidades (1:1.7) no supera la proporción recomendada (1:10) (Toebe y Ouryvaev, 1970). Otro resultado positivo que valida el experimento es la localización relativa de las unidades, pues al estar en una posición tan cercana, se garantiza la similitud climática y geomorfológica que demanda la investigación.

Con respecto a los parámetros de forma (Tabla 14), los valores asociados a las unidades hidrográficas resultaron ser muy similares entre sí. Al estimar las diferencias porcentuales de los parámetros, se encontró que en promedio difieren en 10.8%. Este porcentaje ratifica la gran

similitud que presentan las dos unidades, lo cual es primordial para la aplicación del enfoque adaptado de cuencas pareadas, sobre todo, si se tiene en cuenta que los patrones asociados a la forma hacen parte de los componentes que definen la respuesta hidrológica de las unidades.

Tabla 14. Parámetros de forma.

Parámetro	Unidad	Unidad Intervenida	Unidad No Intervenida
Índice de alargamiento	N/A	2.760	2.546
Coefficiente de compacidad de Gravelius	N/A	1.958	1.984
Factor de forma de Horton	N/A	0.232	0.219
Relación de elongación	N/A	0.543	0.528
Relación de circularidad	N/A	0.261	0.254
Dimensión larga del rectángulo equivalente	m	1371.513	1069.644
Dimensión corta del rectángulo equivalente	m	137.884	104.053
Factor de forma del rectángulo equivalente	N/A	0.101	0.097

N/A: no aplicable.

En función de lo anterior los resultados evidenciaron que según los parámetros de forma, las unidades hidrográficas se pueden definir cualitativamente como: moderadamente alargadas, pues sus índices de alargamiento resultaron entre 1.5 y 2.8 (INE, 2004); de formas rectangulares oblongas, debido a que sus coeficientes de compacidad superaron el valor de 1.75 (Gaspari et al., 2012); ligeramente achatadas, puesto que sus factores de forma resultaron entre 0.18 y 0.36 (INE, 2004); de fuertes relieves y pendientes pronunciadas, ya que sus relaciones de elongación resultaron cercanas a 0.6 (Campos, 1998); no circulares, debido a que sus relaciones de circularidad resultaron muy lejanas a 1.0 (Díaz et al., 1999); y análogas a rectángulos equivalentes muy alargados, cuyos factores de forma corresponden a unidades muy poco achatadas (INE, 2004).

Al comparar los resultados de las dos unidades, con respecto a los parámetros de forma recopilados en la revisión de literatura (Tabla 1), se identificó que las Unidades Intervenida y No Intervenida presentan una de las formas más usuales de las cuencas de páramo, específicamente, formas ovaladas alargadas. Con respecto a ello, los resultados de este tipo de forma según distintos autores (Camino et al., 2018; Campos, 1998), se caracterizan por presentar respuestas hidrológicas más reguladas que unidades hidrográficas más circulares (menos alargadas). En otras palabras, estas unidades suelen presentar crecientes más controladas y tiempos de concentración mayores.

En cuanto a los parámetros de relieve (Tabla 15), los resultados evidenciaron que en términos topográficos las dos unidades son prácticamente iguales, con apenas una diferencia porcentual de 4.6% en promedio. El hecho de que las unidades hidrográficas sean tan similares en sus condiciones topográficas, soporta el enfoque adaptado de cuencas pareadas, sobre todo si se tiene en cuenta que de las características topográficas dependen en gran medida las respuestas hidrológicas de las corrientes.

Tabla 15. Parámetros de relieve.

Parámetro	Unidad	Unidad Intervenida	Unidad No Intervenida
Altitud máxima	m s. n. m.	3666.986	3635.474
Altitud mínima	m s. n. m.	3430.900	3430.900
Altitud media	m s. n. m.	3549.696	3538.093
Rango de altitud	m	236.086	204.574
Nonagésimo quinto percentil (95 th) de altitud	m s. n. m.	3653.228	3625.708

Quinto percentil (5th) de altitud	m s. n. m.	3457.281	3454.516
Pendiente máxima de la unidad	°	87.935	86.946
Pendiente mínima de la unidad	°	0.000	0.000
Pendiente media de la unidad	°	24.259	27.118
Pendiente media de la corriente principal	°	11.592	13.374

En términos relativos, los resultados de los parámetros de relieve denotaron patrones interesantes en relación con la altitud y la pendiente de las unidades. Con respecto a la altitud se encontró que, a pesar de que las unidades comparten la misma cota de cierre debido a su adyacencia (3430.9 m s. n. m.), la Unidad Intervenida abarca un rango altitudinal mayor (en 31.5 m), llegando casi a la curva de nivel de valor 3667 m s. n. m. La distribución de altitudes de las unidades, representada en los parámetros de relieve (percentiles 5th, 95th y altitud media) evidenciaron que, para valores de elevación bajos, las unidades presentan comportamientos muy similares, pero a medida que la elevación aumenta, las unidades tienden a diferenciarse. Esta observación se puede revisar de manera detallada en la Figura 23.

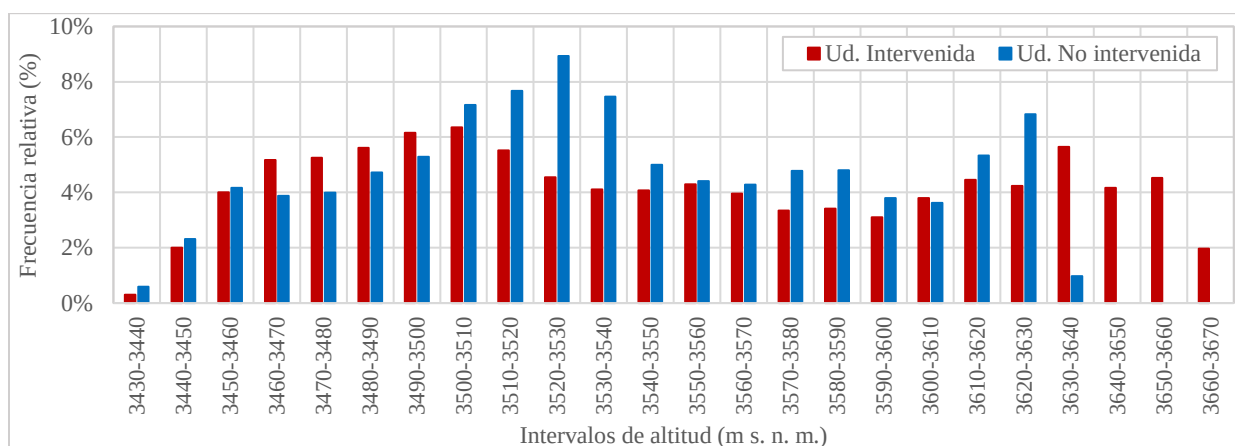


Figura 23. Histogramas de valores de altimetría de las unidades.

Los histogramas de valores de elevación (Figura 23), presentan los porcentajes de las áreas de las unidades hidrográficas que se encuentran acotadas por intervalos de altitud establecidos. En general, la forma de los histogramas y sus valores resultaron ser similares para ambas unidades. Los rangos de variación de cada histograma resultaron iguales a 6.05 y 8.34% para las Unidades Intervenida y No Intervenida, respectivamente. Al ser pequeñas las variaciones, indican que en general existe regularidad en los anchos y las pendientes de las unidades, siendo la Unidad No Intervenida un poco más irregular. En este sentido, se puede concluir que las unidades aumentan casi el mismo porcentaje de área a medida que aumenta gradualmente la altitud. Esta observación se puede confirmar al analizar las curvas hipsométricas de la Figura 24.

Las curvas hipsométricas (Figura 24), representan el área relativa de cada unidad con respecto al área total, que se puede encontrar sobre cortes altitudinales relativos a la cota del punto de cierre. En este caso las curvas son prácticamente iguales, lo que confirma la gran similitud que existe entre las características topográficas de las unidades. En general, las dos curvas hipsométricas presentaron comportamientos lineales, cuyas rectas de tendencia tienen en promedio una pendiente cercana a los 45° (42.9°), lo cual implica que casi se gana o pierde el mismo porcentaje de área, en desplazamientos con el mismo porcentaje de altitud.

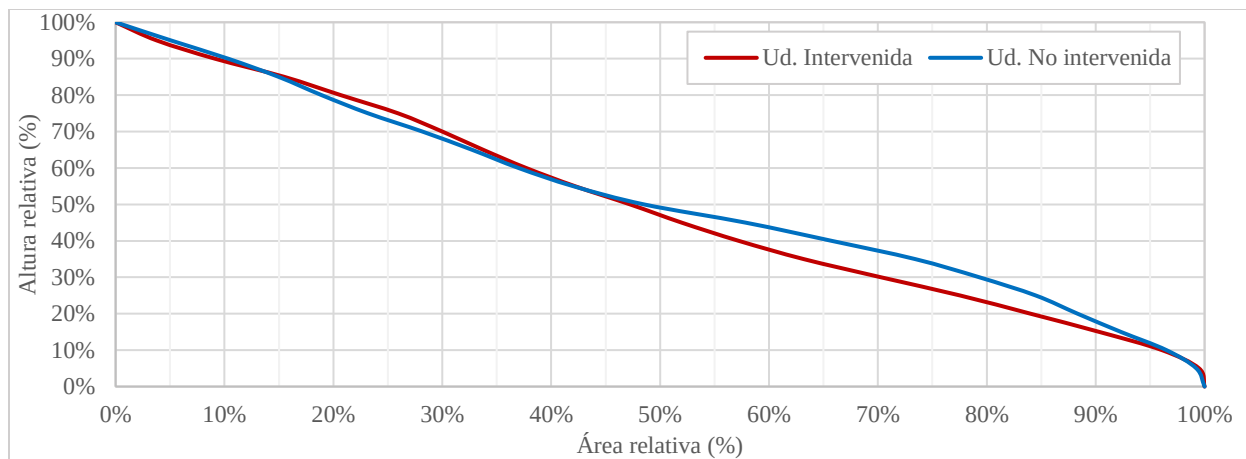


Figura 24. Curvas hipsométricas.

Este patrón ha sido descrito como una condición de equilibrio por parte de las unidades hidrográficas, en el cual, las unidades se encuentran en una etapa intermedia de madurez; es decir, ni tan jóvenes, ni tan viejas (Posada, 1994). Esta etapa de equilibrio, es una expresión del logro de un estado estacionario en los procesos de erosión y transporte del sistema fluvial (Strahler, 1950). En otras palabras, implica que las unidades hidrográficas poseen cauces desarrollados, pendientes bien definidas, sistemas de corrientes estables y se encuentran sometidas a procesos erosivos equilibrados, en los cuales, las fuerzas erosivas disponibles están controladas por fuerzas resistivas de cohesión generadas por el lecho rocoso, el suelo y la cobertura vegetal (Strahler, 1952).

Las pendientes de las unidades hidrográficas, según los resultados de la Tabla 15, también guardan mucha similitud entre las dos unidades. Se observa que las pendientes máximas y mínimas resultaron ser prácticamente iguales, mientras que, la pendiente media de la Unidad No Intervenida, resultó ser un poco mayor que la de la Unidad Intervenida (en 2.86°). En consecuencia, los parámetros de pendiente indican que la Unidad No Intervenida está más inclinada que la Unidad Intervenida. Este comportamiento se aprecia mejor en los perfiles topográficos de la Figura 25.

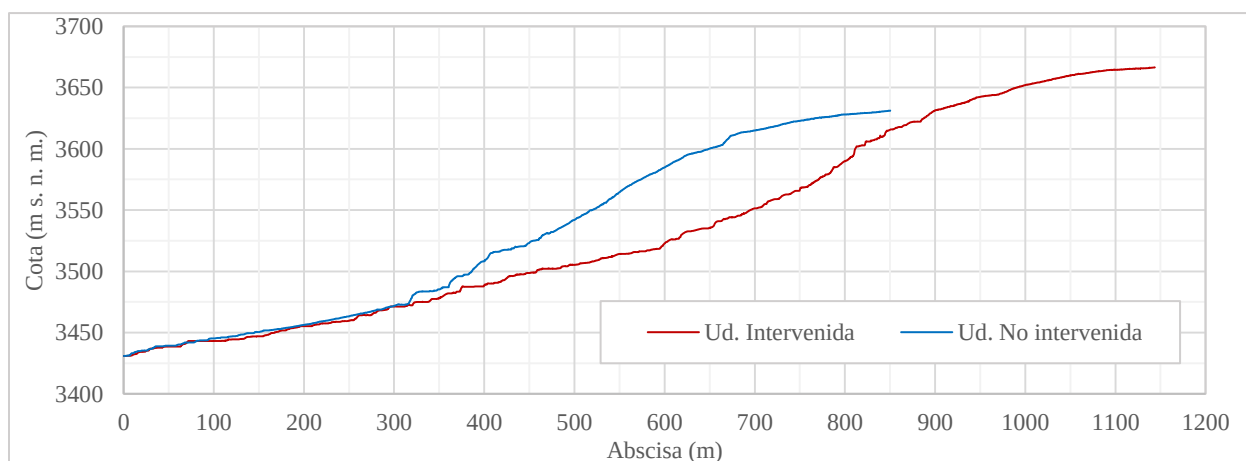


Figura 25. Perfiles topográficos de los cauces de las corrientes principales.

Los perfiles de las corrientes principales (Figura 25), muestran que el comportamiento topográfico de los cauces se caracteriza por la presencia de tres zonas: la primera, que consiste en

pendientes bajas y se localiza en las elevaciones más pequeñas de las unidades; la segunda, que presenta pendientes más inclinadas y se ubica en las elevaciones medias de cada unidad; y la tercera, que se caracteriza por pendientes bajas y se localiza en las partes más altas. En general, ambos perfiles presentaron el mismo patrón (cóncavos abajo y convexos arriba); sin embargo, la Unidad No Intervenido ostentó una transición un poco más abrupta. El hecho de que esté un poco más inclinada no constituye un problema para el experimento, pues en promedio las pendientes de los cauces principales son casi las mismas (diferencia de 1.78°, Tabla 15). La Figura 26 presenta otra alternativa para el análisis del comportamiento de las pendientes en las dos unidades.

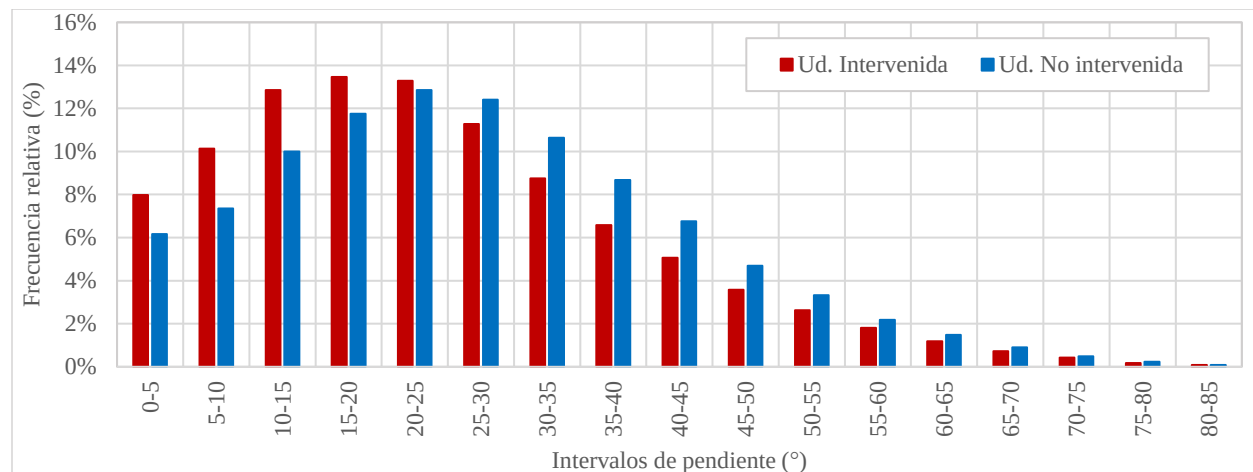


Figura 26. Histogramas de valores de pendiente de las unidades.

Las distribuciones de pendientes de las unidades (Figura 26), evidenciaron que la Unidad Intervenido tiende a acumular más superficie en las pendientes menores (de 0 a 25%) que la Unidad No Intervenido, mientras que, para las pendientes mayores (de 25 a 85%) el comportamiento se invierte. Estas características confirman que la Unidad Intervenido es un poco menos inclinada que la Unidad No Intervenido, tal como lo evidenciaron los perfiles topográficos (Figura 25); sin embargo, las diferencias promedio de las barras (1.1%) confirman que la variación es mínima.

Las pendientes desempeñan un rol importante en la respuesta hidrológica de las unidades hidrográficas (Chow et al., 1994), en este caso según los resultados, las pendientes más inclinadas de la Unidad No Intervenido promueven respuestas hidrológicas más rápidas que las de la Unidad Intervenido. A pesar de ello, otros factores también influyen en la respuesta hidrológica de las unidades, como lo son los parámetros relacionados con la red de canales (Tabla 16).

Con respecto a los parámetros de la red de canales (Tabla 16), las dos unidades hidrográficas presentaron similitud en la mayoría de ellos. Los únicos parámetros que se diferenciaron un poco entre las unidades correspondieron a las longitudes de las corrientes y los tiempos de concentración. En cuanto a las longitudes de las corrientes, resulta normal que la Unidad Intervenido supere a la Unidad No Intervenido, sobre todo si se tiene en cuenta que el área de la primera es mayor; sin embargo, sus densidades de corriente son prácticamente iguales (≈ 0.005), por lo cual, este factor no constituye un inconveniente para el enfoque adaptado de cuencas pareadas. De otro lado, en relación con el tiempo de concentración, la Unidad Intervenido superó en 2.013 minutos al tiempo de la Unidad No Intervenido. Según este resultado, se espera una respuesta hidrológica un poco más rápida en la Unidad No Intervenido, debido a la menor longitud del cauce de la corriente principal y su pendiente superior.

Tabla 16. Parámetros de la red de canales.

Parámetro	Unidad	Unidad Intervenido	Unidad No Intervenido
Caracterización de la red de canales	N/A	Dendrítica-Paralela	Dendrítica-Paralela
Jerarquización de la red fluvial	N/A	2	2
Relación de bifurcación	N/A	3	3
Longitud de las corrientes	m	998.971	553.414
Longitud de la corriente principal	m	808.766	449.633
Densidad de drenaje	1/m	0.00528	0.00497
Tiempo de concentración	min	8.113	6.100

N/A: no aplicable.

En síntesis, morfológicamente las dos unidades hidrográficas son prácticamente iguales, salvo por algunos aspectos (de pendiente y longitud) que influyen en una respuesta hidrológica apenas un poco más rápida en la Unidad No Intervenido. La respuesta hidrológica de las unidades no solo depende de factores morfológicos, sino que se ve influenciada por un grupo más amplio que incluye otras características como los tipos de suelo, las coberturas, los usos y la geología.

6.1.2. Caracterización de suelos

Tras la aplicación de la metodología descrita en el numeral 5.2.2, se obtuvieron los resultados de la caracterización de los suelos de las dos unidades hidrográficas, tal como se presenta en la Figura 27 y la Tabla 17.

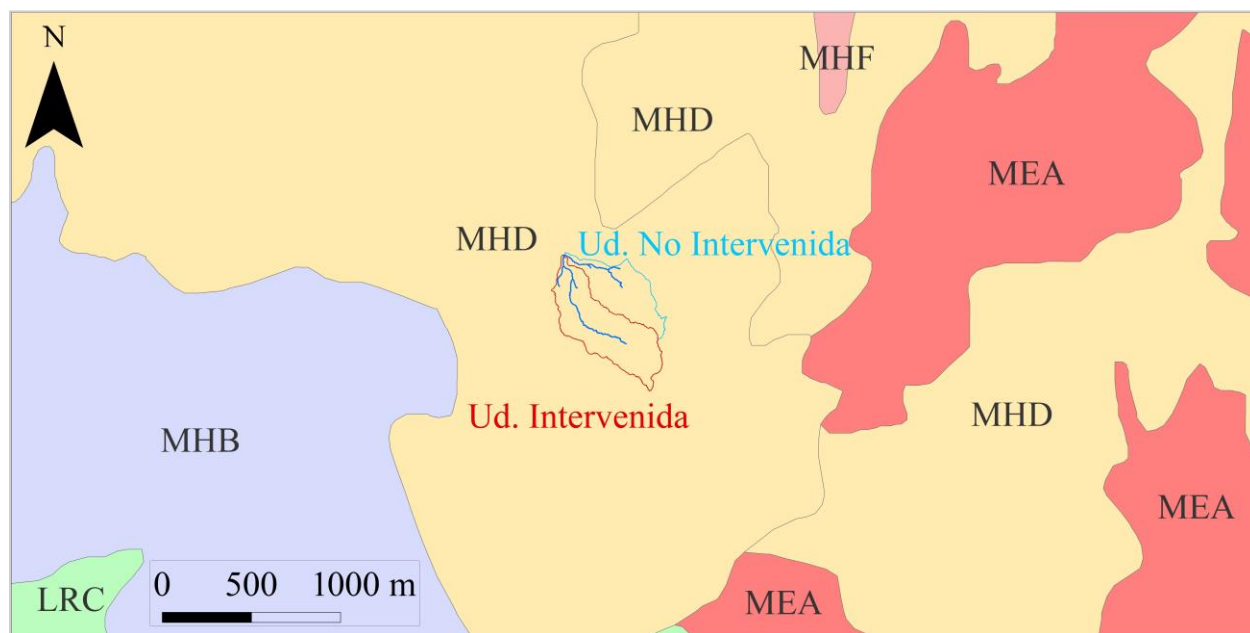


Figura 27. Tipos de suelo identificados en las inmediaciones del sitio de estudio.

El mapa de los tipos de suelo identificados en el sitio de estudio (Figura 27), permitió evidenciar que tanto la Unidad Intervenido, como la No Intervenido, se caracterizan por presentar la misma unidad de suelo (MHD). El hecho de que las dos unidades hidrográficas posean la misma unidad resulta muy positivo, pues la similitud en este aspecto argumenta la aplicación del enfoque adaptado de cuencas pareadas, a través de la premisa de que los procesos hidrológicos relacionados con el tránsito del agua por el suelo, son similares en las dos unidades hidrográficas.

La unidad MHD relacionada con los tipos de suelo hallados en las dos unidades hidrográficas, según el estudio (IGAC, 2003), está compuesta por las tres asociaciones taxonómicas siguientes: Typic Humitropepts (45%), Typic Dystropepts (35%) y Lithic Humitropepts (20%). Los detalles revisados para cada asociación taxonómica se aprecian en la Tabla 17.

Tabla 17. Características de las asociaciones taxonómicas identificadas.

Parámetro	Typic Humitropepts	Typic Dystropepts	Lithic Humitropepts
Paisaje	Montaña	Montaña	Montaña
Clima	Muy frío – Muy húmedo	Muy frío – Muy húmedo	Muy frío – Muy húmedo
Veg. Natural	Pajonal	Pajonal	Helecho, mortiño y ciprés.
Clima edáfico	Isofrígido – Údico	Isofrígido – Údico	Isofrígido – Údico
Orden	Inceptisol	Inceptisol	Inceptisol
Litología	Cuarzomonzonitas	Cuarzomonzonitas	Areniscas
Drenaje	Interno: lento Externo: rápido	Interno: lento Externo: rápido	Interno: rápido Externo: rápido
Prof. Efectiva	Profunda	Profunda	Superficial
Horizontes diagnósticos	Epipedón: úmbrico Endopedón: cámbico	Epipedón: úmbrico Endopedón: cámbico	Epipedón: úmbrico
Detalle del perfil	Perfil: PS-235 <u>Horizonte A₁: (0-30 cm)</u> Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1). Textura franco arenosa. Muchos macroorganismos. Muchas raíces finas. <u>Horizonte A₂: (30-48 cm)</u> Color en húmedo gris muy oscuro (10YR 3/1). Textura franca arcillo arenosa. Muchos macroorganismos. Abundantes raíces finas. <u>Horizonte B_w: (48-75 cm)</u> Color en húmedo amarillo (10YR 7/8). Textura franca arcillo arenosa. Pocas raíces finas. <u>Horizonte C: (75-150 cm)</u> Color en húmedo gris claro (10YR 7/1). Textura franca arcillo arenosa.	Perfil: PS-237 <u>Horizonte A_p: (0-36 cm)</u> Color en húmedo pardo oscuro (10YR 3/3). Textura franco arcillosa. Mucha actividad de macroorganismos. Abundantes raíces finas. <u>Horizonte B_w: (36-120 cm)</u> Color en húmedo amarillo (10YR 7/8). Textura franco arcillosa. Frecuente actividad de macroorganismos. Abundantes raíces finas. <u>Horizonte C_r: (120-150 cm)</u> Cuarzomonzonita alterada.	Perfil: PS-214 <u>Horizonte A₁: (0-18 cm)</u> Color en húmedo negro (10YR 2/1). Textura arenosa franca. Alta actividad de macroorganismos. Muchas raíces medias y finas. <u>Horizonte A₂: (18-29 cm)</u> Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2). Textura franco arenosa. Pocas macroorganismos. Pocas raíces finas y medias. <u>Horizonte B_w: (29-50 cm)</u> Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2). Textura franco arenosa con gravilla. Pocas raíces finas. <u>Horizonte R: (50-100 cm)</u> Roca coherente de arenisca.
Distribución granulométrica	0-30 cm: arena (66%), limo (22%) y arcilla (12%) 30-48 cm: arena (56%), limo (24%) y arcilla (20%) 48-75 cm: arena (64%), limo (12%) y arcilla (24%) 75-150 cm: arena (48%), limo (16%) y arcilla (36%)	0-36 cm: arena (46%), limo (20%) y arcilla (34%) 36-120 cm: arena (44%), limo (20%) y arcilla (36%)	No se reporta en el estudio.

Limitantes de uso	Fertilidad baja, saturación de aluminio mayor que 60% y frecuentes heladas.	Saturación de aluminio superior a 60% y frecuentes heladas.	Poca profundidad radicular y saturación de aluminio mayor que 60%.
Tipo de relieve	Lomas – Colinas Ligeramente escarpado	Lomas – Colinas Fuertemente ondulado	Lomas – Colinas Ligeramente escarpado
Grado de pendiente	27%	12 a 25%	30%

Adaptado de IGAC (2003).

En general, los resultados de las asociaciones taxonómicas (Tabla 17) evidenciaron que los tres tipos de suelo presentes en las dos unidades hidrográficas son muy similares, sobre todo, si se comparan las dos asociaciones que conforman el 80% de los suelos (Typic Humitropepts y Typic Dystropepts). Sin embargo, con la finalidad de sintetizar los resultados para las dos unidades a partir de las características de las tres asociaciones taxonómicas, se puede decir que los suelos de estas son: suelos de montaña, presentes en elevaciones altas, característicos de lomas y colinas con pendientes pronunciadas, con vegetación predominante tipo pajonal, litología principalmente relacionada a la cuarzomonzonita y de profundidades efectivas notables. Con respecto a las características específicas de los suelos, se puede afirmar que corresponden a Inceptisoles con perfiles caracterizados por suelos de colores oscuros (negro, gris y pardo), con texturas predominantes franco arcillo arenosas y granulometrías representadas en promedio por: arena (54%), arcilla (27%) y limo (19%).

Las características anteriores de los tres tipos de suelo, incluyendo sus regímenes de humedad (údic e isofrígido) que los caracteriza como suelos muy húmedos y fríos a lo largo del año, promueven que las dos unidades hidrográficas presenten condiciones de drenaje externo e interno especiales. Externamente, el drenaje se da de manera rápida teniendo en cuenta las características topográficas inclinadas asociadas a estos tipos de suelo, mientras que, internamente el drenaje se da de manera lenta debido a las propiedades de los suelos (Tabla 17).

En síntesis, las características internas promueven el servicio de regulación hídrica, mediante la acumulación y el tránsito lento del agua en los suelos. Este comportamiento es característico en las unidades hidrográficas de páramo, aunque la revisión de literatura evidenció que la mayoría de las investigaciones similares a esta, se han dado principalmente en unidades con suelos de Andosol e Histosol (Tabla 1).

6.1.3. Caracterización de coberturas del suelo

El mapa de coberturas de la Figura 28, permitió identificar la presencia de 10 categorías en las dos unidades, las cuales, se describen de manera detallada en la Tabla 18. En general, en el mapa se pueden apreciar diferencias notables en el patrón de distribución espacial de las categorías y en el área de la superficie asociada a cada una de estas. Con respecto a la distribución, se puede notar que la alteración de coberturas guarda relación con un gradiente de altitud, en el cual, los cambios son más severos a medida que la elevación decrece. En el mapa también se puede apreciar que la corriente principal de la Unidad Intervenida y la presencia de la zona boscosa, son dos límites naturales que congregan las alteraciones más fuertes, mientras que, las plantaciones de coníferas parecen limitar por arriba otros cambios de coberturas menos agresivos. De otro lado, con respecto a la superficie de cada tipo de cobertura, la Tabla 19 sintetiza los porcentajes y áreas de cada unidad hidrográfica.

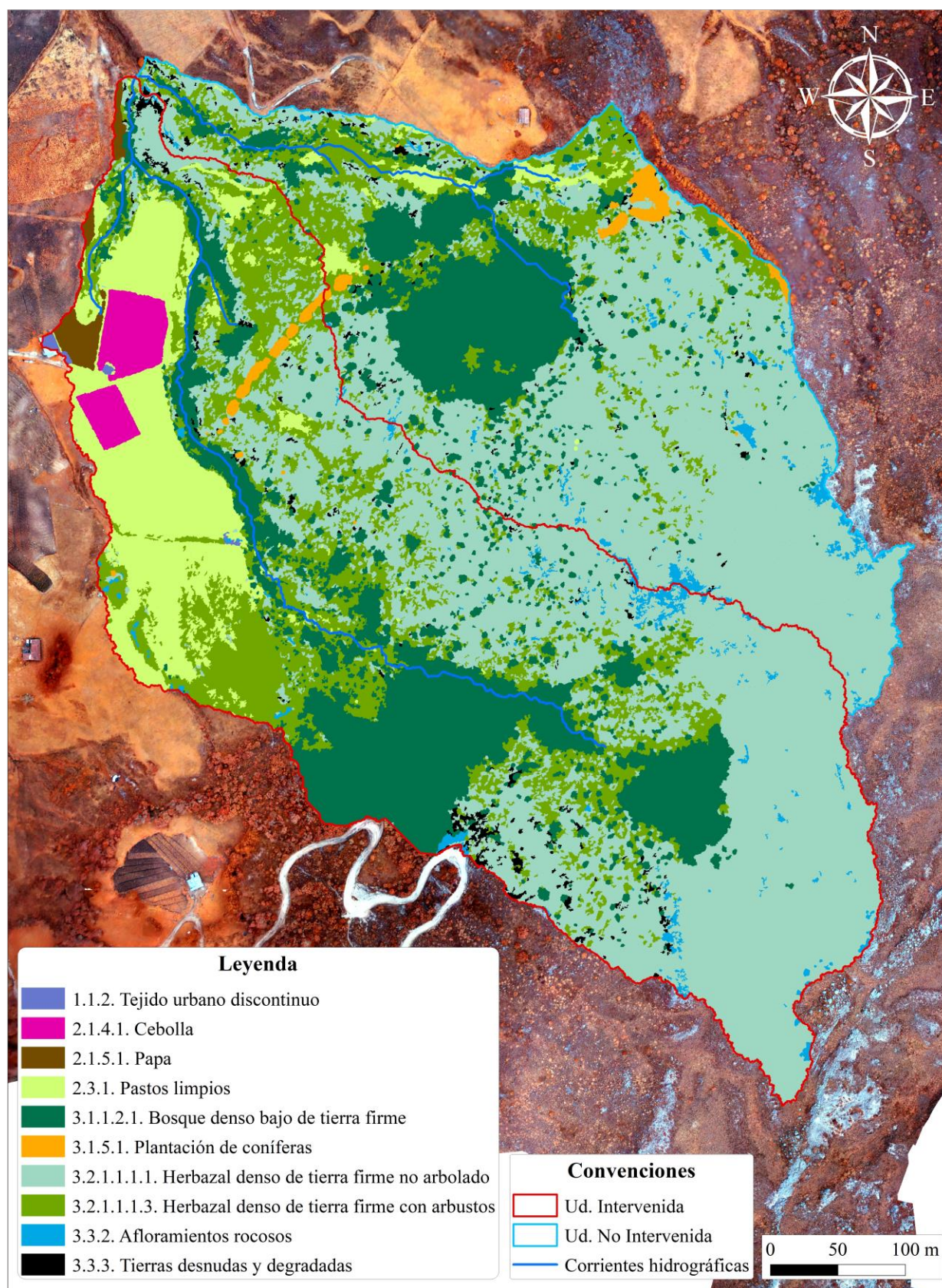


Figura 28. Mapa de coberturas de las dos unidades hidrográficas.

Tabla 18. Descripción de las clases de coberturas identificadas.

Clases de coberturas	Descripción	Muestra
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	Comprende las áreas artificializadas con fines de uso antrópico. Las superficies que se clasificaron en esta categoría correspondieron a: la vivienda de los habitantes de la Unidad Intervenida, el área de aprovisionamiento de leña, la caseta de almacenamiento de cultivos, las estaciones hidrométricas instaladas en los puntos de desfogue de las dos unidades, y los tanques utilizados para la distribución de agua en la zona (captada desde las corrientes hídricas de la Unidad Intervenida).	
2.1.4.1. Cebolla	Se refiere a las superficies cubiertas por el cultivo transitorio de cebolla de rama (<i>Allium fistulosum</i> L.). En el período de estudio, la vegetación perteneciente a esta categoría pasó por distintas etapas de crecimiento; sin embargo, las parcelas dedicadas a su cultivo no presentaron descansos.	
2.1.5.1. Papa	Corresponde a las zonas cubiertas por los procesos relacionados con el cultivo transitorio de papa negra (<i>Solanum tuberosum</i> L.). En el sitio de estudio, las prácticas relacionadas con este cultivo generaron varios cambios de cobertura en el período de monitoreo. En orden cronológico, los procesos que tuvieron lugar correspondieron a: arado mecánico, siembra de papa negra (<i>Solanum tuberosum</i> L.), siembra de papa amarilla (<i>Solanum phureja</i>) y siembra de una variedad de avena para el consumo de ganado. A pesar de las distintas etapas, el cultivo predominante correspondió al cultivo de papa negra, esto debido a su representatividad tanto en tamaño como en duración.	
2.3.1. Pastos limpios	Consiste en una pradera transformada y moderadamente pastoreada. En esta clase se identificó vegetación de baja estatura como pastos, graminoides y hierbas erectas. Específicamente, se identificaron especies de <i>Agrostis tolucensis</i> , <i>Lachemilla orbiculata</i> y <i>Anthoxanthum odoratum</i> . Las especies menos predominantes identificadas fueron: <i>Campylopus</i> sp. 1, <i>Rumex acetosella</i> y <i>Achillea millefolium</i> . En general la altura promedio de la vegetación correspondió a 6 cm.	

3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	Hace referencia a las áreas cubiertas principalmente por bosques enanos azonales, que configuran una mezcla de árboles, arbustos y vegetación de baja estatura. Las especies más predominantes de esta categoría correspondieron a: los musgos <i>Dicranum</i> sp. 1, <i>Bryophyta</i> sp. 2, <i>Breutelia</i> sp. 1 y sp. 2; los árboles <i>Myrsine dependens</i> y <i>Polylepis quadrijuga</i>; y los arbustos <i>Pentacalia ledifolia</i>, <i>Miconia summa</i>, <i>Diplostephium</i> sp. 2, <i>Ilex kunthiana</i> y <i>Weinmannia fagaroides</i>. También se identificaron otras especies de gramíneas, helechos, briófitas y hierbas. En general, la altura promedio de la vegetación identificada en la categoría, correspondió a 95 cm, mientras que la altura máxima resultó ser de 9 m.	
3.1.5.1. Plantación de coníferas	Comprende las áreas cubiertas primordialmente por plantaciones de coníferas relacionadas con la especie <i>Pinus Patula</i>. En la superficie del terreno, es decir, bajo las copas de los pinos, reposan algunas especies de hongos que crecen entre los restos de las hojas (agujas de los pinos).	
3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	Se refiere a las superficies cubiertas en su mayoría por la paja de páramo <i>Calamagrostis effusa</i>. Además de la paja, se identificaron otras especies como: la roseta <i>Espeletia</i>, la gramínea <i>Cortaderia nitida</i>; el helecho <i>Jamesonia</i> sp. 1; el arbusto <i>Diplostephium</i> sp. 1; y la especie herbácea rastrera <i>Lycopodium clavatum</i>. En general, las formas de crecimiento características de esta categoría correspondieron a: <i>tussock grass</i>, arbusto enano erguido y hierba erecta. La altura promedio de crecimiento fue de 32 cm, mientras que la altura máxima encontrada fue de 77 cm. Finalmente, se debe tener en cuenta que este tipo de cobertura se encuentra sometido a pastoreo extensivo en algunas zonas.	
3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos	Corresponde a zonas de páramo representadas principalmente por arbustos enanos que se encuentran sometidos a condiciones de pastoreo extensivo. Las especies predominantes identificadas fueron: los arbustos enanos <i>Arcytophyllum nitidum</i> y <i>Arcytophyllum muticum</i>; las gramíneas <i>Sporobolus lasiophyllus</i> y <i>Nassella depauperata</i>; y el graminoide exótico <i>Anthoxanthum odoratum</i>. Otras especies identificadas fueron <i>Agrostis mertensii</i>, <i>Cortaderia nitida</i>, <i>Vaccinium</i> sp. 1, <i>Gaultheria santanderensis</i> y <i>Pernettya prostrata</i>. La altura promedio de la vegetación de esta categoría resultó ser de 33 cm aproximadamente.	

3.3.2. Afloramientos rocosos	Consiste en superficies representadas por afloramientos de rocas ígneas. En términos específicos, a partir del trabajo adelantado por Bejarano y Navas (2018), se pudo identificar que las rocas corresponden a la Cuarzomonzonita del Batolito de Santa Bárbara (JRcs).	
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	Hace referencia a las zonas del terreno que poseen superficies desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal. Algunas de las razones principales por las cuales se presenta esta cobertura, están relacionadas con el pastoreo extensivo, el establecimiento de caminos y la meteorización de las rocas.	

Adaptado de Löwer (2020).

Tabla 19. Áreas de las clases identificadas en la clasificación de coberturas.

Clases de coberturas	Unidad Intervenido		Unidad No Intervenido	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	0.0263	0.139	0.0006	0.005
2.1.4.1. Cebolla	0.3967	2.098	0.0000	0.000
2.1.5.1. Papa	0.1649	0.872	0.0000	0.000
2.3.1. Pastos limpios	2.2575	11.937	0.2327	2.091
3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	3.8110	20.152	2.3324	20.956
3.1.5.1. Plantación de coníferas	0.0806	0.426	0.1562	1.403
3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	8.1917	43.317	6.5410	58.769
3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos	3.5645	18.849	1.5563	13.983
3.3.2. Afloramientos rocosos	0.2306	1.220	0.2042	1.835
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	0.1872	0.990	0.1066	0.957

En relación con el área de cada tipo de cobertura (Tabla 19), los resultados evidenciaron que en ambas unidades hidrográficas la cobertura más predominante fue el herbazal no arbolado (3.2.1.1.1.1), con una participación de 43.3 y 58.8% del área de las Unidades Intervenido y No Intervenido, respectivamente. El hecho de que este tipo de cobertura predomine en ambas unidades y se localice en las zonas más altas (menos intervenidas), permite plantear que las dos unidades hidrográficas originalmente pertenecen a la franja denominada «páramo propiamente dicho», la cual se caracteriza por presentar vegetación abierta, dominada por pajonales, pastizales, frailejonales y algunos arbustos (Cuatrecasas, 1958; Vásquez y Buitrago, 2011). Sin embargo, en las zonas bajas de las dos unidades, específicamente bajo las plantaciones de coníferas, se puede observar que la presencia de las coberturas herbazal con arbustos (3.2.1.1.1.3) y pastos limpios (2.3.1), coexiste con la cobertura predominante de herbazal no arbolado (3.2.1.1.1.1). La razón de la configuración de este mosaico de coberturas, tal como lo enunció Löwer (2020), se debe a la presencia del pastoreo en ambas unidades de estudio.

Con respecto al enfoque adaptado de cuencas pareadas, el hecho de que la Unidad No Intervenida presente pastoreo extensivo no constituye una problemática, pues en otros estudios se ha encontrado que los impactos de este en el comportamiento hidrológico son menores (Montenegro-Díaz et al., 2019). Otro factor que soporta la aplicación del enfoque consiste en que las dos unidades están sometidas a actividades de pastoreo similares (en extensión y localización), lo cual traslada la justificación de los impactos hidrológicos a otras actividades y coberturas.

En este sentido, se espera que las coberturas que más influencia presenten en la diferencia del comportamiento hidrológico entre las Unidades Intervenida y No Intervenida, sean: el tejido urbano discontinuo (1.1.2), por la extracción de agua para el desarrollo de sus actividades; los cultivos de cebolla (2.1.4.1) y papa (2.1.5.1), por la influencia que causan en el suelo y las cantidades de agua que demandan para su soporte; y los pastos limpios (2.3.1), por la diferencia de porcentaje que existe entre las áreas de las dos unidades. Desde este punto de vista, se puede afirmar que el porcentaje de área responsable de los cambios en la respuesta hidrológica radica principalmente en la suma de la ocupación de las cuatro categorías mencionadas; es decir, corresponde al 15% del área de la Unidad Intervenida. Con respecto a los demás tipos de coberturas, no se espera que sean los responsables de los impactos encontrados, pues poseen porcentajes similares de área entre las dos unidades, hacen parte de la vegetación natural del ecosistema o sus efectos son despreciables.

6.1.4. Caracterización de usos del suelo

La Tabla 20 y la Figura 29 presentan los resultados del procedimiento descrito, los cuales consisten en la caracterización de los usos identificados con sus respectivas áreas y la distribución espacial de tales actividades en las dos unidades hidrográficas.

Tabla 20. Descripción de los usos del suelo identificados.

Usos del suelo	Sub tipos	Descripción	Unidad Intervenida		Unidad No Intervenida	
			Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Barbecho (B)	B1	Área en la que se cultivó papa negra por 2 años. Hace aprox. 14 años está en descanso.	1.559	8.244	0.000	0.000
	B2	Zona en la que se cultivó primordialmente papa negra y ocasionalmente fresas por aprox. 16 años. Hace 4 años está en descanso.	0.827	4.375	0.000	0.000
	B3	Área en la que se cultivó papa negra y avena por casi 2 años. Hace 3 años está en descanso.	0.428	2.261	0.000	0.000
Cultivos (C)	C1	Zona en la que se ha cultivado cebolla de rama en los últimos 3 años. Anteriormente fue B2.	0.132	0.700	0.000	0.000
	C2	Área en la que se ha cultivado cebolla de rama en los últimos 16 años.	0.272	1.438	0.000	0.000
	C3	Zona en la que se ha cultivado papa negra, papa amarilla y avena en los últimos 2 años. Anteriormente la zona era del tipo PE1.	0.222	1.173	0.000	0.000
Pastoreo Extensivo (PE)	PE1	Área con pasado de pastoreo bovino y ovino (aprox. 15 años). Siempre se ha dado con baja densidad de ganado (aprox. 4 por hectárea).	1.082	5.720	0.891	8.006
Conservación (CO)	CO1	Zona en la que nunca se han realizado intervenciones antrópicas significativas.	14.314	75.692	10.239	91.994
Zona Habitable (ZH)	ZH1	Área destinada a la residencia de personas. Este uso se ha mantenido por más de 20 años.	0.075	0.396	0.000	0.000

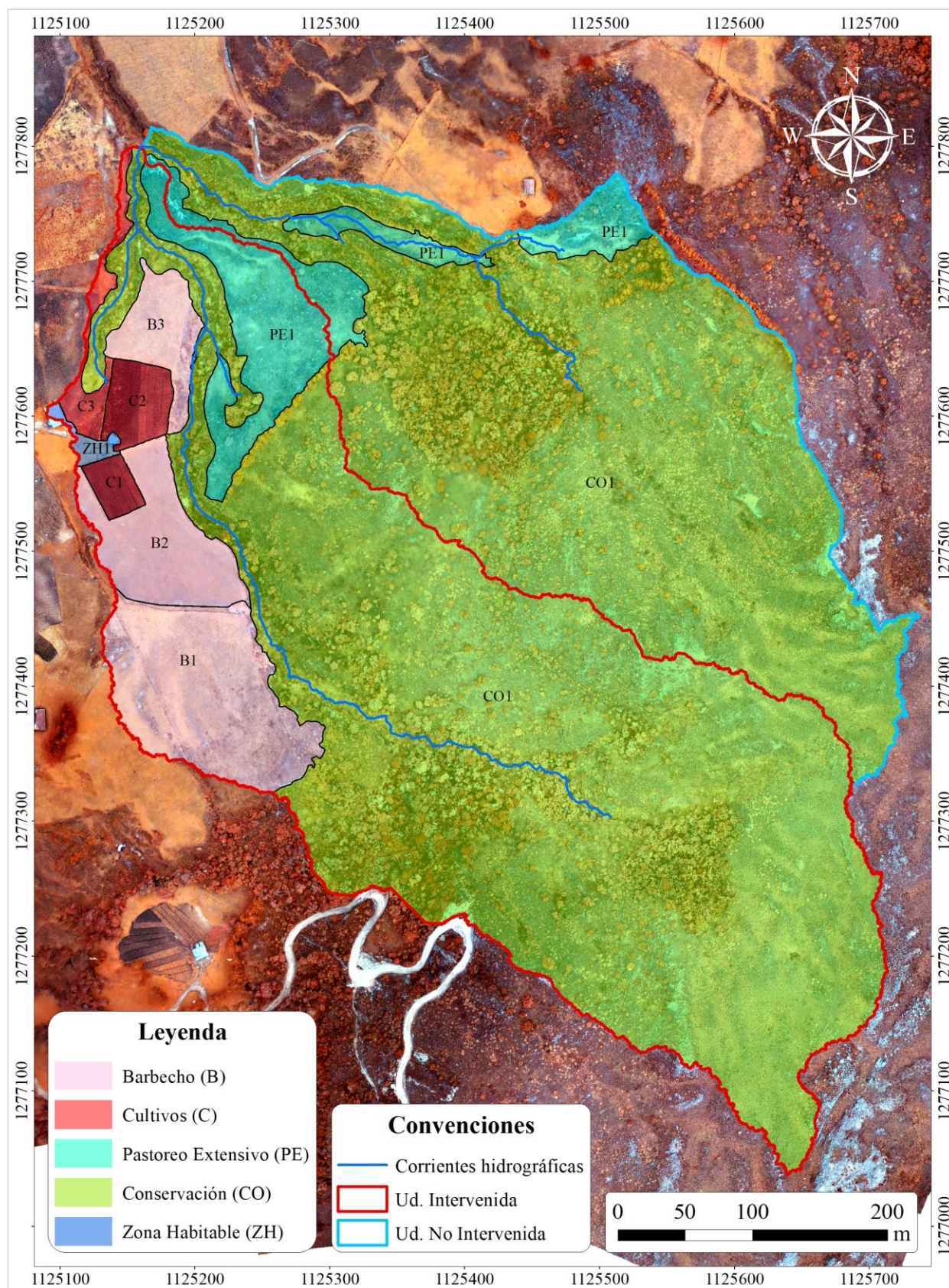


Figura 29. Mapa de usos de las dos unidades hidrográficas.

El mapa de usos de la Figura 29 y las descripciones de la Tabla 20, permitieron evidenciar la presencia de 5 tipos de actividades principales y 9 subtipos de usos específicos en las dos unidades hidrográficas, los cuales presentaron rasgos interesantes en términos de su distribución espacial, permanencia en el tiempo y área.

Con respecto a la distribución de los usos en las dos unidades, se puede mencionar que son coherentes con las coberturas identificadas en el mapa de la Figura 28, ya que en ambos casos las áreas más afectadas se localizan en las zonas de menor elevación de las unidades, mientras que las áreas más conservadas se ubican en las cabeceras. De igual manera, en el mapa de usos también se puede apreciar que la presencia de límites como las áreas boscosas, los cauces de las corrientes y las plantaciones de pino, constituyen barreras espaciales que limitan las áreas con los usos más agresivos, tal como se evidenció en el mapa de coberturas. Finalmente, en el mapa de usos se puede notar un patrón de conservación en la vegetación aledaña a los cauces. Este comportamiento se da principalmente en la Unidad Intervenida, pues en la Unidad No Intervenida, se evidencia un área con vegetación asociada a actividades de pastoreo extensivo cerca de la corriente principal.

En cuanto a la historia de los usos identificados, los resultados evidenciaron que no existe uniformidad en la permanencia o en el pasado entre las diferentes actividades, pues se identificaron porciones de tierra que se han usado desde hace mucho tiempo (p. ej., C2) y otras áreas que desde hace varios años están en descanso (p. ej., B1). A pesar de las diferencias se identificó que las tierras de barbecho, incluso llegando a tener períodos largos de descanso (p. ej., B1), no recuperan totalmente la cobertura que debería encontrarse a esas alturas en condiciones naturales, tal como se evidencia en la Figura 28. Este comportamiento resulta importante para la prestación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica de la Unidad Intervenida, ya que al existir coberturas diferentes se generan cambios hidrológicos en aspectos como la interceptación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración de los flujos hídricos.

En relación con las áreas de los usos identificados (Tabla 20), los resultados evidenciaron que en ambas unidades el uso predominante correspondió a conservación, con un 75.7 y 92.0% del área total de las Unidades Intervenida y No Intervenida, respectivamente. Para la Unidad Intervenida, el porcentaje de área dedicado a la conservación fue seguido por el uso de barbecho (14.9%), el pastoreo extensivo (5.7%), las actividades de cultivos (3.3%) y las zonas habitables (0.4%). De otro lado, el porcentaje de uso dedicado a la conservación fue seguido por el pastoreo extensivo (8%) para la Unidad No Intervenida.

Teniendo en cuenta los porcentajes anteriores y considerando que el pastoreo extensivo no genera afectaciones significativas sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, se puede afirmar que la Unidad No Intervenida a pesar de poseer cambios de coberturas en pequeñas porciones de tierra, se encuentra idealmente conservada al 100%. Mientras que la Unidad Intervenida, se encuentra idealmente conservada en el 81.4% y alterada en el 18.6%. En otras palabras, se puede aseverar que los usos que se desarrollan en el 18.6% de la Unidad Intervenida, son los responsables principales de los cambios hidrológicos generados a los dos servicios.

Finalmente, cabe mencionar que este porcentaje resultó ser similar al 15% asociado a las coberturas afectadas (numeral 6.1.3), lo cual evidencia la relación que existe entre los usos y las coberturas de los suelos en las dos unidades hidrográficas. La diferencia entre estos porcentajes radica primordialmente en la definición de los conceptos de usos y coberturas, que conlleva a que, por ejemplo: algunas zonas dedicadas a barbecho presenten porciones recuperadas que en el mapa de coberturas no se contabilizan como afectadas, pero en el de usos sí se consideran alteradas (p. ej., B1). Sin embargo, ambos porcentajes son válidos para el análisis de las áreas afectadas, puesto que proveen visiones complementarias acerca del territorio.

6.1.5. Caracterización geológica

Tras la aplicación de la metodología enunciada en el numeral 5.2.5, se generaron los resultados de la caracterización geológica de las dos unidades hidrográficas (Figuras 30 y 31).

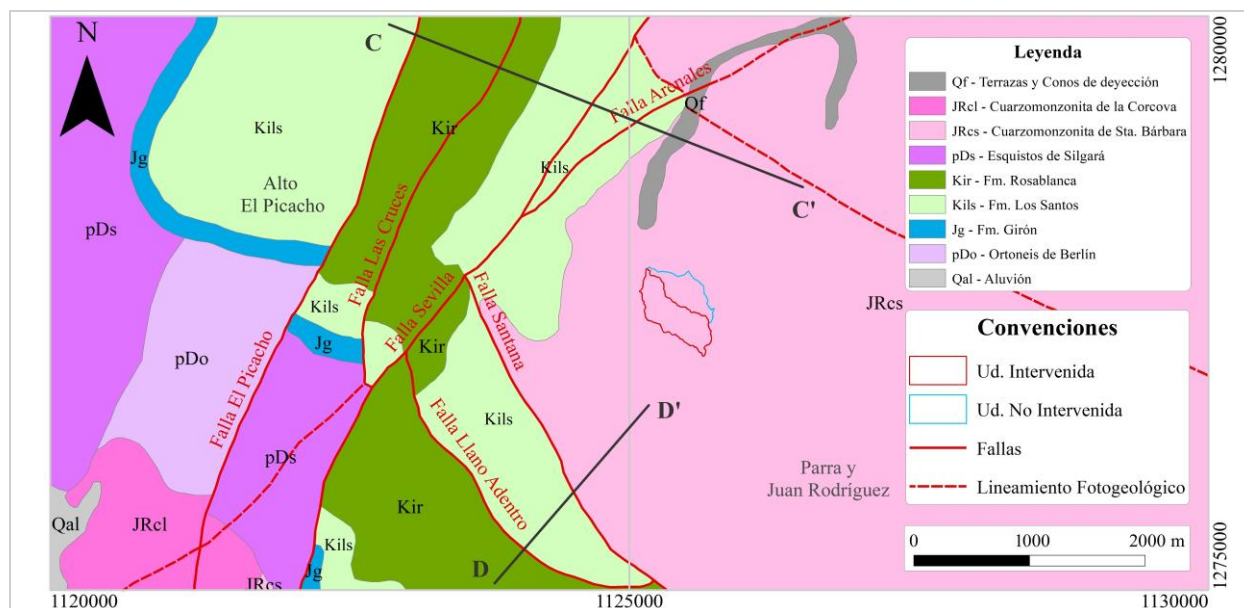


Figura 30. Mapa geológico del área de estudio. Adaptado de Bejarano y Navas (2018).

El análisis del mapa ilustrado en la Figura 30, permitió identificar el contexto geológico al cual pertenecen las Unidades Intervenida y No Intervenida, además de la variación en planta y altura de las formaciones localizadas en la cercanía de la zona de estudio. En relación con el análisis espacial en planta, el mapa indica que ambas unidades pertenecen a la formación JRcs, conocida como Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Esta unidad geológica que aflora al este del área de estudio, se caracteriza por la presencia de un relieve ondulado con una morfología de colinas redondeadas, compuesto por un cuerpo ígneo de textura fanerítica, integrado por cantidades de: cuarzo anhedral de tamaño entre 3 y 5 mm, de 30 a 60%; plagioclasa subhedral y alterada a arcillas, de 20 a 45%; feldespato potásico de color rosado pálido, de 10 a 15%; biotita con hábito laminar de color verdoso, con presencia de 1%; óxidos de hierro de alrededor de 1 mm, con 2%; y minerales accesorios, con alrededor de 4%, llegando a clasificarse como Granodiorita (Cetina, 2019).

Con respecto a la antigüedad, algunos estudios le asignan edades relativas al Jurásico y/o Triásico-Jurásico, según relaciones de campo y determinaciones radiométricas (Ulloa y Gómez, 2007). Otros análisis relacionados con la variación en profundidad de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara pueden revisarse a partir de los cortes C-C' y D-D' ilustrados en la Figura 31.

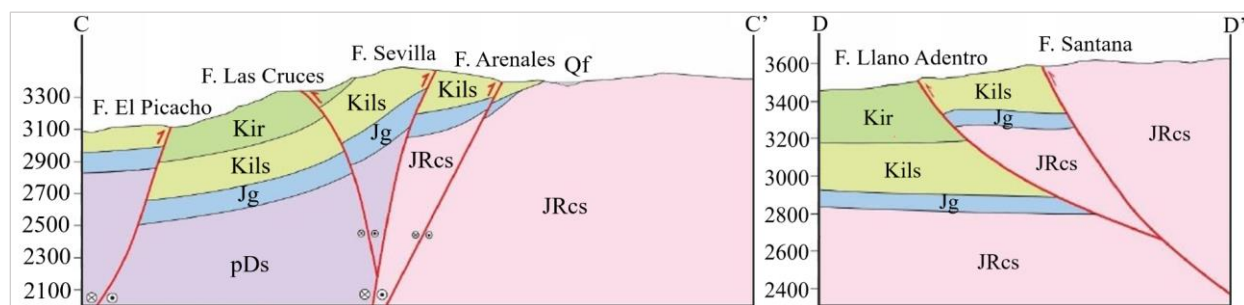


Figura 31. Cortes del mapa geológico de la Figura 30. Adaptado de Bejarano y Navas (2018).

La revisión de los cortes geológicos (Figura 31), no evidencia la presencia de otras formaciones localizadas por encima o por debajo, hacia la derecha de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Aunque las dos unidades hidrográficas no son atravesadas específicamente por ninguno de los cortes geológicos, las Figuras 30 y 31 sugiere que bajo la delimitación topográfica de las Unidades Intervenida y No Intervenida, la única formación presente es la JRcs, sobre todo si se tiene en cuenta que hacia el este no se presentan otras formaciones (salvo la Qf que es superficial) y que la Cuarzomonzonita predomina en las profundidades mayores.

Según lo afirmado previamente, ambas unidades hidrográficas presentan características geológicas semejantes, lo cual reafirma la aplicabilidad del enfoque adaptado de cuencas pareadas, puesto que el comportamiento de los flujos subterráneos probablemente es similar. Con respecto a las características de estos flujos, la revisión de los estudios realizados en la zona permitió identificar que para varios autores (Cetina, 2019; Franco, 2009; Hincapié y Veloza, 2009), existen muchas posibilidades de que la formación Cuarzomonzonita de Santa Bárbara albergue acuíferos libres, afirmación que sustentan en: la buena porosidad que presentan las rocas debido a la meteorización de la formación; los patrones de fracturamiento que promueven la porosidad secundaria en las rocas y mejoran su permeabilidad; la presencia de manantiales en la formación; las características geomorfológicas onduladas que facilitan la infiltración; y la realización de prospecciones geoeléctricas en la formación que han mostrado estratos con el potencial de acumular agua.

6.2. Caracterización hidrometeorológica de las unidades hidrográficas

En esta sección del documento se presentan y discuten los resultados de la caracterización hidrometeorológica de las dos unidades hidrográficas de estudio, siguiendo la metodología estipulada en las secciones anteriores (numeral 5.3). Los resultados de este componente incluyen la caracterización pluviométrica, hidrométrica, meteorológica y de extracciones hídricas.

6.2.1. Caracterización pluviométrica

Inicialmente, el análisis de los registros se realizó por medio del régimen anual de la precipitación, el cual se construyó a partir de los datos monitoreados por las estaciones El Picacho y Berlín, tal como se ilustra en la Figura 32.

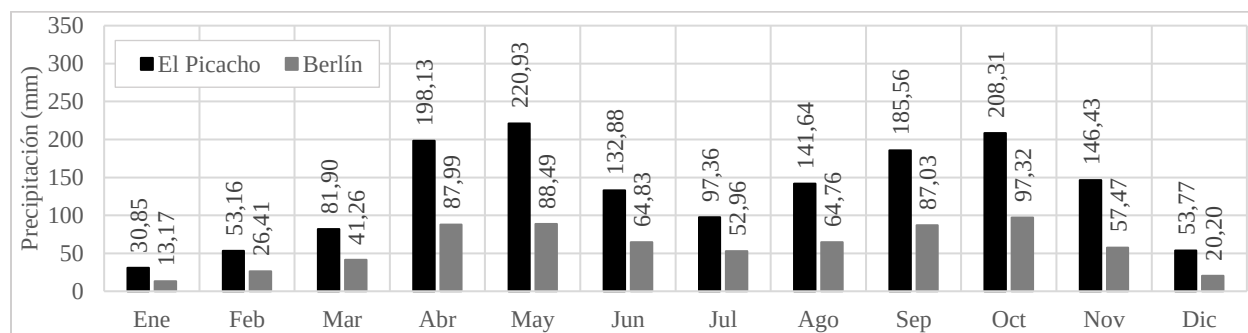


Figura 32. Régimen promedio anual de la precipitación en la zona de estudio.

Según la Figura 32, el régimen de la precipitación en la zona de estudio se caracteriza por presentar un patrón bimodal de dos temporadas húmedas en el año. En el caso de la primera, suele presentar los valores de precipitación más altos en los meses de abril y mayo; mientras que, en el caso de la segunda, normalmente posee los registros más altos en septiembre y octubre. El régimen anual de la precipitación también presenta épocas secas en el año, siendo diciembre, enero y

febrero los meses que menos precipitación habitualmente registran. De igual manera, existen otros meses en los que la cantidad de precipitación es intermedia, los cuales suelen ser marzo, julio, junio, agosto y noviembre, siendo los dos primeros regularmente más secos que los tres últimos.

Otro aspecto interesante del régimen de precipitación anual consiste en que, a pesar de que ambas estaciones presentaron el mismo patrón bimodal, sus valores de precipitación resultaron sustancialmente diferentes. En la Figura 32 se puede observar que la precipitación es mucho mayor en la estación El Picacho que en Berlín, presentando valores promedio de 1550.93 y 701.88 mm al año, valores que según la clasificación de páramos (Rangel, 2000), clasifican a los sitios como lugares pertenecientes a páramos semihúmedos y secos, respectivamente.

Con respecto a la diferencia anterior, al considerar la posición de cada uno de los puntos de monitoreo (Figura 16), se puede enunciar que espacialmente la cantidad de precipitación tiende a disminuir hacia la dirección este. Además, si se tiene en cuenta que las unidades hidrográficas se localizan entre las dos estaciones, es probable que el pluviómetro instalado en el sitio de estudio registre valores intermedios a los hallados por El Picacho y Berlín, siendo más similares a los de la primera estación debido a su posición. Esta observación se puede confirmar con los valores mensuales de precipitación que se ilustran en la Figura 33.

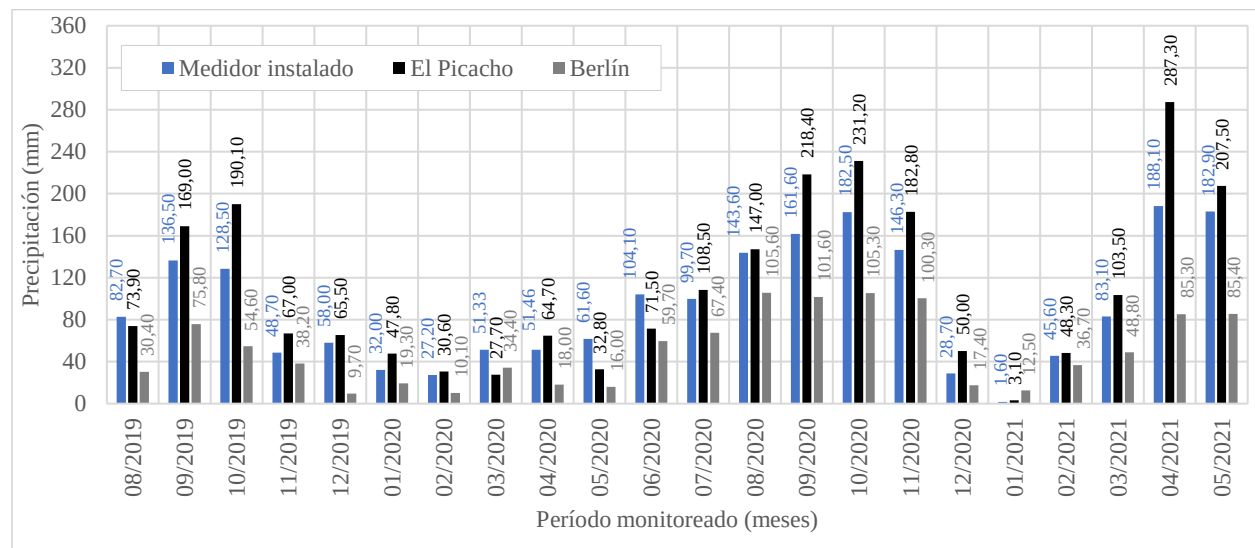


Figura 33. Precipitación mensual registrada por el pluviómetro instalado en las unidades hidrográficas y las estaciones El Picacho y Berlín.

La Figura 33 evidencia que, en la mayoría de los meses los valores de precipitación registrados en las unidades hidrográficas se encuentran intermedios a los valores capturados en las estaciones El Picacho y Berlín. Como ejemplo se puede revisar al año 2020, que presentó una precipitación anual de 1090.08 mm, mientras que las dos estaciones cercanas presentaron valores de 1213.00 y 655.10 mm. Este valor clasifica al área donde se encuentran las unidades hidrográficas como una zona de páramo seco con tendencia a semihúmedo (Rangel, 2000); sin embargo, debido a que el período de monitoreo es corto y que se completaron los registros mensuales de marzo y abril (Apéndice N), no se puede asegurar con certeza que esta condición sea definitiva.

Otro aspecto para tener en cuenta es que las precipitaciones del año 2020 en los meses de abril y mayo resultaron atípicamente menores a lo esperado, incluso mostrando un patrón anual casi unimodal, mientras que en el año 2021 recuperaron los valores normales. Adicionalmente, los valores de la precipitación capturada por las estaciones El Picacho y Berlín en el año 2020 (Figura

33), resultaron menores que los promedios registrados en el régimen anual (Figura 32). Debido a estas observaciones se puede aseverar que el año 2020 fue un año más seco que el régimen promedio, por lo cual, los resultados de la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica estarán sujetos a esta condición.

Otra manera de caracterizar los registros de precipitación corresponde al análisis de los valores diarios registrados por el pluviómetro instalado en las dos unidades hidrográficas. En concordancia con lo enunciado, la Figura 34 presenta la distribución diaria de la precipitación registrada en el período de monitoreo.

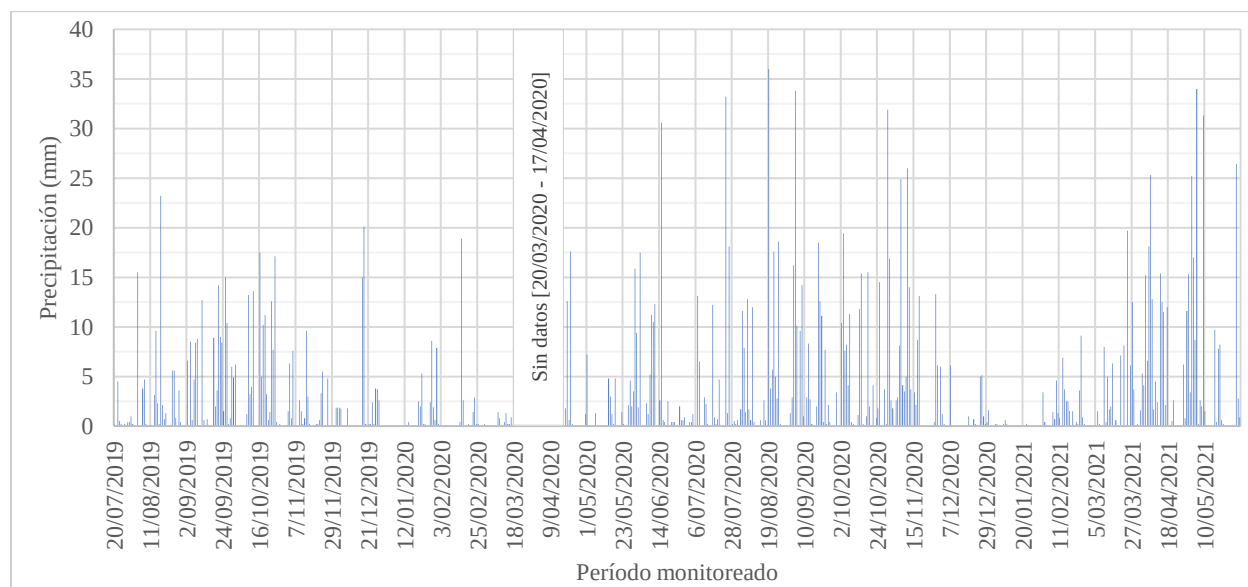


Figura 34. Precipitación diaria registrada por el pluviómetro instalado en las unidades.

En general, en la Figura 34 se observa que la precipitación diaria cumple con el patrón mensual de los valores monitoreados (Figura 33), mostrando coherencia en las temporadas húmedas, secas e intermedias del año. A través de los valores diarios (Figura 34), también se puede analizar el coeficiente de variación de los datos, su promedio y porcentaje de días sin precipitación.

En cuanto al coeficiente de variación, este resultó 1.90 para todo el período de monitoreo y 1.98 para el año 2020. La magnitud de este valor hace referencia a una distribución de precipitaciones diarias muy variables, en las que el valor medio no resulta muy representativo; sin embargo, los resultados fueron similares a los recopilados en la revisión de literatura (Tabla 4). Con respecto al porcentaje de días sin lluvia, se encontró que para todo el período de monitoreo y el año 2020, los resultados fueron de 44 y 45% respectivamente. Estos porcentajes que resultaron mayores que el promedio de la revisión de literatura (29%, Tabla 4), evidencian que las precipitaciones no son muy frecuentes en el sitio de estudio ya que casi la mitad del tiempo no se registraron lluvias, lo cual resulta característico de este tipo de páramos (con tendencia a ser secos). De otro lado, los promedios diarios resultaron ser de 3.05 mm para el período de monitoreo y el año 2020, valores que son coherentes y un poco menores a las cantidades medias diarias registradas en la revisión de literatura (4.07 mm, Tabla 2).

Adicional al estudio de los valores diarios se estudiaron otros aspectos como la variación intradiaria de la precipitación, las intensidades de los eventos y sus duraciones. Todo ello, debido a que los registros se capturaron con intervalos de tiempo pequeños (5 y 15 minutos). El análisis de estos aspectos se presenta en las Figuras 35, 36 y 37, respectivamente.

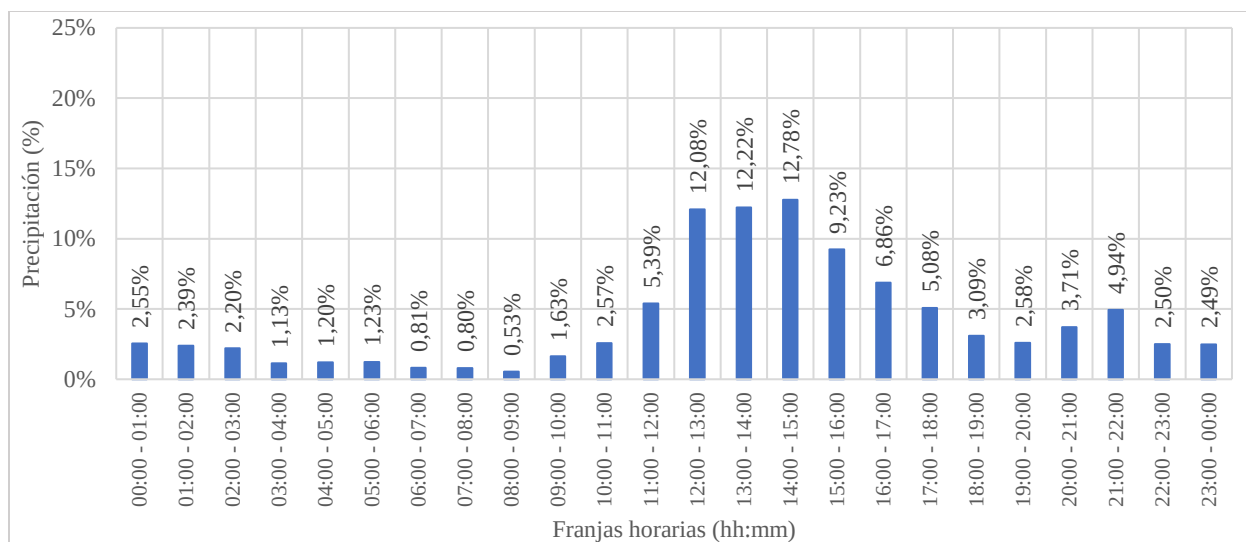


Figura 35. Variación intradiaria de la precipitación monitoreada.

En relación con la variación intradiaria de la precipitación, la Figura 35 ilustra que el mayor porcentaje de las lluvias capturadas en el período de monitoreo se dio entre las 11:00 y 18:00 horas. En esta franja se precipitó alrededor del 63.6% de la cantidad total registrada, siendo las 12:00, 13:00 y 14:00, los inicios de las franjas horarias en las que más se presentaron lluvias, con más de 12% de probabilidad de precipitación cada una. De forma similar, otros valores de precipitación notables pero menores, se dieron entre las 18:00 y 03:00 horas, con alrededor del 26.4% de la cantidad total precipitada.

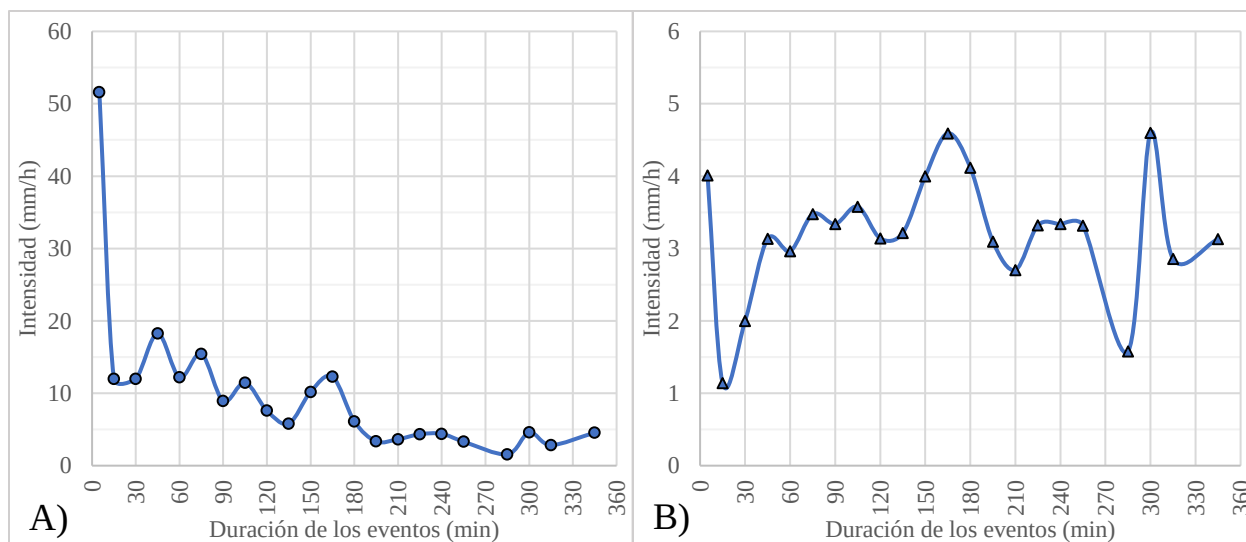


Figura 36. Curvas de intensidad y duración de las lluvias registradas. A) Máxima. B) Promedio.

Con respecto a la intensidad de los eventos registrados, la Figura 36B muestra que en promedio todos presentaron intensidades bajas sin importar su duración (menores a 5 mm/h). Sin embargo, la curva de intensidad máxima (Figura 36A) evidencia que los eventos de menor duración lograron alcanzar intensidades mucho más altas que otros eventos más largos, lo cual sugiere que los eventos muy largos normalmente son poco intensos, mientras que los eventos más cortos pueden

llegar a descargar grandes volúmenes de agua en poco tiempo (p. ej., 51.6 mm/h para un evento de 5 min).

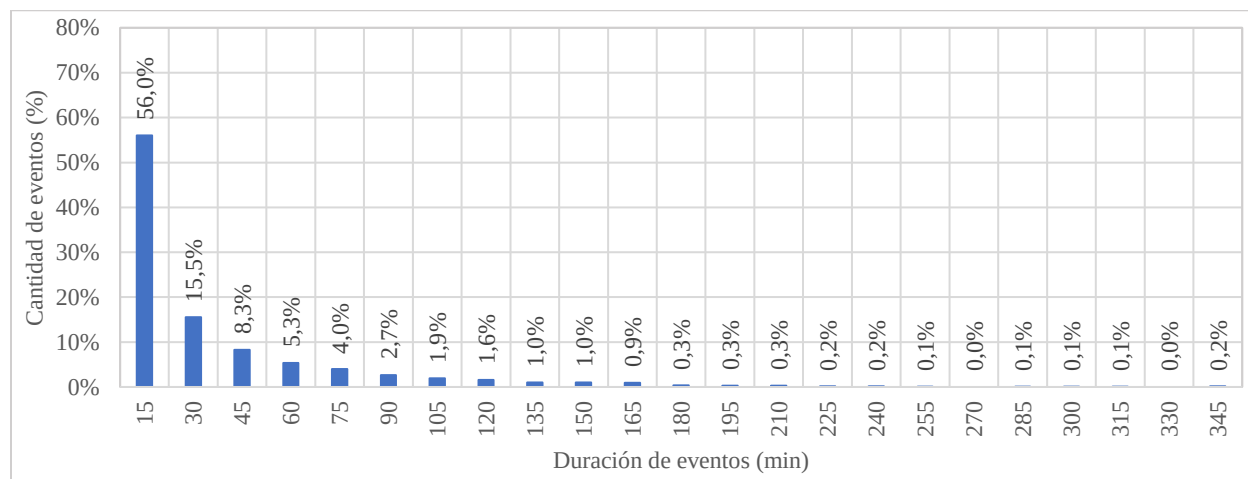


Figura 37. Histograma de los eventos registrados en el período de monitoreo.

Como complemento al estudio de las intensidades, las duraciones de los eventos registrados en el histograma de la Figura 37, permitieron identificar que de todas las lluvias que se dieron casi el 80% fueron iguales o menores a los 45 minutos; mientras que el 20% restante presentó duraciones superiores, llegando incluso a darse eventos continuos de 345 minutos de precipitación. De igual manera, cabe mencionar que la duración típica correspondió a 15 minutos, ya que en este intervalo se dieron el 56% de todas las precipitaciones. Con respecto a las cifras anteriores, es válido indicar que en la revisión de literatura no se encontraron referentes para su comparación.

En síntesis, a partir de todos los análisis ejecutados en este componente de caracterización pluviométrica, se puede enunciar que la precipitación del sitio de estudio tiende a ser: (i) bimodal, con dos temporadas húmedas en el año; (ii) típica de páramo seco, con una tendencia importante a semihúmedo; (iii) variable, con coeficientes de variación diarios superiores a 1.90; (iv) de frecuencia media, con alrededor del 45% de los días sin precipitación; (v) vespertina, con el 63.6% de las lluvias entre las 11:00 y 18:00 horas; (vi) corta, con duraciones típicas menores a 45 minutos y principalmente de 15; y (vii) de intensidades bajas, con promedios menores a 5 milímetros por hora y valores máximos de hasta 51.6 en el caso de los eventos más cortos.

El hecho de que el sitio de estudio se caracterice por tener precipitaciones como la descrita, conlleva a que existan condiciones específicas, que pueden promover o limitar la prestación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica en las dos unidades. Por ejemplo, en el caso del servicio de regulación hídrica, el hecho de que el régimen anual sea bimodal constituye una ventaja, ya que la cantidad de agua ingresa al sistema de manera más regulada que en un régimen unimodal, lo cual permite que los suelos se saturen menos y acumulen más agua; sin embargo, tal como se analizó para el año 2020, en algunos años atípicos este régimen podría variar a unimodal. De igual manera, el hecho de que los eventos de precipitación sean frecuentemente cortos y tengan intensidades promedio bajas, promueve la prestación del servicio de regulación hídrica. De otro lado, en el caso del servicio de abastecimiento hídrico, un aspecto clave a considerar es que la precipitación de la zona resultó ser seca con tendencia a semihúmeda; es decir, que no presentó valores elevados. Este aspecto restringe al servicio de abastecimiento hídrico, ya que las entradas de precipitación al ser pequeñas, conllevan a que la oferta de agua para el uso de las personas y los ecosistemas sea limitada, sobre todo en los años y temporadas más secas.

6.2.2. Caracterización hidrométrica

En primer lugar, los registros de caudal monitoreados se analizaron por medio del estudio de sus valores medios mensuales, tal como se presenta a continuación (Figuras 38 y 39).

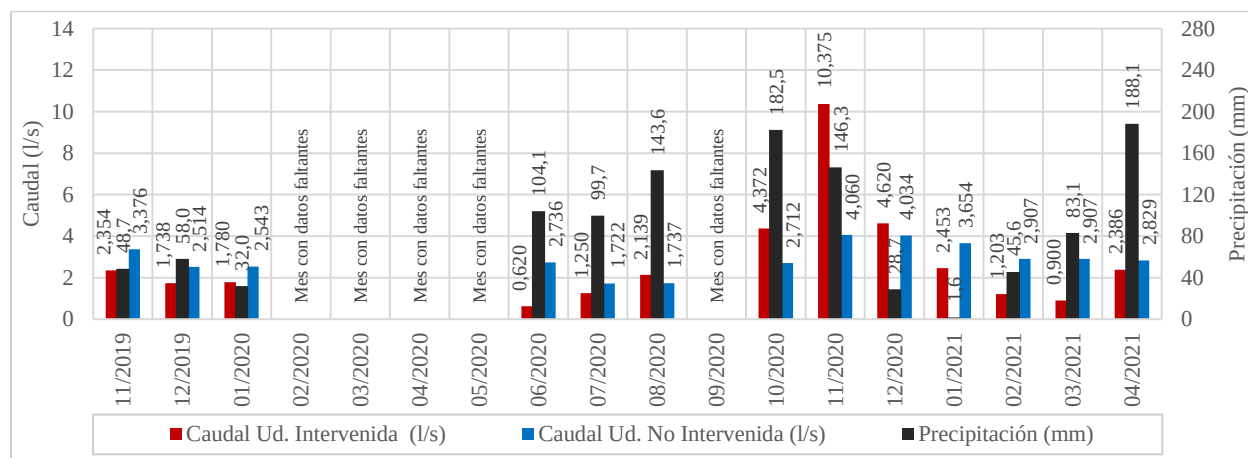


Figura 38. Caudales medios mensuales monitoreados en las dos unidades hidrográficas.

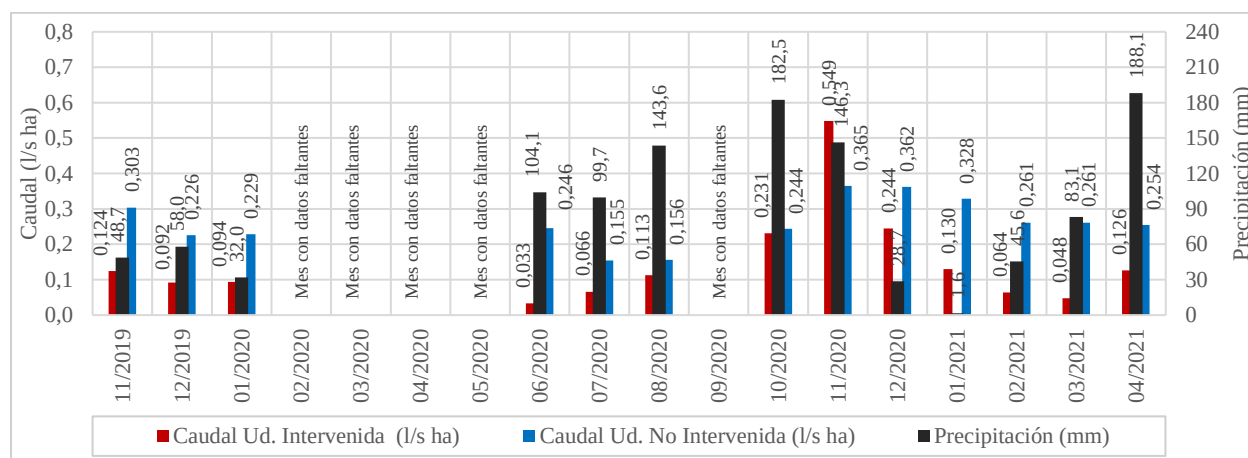


Figura 39. Caudales medios mensuales normalizados por el área de cada unidad hidrográfica.

En la Figura 38 se identifica que en general, en los meses secos e intermedios el caudal medio de la Unidad No Intervenida supera al de la Unidad Intervenida, ocurriendo lo contrario en los meses más húmedos. Este comportamiento resulta inesperado si se tiene en cuenta que el tamaño de la Unidad Intervenida es mucho mayor que el de la Unidad No Intervenida; sin embargo, puede explicarse a través de la presencia de extracciones hídricas que demandan más agua en tiempos de menor precipitación. Sumado a ello, otro factor que explica este fenómeno se relaciona con la presencia de suelos alterados en la Unidad Intervenida que, al tener una menor capacidad de regulación, drenan y desabastecen el sistema hidrológico rápidamente. Como resultado de estos efectos, los registros de caudal que se monitorearon en el cierre de las unidades, normalizados por el área, resultaron menores en la Unidad Intervenida que en la No Intervenida (Figura 39).

Otra manera de caracterizar los registros se puede llevar a cabo por medio de descripciones realizadas en escalas temporales más específicas. En este sentido, las Figuras 40 y 41 presentan los caudales medios diarios monitoreados en cada una de las dos unidades hidrográficas.

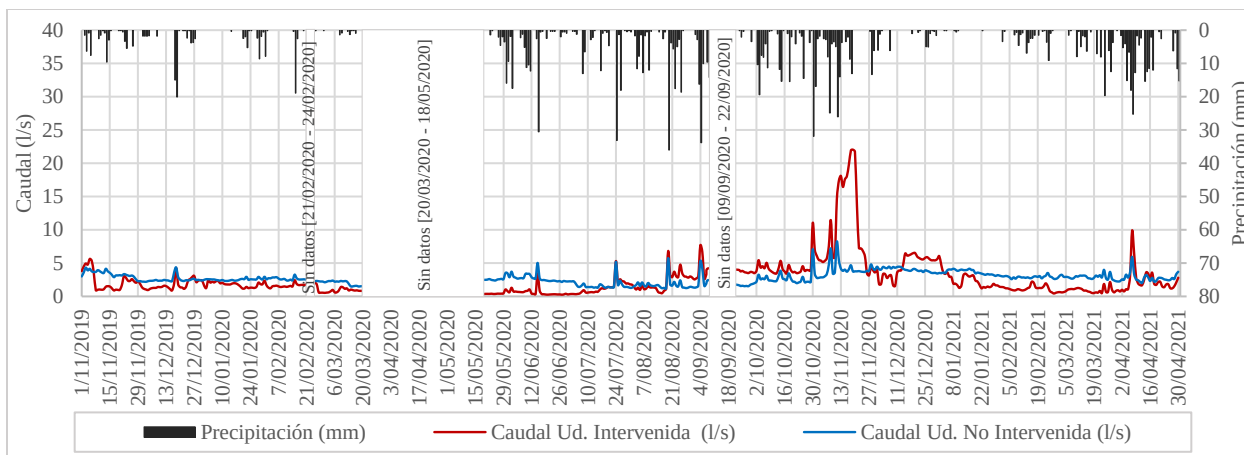


Figura 40. Caudales medios diarios monitoreados en las dos unidades hidrográficas.

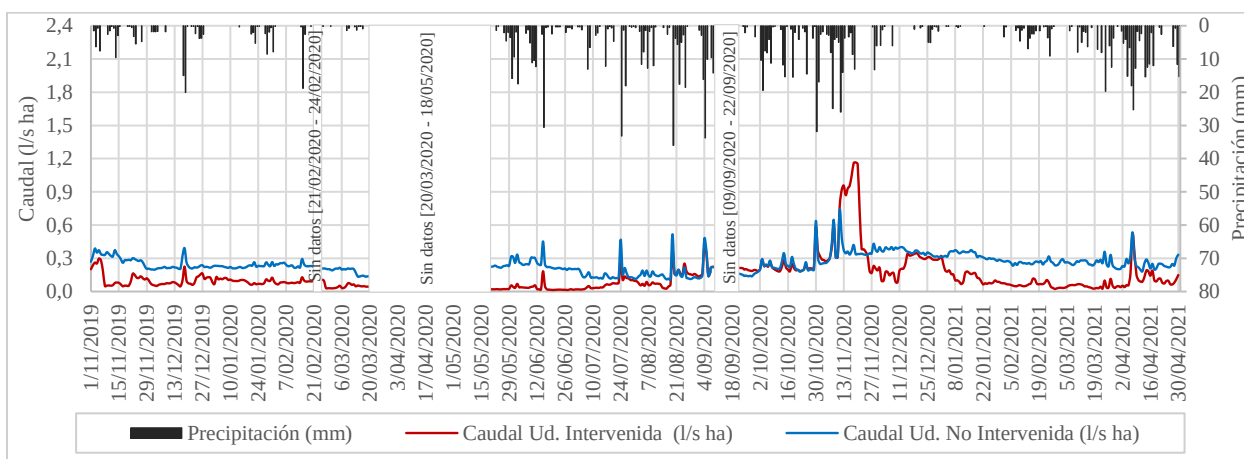


Figura 41. Caudales medios diarios normalizados por el área de cada unidad hidrográfica.

En las Figuras 40 y 41 se observa que, como se identificó previamente, los caudales de la Unidad No Intervenido tienden a ser más grandes que los de la Unidad Intervenido en la mayoría del tiempo, excepto en los períodos en los que se concentra la mayor cantidad de precipitación, que es cuando la Unidad Intervenido recupera el comportamiento esperado y sus caudales superan a los de la otra unidad (incluso en el análisis normalizado por las áreas).

De otro lado, en la Figura 40 se puede evidenciar que la variabilidad de los caudales es mucho mayor en la unidad sometida a intervención que en la de control, pues abarca un rango más amplio de flujos que van desde 0.262 a 22.046 l/s, mientras que en la otra unidad varían apenas entre 1.188 y 8.251 l/s. Además de ello, la variabilidad se nota en los cambios abruptos de caudal que presenta la Unidad Intervenido y que no se dan en la No Intervenido, comportamiento que está asociado al patrón de funcionamiento de las extracciones hídricas.

En relación con la respuesta de las unidades hidrográficas a las entradas de precipitación, las Figuras 40 y 41 muestran que existe coherencia entre la presencia de lluvias acumuladas a nivel diario y la respuesta del hidrograma. Sin embargo, como se observa en las Figuras 40 y 41, los ascensos de caudal no siempre responden con la misma magnitud ante cantidades de lluvia similares, ya que la respuesta depende de otros aspectos, como las condiciones previas de humedad y la intensidad de los eventos de precipitación. Otros elementos característicos de los caudales pueden ser revisados de manera específica a partir de registros más detallados (Figuras 42 y 43).

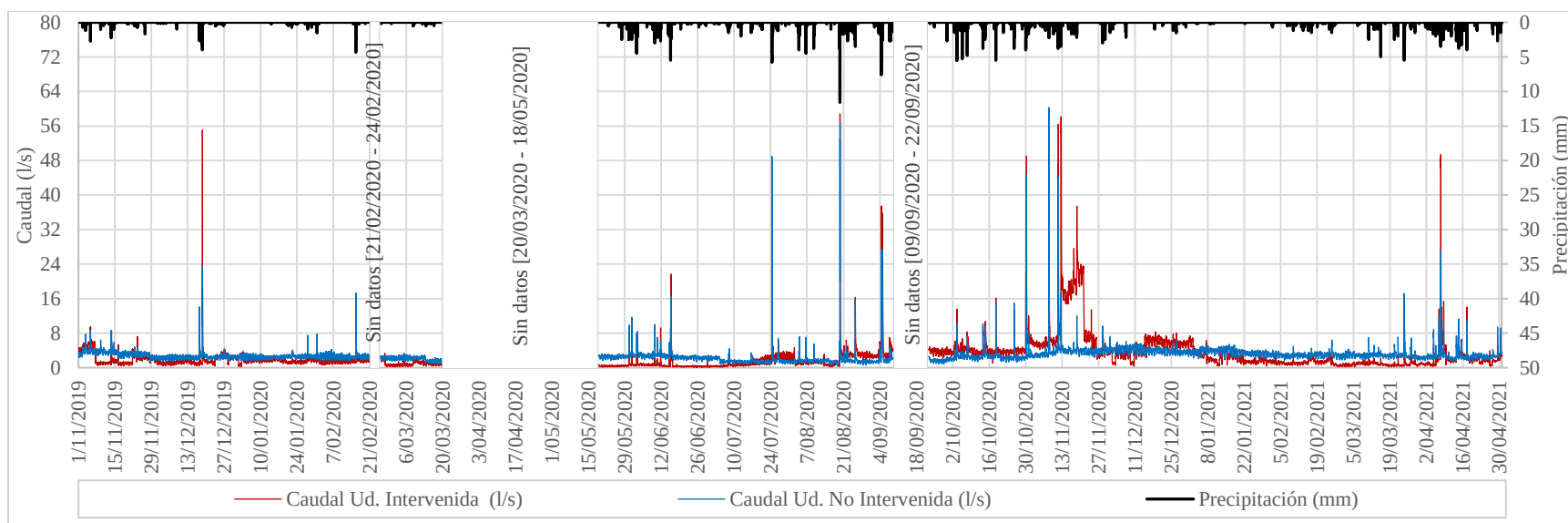


Figura 42. Caudales monitoreados en las dos unidades hidrográficas a escala de registro (5 y 15 min).

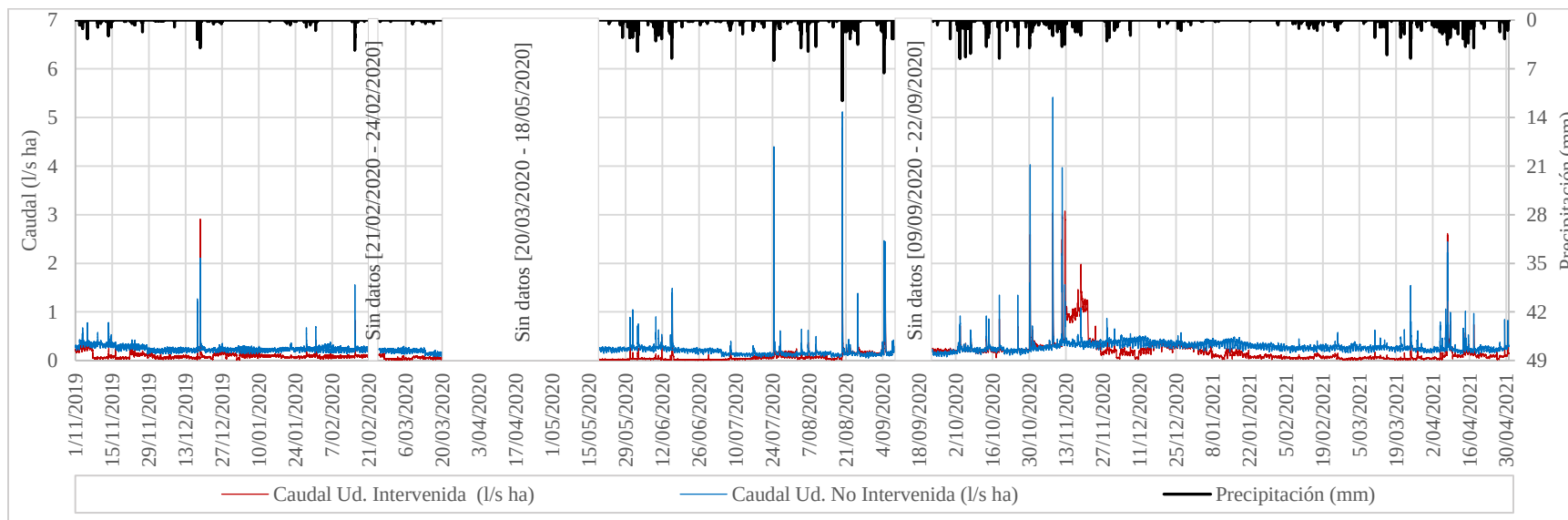


Figura 43. Caudales normalizados por el área de cada unidad hidrográfica a escala de registro (5 y 15 min).

En las Figuras 42 y 43, se pueden identificar los valores de caudal y precipitación registrados en intervalos de 5 y 15 minutos, durante todo el período de monitoreo en las dos unidades hidrográficas. Inicialmente, a partir de los registros (Figuras 42 y 43) se pueden confirmar las características que se plantearon en las descripciones anteriores, es decir: (i) que en la mayoría del tiempo la Unidad No Intervenida registra más caudal que la Unidad Intervenida, excepto en los períodos de mayor precipitación; (ii) que la variabilidad de los caudales de la Unidad Intervenida es mayor que la de la Unidad No Intervenida; y (iii) que los ascensos de los caudales son coherentes con la incidencia de los eventos de lluvia.

Aparte de las características anteriores, en las Figuras 42 y 43 se pueden notar concentraciones o grosores mayores a lo normal, en las líneas que conforman los hidrogramas de las dos unidades hidrográficas. Estas concentraciones son el resultado de variaciones intradiarias de los caudales de ambas unidades, las cuales se pueden visualizar al hacer un acercamiento a una porción de la gráfica que no presente eventos de precipitación (para evitar la interferencia de este efecto), como el período comprendido entre el 28/12/2019 y el 30/12/2019 (Figura 44).

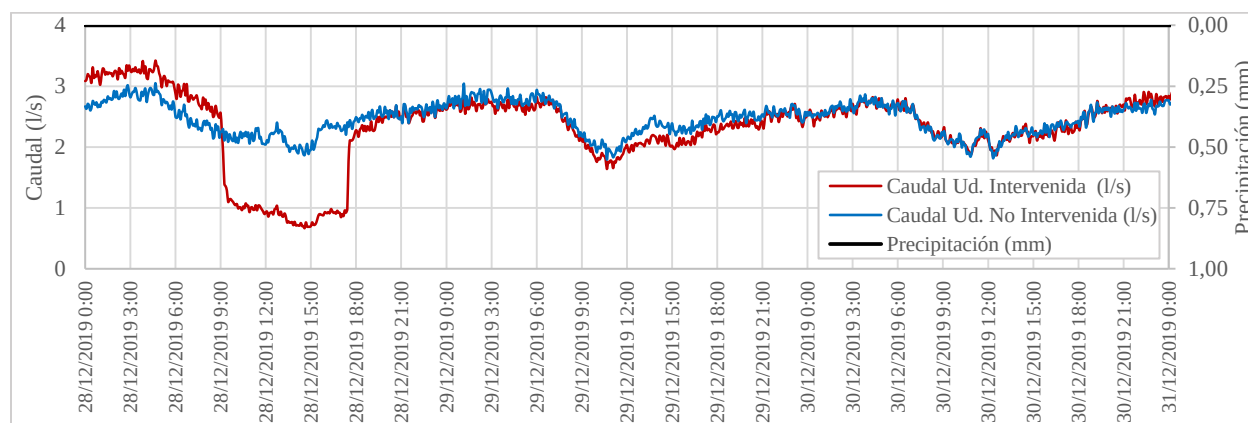


Figura 44. Variaciones intradiarias de los caudales de las dos unidades hidrográficas.

En la Figura 44 se pueden observar dos aspectos interesantes de las variaciones intradiarias de los flujos de las unidades. En primer lugar, la gráfica ilustra que los flujos de la Unidad Intervenida muestran cambios abruptos entre las 09:00:00 a. m. y 06:00:00 p. m., cambios que nunca llegan a presentarse en los registros de la Unidad No Intervenida. En segundo lugar, los flujos de la gráfica exhiben una variación similar a un patrón oscilatorio que hace que el caudal de ambas unidades hidrográficas, varíe en promedio alrededor de un litro por segundo entre el medio día y la media noche, para los registros graficados en la Figura 44.

Con respecto a la primera variación, tras haber confirmado el funcionamiento de los equipos, revisado la magnitud de los cambios, las horas en las que se presentaron y el hecho de que solo se dan en la Unidad Intervenida, se concluyó que lo más probable es que estén relacionadas con el funcionamiento del sistema de extracciones hídricas.

En relación con las oscilaciones diarias de caudal, al realizar una búsqueda de documentos académicos, se halló evidencia de que este patrón se ha encontrado en otras investigaciones realizadas en la región (p. ej., Duarte, 2022; Forero, 2012); sin embargo, en los estudios no se encontraron explicaciones que sustenten los porqués de la variación. Debido a ello, se estudió este fenómeno a través de: una caracterización de caudales; una prueba al equipo de medición; y un análisis de correlación con variables meteorológicas (Apéndice O). Como resultado, se encontró que el patrón oscilatorio puede obedecer a procesos de cambios de fase del fluido y a la entrada de agua a través de fenómenos asociados a la precipitación horizontal.

6.2.3. Caracterización meteorológica

A partir de la ejecución de la metodología descrita en el numeral 5.3.3, se llevó a cabo la caracterización meteorológica de las dos unidades hidrográficas. Inicialmente, en la Figura 45 se describe el comportamiento de la radiación solar.

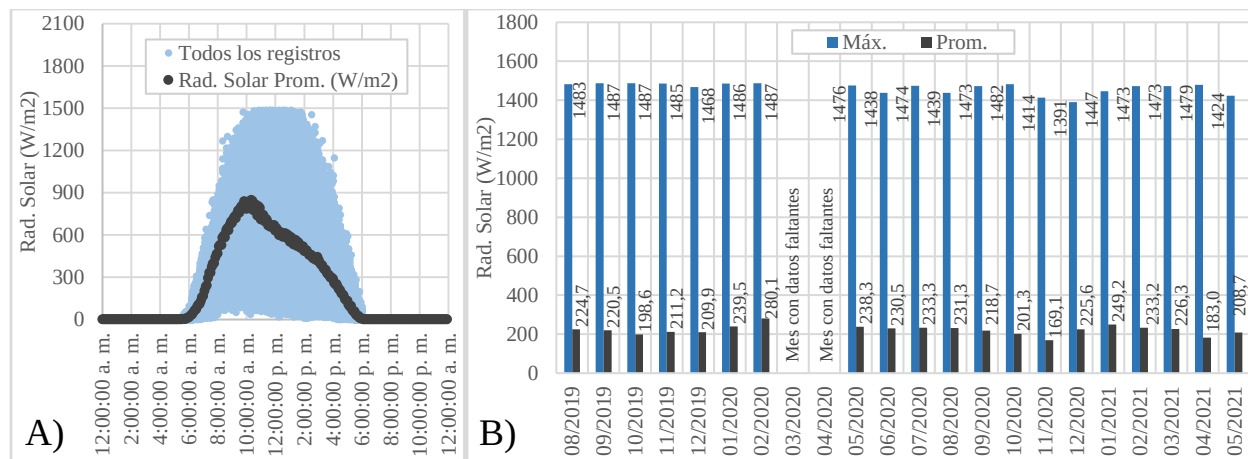


Figura 45. Radiación solar. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.

La Figura 45A permitió evidenciar que la radiación solar muestra un patrón de variación intradiaria unimodal que, normalmente, inicia a las 06:00:00 a.m. y termina a las 06:00:00 p.m., mostrando su valor máximo alrededor de las 10:20:00 a.m. En cuanto a su variación mensual, la Figura 45B no presenta un patrón de variación completamente definido para los valores medios y máximos. Sin embargo, es posible notar que existe una relación inversa entre la radiación solar y la precipitación, ya que los meses más secos presentan los valores más altos de radiación (p. ej., 02/2020 y 01/2021); mientras que, los meses más húmedos poseen los registros más bajos de radiación (p. ej., 10/2019, 11/2020 y 04/2021) (Figuras 33 y 45B). La razón de ello radica en la presencia de nubes y niebla que logran atenuar la radiación solar antes que impacte sobre la superficie terrestre.

En relación con la humedad relativa, la Figura 46A evidencia que el patrón medio de variación intradiaria de esta variable, se caracteriza por presentar valores estables alrededor del 91.7% entre las 06:00:00 p. m. y 06:00:00 a. m. De otro lado, en la franja de tiempo contraria, los valores de humedad relativa decaen hasta cerca del 70.8% alrededor de las 10:20:00 a.m. para luego recuperar su valor habitual y continuar el ciclo. Como era de esperarse, este ciclo de variación posee una relación inversa con el patrón intradiario de la radiación solar (Figuras 45A y 46A), el cual, se puede explicar a través de las horas de brillo solar, pues este fenómeno controla ambos procesos.

Con respecto a la variación mensual de la humedad relativa, al comparar las Figuras 45B y 46B, de nuevo se puede confirmar la relación inversa que existe con la radiación solar. En este caso, la humedad relativa presenta sus valores más altos en los meses de menor radiación solar y mayor precipitación (p. ej., 11/2020 y 04/2021). Mientras que, sus valores más bajos se dan en los meses de mayor radiación solar y menor precipitación (p. ej., 02/2020 y 01/2021). En estos meses secos de alta radiación solar, la humedad relativa puede descender hasta cerca del 10%, mientras que, en los meses más húmedos, sus valores mínimos suelen estar sobre el 50%. Sin embargo, en ambas gráficas de la Figura 46 se puede identificar que, normalmente, la humedad relativa promedio suele presentar valores altos en el sitio de estudio (sobre el 70%).

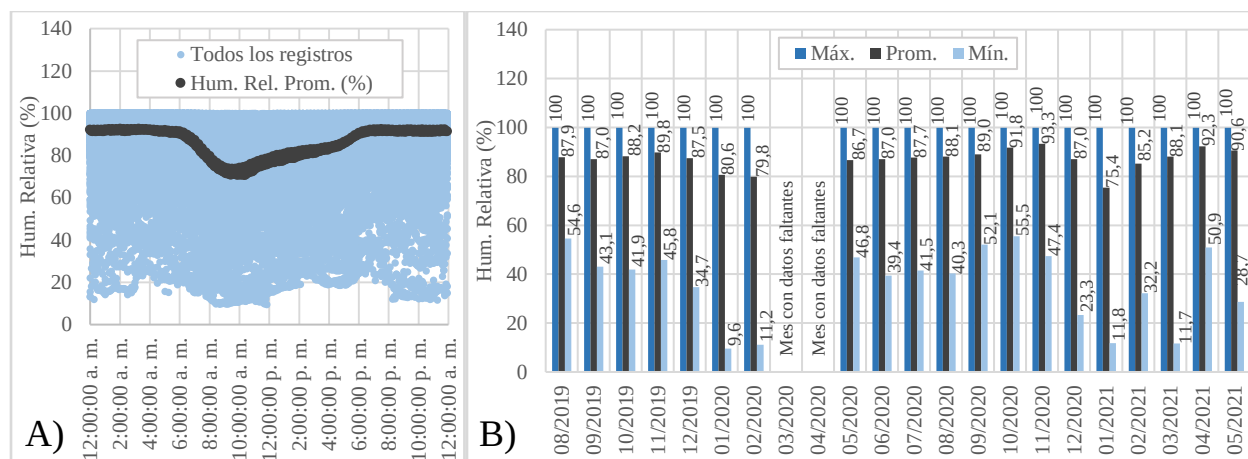


Figura 46. Humedad relativa. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.

En cuanto a la variación intradiaria de la temperatura del aire, la Figura 47A muestra que corresponde a un patrón unimodal que presenta sus valores máximos y mínimos, cerca de las 10:50:00 a. m. y 05:35:00 a. m., respectivamente. Además de ello, la Figura 47A ilustra que la variación intradiaria de la temperatura es fuerte, pues puede presentar valores máximos de 19.1 °C y mínimos de -2.3 °C, lo cual corresponde a un rango de variación posible de hasta 21.4 °C.

De otro lado, acerca de la variación mensual de la temperatura del aire, la Figura 47B permitió identificar que, en promedio, los valores no presentan un patrón mensual evidente de variación, ya que normalmente sus registros mensuales oscilan cerca de los 8.3 °C, con un rango de variación máximo de 2 °C. Sin embargo, sí es posible identificar un patrón interesante que suele darse a finales y principios de año; es decir, en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. El patrón consiste en que, en estos meses de baja precipitación, alta radiación solar y poca humedad relativa, la temperatura suele variar abruptamente desde valores muy altos durante el día a registros bajo cero durante la noche. Algunos ejemplos de este fenómeno que, es conocido por los pobladores locales como heladas, pueden notarse en los registros de enero, febrero y diciembre del año 2020, y enero y marzo de 2021.

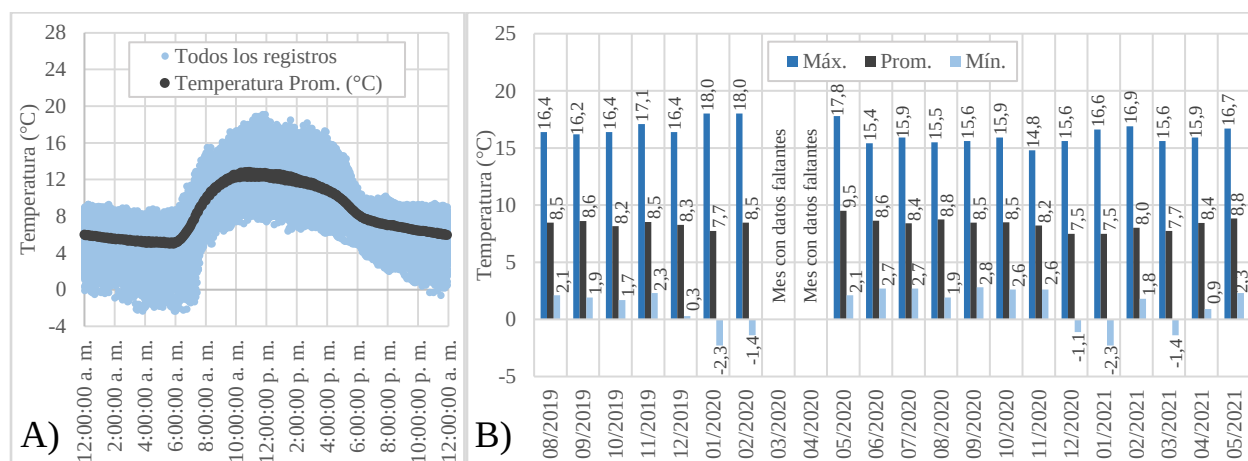


Figura 47. Temperatura del aire. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.

Con respecto a la velocidad del viento, la variación intradiaria ilustrada en la Figura 48A, evidenció que esta se rige por un patrón bimodal que suele presentar valores promedio poco

variables entre el periodo comprendido entre las 06:00:00 p. m. y las 06:00:00 a. m., siendo estos registros cercanos a los 4 km/h. En cuanto a los registros más altos, el patrón bimodal suele presentar dos picos alrededor de las 10:20:00 a. m. y 03:50:00 p. m., con valores medios de 8.5 y 6.7 km/h respectivamente. Además de ello, los registros evidenciaron que la velocidad del viento posee valores muy variables, que pueden ir desde el reposo, hasta los 28 km/h.

En relación con la variación mensual, en la Figura 48B se encontró que los meses más secos suelen presentar valores altos de velocidad del viento (p. ej., 05/2020); mientras que, los meses más húmedos, normalmente exhiben registros bajos (p. ej., 11/2020). Esta observación y las variaciones intradiarias de las otras variables estudiadas, permiten inferir que usualmente radiaciones solares altas, humedades relativas bajas, temperaturas altas y precipitaciones bajas, normalmente suelen relacionarse con velocidades del viento altas, y viceversa.

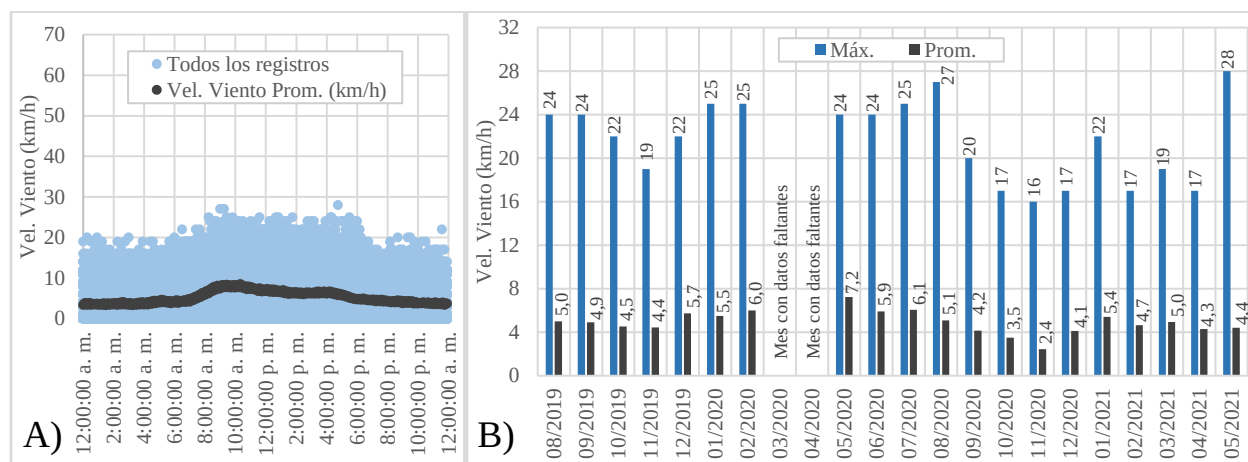


Figura 48. Velocidad del viento. A) Variación intradiaria. B) Registros mensuales.

Por último, a partir de las cuatro variables meteorológicas descritas, se estimaron los valores mensuales de la evapotranspiración de referencia en el sitio de estudio (Figura 49). En los datos se puede observar que los meses más secos son los que muestran los niveles más altos (p. ej., 01/2020, 02/2020 y 01/2021), en tanto que, los meses más húmedos, son los que presentan los valores más bajos de evapotranspiración (p. ej., 10/2020, 11/2020 y 04/2021).

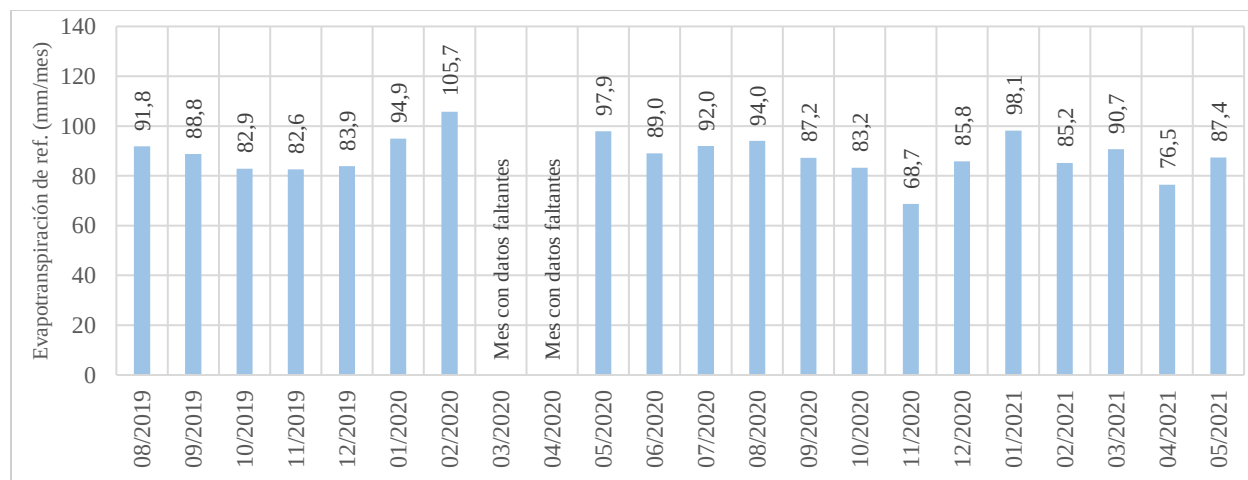


Figura 49. Variación mensual de la evapotranspiración de referencia de las unidades hidrográficas.

En el estudio de los impactos hidrológicos causados por las transformaciones de los suelos y coberturas de los páramos, la evapotranspiración posee un rol relevante, sobre todo, en las alteraciones que puede causar sobre el servicio de abastecimiento hídrico. En general, estudios como los adelantados por Buytaert et al. (2007) y Buytaert et al. (2006A), han mostrado que los reemplazos de coberturas naturales por otras especies vegetales más productivas, pueden generar impactos importantes sobre el suministro hídrico, debido al incremento de los requerimientos de agua de las nuevas especies y el aumento de su transpiración.

En esta investigación se abordó el fenómeno de la evapotranspiración, mediante la estimación de los valores mensuales para un cultivo de referencia, tal como se ha hecho en otros estudios similares como método de caracterización meteorológica de las unidades hidrográficas (p. ej., Ochoa-Tocachi et al., 2016A). La superficie de referencia utilizada, corresponde a un cultivo hipotético de pasto verde, bien regado, de crecimiento activo y altura uniforme de 12 cm (Allen et al., 2006). Sin embargo, como se puede observar en el mapa de coberturas (Figura 28), las especies vegetales presentes en las dos unidades hidrográficas pueden diferir notablemente del cultivo de referencia, como en el caso de las coberturas de papa y cebolla de la Unidad Intervenida.

La cuestión radica en que, en estudios como los realizados por Carreño (2019) y CCB (2015), se ha encontrado que este par de coberturas demandan más agua que la vegetación natural de páramo, razón por la cual, es de esperarse que el servicio de suministro hídrico presente declives en la Unidad Intervenida en comparación con la Unidad No Intervenida.

6.2.4. Caracterización de extracciones hídricas

Tras la ejecución de la metodología enunciada en el numeral 5.3.4, se obtuvieron los resultados de la caracterización del sistema de extracciones hídricas de la Unidad Intervenida. Como se enunció en la metodología, este procedimiento se llevó a cabo mediante la ejecución de recorridos de campo, aforos volumétricos, análisis estadísticos e indicadores hidrológicos. Los resultados del procedimiento descrito se pueden visualizar en las Figuras 50 y 51 y las Tablas 21 y 22.

Los elementos del sistema de extracción ilustrados en el mapa (Figura 50), permitieron identificar la presencia de tres puntos de extracción (E1, E2 y E3). En general, se identificó que los tres puntos se localizan sobre la corriente principal en diferentes altitudes. También se evidenció que corresponden a sistemas improvisados, ausentes de tratamiento y con dinámicas de consumo muy variables. Con respecto a ello, en la Tabla 21 se describe específicamente cada punto de extracción, su material y dinámica de uso, entre otros detalles adicionales.

Tal como se evidencia en la Tabla 21, cada uno de los puntos de extracción posee diferencias tanto en sus componentes como en el servicio que presta, razón por la cual, cada punto del sistema transporta distintas cantidades de agua. En este sentido en la Figura 51 se observa que, en promedio, los puntos E1, E2 y E3 extraen caudales de 1.428, 1.779 y 2.826 l/s, respectivamente. La razón por la cual E3 es la que más agua consume, se debe a que posee dos mangueras de gran diámetro (2 pulg.) que tienen acceso a una oferta hídrica considerable, pues su lugar de captación se encuentra cerca del punto de desfogue y allí la corriente principal transporta más fluido.

Otro factor que evidencia la Figura 51, es el gran rango de variación que presentan los caudales del punto E3 (2.175 l/s) con respecto a los puntos E2 (0.858 l/s) y E1 (0.875 l/s). Se sugiere que la razón de ello radica en el patrón de consumo al que están sometidas las mangueras que salen de E3, a las conexiones y desconexiones que ejecutan en las mismas, y a los procesos de colmatación que reducen la sección transversal de la manguera. De hecho, en las visitas al sitio de estudio, en ciertas ocasiones se observaron habitantes realizando procesos de limpieza en las entradas de las mangueras, con la finalidad de generar aumentos en el transporte de caudal.



Figura 50. Descripción del sistema de extracciones hídricas.

Tabla 21. Detalle de los puntos más importantes del sistema de extracciones.

Elemento	Descripción	Imagen
Punto de extracción E1	Corresponde a un dique improvisado compuesto por rocas, suelo y vegetación de la zona. En el fondo del empozamiento posee una manguera de polietileno de 2 pulgadas que sigue el enrutamiento del cauce hasta llegar a los cultivos de la Unidad Intervenida (Figura 50). Debido a que el funcionamiento de esta manguera está destinado al riego de los cultivos, según el habitante de la zona al que se le consultó, funciona dos días por semana en los meses más secos. Como observación, cuando esta manguera se pone en funcionamiento consume toda el agua que transporta el cauce aguas arriba. En caso de no funcionar, el agua continúa su recorrido por la corriente principal.	
Punto de extracción E2	Comprende una derivación a modo de zanja o canal abierto sin revestimiento artificial. La zanja tiene como función desviar el flujo desde la corriente principal hacia tres tanques, con el objetivo de almacenar el agua para luego transportarla a 10 viviendas (nueve en el exterior y una en el interior de la unidad) (Figura 50). Con respecto al uso del agua extraída, según el habitante consultado, corresponde al consumo humano; sin embargo, no se corroboró este planteamiento debido a la complejidad del contexto. Como observación, el agua que transporta esta derivación no retorna a la corriente así la gente demande o no el servicio, por el contrario, sigue la zanja hacia el exterior de la unidad para luego retornar más abajo del punto de desfogue.	
Sistema de tanques	Corresponde a tres tanques que se ubican en el margen de la zanja del punto de extracción E2 (Figura 50). Dos de los tanques están hechos en mampostería y el otro se encuentra improvisado como el dique del punto de extracción E1. De los tanques surgen mangueras de polietileno de diámetros de 1 ½ y ½ pulgada para el uso descrito de las 10 viviendas. Como observación, cuando no se utiliza el servicio los tanques devuelven el flujo a la zanja para que siga su recorrido hacia el exterior de la unidad.	
Punto de extracción E3	Comprende un dique en mampostería que posee dos mangueras de polietileno de 2 pulgadas cada una. Ambas mangueras siguen el recorrido del cauce hasta que salen de la unidad hidrográfica. Con respecto al uso, según la consulta realizada al habitante, corresponde al consumo humano. Sin embargo, esto no se pudo confirmar debido a las grandes longitudes que atraviesan las mangueras. Además, por la posición del punto (debajo de los cultivos), no pareciera ser adecuado para tal fin. Como observación, las mangueras succionan gran parte del caudal de la corriente hídrica principal. En este sentido, cuando las mangueras no están en funcionamiento, el caudal continúa su camino por el cauce de la unidad.	

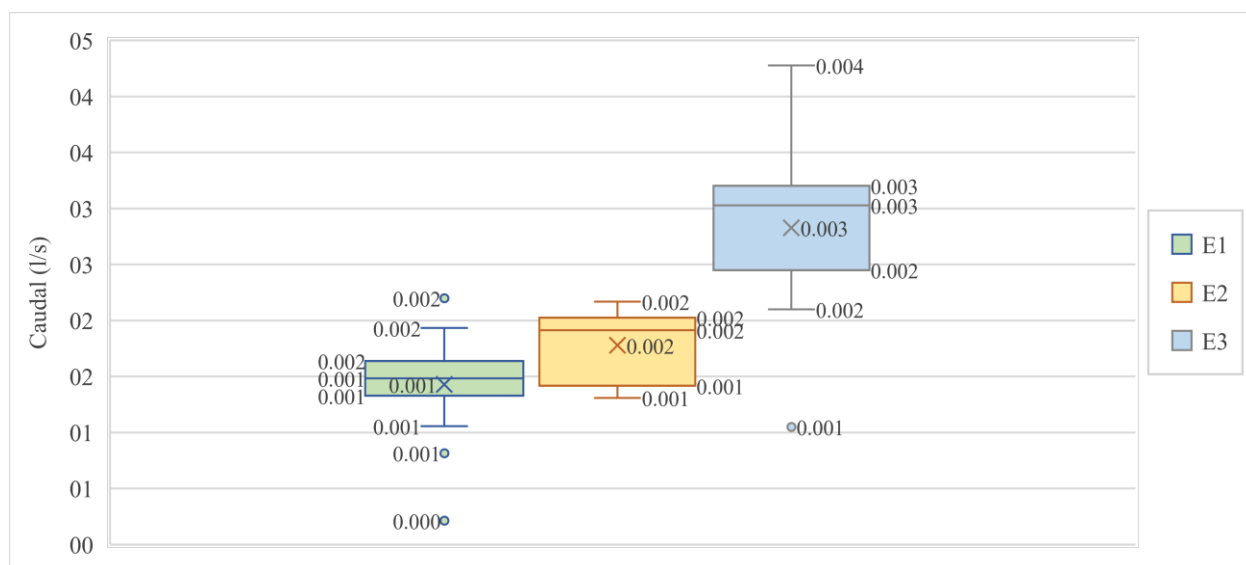


Figura 51. Análisis estadístico de los caudales aforados en cada punto de extracción.

Teniendo en cuenta que las captaciones de agua desvían el caudal de la corriente principal y que, esas cantidades no son medidas en la estación hidrométrica localizada en el punto de cierre de la Unidad Intervenida; se hace necesario estimar la cantidad de agua que se extrae de la unidad hidrográfica con respecto a la que produce en su totalidad.

Para lograr este objetivo, se estimó el Índice de Uso de Agua (IUA) y el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVH) de la Unidad Intervenida, a partir de: los caudales medios de extracción; el flujo promedio diario medido en el cierre; el trazado de la Curva de Duración de Caudales (CDC); la estimación del Índice de Regulación Hidrológica (IRH); y la definición del caudal ambiental, tal como se detalla en los Apéndices M y P.

Para estudiar esta situación se plantearon dos escenarios extremos, uno en el que convergen todas las extracciones y otro en el que no. En el primer escenario, en promedio se extrae de la unidad un caudal de 6.033 l/s, que corresponde a la suma de los caudales promedio que salen de los puntos E1, E2 y E3. En el segundo, en promedio se extrae un caudal de 1.779 l/s, que corresponde al caudal que sale del punto E2, el cual no depende de patrones de consumo, pues allí independientemente si se consume o no, el agua sigue el recorrido de la zanja hacia afuera de la unidad. En concordancia con los escenarios establecidos y de acuerdo con el procedimiento llevado a cabo en el Apéndice P, los resultados se pueden visualizar en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados del IUA e IVH de la Unidad Hidrográfica Intervenida.

Escenario	Descripción	Demanda promedio (l/s)	Oferta promedio (l/s)	Caudal ambiental (l/s)	IUA	IVH
Primero (pesimista)	Todos los puntos de extracción funcionan al tiempo.	6.033	8.647	1.013	79.0% (muy alto)	Alto
Segundo (optimista)	Solo el punto de extracción E2 se encuentra en funcionamiento.	1.779	8.647	1.013	23.3% (alto)	Alto

Los valores de los indicadores presentados en la Tabla 22, evidencian que la Unidad Hidrográfica Intervenida se encuentra sometida a consumos y vulnerabilidades altas en los dos escenarios. Como consecuencia, el hecho de que los valores del IUA hayan resultado altos y muy

altos, indica que la unidad se encuentra sometida a un nivel importante de presión, puesto que los caudales que se demandan son más grandes que los recomendados. Por otra parte, si se considera que la Unidad Hidrográfica Intervenida presentó niveles bajos de regulación (Apéndice P), se puede enunciar que la unidad presenta un grado de fragilidad importante de desabastecimiento.

Estos hallazgos son relevantes, ya que debido a la dinámica de extracciones hídricas que presenta la unidad hidrográfica, en el futuro pueden presentarse problemáticas asociadas a conflictos por el uso del agua, causados por el desabastecimiento que puede empeorar en los meses de sequía, y ante amenazas como el cambio climático y la incidencia de fenómenos cálidos como El Niño. Por esta razón, a pesar de que en esta unidad hidrográfica los habitantes usan el servicio de abastecimiento hídrico, se debe considerar que el recurso es limitado y que en algunos casos puede llegar a sobreexplotarse.

6.3. Evaluación de los impactos hidrológicos sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica

En esta parte del documento, se presentan y discuten los resultados de la evaluación de los impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, generados por las alteraciones en los usos y las coberturas de los suelos. Los resultados de este componente incluyen la aplicación y el análisis de los métodos e índices hidrológicos seleccionados y la discusión del estado de los servicios.

6.3.1. Aplicación y análisis de métodos hidrológicos para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica

Se aplicaron y analizaron los métodos hidrológicos considerados en la Tabla 12; es decir, se utilizaron hietogramas e hidrogramas, curvas acumuladas y curvas de duración de caudales para el estudio de los dos servicios en las Unidades Intervenida y No Intervenida.

6.3.1.1. Análisis de eventos en hietogramas e hidrogramas

Inicialmente, los impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica se abordaron por medio del análisis de secciones representativas de los hietogramas e hidrogramas registrados, a partir del estudio de eventos de precipitación ocurridos en meses secos y húmedos (Figuras 52, 53, 54 y 55).

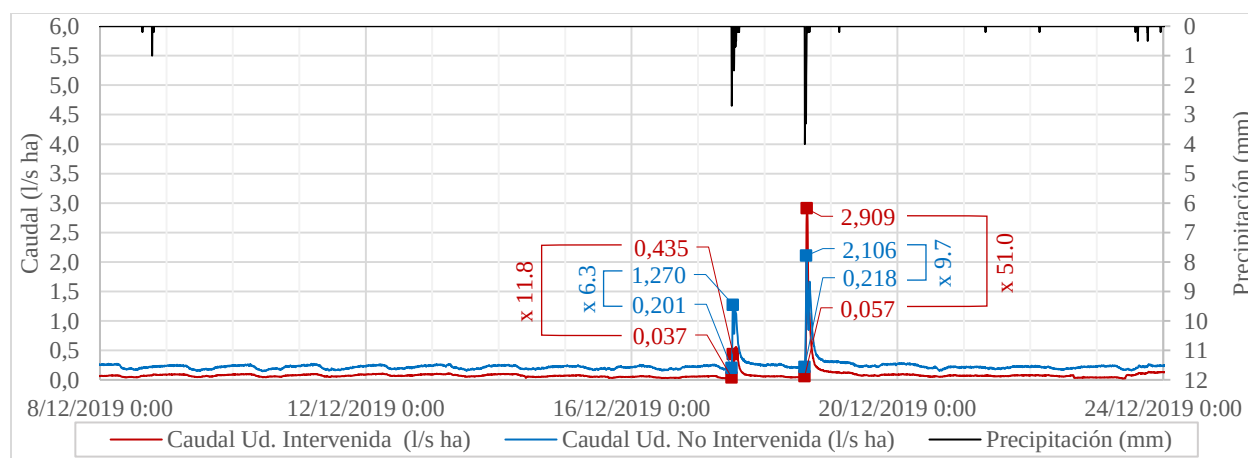


Figura 52. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de eventos de precipitación acontecidos en un mes seco (diciembre de 2019).

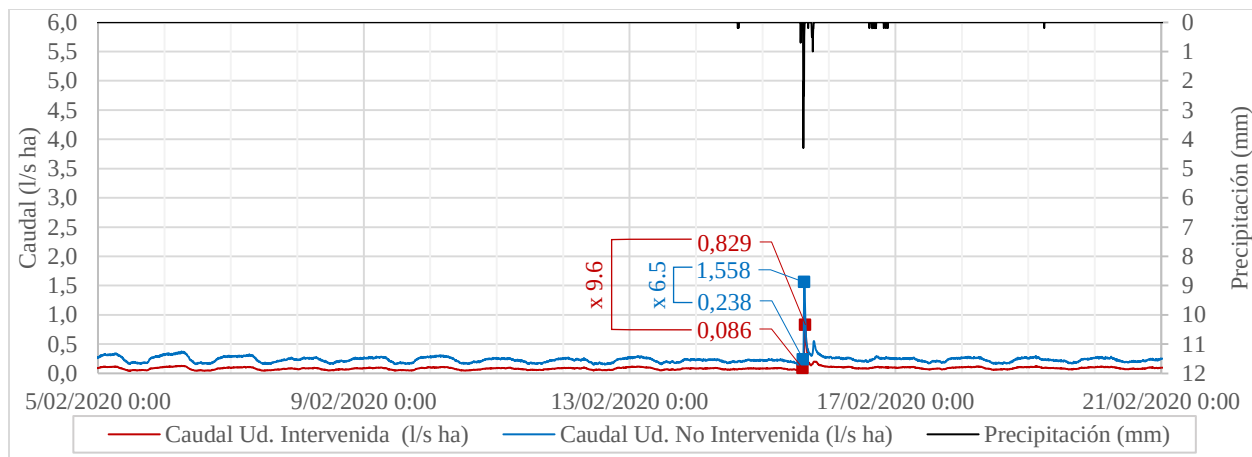


Figura 53. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de un evento de precipitación acontecido en un mes seco (febrero de 2020).

El análisis de los eventos de precipitación ocurridos en los meses secos (Figuras 52 y 53), permitió plantear premisas interesantes acerca del comportamiento de los dos servicios. En relación con el abastecimiento hídrico, en las dos figuras se observa que la unidad de control registra más caudal por unidad de área en el punto de desfogue, en comparación con la unidad sometida a intervención. Con respecto a este fenómeno, se plantea que las razones principales que lo sustentan, se basan en la presencia de extracciones hídricas que generan desvíos del flujo de la corriente principal para diversos usos, además de, la existencia de transformaciones en los territorios que disminuyen la capacidad de los suelos de sostener flujos mayores (Patiño, 2020).

Con respecto a la regulación hídrica, en las Figuras 52 y 53 se puede notar que, para los mismos eventos de precipitación, en dos de tres ocasiones la Unidad No Intervenido presentó caudales mayores que la Unidad Intervenido. Sin embargo, este criterio no necesariamente implica que la unidad de control presenta menores niveles en la prestación del servicio, ya que el servicio de regulación más que una cuestión de cantidad, se encuentra vinculado a la variabilidad de los flujos (Ochoa-Tocachi et al., 2016A). En este sentido, en las Figuras 52 y 53 se pueden observar las proporciones de los ascensos que ocurren entre los valores de caudal, específicamente, entre el caudal donde empieza el crecimiento de los hidrogramas y el flujo pico. En relación con ello, las proporciones resultaron ser mayores en la unidad sometida a intervención que en la unidad de control. Esto sugiere que en los períodos más secos (que suelen ser los más críticos), la Unidad Intervenido posee menor capacidad de regulación que la Unidad No Intervenido, llegando incluso a presentar caudales que pueden alcanzar valores de hasta 51 veces su valor inicial (Figura 52).

Los resultados obtenidos en el análisis realizado para los períodos más secos (Figuras 52 y 53), difieren en algunos aspectos con los del estudio de eventos en los meses más húmedos (Figuras 54 y 55). En el caso del servicio de abastecimiento hídrico, se puede observar que la producción de caudal por unidad de área de la Unidad Intervenido se encuentra por debajo de la Unidad No Intervenido en abril de 2021 (Figura 55), pero alcanza los niveles de la unidad de control en octubre de 2020 (Figura 54). Este comportamiento puede ser explicado a través de los antecedentes de precipitación que se presentaron en los meses anteriores, puesto que, en el caso de octubre, en los meses previos los niveles de precipitación fueron altos; mientras que, en el caso de abril, la cantidad de lluvia fue baja en los meses precedentes (Figura 33). Teniendo en cuenta que las

extracciones hídricas desvían el flujo para usos de consumo y riego, se plantea que el motivo por el cual, en los meses más húmedos, los niveles de la Unidad Intervenido tratan de recuperar sus valores normales (Figura 54), se debe a que estas extracciones disminuyen en gran manera su uso. Sin embargo, como se identificó para el mes de abril (Figura 55), en aquellos meses que tienen antecedentes de sequía, los valores de caudal aún pueden presentar niveles menores a lo esperado.

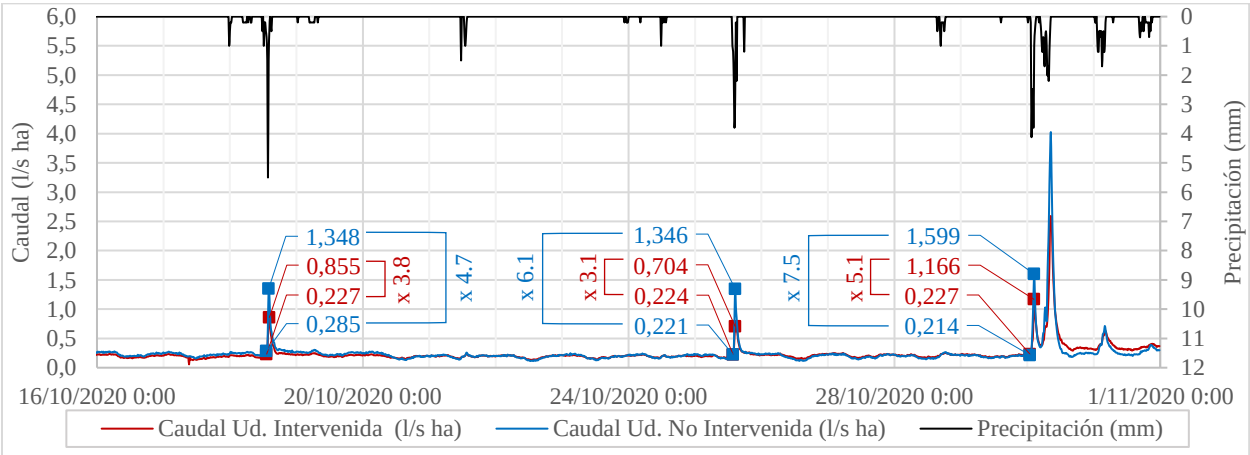


Figura 54. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de eventos de precipitación acontecidos en un mes húmedo (octubre de 2020).

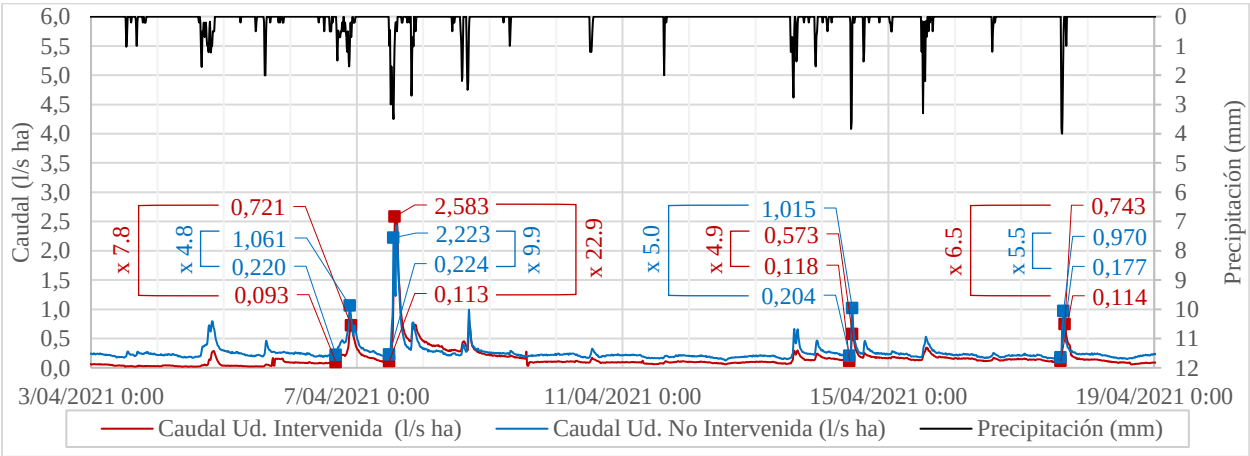


Figura 55. Análisis de impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, a través del estudio de eventos de precipitación acontecidos en un mes húmedo (abril de 2021).

En relación con el servicio de regulación hídrica, el análisis de los eventos de precipitación en los meses más húmedos (Figuras 54 y 55), permitió identificar que las proporciones de los ascensos de caudal siguen siendo mayores en la Unidad Intervenido (Figura 55). Sin embargo, en oposición al patrón esperado, también se encontró que para el mes de octubre las proporciones resultaron ser mayores en la Unidad No Intervenido (Figura 54), lo cual podría indicar un declive en el servicio de regulación. A pesar de ello, se sugiere que el motivo por el cual esto ocurre radica de nuevo en los antecedentes de humedad que, al ser altos en el caso de octubre, promueven que los suelos de la unidad de control se encuentren más saturados que los de la unidad sometida a intervención, debido a sus capacidades de regulación mayores. Por ello, las precipitaciones que ocurren generan

escorrentías y proporciones mayores en los ascensos de caudal en la Unidad No Intervenida que en la Unidad Intervenida, aunque estas diferencias no llegan a ser significativamente superiores.

En síntesis, el análisis de los eventos de las secciones representativas de los hietogramas e hidrogramas permitió identificar que, tanto para los períodos secos como los húmedos, la Unidad No Intervenida presenta niveles superiores en la producción y regulación de los flujos hídricos, en comparación con la Unidad Intervenida. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los antecedentes de humedad de los suelos juegan un papel importante en este tipo de análisis, pues de no considerarse, podrían generarse conclusiones distintas a las esperadas.

6.3.1.2. Análisis de curvas acumuladas

Las alteraciones a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, también se abordaron a través del análisis de las curvas de volumen acumulado de precipitación y descarga, a partir de la información monitoreada en las dos unidades hidrográficas de estudio. Para ello, teniendo en cuenta que debido a ciertos inconvenientes el monitoreo hidrométrico no pudo hacerse de manera constante (Figura 17), en vez de una curva, se generaron cuatro gráficas que representan el comportamiento acumulado de las variables para cada período continuo (Figuras 56, 57, 58 y 59).

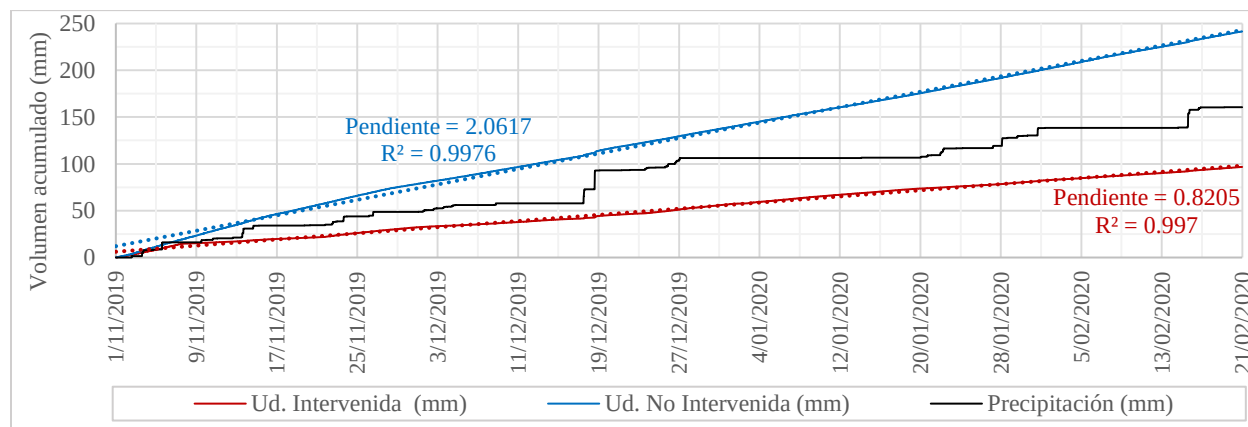


Figura 56. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el primer período continuo de registros (desde noviembre de 2019 hasta febrero de 2020).

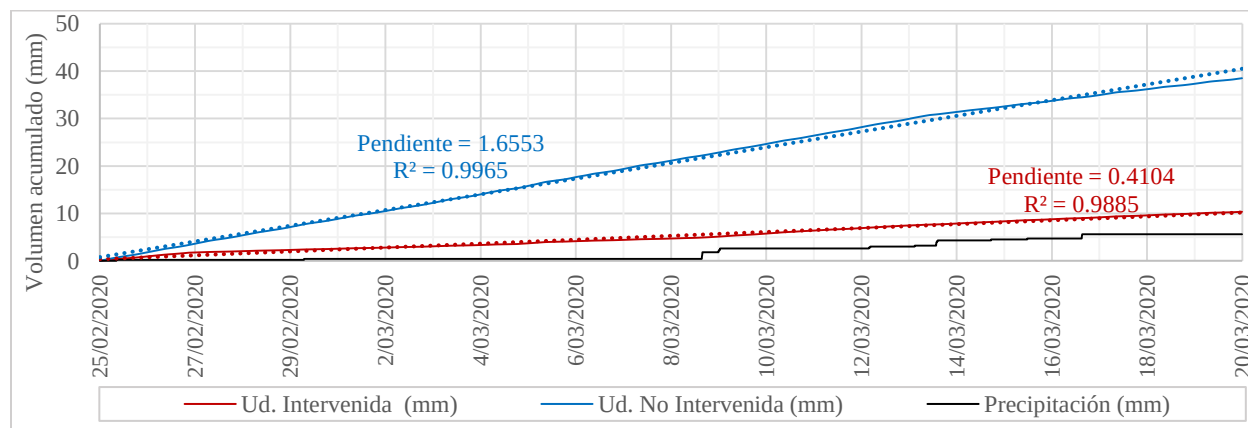


Figura 57. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el segundo período continuo de registros (desde febrero de 2020 hasta marzo de 2020).

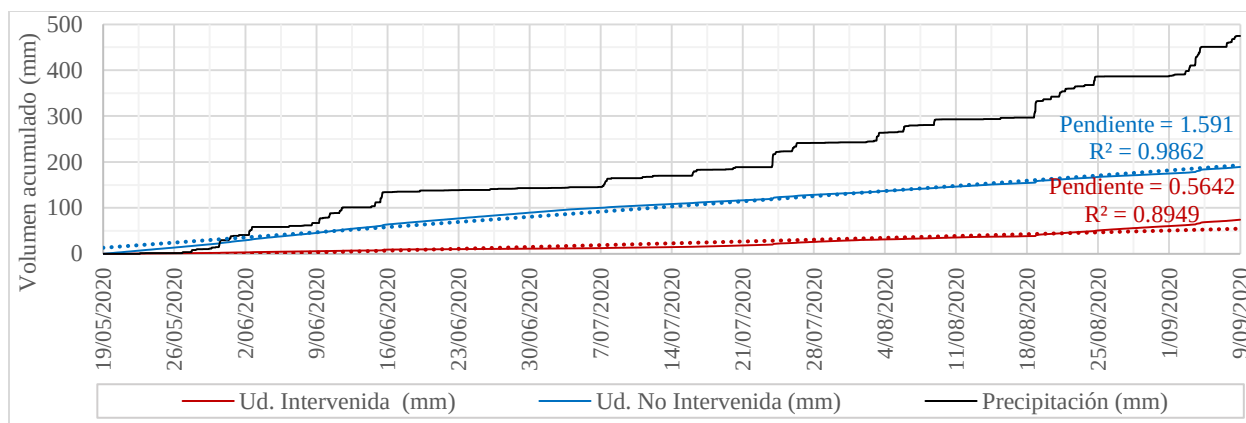


Figura 58. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el tercer período continuo de registros (desde mayo de 2020 hasta septiembre de 2020).

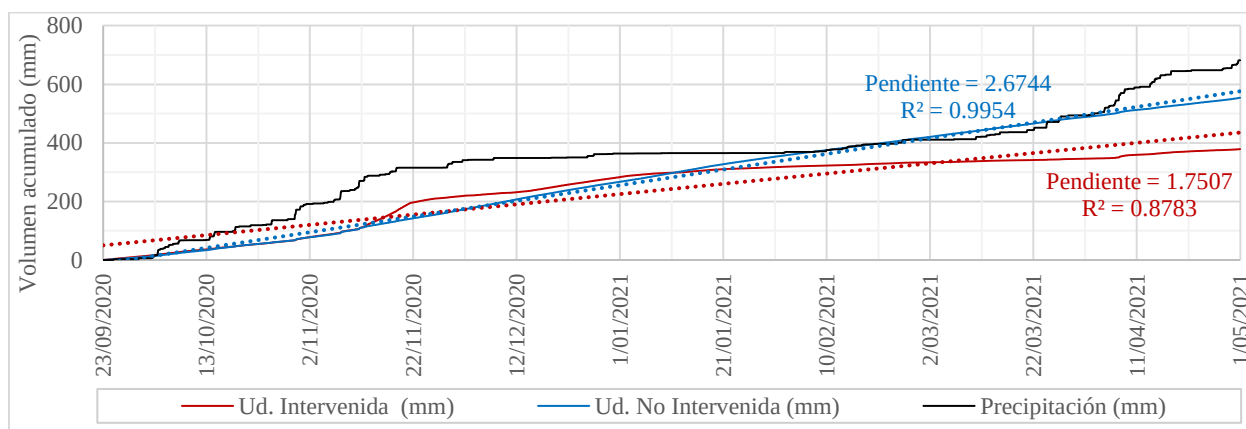


Figura 59. Curvas acumuladas de precipitación y descarga para el cuarto período continuo de registros (desde septiembre de 2020 hasta abril de 2021).

Con referencia al servicio de abastecimiento, las Figuras 56, 57, 58 y 59, demuestran que las descargas acumuladas de la Unidad No Intervenido, suelen ser superiores a las de la Unidad Intervenido. Esta observación se puede confirmar al considerar las pendientes de las tendencias lineales de cada figura, pues allí se puede inferir que, al promediar los cuatro valores de cada unidad hidrográfica el resultado es casi el doble para la Unidad No Intervenido (1.996), que para la Unidad Intervenido (0.886). Como se ha discutido en análisis anteriores, este patrón se explica al menos por dos razones: (i) la existencia de extracciones hídricas, que sustraen el flujo de la corriente principal sobre todo en las épocas más secas (Figuras 56 y 57); y (ii) la influencia de los cambios de los usos y las coberturas naturales, que promueven aumentos en la evapotranspiración, alteraciones en la capacidad de retención hídrica de los suelos y rutas de drenaje preferenciales.

En cuanto a las transformaciones de los territorios, en el estudio de Patiño (2020) se encontró que los cambios de los usos y las coberturas naturales en la Unidad Intervenido, impactaron negativamente a las propiedades del suelo relacionadas con los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, primordialmente, en lo que respecta a los primeros centímetros de profundidad. En promedio, Patiño (2020) encontró: reducciones en el contenido de humedad (22%); declives en la materia orgánica (11%); aumentos en el pH (1.1); incrementos en la conductividad eléctrica (56 $\mu\text{S}/\text{cm}$); y crecimientos en la densidad del suelo (1.08 g/cm^3).

En relación con el servicio de regulación hídrica, en las Figuras 56, 57, 58 y 59 se puede observar que, en promedio, el valor del coeficiente de determinación es mayor para la Unidad No Intervenida (0.994) que para la Unidad Intervenida (0.940). Estos resultados indican que la descarga acumulada de la unidad de control presenta mayor linealidad (y menor variación) que la de la unidad sometida a intervención. Por otra parte, al estimar los coeficientes de variación de las cuatro pendientes, se puede encontrar que los valores son casi tres veces mayores en la Unidad Intervenida (0.677) que en la Unidad No Intervenida (0.250). Estos resultados demuestran que la descarga de la unidad sometida a intervención presenta más variabilidad que la descarga de la unidad de control y, por consiguiente, que el servicio de regulación presenta mejores condiciones en la Unidad No Intervenida, pues esta unidad es capaz de mantener niveles más constantes a lo largo del año, a diferencia de la Unidad Intervenida.

Finalmente, otro aspecto que demuestra la capacidad que tiene la unidad de control de regular los flujos se observa en las Figuras 56 y 57. En estos gráficos es posible evidenciar que la línea acumulada de la descarga de la Unidad No Intervenida, se encuentra sobre la línea acumulada de la precipitación. Aunque en principio este comportamiento puede parecer contrario a lo esperado, en opinión del autor, muestra la alta capacidad que tiene esta unidad para regular los flujos ya que, a diferencia de la otra unidad, la unidad sin intervención es capaz de mantener caudales significativos en tiempos de sequía.

6.3.1.3. Análisis de curvas de duración de caudales

Otro de los métodos empleados para estimar los impactos a los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, se basó en el análisis comparativo de distintas Curvas de Duración de Caudales (CDC), construidas a partir de los flujos monitoreados por las estaciones hidrométricas (Figuras 17 y 20) y la información recopilada en la revisión sistemática de literatura (Tabla 1). Como resultado, se crearon tres gráficas que contrastan el comportamiento de las dos unidades hidrográficas de estudio (Figura 60), además de, su relación con otras unidades no intervenidas e intervenidas compiladas a partir de otras investigaciones (Figuras 61 y 62, respectivamente).

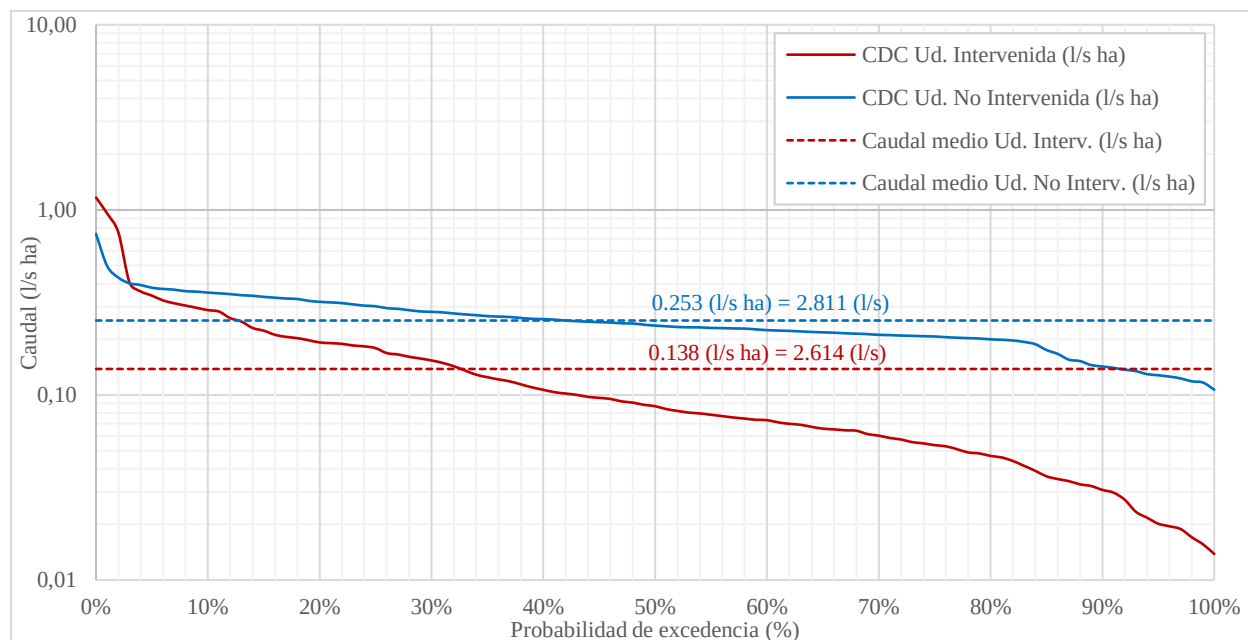


Figura 60. Curvas de duración de caudales de las dos unidades hidrográficas.

Inicialmente, a través del análisis comparativo realizado a las CDC de las Unidades Intervenido y No Intervenido (Figura 60), fue posible identificar diferencias notables en la posición de las curvas y sus inclinaciones.

Con respecto a la posición, en la Figura 60 se puede notar que la CDC de la Unidad Intervenido, en la mayoría de los porcentajes de excedencia, se localiza por debajo de la CDC de la Unidad No Intervenido. Adicionalmente, se evidencia que esta separación entre las curvas tiende a ser más notoria a medida que los porcentajes de excedencia aumentan; es decir, que la diferencia entre los valores de caudal por unidad de área, tiende a ser mayor para los flujos más bajos que para los flujos más altos.

Este patrón ha sido identificado por diversos autores (p. ej., Buytaert et al., 2007; Ochoa-Tocachi et al., 2016A) como una señal de declive en el rendimiento y la oferta del servicio de abastecimiento hídrico, promovida por: (i) cambios en los usos y las coberturas de los suelos, que generan aumentos en el consumo de agua de las nuevas especies cultivadas; (ii) incrementos en los requerimientos de riego (sobre todo en los meses más secos); (iii) ascensos en la conductividad hidráulica; y (iv) aumentos en el drenaje de los suelos a través de canales artificiales. Como resultado de estos impactos, a pesar de que ambas unidades son prácticamente iguales, el caudal medio por unidad de área que llega al punto de desfogue de la Unidad Intervenido es casi la mitad del flujo medio que drena la Unidad No Intervenido (Figura 60).

En relación con la inclinación de las curvas, en la Figura 60 se evidencia que la CDC de la unidad sometida a intervención, presenta una pendiente mayor que la CDC de la unidad de control. Como en el caso anterior, este comportamiento también ha sido reconocido por otros investigadores (p. ej., Buytaert et al., 2007; Cárdenas y Tobón, 2017; Ochoa-Tocachi et al., 2016A; 2016B), quienes lo han asociado a un cambio negativo en la prestación del servicio de regulación hídrica. En los documentos citados, los autores sostienen que el hecho de que la curva esté más inclinada es un indicador de que los caudales son más variables en el tiempo, lo cual, para el caso de la Unidad Intervenido, se puede notar en el rango que abarca la curva (de 0.014 a 1.166 l/s ha), el cual es casi el doble en comparación con el de la Unidad No Intervenido (de 0.107 a 0.741 l/s ha).

Como argumento a la variabilidad de los flujos, un estudio desarrollado en las mismas unidades hidrográficas de este proyecto (Patiño, 2020) y otras investigaciones adelantadas en ecosistemas de páramo semejantes (Buytaert et al., 2005; Daza et al., 2014; Lis-Gutiérrez et al., 2019; Otero et al., 2011; Thompson et al., 2021), encontraron que sus causas obedecen principalmente a los cambios que sufren las propiedades hidrofísicas de los suelos, tales como: (i) disminución en la capacidad de almacenamiento de humedad; (ii) aumento en la densidad aparente; (iii) disminución en la porosidad total; (iv) degradación del porcentaje de carbono orgánico; (v) incremento en la hidrofobicidad; (vi) ascenso en la conductividad hidráulica; y (vii) aumento de las tasas de erosión y pérdida de suelo.

En síntesis, todos los impactos anteriores conducen a que los suelos afectados disminuyan su capacidad de retención hídrica, promoviendo que las cantidades de agua que ingresan a la Unidad Intervenido sean drenadas más rápidamente que en condiciones naturales. Como consecuencia, este fenómeno conlleva a que el sistema hidrológico presente menores habilidades de almacenar agua y ofertar un flujo sostenido en el tiempo, lo cual, según las definiciones enunciadas (numeral 4.1.3), afecta negativamente al servicio de regulación hídrica y por extensión al servicio de abastecimiento hídrico.

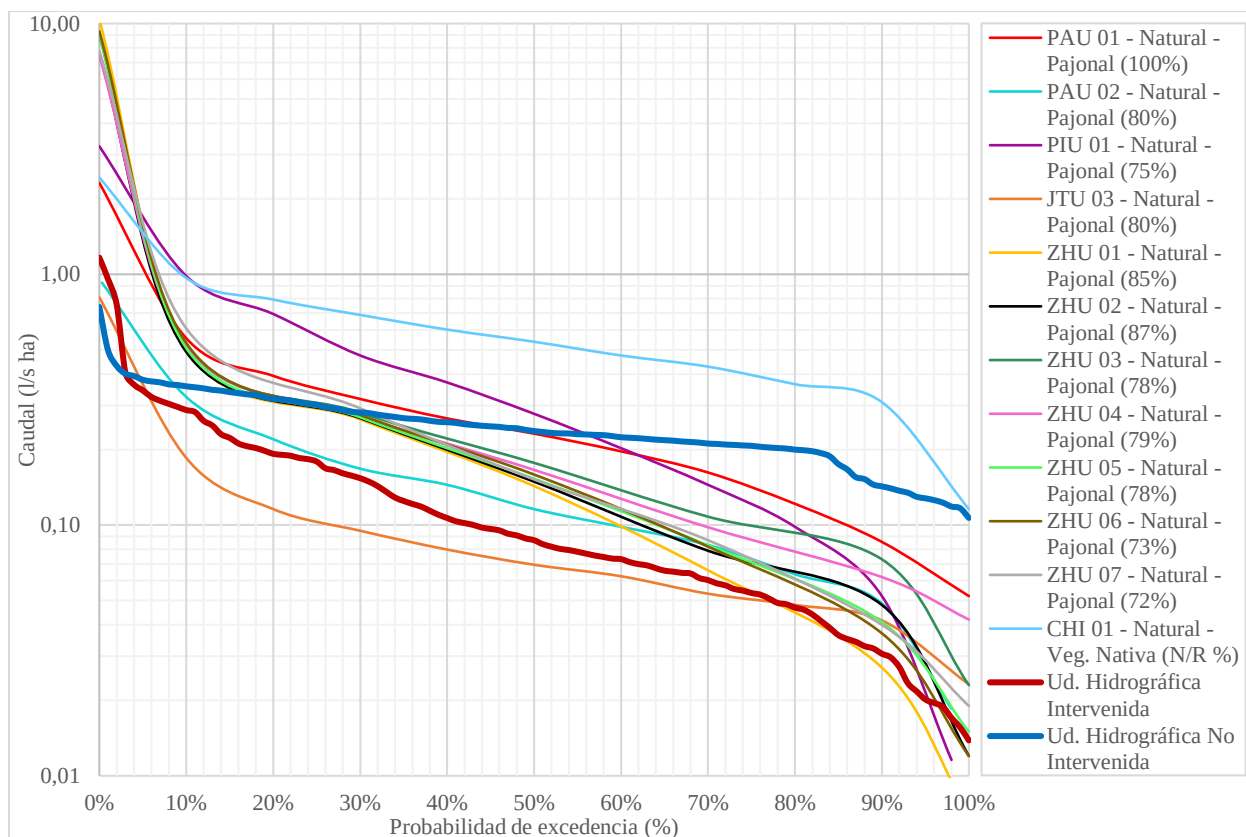


Figura 61. Comparación de las curvas de duración de caudales de las dos unidades de estudio, con respecto a unidades referentes no intervenidas identificadas en la revisión de literatura.

Tras estudiar de manera comparativa las CDC de las dos unidades hidrográficas de estudio, se contrastaron estos resultados con respecto a los hallazgos obtenidos en otras unidades no alteradas de páramo (Figura 61). En el análisis se logró evidenciar que, aunque todas las curvas tienen en común la condición de representar unidades bien conservadas, existe una variación amplia en el comportamiento de sus flujos, la cual puede ser explicada a través de la diversidad regional de los páramos.

Para Llambí et al. (2012), las variaciones que se dan a escala regional y continental en aspectos como: la geología, altitud, latitud, clima, topografía, condiciones hidrometeorológicas, historia de uso, grado de aislamiento geográfico, vegetación dominante y tipos de suelo, son las razones por las que cada unidad hidrográfica de páramo se comporta de manera distinta en relación con la gestión de las cantidades del ciclo hidrológico que opera en su interior. Como resultado de ello, cada unidad hidrográfica de cada tipo de páramo presenta sus propias cualidades en la prestación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica (Ochoa-Tocachi et al., 2016A).

Otra característica interesante que surge al revisar las CDC resultantes tiene que ver con el caudal normalizado por el área que genera cada una de las unidades. En la Figura 61 se puede observar que las unidades hidrográficas de referencia denominadas CHI 01 y PIU 01, son las que más rendimiento hídrico generan, mientras que las unidades PAU 02 y JTU 03, son las que presentan los flujos más bajos. La razón de este comportamiento radica principalmente en los valores de lluvia anual que se precipitan en promedio sobre las unidades hidrográficas, los cuales, para el caso de las cuatro unidades citadas corresponden a: 3098, 2239, 1092 y 849 mm, respectivamente (Cárdenas y Tobón, 2017; Ochoa-Tocachi et al., 2016A).

Como resultado de lo enunciado, si se considera que la posición vertical de la CDC es un insumo que describe el servicio de abastecimiento hídrico, se puede concluir que la oferta de este servicio está íntimamente asociada a las cantidades de lluvia que se precipitan en las unidades hidrográficas. Por esta razón, los páramos más húmedos tienden a presentar mayores rendimientos hídricos y mayor oferta en el servicio de abastecimiento; mientras que, los páramos más secos, tienden a presentar menores rendimientos hídricos y menor oferta en la prestación de este servicio.

Como consecuencia de ello, en la Figura 61 se observa que la CDC de la unidad hidrográfica de control se encuentra en una posición intermedia en comparación con las demás unidades de referencia, debido a que la precipitación anual que en promedio cae sobre esta unidad, presenta valores cercanos a los 1090.1 mm (según el año 2020 de la Figura 33). En este sentido, en concordancia con el análisis realizado, resulta vital gestionar de manera adecuada los recursos hídricos de las unidades de estudio, ya que sus capacidades de ofertar el servicio de abastecimiento hídrico son intermedias (en condiciones naturales) en comparación con otras unidades de páramo, pudiéndose deteriorar esta capacidad si se presentan cambios negativos en el uso y las coberturas de los suelos, tal como sucede en el caso de la Unidad Intervenida (Figura 61).

En relación con la regulación hídrica, al abordar este servicio mediante el análisis de las pendientes del tercio central de las CDC (Ochoa-Tocachi et al., 2016A), se puede evidenciar que existe una variación considerable entre las inclinaciones de las curvas de referencia, a pesar de que todas las unidades hidrográficas tienen en común la ausencia de intervenciones sobre sus territorios (Figura 61). Como evidencia de ello, en la figura anterior es posible observar que las unidades ZHU 01 y PIU 01 poseen las pendientes más altas de la muestra; mientras que, las unidades JTU 03 y CHI 01 presentan las inclinaciones más bajas del grupo.

El resultado de este comportamiento diferencial, en contraste a lo descrito para el servicio de abastecimiento, no subyace en la cantidad de lluvia que cae sobre las unidades hidrográficas, pues en la Figura 61 se puede identificar que unidades con distintos niveles de precipitación, pueden poseer CDC con pendientes muy similares (p. ej., las unidades CHI 01 y JTU 03). Sin embargo, la variabilidad temporal de la lluvia sí puede tener un rol importante en el servicio de regulación hídrica, pues no es lo mismo que a un sistema hidrológico le ingrese la misma cantidad de lluvia en un régimen unimodal que en uno bimodal (Arias et al., 2017). A pesar de ello, según diferentes autores, la razón de esta diferencia radica primordialmente en la variabilidad natural de los ecosistemas de páramo, en especial, en factores como el relieve, las coberturas y los tipos de suelo, ya que son estos aspectos los que gobiernan el almacenamiento, el drenaje y el tránsito de los flujos por las unidades (Bonnesoeur et al., 2019; Garzón-Sánchez et al., 2021).

Continuando con el análisis del servicio de regulación hídrica, si se compara el comportamiento de las dos unidades hidrográficas de estudio con respecto al conjunto de unidades de referencia no intervenidas (Figura 61), se pueden notar dos puntos interesantes.

El primero consiste en que la Unidad Hidrográfica No Intervenida es la que mejor regulación presenta, pues ninguna de las otras unidades de referencia exhibe una pendiente tan horizontal como la de esta unidad, lo cual evidencia que la Unidad No Intervenida tiene una capacidad notable de mantener un rendimiento hídrico similar a lo largo del año, sin presentar grandes variaciones entre sus flujos altos y bajos (Searcy, 1959). En relación con las causas de este comportamiento, cabe mencionar que esta investigación no está diseñada para escudriñar estos detalles; sin embargo, la razón por la que la Unidad No Intervenida es la que mejor regula de la muestra (Figura 61), parece estar asociada a condiciones propias del sitio de estudio (un ecosistema de páramo seco con tendencia a semihúmedo), tales como la topografía, el régimen anual de las lluvias y los tipos de suelo, que en este caso se compaginan muy bien para ofertar un alto nivel de regulación hídrica.

El segundo punto se basa en que la Unidad Hidrográfica Intervenida, a pesar de que se encuentra sometida a cambios en el uso y la cobertura de sus suelos, no está necesariamente fuera del rango de variabilidad natural de los páramos (Figura 61), pues sus afectaciones medidas a través de la inclinación de la CDC no son extremas, llegando incluso a ser menores que las que presenta la CDC de la unidad de referencia denominada PIU 01, la cual es mucho más inclinada. Sin embargo, es claro que los cambios en el uso y la cobertura de los suelos a los que está sometida la Unidad Intervenida, sí promueven pérdidas en la capacidad de prestación del servicio hidrológico de regulación hídrica, pues como se puede ver en la Figura 61, tienden a inclinar la CDC de esta unidad (en comparación con su unidad de control).

Finalmente, otra conclusión relevante que surge del segundo punto, consiste en la importancia de que el análisis a los servicios hidrológicos de las unidades, se realice de manera comparativa con respecto a otras unidades semejantes localizadas en la misma área geográfica y no en relación con otras unidades de ecosistemas similares ubicados en otros sitios, pues de no tenerse en cuenta esta connotación los resultados podrían conducir a falsos negativos (p. ej., que la Unidad Intervenida está bien, porque regula más que otras unidades conservadas).

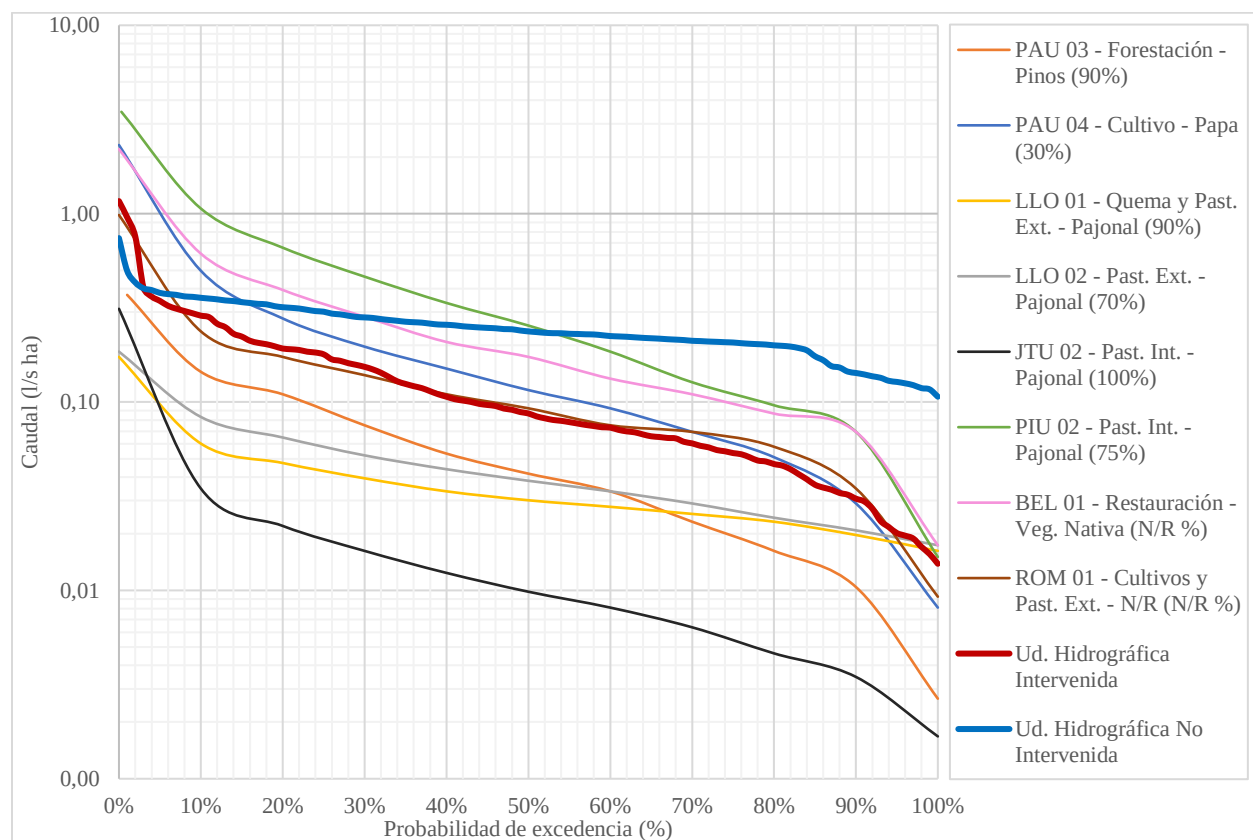


Figura 62. Comparación de las curvas de duración de caudales de las dos unidades de estudio, con respecto a unidades referentes intervenidas identificadas en la revisión de literatura.

Tras analizar las CDC de las dos unidades de estudio (Figura 60) y comparar sus resultados con los de otras unidades de referencia no alteradas (Figura 61), se contrastaron las curvas de las dos unidades de interés con respecto a las de otras unidades análogas sometidas a intervención (Figura 62). En este análisis se lograron identificar aspectos relevantes asociados a la variabilidad de las curvas, el servicio de abastecimiento y el de regulación hídrica.

En primer lugar, se observa que existe una diferencia notable en el comportamiento que caracteriza a cada una de las CDC, evidenciándose variaciones en la posición y la inclinación de las curvas. En este caso, a diferencia de la variabilidad identificada en las CDC de la Figura 61, la variedad de las curvas puede ser explicada como la suma de varios factores que actúan al mismo tiempo, tales como la diversidad natural de los páramos y las particularidades de las intervenciones antrópicas a las que está sometida cada unidad hidrográfica.

Los factores anteriores, según diversos autores (p. ej., Best et al., 2003; Bosch y Hewlett, 1982; Brown et al., 2005; Hibbert, 1967), conllevan a que cada caso de afectación a nivel de coberturas y usos del suelo en diferentes unidades hidrográficas, deba ser estudiado de manera específica, debido a que los efectos de las intervenciones cambian en función de variables distintas, tales como: el tipo de tratamiento; el porcentaje de área intervenida; la localización de la zonas alteradas; las especies vegetales involucradas; la etapa de crecimiento de las especies; el pasado de las afectaciones ejecutadas en la unidad hidrográfica; la duración del período de investigación; la información hidrometeorológica base; las diferencias geológicas; altitudinales; topográficas; climáticas; y edáficas de los ecosistemas a los cuales pertenecen las unidades hidrográficas.

El planteamiento anterior, no necesariamente implica que no se puedan comparar estudios de cuencas experimentales similares, de hecho, en varias revisiones de literatura se realiza (p. ej., Sahin y Hall, 1996) e incluso en esta investigación también se hace. Más bien, busca aclarar las bases de la comparación y resaltar la importancia de que, al contrastar los servicios de abastecimiento y regulación hídrica de distintas unidades hidrográficas sometidas a intervención, siempre se debe actuar con prudencia y considerar las distintas variaciones de cada caso de estudio.

Habiendo establecido las características de la comparación, en relación con el servicio de abastecimiento hídrico, la Figura 62 permitió identificar varios comportamientos interesantes. Uno de ellos consiste en que, como era de esperarse, la Unidad Hidrográfica No Intervenida presenta los caudales más altos para casi el 50% de los flujos más bajos. Este comportamiento sustenta la gran capacidad de abastecimiento hídrico que tiene esta unidad, puesto que es capaz de mantener los rendimientos más grandes de la muestra, en los períodos más críticos del año (es decir, en las sequías). De igual manera, esta observación también evidencia de manera didáctica (Figura 62) cómo este tipo de intervenciones en las coberturas y los usos de los suelos, tienden a generar declives en los caudales más bajos de las unidades, lo cual, es producto de las prácticas antrópicas que alteran la estructura de los suelos, promoviendo menores capacidades de retención hídrica y mayores niveles de escorrentía (Buytaert et al., 2007). Como consecuencia, esto puede generar escenarios de desabastecimiento en las épocas menos lluviosas del año, una de las razones por las cuales, es clave gestionar de manera integrada los recursos hídricos de las unidades.

Por otra parte, con respecto al servicio de abastecimiento hídrico que oferta la Unidad Intervenida, en la Figura 62 se puede notar que esta unidad no es la que presenta los niveles más bajos de rendimiento, ya que su CDC se localiza en una posición intermedia; sin embargo, es difícil concluir más acerca de ello debido a la variabilidad de las intervenciones y los ecosistemas propios de toda la muestra. A pesar de lo enunciado, en la Figura 62 se pueden encontrar coincidencias muy específicas entre la Unidad Intervenida y las unidades ROM 01 y PAU 04, las cuales son similares (Tablas 1 y 2) y presentan intervenciones parecidas (en términos de coberturas, usos y áreas afectadas, Tablas 1, 19 y 20) a las que está sometida la Unidad Intervenida. Desde el punto de vista de la investigación, esta coincidencia en las CDC es positiva debido a que valida el experimento de cuencas pareadas planteado en este proyecto y, además, confirma que se pueden hacer comparaciones con los resultados de unidades muy similares localizadas en otros sitios.

En relación con el servicio de regulación hídrica, en la Figura 62 se puede identificar que, aunque existe una variabilidad significativa en las intervenciones a las que está sometida cada unidad hidrográfica de la muestra, es posible notar ciertos patrones descritos en otras investigaciones. Por ejemplo, con respecto a las unidades sometidas a pastoreo intensivo JTU 02 y PIU 02, se puede observar que sus CDC poseen pendientes superiores (en promedio de -1.16, Tabla 4) a las que presentan las unidades con pastoreo extensivo LLO 01 y LLO 02 (en promedio de -0.53, Tabla 4), estando este comportamiento en coherencia con lo planteado por Montenegro-Díaz et al. (2019). Así mismo, en la Figura 62 se puede apreciar que las alteraciones asociadas a cultivos que abarcan menos del 30% del área de las unidades hidrográficas (p. ej., ROM 01, PAU 04 y la Unidad Intervenida), pueden tener un impacto mayor en la regulación que el de las unidades con pastoreo extensivo, y menor que el de las unidades con pastoreo intensivo general.

En este orden de ideas, a pesar de que se debe tener presente que el tamaño de la muestra no es significativo para generalizar estas premisas, a través de estas comparaciones se puede conjeturar acerca de cómo se podría comportar la regulación hídrica en caso de intervenir las unidades hidrográficas con uno u otro tipo de actividad.

En cuanto al servicio de regulación hídrica que oferta la Unidad Hidrográfica No Intervenida, en contraste con las demás unidades intervenidas de referencia (Figura 62), es posible observar que la forma de la CDC de la Unidad No Intervenida es mucho más achatada que las curvas de las demás unidades hidrográficas, las cuales presentan inclinaciones notablemente mayores. Como se ha discutido previamente, este patrón resalta la gran capacidad de regulación hídrica que tiene la Unidad No Intervenida debido a que, al presentar una forma horizontal sus valores de caudal son poco variables en el tiempo, logrando así amortiguar las crecidas en las épocas de precipitación y las sequías en los tiempos de estiaje (Searcy, 1959). A diferencia de lo aseverado, las demás unidades hidrográficas al estar sujetas a fuerzas de transformación a nivel de las coberturas, los usos y la estructura de sus suelos, no son capaces de retener el agua y por ello fluye rápidamente como escorrentía a través de caudales pico más elevados de lo normal, para luego quedarse sin reservas que puedan contrarrestar caudales bases muy bajos (Figura 62).

Finalmente, en alusión al servicio de regulación hídrica de la Unidad Hidrográfica Intervenida, en la Figura 62 se puede visualizar que presenta una inclinación intermedia en comparación con las demás unidades alteradas, mostrando una notable similitud con las CDC de las unidades de referencia cultivadas (PAU 04 y ROM 01). Por último, a pesar de que la inclinación de la CDC de esta unidad no es la más grande del grupo, se debe prestar atención a las actividades que allí se desarrollan ya que, en caso de cambiarse, podrían generarse impactos más severos en la regulación hídrica.

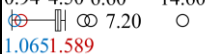
6.3.2. Aplicación y análisis de índices hidrológicos para la evaluación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica

De acuerdo con la metodología establecida en el numeral 5.4.2 de este documento, se estimaron y analizaron los indicadores hidrológicos considerados en la Tabla 12, los cuales, se calcularon a partir de los registros hidrométricos capturados por los sistemas de monitoreo de las dos unidades hidrográficas (Figuras 17 y 20). Como resultado de la aplicación del procedimiento descrito, se cuantificaron los valores de 26 índices hidrológicos relacionados con el estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica (12 y 14 indicadores para cada servicio, respectivamente), tal como se ilustra en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados de los índices hidrológicos considerados para la evaluación del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica.

Categoría	Indicador*	Ud.	Id.	Unidad Intervenida	Unidad No Intervenida	¿Qué unidad presentó mejores niveles en el servicio según el indicador?	¿Cuál es la razón entre el mejor índice y el peor?	Comparación de los resultados de este estudio, con valores de referencia de otras investigaciones análogas**
Servicio de abastecimiento hídrico	Caudal mínimo	$\frac{l}{s * ha}$	QDMIN	0.014	0.107	Unidad No Intervenida	7.712	0.01 0.016 0.022 0.042 0.052 0.116 0.002 [] 0.023 0.014 0.022 0.107
	Caudal medio	$\frac{l}{s * ha}$	QDMY	0.138	0.253	Unidad No Intervenida	1.827	0.02 0.10 0.25 0.29 0.55 0.63 [] 0.138 0.24 0.253 0.59
	Caudal del quincuagésimo percentil	$\frac{l}{s * ha}$	Q50	0.087	0.237	Unidad No Intervenida	2.726	0.01 0.08 0.15 0.18 0.28 0.54 [] 0.087 0.154 0.237
	Caudal medio del mes más seco	$\frac{l}{s * ha}$	QMDRY	0.130	0.328	Unidad No Intervenida	2.531	0.025 0.031 0.083 0.156 [] 0.0003 0.130 0.328
	Caudal medio del mes más húmedo	$\frac{l}{s * ha}$	QMWET	0.126	0.254	Unidad No Intervenida	2.014	N/R
	Caudal máximo	$\frac{l}{s * ha}$	QDMAX	1.166	0.741	Unidad Intervenida	1.572	0.17 0.84 2.37 7.74 10.39 [] 0.741 1.166 4.01
	Caudal del quinto percentil	$\frac{l}{s * ha}$	Q95	0.020	0.128	Unidad No Intervenida	6.344	0.018 0.028 0.038 0.068 0.204 0.003 [] 0.020 0.037 0.128
	Caudal del nonagésimo percentil	$\frac{l}{s * ha}$	Q10	0.287	0.358	Unidad No Intervenida	1.244	0.03 0.20 0.50 0.59 1.06 [] 0.287 0.358 0.47
	Descarga general	mm	DG	560.038	1023.297	Unidad No Intervenida	1.827	57 315 786 908 1729 1979 [] 560.038 766.15 1023.297 1854
	Descarga del mes más seco	$\frac{mm}{mes}$	DMDRY	34.718	87.903	Unidad No Intervenida	2.532	6.48 8.04 21.51 40.38 [] 0.08 34.718 87.903
	Descarga del mes más húmedo	$\frac{mm}{mes}$	DMWET	32.701	65.865	Unidad No Intervenida	2.014	N/R
	Rendimiento hídrico	N/A	RH	0.423	0.774	Unidad No Intervenida	1.827	0.08 0.26 0.60 0.65 0.79 [] 0.423 0.48 0.774

Servicio de regulación hídrica	Variabilidad de flujo	N/A	QVAR	1.163	0.330	Unidad No Intervenida	0.284	
	Tiempos asociados a las constantes de recesión de eventos	Hora	T1	1.780	2.053	Unidad No Intervenida	1.153	
			T2	6.417	6.429	Unidad No Intervenida	1.002	
			T3	43.227	83.230	Unidad No Intervenida	1.925	
	Rango de descarga	N/A	RANGE	84.226	6.945	Unidad No Intervenida	0.082	
	Rango de descarga de la curva de duración de caudal	$\frac{1}{s * ha}$	RANGQ	1.152	0.635	Unidad No Intervenida	0.551	
	Rango entre los percentiles alto y bajo	$\frac{1}{s * ha}$	RANHL	0.126	0.095	Unidad No Intervenida	0.754	
	Pendiente de la curva de duración de caudal	N/A	R2FDC	-0.964	-0.300	Unidad No Intervenida	0.311	
	Índice de regulación hidrológica	N/A	IRH	0.633 (bajo, IDEAM, 2019)	0.870 (muy alto, IDEAM, 2019)	Unidad No Intervenida	1.374	
	Índice flashiness de Richards-Baker	N/A	RB3	0.198	0.115	Unidad No Intervenida	0.582	
	Cantidad de flujos bajos	N/A	FL	22.000	23.000	Unidad Intervenida	0.957	
	Cantidad de flujos altos	N/A	FH	19.000	18.000	Unidad No Intervenida	0.947	
	Duración promedio de flujos bajos	Día	DLQ75	4.802	4.563	Unidad No Intervenida	0.950	
	Duración promedio de flujos altos	Día	DHQ25	5.529	5.728	Unidad No Intervenida	1.036	
	Proporción de días con incremento de flujo	N/A	RA	0.462	0.447	Unidad No Intervenida	0.968	

	Simetría de los flujos	N/A	SIMQD	1.589	1.065	Unidad No Intervenida	0.670	0.94 4.50 6.60 14.60 36.78  1.065 1.589 33.80	
--	------------------------	-----	-------	-------	-------	-----------------------	-------	---	--

Notas:

N/A: No Aplicable; N/R: No Reportado.

Los símbolos , , ,  y , corresponden a: resultado del indicador para la Unidad Intervenida; valor del índice para la Unidad No Intervenida; resultado de la media de la muestra; valores atípicos del conjunto de datos; y desviaciones estándar a la izquierda y la derecha de la media, respectivamente.

*: Los insumos y el procedimiento para el cálculo de los índices presentados se pueden consultar en los Apéndices Q, R y S.

**: Los insumos que sirvieron de soporte en la comparación de los resultados, consistieron en: las investigaciones realizadas por Buytaert et al. (2004), Ochoa-Tocachi et al. (2016A) y (2016B); la información recopilada en las Tablas 1, 2 y 4 de la revisión de literatura; y las Figuras 61 y 62 de este documento. A modo de aclaración, cabe mencionar que en algunos casos se debió cambiar la cantidad de decimales, el tipo de gráfico y la presencia de los valores promedio, debido a la naturaleza de la información que presentaron los documentos de referencia. Finalmente, se debe tener en cuenta que la muestra incluyó valores de unidades de referencia intervenidas y no intervenidas, a causa de la imposibilidad de separar los resultados en el origen de los datos.

Desde un punto de vista general, los valores cualitativos de la Tabla 23 evidenciaron que la mayoría de los índices de abastecimiento y regulación hídrica presentaron resultados más positivos, con respecto a la oferta de los dos servicios hidrológicos, en la unidad hidrográfica de control que en la unidad sometida a intervención. Como prueba de ello, se encontró que 11 de los 12 indicadores de abastecimiento hídrico, demostraron que la Unidad No Intervenida tiene mejores capacidades de ofertar este servicio; mientras que, en relación con el servicio de regulación hídrica, 13 de los 14 indicadores mostraron que la Unidad No Intervenida es la que mejor regula los flujos (Tabla 23, columna 7).

Las premisas anteriores sugieren que las funciones de regulación y abastecimiento hídrico se encuentran más conservadas en la Unidad No Intervenida que en la Unidad Intervenida; sin embargo, al ser extraídas de resultados cualitativos, no dicen mucho acerca de qué tanto estas funciones son mejores o peores en cada unidad. Con respecto a ello, las proporciones entre los valores de los indicadores, en los cuales la Unidad No Intervenida obtuvo mejores resultados (Tabla 23, columna 8), muestran que en promedio la capacidad de abastecimiento hídrico de la Unidad No Intervenida es 2.96 veces la capacidad de la Unidad Intervenida. De otro lado, en cuanto al servicio de regulación, las proporciones muestran que en promedio la capacidad de regulación de la Unidad Intervenida es apenas 0.68 veces la capacidad de la Unidad No Intervenida.

Continuando con el análisis global, los diagramas usados como insumos de comparación entre los valores encontrados por esta investigación y los de otros proyectos (Tabla 23, columna 9), permitieron confirmar la validez de los resultados hallados en las dos unidades hidrográficas de estudio, debido a que en general, los datos calculados se localizaron dentro o en las inmediaciones de los valores esperados.

En resumen, al analizar los datos de manera general, se encontró que el estado de afectación al que se encuentra sometida la Unidad Intervenida, evidenció en la mayoría de índices hidrológicos una disminución importante en la capacidad de ofertar los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, en comparación con la Unidad No Intervenida. No obstante, las causas, los efectos y la manera en que los cambios en las coberturas y los usos de los suelos impactan estos dos servicios, puede ser evaluada con más detalle al realizar una revisión minuciosa de los resultados.

En este sentido, el análisis específico de los diferentes indicadores se llevó a cabo por medio del estudio de distintos grupos de índices, con la finalidad de facilitar la evaluación del estado de los dos servicios hidrológicos. En función de lo enunciado, los conjuntos definidos para el servicio

de abastecimiento consistieron en: indicadores relativos al rendimiento hídrico basado en caudales diarios (QDMIN, Q95, Q50, Q10 y QDMAX); e índices asociados a los caudales medios y sus descargas (RH, QDMY, QMDRY, QMWET, DG, DMDRY y DMWET). Mientras que, los grupos precisados para el servicio de regulación se basaron en: indicadores relacionados con la variabilidad de los flujos (QVAR, RANGE, RANGQ, RANHL, R2FDC, IRH, RB3 y SIMQD); e indicadores relativos al análisis de eventos en hidrogramas de escala diaria (RA, FL, FH, DLQ75 y DHQ25) y de registro (T1, T2 y T3).

En lo que respecta al primer grupo de indicadores del servicio de abastecimiento, es decir, aquellos vinculados al rendimiento hídrico estimado a partir de caudales diarios, los valores de la Tabla 23 mostraron que 4 de los 5 índices fueron mayores en la Unidad No Intervenida que en la Unidad Intervenida. En detalle, los resultados de la unidad de control superaron en proporciones de 7.712, 6.344, 2.726 y 1.244 los valores de la unidad sometida a intervención, para los índices QDMIN, Q95, Q50 y Q10, respectivamente. A pesar de ello, también se notó el patrón contrario para el índice QDMAX, que resultó 1.572 veces mayor en la Unidad Intervenida.

Los resultados de estos indicadores confirman el comportamiento identificado en los hidrogramas y las CDC de las unidades (Figuras 41 y 60), en donde se puede notar que el 97% del tiempo los caudales normalizados por el área de la Unidad No Intervenida, superaron a los flujos de la Unidad Intervenida, manifestando el comportamiento contrario únicamente en el 3% del período restante. Además de ello, en relación con la diferencia que pueden presentar los caudales de las dos unidades en el tiempo, las proporciones mostraron que a medida que los flujos disminuyen, la magnitud de la disparidad tiende a ser más grande.

En cuanto a la comparación de los resultados del primer grupo de indicadores, contra otros referentes encontrados en la revisión de literatura (Tabla 23, columna 9), por medio del análisis se logró observar que los valores de los índices QDMIN y Q95 de la Unidad No Intervenida, se localizaron como datos atípicos hacia los valores más altos de la muestra, mientras que los indicadores Q50 y Q10 de la misma unidad, se ubicaron sobre los cuartiles tercero y primero del conjunto de datos, respectivamente. En estos cuatro índices, tal como se revisó previamente, los resultados de la Unidad No Intervenida superaron a los de la Unidad Intervenida, cuyos valores se ubicaron en cuartiles menores, aunque este comportamiento se revirtió para el indicador QMAX, donde el cuartil de la unidad sometida a intervención superó al de la unidad de control.

En síntesis, a partir de los resultados del primer grupo de índices de abastecimiento hídrico, es posible aseverar que la unidad de control tiende a mantener caudales más altos que la unidad alterada la mayoría de las veces y sobre todo en los tiempos de sequía, pudiéndose revertir este patrón en los períodos más lluviosos del año. Este fenómeno hidrológico ya ha sido identificado por otras investigaciones adelantadas en ecosistemas de páramo, como los trabajos realizados por Ochoa-Tocachi et al. (2016A) y Mosquera et al. (2022), donde encontraron que las unidades hidrográficas al ser cultivadas, tienden a aumentar sus flujos pico y disminuir sus caudales base. Todo esto, generado por la introducción de drenajes artificiales y el mejoramiento de la capacidad hidráulica de los suelos, lo cual se conjuga para disminuir la retención hídrica y aumentar la escorrentía de los flujos.

En lo que concierne al segundo grupo de indicadores relativos al servicio de abastecimiento hídrico, específicamente, aquellos relacionados a los caudales medios y sus descargas, los resultados de la Tabla 23 evidenciaron que todos los valores de los índices de la Unidad No

Intervenida resultaron más elevados que los de la Unidad Intervenida. En profundidad, los resultados de la unidad inalterada superaron en razones matemáticas de 1.827, 1.827, 2.531, 2.014, 1.827, 2.532 y 2.014 los resultados de la unidad sometida a intervención, para los indicadores RH, QDMY, QMDRY, QMWET, DG, DMDRY y DMWET, respectivamente. Como anotación, cabe mencionar que algunas proporciones fueron iguales entre sí, debido a la correspondencia que existe en la definición de algunos índices hidrológicos que, aunque en principio pueden parecer redundantes, en este análisis se consideran independientemente debido a que permiten abordar el fenómeno desde distintas perspectivas.

Los valores anteriores permiten corroborar el comportamiento identificado en los hidrogramas mensuales de las dos unidades (Figura 39), pues allí es posible notar que los caudales normalizados por el área y las descargas promedio de la Unidad No Intervenida, en general superan a las de la Unidad Intervenida, pudiéndose invertir este patrón en algunos meses excepcionales siguientes a períodos húmedos (p. ej., noviembre de 2020). Como evidencia de ello, los indicadores RH, QDMY y DG son mayores en la unidad de control que en la intervenida, aunque se debe notar que las diferencias entre los caudales y las descargas son mucho más grandes en los meses más secos que en los húmedos (2.531 vs. 2.014).

La ocurrencia de este fenómeno puede ser revelada mediante diferentes argumentos que, explican por qué el flujo que descarga en el cierre la Unidad Intervenida es menor que el caudal que drena la Unidad No Intervenida. En primer lugar, una de las razones radica en la existencia de extracciones hídricas en la unidad sometida a intervención (Tabla 21), pues estas sustracciones son capaces de desviar importantes cantidades de flujo de la corriente principal (Figura 51), haciendo que los valores medios del caudal y la descarga de la Unidad Intervenida resulten más bajos en el punto de desfogue, sobre todo, en los tiempos donde la necesidad de riego se hace más evidente, es decir: en las sequías.

En adición a ello, otros elementos que esclarecen este comportamiento consisten en: la baja capacidad de retención hídrica de los suelos de la Unidad Intervenida; y el aumento de la evapotranspiración de las nuevas especies vegetales. En el primer caso, Patiño (2020) encontró que la unidad de estudio sometida a intervención, presenta declives en las propiedades hidrofísicas del suelo que propician el almacenamiento de agua, lo cual, tal como lo plantea Buytaert et al. (2006B), genera que las cantidades de lluvia que se precipitan en la Unidad Intervenida escurran más rápidamente que en la unidad de control, haciendo que la mayoría del tiempo presente caudales más bajos y, por lo tanto, descargas promedio más reducidas. De otro lado, en el segundo caso, estudios como los adelantados por Allen et al. (2006), Buytaert et al. (2006A) y (2007) han mostrado que la introducción de especies vegetales como los cultivos de papa y cebolla, pueden ocasionar ascensos en los requerimientos de riego y niveles de evapotranspiración para el buen desarrollo de los cultivos, haciendo que el balance hídrico presente aumentos en las salidas y disminuciones en el flujo que descarga la unidad en el cierre.

En síntesis, tomando como base los resultados del segundo grupo de índices de abastecimiento hídrico, es posible argumentar que la Unidad Intervenida en condiciones medias, posee menores magnitudes en lo que respecta al caudal y la descarga en el punto de desfogue, evidenciando así, la presencia de afectaciones en el uso y la cobertura de sus suelos. Finalmente, en comparación con los valores de referencia encontrados en otras investigaciones, los resultados permitieron corroborar la gran capacidad que tiene la Unidad No Intervenida de ofertar flujos significativos,

pues sus índices de tiempo seco se clasificaron como valores atípicos a la derecha, mientras que los indicadores generales superaron la media del conjunto de datos (Tabla 23, columna 9).

Con respecto al primer grupo de indicadores del servicio de regulación hídrica, específicamente, los índices hidrológicos asociados a la variabilidad de los flujos, los valores de la Tabla 23 mostraron que 8 de los 8 índices, resultaron más favorables para la prestación del servicio de regulación en la Unidad No Intervenida que en la Unidad Intervenida. En detalle, los niveles de regulación de la unidad sometida a intervención, según sus indicadores, resultaron ser de apenas 0.284, 0.082, 0.551, 0.754, 0.311, 0.728, 0.582 y 0.670, los niveles de regulación de la unidad de control, para los indicadores QVAR, RANGE, RANGQ, RANHL, R2FDC, IRH, RB3 y SIMQD, respectivamente.

Los valores de los indicadores anteriores son coherentes con los comportamientos identificados en los hidrogramas diarios y las CDC de las dos unidades (Figuras 41 y 60), debido a que allí es posible notar que los registros de la Unidad Intervenida son mucho más variables en el tiempo que los de la Unidad No Intervenida. Otra manera de estudiar esta variación se puede llevar a cabo mediante el análisis del indicador SIMQD, el cual estudia la simetría de la distribución estadística de los datos a través de la relación que existe entre la media y la mediana o, visto desde otro punto de vista, por medio de las proporciones que presentan los histogramas de flujos como los que se ilustran a continuación (Figura 63).

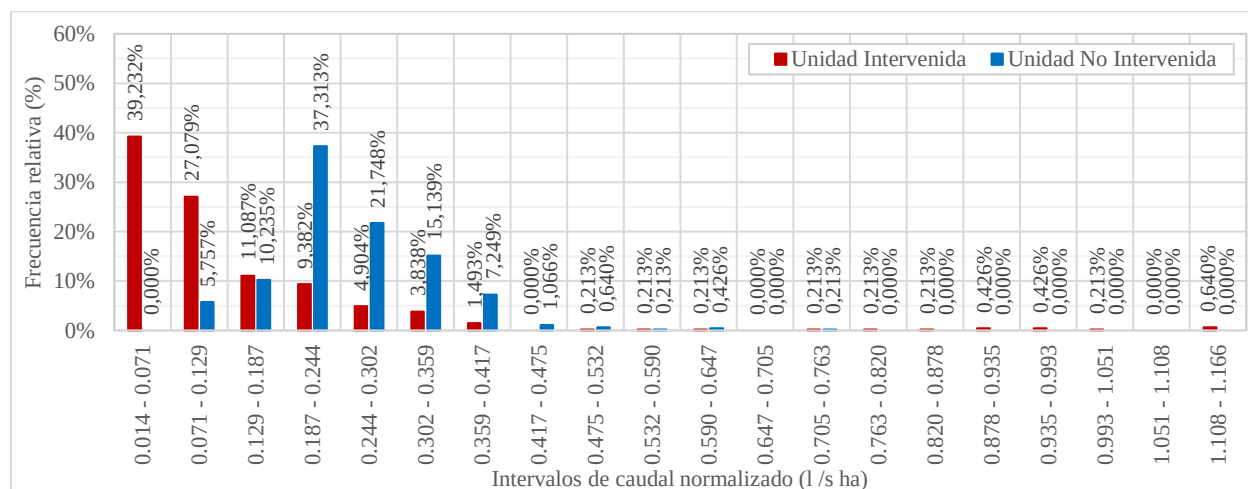


Figura 63. Histogramas de los caudales normalizados de las dos unidades hidrográficas.

En función de lo aseverado previamente, los histogramas de la Figura 63 permitieron corroborar que la variabilidad de los caudales es superior en la Unidad Intervenida, puesto que en el diagrama de barras se puede notar que esta unidad concentra sus flujos la mayoría del tiempo en valores bajos, para luego presentar cambios abruptos hacia valores atípicos de caudales altos, recorriendo así un espectro de valores más amplio que el de la unidad de control. En contraste, el histograma de la Unidad No Intervenida muestra más simetría en la acumulación de sus flujos, siendo capaz de gestionar sus caudales altos y bajos de manera similar, sin sobrecargar el porcentaje de acumulación de sus registros hacia los caudales más bajos o altos.

Las razones que sustentan la incidencia de este fenómeno de variabilidad han sido estudiadas previamente por otras investigaciones realizadas en contextos similares. En una de ellas Buytaert et al. (2006B) argumenta que la razón primordial, radica en que las transiciones de las especies

vegetales nativas a coberturas agrícolas más productivas, conllevan a la ruptura de las estructuras naturales del suelo, a la alteración de sus propiedades hidrofísicas responsables de la regulación y al incremento de la escorrentía, evidenciada por el aumento de los flujos hortonianos motivados por la impermeabilización de la superficie y la creación de canales prioritarios de drenaje.

Finalmente, al contrastar los resultados de este grupo de indicadores con el conjunto de los valores encontrados en otras investigaciones semejantes (Tabla 23, columna 9), es posible notar que la mayoría de los resultados de la Unidad No Intervenida se posicionan bajo el primer cuartil y muy cerca de los valores mínimos, destacándose así, como una unidad hidrográfica con una capacidad excepcional para la regulación de los flujos. Por otra parte, los valores de los índices relacionados con la Unidad Intervenida se localizaron bajo los cuartiles tercero y segundo, mostrando así que, a pesar de presentar un declive en la regulación hídrica, no es necesariamente la unidad hidrográfica más alterada del grupo, aunque se debe considerar que este comportamiento puede obedecer al bajo porcentaje de área afectada.

En relación con el segundo grupo de índices hidrológicos relativos al servicio de regulación hídrica, es decir, aquellos vinculados al análisis de eventos en hidrogramas de escala diaria y registro, los resultados de la Tabla 23 evidenciaron que 7 de los 8 indicadores mostraron favorabilidad hacia la capacidad de la Unidad No Intervenida de ofertar un mejor servicio de regulación hídrica.

Exhaustivamente, la capacidad de regulación de la Unidad Intervenida resultó ser 0.968, 0.947, 0.950, 0.965, 0.867, 0.998 y 0.519 la capacidad de la Unidad No Intervenida para los índices RA, FH, DLQ75, DHQ25, T1, T2 y T3, respectivamente. Estos resultados posicionan a la unidad de control, como la unidad hidrográfica que presentó los mejores niveles de regulación hídrica, en comparación con la unidad sometida a intervención. A pesar de ello, según el último grupo de indicadores, las proporciones entre los valores de los índices resultaron cercanas a la unidad, lo cual indica que el comportamiento hidrológico de las dos unidades no difiere mucho en lo que respecta a estos indicadores. De hecho, incluso se puede observar que la Unidad Intervenida superó levemente a la Unidad No Intervenida en el índice FL (Tabla 23), lo cual debería confirmarse con series más largas de registros.

Los resultados de los indicadores anteriores son coherentes con los comportamientos evidenciados en los hidrogramas diarios y de registro de las dos unidades hidrográficas (Figuras 41 y 43), debido a que allí se puede notar que tal como lo plantea el indicador RA, el caudal de la Unidad Intervenida tiende a mostrar más variación y responder más fácilmente ante los eventos de precipitación. Las causas de este patrón se basan primordialmente en la alteración de las propiedades hidrofísicas de los suelos y la existencia de extracciones hídricas en la unidad sometida a intervención (Buytaert et al., 2006B), pues estas sustracciones generan un tipo de variabilidad antrópica capaz de alterar los caudales de la unidad y, por lo tanto, capaz de generar aumentos en el indicador que estima la proporción de los días con incrementos de flujos (RA). En contraste al comportamiento descrito, la Unidad No Intervenida presenta ascensos y descensos de caudal regulados, haciendo que la variabilidad de sus flujos sea menor y más controlada (Apéndice T).

Con respecto a los indicadores de duración DHQ25 y DLQ75, los resultados de la Tabla 23 corroboraron el buen nivel de regulación de la Unidad No Intervenida que, a diferencia de la Unidad Intervenida, posee la capacidad de gestionar las crecidas a través de duraciones largas y

controladas, y los períodos de estiaje mediante permanencias cortas y poco sostenidas, comportamientos que se pueden confirmar al revisar los hidrogramas diarios de las dos unidades (Figura 41) y los resultados obtenidos por la investigación realizada por Ochoa-Tocachi et al. (2016A). Por otra parte, en alusión a los indicadores de existencia de flujos altos y bajos (FH y FL), la diferencia encontrada en los resultados no permitió generar conclusiones fehacientes acerca del estado de la regulación hidrológica de las unidades; sin embargo, el comportamiento esperado consiste en que las unidades con mejor regulación tienden a presentar valores más bajos en los índices, tal como ocurrió con el indicador FH de la Unidad No Intervenida.

En cuanto a los índices que caracterizaron los tiempos vinculados a las constantes de recesión de eventos en escala de registro (T1, T2 y T3), los resultados permitieron demostrar el buen estado del servicio de regulación de la Unidad No Intervenida. El argumento de ello se soporta en que los tiempos promedio para las tres etapas de la recesión, resultaron más grandes en la unidad de control que en la unidad sometida a intervención, conduciendo a la conclusión de que la Unidad No Intervenida gestiona sus flujos de manera más regulada, evitando la presencia de ascensos y descensos abruptos en franjas pequeñas de tiempo.

En este sentido, el ejemplo más notable se observa en la amplia diferencia que existe entre los tiempos de drenaje de la tercera etapa de las dos unidades (T3), pues el tiempo de la Unidad No Intervenida casi duplica al de la Unidad Intervenida (Tabla 23), ocurriendo esto en una fase extremadamente relevante de la recesión, puesto que en esta etapa es donde se caracterizan los caudales de estiaje de las unidades hidrográficas, los cuales serán los niveles más críticos para el uso del recurso hídrico. Todo esto, según Buytaert et al. (2004), es el resultado de la disminución de la capacidad de amortiguamiento de las unidades hidrográficas, producida por cambios en las propiedades hidrofísicas de los suelos que promueven menores almacenamientos y escorrentías más veloces.

Finalmente, en la comparación de los resultados de los indicadores de este grupo con respecto a los hallados por otras investigaciones (Tabla 23, columna 9), no se encontró un patrón general en el comportamiento del conjunto de los datos, ya que algunos índices resultaron más pequeños de lo esperado en la muestra (p. ej., T1, T2, T3 y DLQ75), otros en el rango típico (p. ej., FH y DHQ25) y varios más grandes de lo previsto (p. ej., FL y RA). Como explicación de estos hechos, se propone a la diversidad natural de las unidades hidrográficas que conforman la muestra de referencia, puesto que cada una de ellas hace parte de ecosistemas diferentes de páramos.

6.3.3. Disertación del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por las dos unidades hidrográficas de estudio

La disertación del estado de los servicios ecosistémicos de abastecimiento y regulación hídrica, ofertados por las Unidades Intervenida y No Intervenida, en el contexto de un páramo particular sometido a cambios específicos en los usos y las coberturas de sus suelos, debe partir del concepto de «servicios ecosistémicos». Respecto a ello, la definición más aceptada se basa en las directrices de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Camacho y Ruiz, 2012), la cual concibe a los servicios como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas (MEA, 2003).

Una característica que se ha evidenciado en la investigación académica, consiste en que existen múltiples enfoques a través de los cuales es posible evaluar el estado de un servicio ecosistémico (Cortinovis et al., 2021). Como ejemplo, se puede citar la problemática de forestación con especies

de pinos que presentan algunos páramos ecuatorianos, pues el efecto que tiene esta intervención sobre el servicio de regulación hídrica, se ha estudiado por medio de estrategias distintas, tales como enfoques técnicos fundamentados en estudios hidrológicos (p. ej., Buytaert et al., 2007) y metodologías participativas basadas en técnicas de trabajo social (p. ej., Quiroz et al., 2018).

Otra característica de los servicios ecosistémicos radica en que las funciones de los ecosistemas, entendidas como la capacidad de las estructuras y los procesos ecológicos de proveer servicios para el bienestar humano (De Groot, 1992), se encuentran interconectadas debido a la existencia de relaciones complejas en el medio ambiente, lo cual conlleva a que no sea infrecuente que los servicios ecosistémicos también se encuentren vinculados entre sí (Oosterheld, 2008; Rincón-Ruíz et al., 2014). En el caso de los servicios de regulación y abastecimiento hídrico de los ecosistemas de páramo, científicamente se reconoce a cada uno; sin embargo, existe consenso en que el servicio de abastecimiento es una consecuencia del servicio de regulación, ya que el páramo no produce agua, si no que la retiene y libera continuamente de una manera excepcional (Hofstede, 2011).

Habiendo establecido los fundamentos teóricos que soportan esta disertación, es oportuno plantear las premisas más relevantes del estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica de las dos unidades hidrográficas de estudio, todo ello, a partir de los resultados del desarrollo completo de esta investigación.

En este orden de ideas, la primera premisa consiste en que los resultados evidenciaron objetivamente que las funciones de regulación y abastecimiento hídrico se encuentran más alteradas en la unidad sometida a intervención que en la unidad de control, siendo los causantes de estos declives, el nivel de transformación en los usos y las coberturas de los suelos a los que está sometida específicamente la Unidad Intervenida. En otras palabras, la presencia antrópica evidenciada en: la modificación de los usos naturales (Figura 29); los cambios de las coberturas prístinas (Figura 28); y la implementación de los sistemas de extracciones hídricas (Figura 50), son los responsables de la diferencia que existe, en la capacidad de proveer las funciones de abastecimiento y regulación hídrica en las dos unidades.

Ahora bien, con respecto al porcentaje de afectación generado por la implementación de estas prácticas, es necesario enunciar que es difícil establecer un valor global debido a la existencia de múltiples índices y metodologías para analizar la misma problemática, ya que de este modo cada uno de los indicadores y métodos arroja un porcentaje de impacto específico (Tabla 23, columna 8), puesto que cada uno de ellos estudia características particulares de cada servicio. Sin embargo, al promediar los diferentes resultados obtenidos a través de los índices en los cuales la Unidad No Intervenida mostró mejor desempeño se encontró que, para las alteraciones analizadas, los declives en los servicios de abastecimiento y regulación fueron de 55.6 y 32.2% en la Unidad Intervenida, respectivamente.

En relación con los porcentajes de los impactos hallados en la unidad sometida a intervención, es necesario abordar la posible contradicción de que la oferta de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, se encuentra más deteriorada en la Unidad Intervenida que en la Unidad No Intervenida, incluso cuando la definición de los servicios ecosistémicos los habilita precisamente para el uso de las personas. Visto de otro modo, en principio puede parecer opuesto que un servicio ecosistémico se encuentre en mal estado simplemente porque se le está dando uso, cuando este es uno de los objetivos del concepto.

Ante esta posible incoherencia, cabe mencionar que el marco de referencia de los servicios ecosistémicos se sustenta en el concepto de sistema socioecológico, el cual relaciona a los sistemas sociales y ecológicos en distintas escalas, a través de diferentes interacciones que pueden culminar en ciclos de realimentación positiva, neutra o negativa (Martín-López et al., 2009). Es decir, que la idea de que los servicios de abastecimiento y regulación hídrica pueden usarse ilimitadamente es inadecuada, porque al hacerlo se generarían impactos sobre la estructura de los ecosistemas que sostienen a los servicios, haciendo que sus ofertas pierdan calidad y culminando en el agotamiento de estos, todo ello teniendo lugar en el contexto de un ciclo de realimentación negativa.

Ante este panorama, se plantea la segunda premisa de esta disertación, la cual consiste en que el alcance de esta investigación permitió caracterizar, evidenciar y cuantificar los cambios que se presentan en relación con los dos servicios cuando se transforman los territorios como en la Unidad Intervenida. Sin embargo, es esencial que las autoridades ambientales y todos los actores de la sociedad involucrados en esta problemática, apliquen la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) a través de las políticas vigentes (p. ej., MinAmbiente, 2010), con la finalidad de ejecutar más programas de educación, regulación e investigación que permitan controlar o establecer (en caso de que no existan), límites permisibles para el uso de los servicios en cada contexto en particular, tal como ocurre con los indicadores IRH, IUA e IVH. Todo lo anterior, con el objetivo de evitar posibles presiones y conflictos alrededor de los recursos hídricos.

Finalmente, la tercera premisa consiste en reconocer la complejidad de evaluar los estados de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica en los ecosistemas de páramo, pues a pesar de que en esta investigación se estudiaron unos efectos hidrológicos específicos que producen unas intervenciones particulares desde un punto de vista técnico, es imposible alcanzar un conocimiento global del fenómeno sin considerar otras disciplinas igual de relevantes, tales como las que hacen parte de las ciencias formales, humanas, sociales y naturales.

6.3.4. Recomendaciones para futuras investigaciones

En este apartado del documento, se mencionan algunas de las recomendaciones más significativas para la ejecución de futuras investigaciones en el área de estudio. El propósito de emitir estas sugerencias consiste en promover la continuidad de otros proyectos que permitan profundizar más, en la evaluación de los impactos que los cambios en los usos y las coberturas de los suelos, provocan sobre la prestación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica en las dos unidades hidrográficas de interés. Por otra parte, cabe hacer énfasis en que la información a partir de la cual se sustentan estas recomendaciones se basa en las lecciones aprendidas en el desarrollo de esta investigación, las lecturas de los documentos que conforman la revisión de literatura, la revisión de manuales de la temática de cuencas experimentales y la lectura de textos relacionados con sus variaciones posibles.

Inicialmente, a pesar de que el sistema de monitoreo hidrometeorológico planteado en este estudio, permitió caracterizar y evaluar adecuadamente los impactos hidrológicos causados por las transformaciones de las dos unidades, es posible enunciar algunas recomendaciones asociadas a la tipología y gestión de estos equipos de monitoreo.

En este sentido, una de las posibles mejoras que se pueden ejecutar en nuevas investigaciones, consiste en la incorporación del monitoreo de nuevas variables esenciales en el análisis de los balances hídricos de las dos unidades, tales como: (i) el monitoreo de las extracciones hídricas, a

través de la lectura de caudalímetros automáticos para las mangueras y la instalación de estructuras hidráulicas para las zanjas (p. ej., Calderón, 2017; Rosero-López et al., 2020); (ii) la medición de los volúmenes de precipitación oculta y horizontal, por medio de la instalación de disdrómetros ópticos y medidores de niebla preferiblemente cilíndricos (p. ej., Cárdenas et al., 2017; Padrón et al., 2015); y (iii) el registro de las cantidades de evapotranspiración de las diferentes coberturas, mediante la instalación de lisímetros volumétricos (p. ej., Ochoa-Sánchez et al., 2019).

Por otra parte, en cuanto a la gestión de los equipos de monitoreo instalados en este proyecto, de manera general se recomienda que, para mantener niveles adecuados de precisión y exactitud en las mediciones, se realicen visitas de control y mantenimiento de los equipos en períodos no mayores a 15 días (según la experiencia con este proyecto), además de que se ejecuten procesos de calibración de los diferentes aparatos en períodos no mayores a un año (según las sugerencias de los proveedores).

Otra de las recomendaciones que se pueden implementar, en caso de que se consideren pertinentes, consisten en replantear los sistemas de monitoreo instalados. Esto debido a que, aunque estos equipos cumplieron a cabalidad con el desempeño demandado para las condiciones y los objetivos de esta investigación, pueden necesitar modificaciones que los hagan más robustos y duraderos en el tiempo.

Un ejemplo de ello, radica en los sistemas de canales y transductores instalados en los puntos de desfogue de las unidades hidrográficas debido a que, si el objetivo es seguir obteniendo registros fiables por muchos años más, puede ser necesario el emplazamiento de estructuras hidráulicas de concreto impermeabilizado u otro material resistente, que soporte la variabilidad de las condiciones meteorológicas típicas del páramo y las crecidas de las corrientes. De igual manera, se recomienda que estas estructuras hidrométricas se rediseñen, con los objetivos de: (i) posicionar los transductores sumergidos fuera de la longitud del canal; (ii) instalar estructuras que controlen el arrastre de objetos de gran tamaño y sedimentos a los vertederos; (iii) impedir la formación de filtraciones; (iv) facilitar la limpieza de los desechos capturados; y (v) ampliar la capacidad hidráulica de las estructuras de medición, ya que en un par de ocasiones las descargas de los eventos superaron los caudales de diseño.

Ahora bien, en relación con posibles variaciones al tipo de investigación, es posible recomendar algunas variedades del enfoque de cuencas experimentales, las cuales pueden consistir en: (i) ampliar o disminuir el área afectada por las coberturas agrícolas, esto con la finalidad de estudiar los nuevos impactos que generarían los porcentajes del territorio transformado sobre la regulación y el abastecimiento hídrico (p. ej., Best et al., 2003); (ii) cambiar los tipos de especies vegetales que tienen las dos unidades hidrográficas, con el objetivo de estudiar el impacto de esta nueva vegetación en los dos servicios (p. ej., Brown et al., 2005); y (iii) estudiar detalladamente las etapas de crecimiento y los requerimientos de riego de los cultivos, con la finalidad de analizar el impacto que generan sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica (p. ej., Allen et al., 2006).

Otras variaciones que se pueden implementar en futuras investigaciones, se pueden llevar a cabo en relación con la incorporación de más enfoques para el estudio de la problemática de interés. Por ejemplo, se recomienda la implementación de modelos hidrológicos calibrados, que simulen el balance hídrico de las dos unidades hidrográficas frente a posibles escenarios de cambio climático y variaciones en el uso de los suelos, tales como SWAT y WEAP (p. ej., Abou et al., 2022). Otra opción viable, podría ser la de analizar estos modelos en unidades hidrográficas más

grandes pertenecientes a la zona, a partir de la información recopilada en las dos unidades de este proyecto (p. ej., Duarte, 2022). Adicionalmente, otra posibilidad de aplicación de un nuevo enfoque para el estudio de la misma problemática, podría ser el de la implementación de estudios biológicos que analicen las propiedades hidrológicas de la vegetación nativa y sus posibles cambios, frente a panoramas de reemplazo de coberturas y pastoreo extensivo e intensivo (p. ej., Cárdenas et al., 2018).

En referencia a otras posibles recomendaciones, asociadas a la construcción de relaciones con otras instituciones involucradas en la misma temática de estudio, se sugiere que se evalúe la posibilidad de hacer parte de redes de investigación nacionales e internacionales, que permitan la realimentación de los procesos ejecutados, la posibilidad de participar en nuevos proyectos y la ampliación del saber con respecto a las transformaciones hidrológicas que sufren los páramos. Como opciones para analizar esta posibilidad, se recomienda la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (CONDESAN, 2022) y las Plataformas Regionales de Monitoreo de Alta Montaña en Colombia (IAvH, 2020).

Finalmente, tras haber planteado las posibles recomendaciones y sugerencias aplicables a nuevos trabajos de investigación, se considera necesario hacer énfasis en que estas son solo ideas que podrían implementarse en el futuro, por lo cual, esto no implica que sean las más adecuadas o idóneas para su desarrollo en un contexto determinado. En vez de ello, se enuncian con la motivación de que se estudie la viabilidad de su ejecución y se continúe con el proceso investigativo. De otro lado, de ninguna manera se pretende desconocer los proyectos que ha liderado o coliderado el grupo de investigación GPH en este ecosistema de páramo, algunos de los cuales corresponden a: estudios de suelos (Patiño, 2020); análisis de evapotranspiración (Gómez, 2022); investigaciones hidrogeológicas (Cetina, 2019); estudios de calidad hídrica (Torres y Durán, 2019); análisis de modelos y simulaciones hidrológicas (Duarte, 2022); investigaciones de trabajo social (Serrano, 2020); y análisis biológicos de los impactos a la vegetación presente en la zona (Löwer, 2020), entre muchas investigaciones más que se realizaron y se están ejecutando en el momento.

7. Conclusiones

En esta investigación, se evaluaron los impactos que las transformaciones en los usos y las coberturas de los suelos, provocaron sobre la prestación de los servicios ecosistémicos de abastecimiento y regulación hídrica, ofertados por dos unidades hidrográficas de páramo expuestas a diferentes niveles de intervención (denominadas Intervenida y No Intervenida). Para cumplir con el objetivo anterior, en este estudio se implementó como metodología central el enfoque adaptado de cuencas pareadas, el cual se llevó a cabo a partir de la ejecución de cuatro etapas, las cuales se basaron en: una revisión sistemática de literatura; las caracterizaciones geomorfológicas e hidrometeorológicas de las dos unidades hidrográficas; y la evaluación de los impactos hidrológicos sobre los dos servicios.

Como resultado de la revisión de literatura, a través de la metodología sistemática se pudo determinar que la problemática que evaluó esta investigación, se ha venido estudiando cada vez más en los últimos 25 años primordialmente en países andinos como Colombia y Ecuador. Por otra parte, en la revisión de literatura se logró identificar un conjunto de otros cuatro enfoques académicos que también posibilitan el análisis de la temática de interés, los cuales consistieron en

estudios de: propiedades hidrofísicas de los suelos; modelamiento y simulación hidrológica de escenarios; características biológicas de los organismos paramunos; y estrategias participativas de trabajo social. Con respecto a la aplicación de estos enfoques, en la revisión de literatura se encontraron artículos académicos que combinaron varias de estas estrategias, evidenciando así que el uso de estas alternativas no es necesariamente excluyente y que, por el contrario, se deben tener en cuenta con la finalidad de estudiar el fenómeno desde distintas perspectivas.

En relación a los resultados de la caracterización geomorfológica, las metodologías aplicadas permitieron identificar que las dos unidades hidrográficas presentaron amplias similitudes, en lo que respecta a sus rasgos morfológicos, edafológicos y geológicos, puesto que ambas unidades se caracterizaron por: ser pequeñas (de 18.911 y 11.130 ha); moderadamente alargadas; de pendientes medias pronunciadas (de 24.259 y 27.118°); con redes fluviales dendríticas-paralelas; y tiempos de concentración bajos (de 8.113 y 6.100 min); entre otras variables. Además, de que ambas unidades mostraron semejanza en sus formaciones edafológicas (MHD) y geológicas (JRcs). Todas estas afinidades permitieron concluir que la aplicación del enfoque de cuencas pareadas contó con una gran validez, ya que las unidades fueron completamente similares en todos sus aspectos, excepto en los relacionados con el uso y las coberturas de sus suelos, los cuales hicieron parte de la diferencia a evaluar por esta investigación.

En cuanto a la caracterización hidrometeorológica, los resultados permitieron concluir varias premisas interesantes acerca de los componentes pluviométricos, meteorológicos, hidrométricos y de extracciones hídricas de las dos unidades hidrográficas de estudio.

En referencia al componente pluviométrico, en esta investigación se halló que las precipitaciones de la zona se caracterizaron por exhibir patrones bimodales anuales (con picos mensuales en mayo y octubre), con cantidades de lluvia que clasificaron a las dos unidades como parte de un ecosistema de páramo seco con tendencia a semihúmedo (con 1090.08 mm precipitados en el año 2020). Además de ello, se logró evidenciar que las lluvias del área también se caracterizaron por presentar: variaciones diarias altas (con coeficiente de variación de 1.90); probabilidades de ocurrencia intermedias (con 56% de posibilidad de lluvia en el día); incidencia mayormente en horas de la tarde (entre las 11:00 y 18:00 horas); duraciones normalmente cortas (de 15 min); e intensidades medias bajas (menores a 5 mm/h) y máximas altas (de hasta 51.6 mm/h). Como conclusión general de este componente, en este estudio se encontró que el hecho de poseer precipitaciones como las descritas, promueve la prestación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica; sin embargo, el factor de que las cantidades de lluvia no sean especialmente altas, puede restringir los volúmenes de agua que suministra el páramo, sobre todo en los años y las temporadas atípicamente más secas.

Con respecto al componente meteorológico, a través de los resultados se pudo evidenciar que la radiación solar del sitio presentó variaciones intradiarias unimodales (entre las 06:00 y 18:00 horas), cuyos valores máximos normalmente se dieron antes del mediodía (cerca de las 10:20 horas), siendo estos registros notablemente altos (en promedio de 850 W/m²) y muy dependientes de la presencia de nubes y neblina. En relación con otras variables meteorológicas, se encontró que la humedad relativa de las unidades se caracterizó por sostener valores generalmente altos (en promedio entre 70.8 y 91.7%), principalmente, en las horas donde los registros de radiación solar fueron habitualmente bajos (entre las 18:00 y las 06:00 horas). De otro lado, en cuanto a la temperatura del aire, los resultados evidenciaron la presencia de un comportamiento unimodal con

un amplio rango de variación intradiaria (de hasta 21.4°C), el cual incluso logró descender a registros bajo cero en los meses más secos del año (a un valor de -2.3°C). En referencia a la velocidad del viento, por medio de los resultados se pudo encontrar que la variable evidenció un patrón diario bimodal con poca variabilidad en las horas nocturnas (con valores cercanos a 4 km/h entre las 18:00 y 06:00 horas) y más variación en las horas diurnas (con valores pico promedio de hasta 8.5 km/h a las 10:20 horas). Finalmente, la estimación de la evapotranspiración de referencia a partir del análisis de las cuatro variables anteriores, permitió concluir que los meses más secos presentaron los valores más altos (p. ej., febrero de 2020 con 105.7 mm/mes) y los meses más húmedos los más bajos (p. ej., noviembre de 2020 con 68.7 mm/mes). Con respecto a ello, aunque en este estudio solo se estimó la evapotranspiración del cultivo de referencia (un pasto verde de 12 cm), la revisión de literatura permitió concluir que el establecimiento de cultivos de papa y cebolla en la Unidad Intervenida puede causar declives importantes en el servicio de abastecimiento hídrico, debido al aumento de los requerimientos de agua y la transpiración de estas especies.

Con relación al componente hidrométrico, a través de los registros de caudal se logró identificar que los flujos de la Unidad No Intervenida, superaron a los de la Unidad Intervenida en los tiempos de precipitaciones medias y bajas, evidenciándose el comportamiento contrario únicamente en los períodos de mayor precipitación. Como conclusión de ello, en esta investigación se encontró que la razón por la cual, la unidad de control superó los caudales de la unidad sometida a intervención (siendo incluso más pequeña), se basó en los cambios de uso y cobertura que presentó la Unidad Intervenida, los cuales promovieron la existencia de extracciones hídricas (sobre todo para labores de riego en los tiempos de sequía) y la presencia de suelos alterados con menor capacidad de almacenamiento hídrico. En este sentido, otra observación que permitió soportar esta premisa consistió en la incidencia de variaciones de caudal más grandes en la Unidad Intervenida, vinculadas a cambios abruptos producidos por el funcionamiento intradiario de las extracciones.

Con respecto a las extracciones hídricas, mediante los resultados de la caracterización se pudo evidenciar la presencia de tres puntos de sustracción sobre la corriente principal de la Unidad Intervenida. Estos sistemas consistieron en montajes no tecnificados, con dinámicas de uso muy variables y capacidades notables de capturar flujos de agua significativos (con caudales entre 1.779 y 6.033 l/s según los escenarios optimista y pesimista, respectivamente). Como conclusión de lo enunciado, se encontró que la unidad sometida a intervención presentó flujos de sustracción importantes (entre 23.3 y 79.0% de su caudal promedio total, según los dos panoramas), llegándose a clasificar por los indicadores IUA e IVH, como una unidad condicionada a consumos y vulnerabilidades altas debido a que sus extracciones resultaron más grandes que las recomendadas. Como consecuencia, se halló que el servicio de abastecimiento hídrico de la Unidad Intervenida se encuentra sometido a niveles relevantes de presión que podrían generar problemáticas de desabastecimiento en el futuro, promovidas por fenómenos de variabilidad climática, el crecimiento de la frontera agrícola y la incidencia de ciclos de realimentación negativos que poco a poco podrían desgastar la oferta del servicio. Por estas razones, se concluye que es necesario considerar que la prestación del servicio es limitada, por lo cual, resulta prioritario establecer o verificar el cumplimiento de límites de consumo que controlen la sobreexplotación del recurso hídrico.

En referencia a la evaluación de los impactos sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, la discusión de los resultados permitió confirmar la hipótesis planteada al inicio de este

documento. De acuerdo con lo esperado, la unidad sometida a las transformaciones en los usos y las coberturas de los suelos evidenció alteraciones notables en el estado de sus dos servicios hidrológicos, en comparación con los resultados de la unidad hidrográfica de control.

En relación con el servicio de abastecimiento hídrico, los resultados del análisis de los hietogramas e hidrogramas de las dos unidades permitieron corroborar que, los caudales de la Unidad No Intervenida superaron a los de la Unidad Intervenida la mayoría del tiempo. Como conclusión de ello, se encontró que las extracciones hídricas fueron la causa principal de este comportamiento, pues en los registros se observó que la diferencia entre los flujos es más notoria en los períodos más secos que en los húmedos, llegando incluso a casi secar el caudal superficial de la Unidad Intervenida en los días más críticos de estiaje. Por otra parte, en relación con el servicio de regulación hídrica, a través del estudio de los hietogramas e hidrogramas se pudo inferir que los flujos de la unidad sometida a intervención presentaron más variabilidad que los de la unidad de control, lo cual se logró evidenciar en las proporciones entre los puntos de levantamiento y pico de los hidrogramas que, en el caso de la Unidad Intervenida tomaron valores notablemente altos (de hasta 51 veces).

Otra metodología que permitió ratificar los declives en la prestación de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, se basó en el estudio de las curvas acumuladas de descarga y precipitación de las dos unidades. En el análisis de las curvas se logró concluir que en general la Unidad No Intervenida descargó más caudal que la Unidad Intervenida en el punto de desfogue, pues las pendientes de las tendencias lineales de la unidad de control casi duplicaron a las de la unidad sometida a intervención (en promedio de 1.996 y 0.886, respectivamente). De otro lado, con respecto al servicio de regulación hídrica, los resultados de esta metodología también corroboraron que la variabilidad de los flujos fue superior en la unidad sometida a intervención, puesto que los coeficientes de variación asociados a las pendientes de las curvas resultaron mayores en esta unidad que en la otra (de 0.677 y 0.250, respectivamente). En conclusión, a través de estas observaciones se pudo identificar que las razones por las cuales se presentaron estos comportamientos, radicarón primordialmente en dos motivos: la existencia de las extracciones hídricas, que retiraron parte del flujo de la corriente principal en las épocas más secas; y las alteraciones de los usos y las coberturas naturales de los suelos, que generaron aumentos en la evapotranspiración, alteraciones en sus propiedades hidrofísicas y rutas de drenaje preferenciales.

En cuanto a la evaluación del comportamiento de las CDC, el análisis arrojó como resultado que la curva de la Unidad Intervenida se posicionó por debajo de la curva de la Unidad No Intervenida, encontrando que la gráfica de la unidad sometida a intervención resultó más inclinada que la de la unidad de control. Con respecto a ello, estas observaciones lograron demostrar que la oferta de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, se encuentra alterada en esta unidad en comparación con la unidad restante. A pesar de esto, la comparación de las CDC de las unidades de estudio con los resultados encontrados en otras investigaciones ejecutadas en contextos similares, evidenció que la CDC de la Unidad Intervenida se localizó dentro del rango de variación natural de los ecosistemas de páramo; sin embargo, este aspecto no demostró necesariamente que los efectos a los que está sometida la unidad fueron menores, puesto que la comparación definitiva de los resultados siempre debe realizarse con respecto a unidades cercanas. Además de lo anterior cabe mencionar que, en la comparación de la CDC de la unidad sometida a intervención con las CDC halladas en otros estudios, se encontró que la curva de la Unidad Intervenida presentó una

semejanza significativa en relación con las curvas de otras unidades sometidas a transformaciones similares, lo cual permitió ratificar la validez del experimento y los resultados hallados en esta investigación.

En el caso de los indicadores hidrológicos, a partir de los resultados se pudo concluir que la oferta de los dos servicios se encuentra más conservada en la Unidad No Intervenida que en la Unidad Intervenida, pues el análisis evidenció que la mayoría de los indicadores de abastecimiento (11 de 12) y regulación hídrica (13 de 14) constataron que la unidad de control presentó mejores niveles de conservación con relación a los dos servicios. Como conclusión de estos resultados, el promedio de las proporciones de los índices hidrológicos en los cuales la unidad de control mostró mejores desempeños, demostró que los porcentajes de cambio en los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, causados por la incidencia de las transformaciones estudiadas en la Unidad Intervenida, fueron de 55.6 y 32.2% respectivamente. En complemento a lo enunciado, es preciso destacar que la comparación de los resultados hallados en este estudio, con respecto a los encontrados en otras investigaciones análogas, permitió validar que los valores analizados en este proyecto se encontraron dentro de los rangos esperados planteados en la revisión de literatura.

En síntesis, las metodologías usadas en esta investigación para la evaluación de los efectos que, los cambios en los usos y las coberturas generan sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica, permitieron concluir que las afectaciones hidrológicas principales se pueden evidenciar en aspectos como: (i) disminuciones en las descargas que llegan al punto de desfogue; (ii) aumentos en la variabilidad de los flujos; (iii) aumentos en las proporciones de los caudales pico; (iv) desplazamientos hacia abajo de las CDC; (v) inclinaciones más grandes en las CDC; (vi) declives en el rendimiento hídrico; (vii) duraciones de eventos más cortas; (viii) incrementos en los rangos de caudal y descarga; y (ix) aumentos en la asimetría de los flujos. Siendo todos estos efectos, causados por fenómenos asociados a la transformación de los territorios, tales como: (i) la presencia de extracciones hídricas; (ii) la implementación de canales artificiales de drenaje; (iii) el aumento de la evapotranspiración y los requerimientos hídricos de las nuevas especies cultivadas; (iv) el aumento de la densidad aparente de los suelos; (v) la disminución de su porosidad total; (vi) el incremento de la hidrofobicidad; (vii) el crecimiento de las tasas de erosión y la pérdida de material edáfico; (viii) la degradación del porcentaje de materia orgánica; (ix) el declive en las capacidades de retención hídrica; y (x) la disminución en los niveles de infiltración.

Finalmente, una de las conclusiones más relevantes de este estudio consiste en la necesidad de implementar programas relacionados con la GIRH y continuar con las investigaciones académicas en el sitio de estudio. Todo ello, con los objetivos de promover la sostenibilidad del recurso hídrico, generar ciclos de realimentación positiva entre los pobladores y el medio ambiente que habitan, promover la resiliencia de las unidades hidrográficas ante probables eventos de variación climática y seguir con la ampliación del conocimiento, acerca de los ecosistemas de páramo y su hidrología.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), por el financiamiento de este estudio a través del Programa de Investigación Santander Científico (subvención 2438); al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), por todo el soporte proporcionado en las actividades de investigación; y a los habitantes de la zona de estudio, quienes generosamente permitieron y apoyaron de manera desinteresada la ejecución de este proyecto.

Referencias

- Abou, S., Uvo, C., Martins, J., Machado, C., & Freitas, E. (2022). Land Use and Cover Changes versus climate shift: Who is the main player in river discharge? A case study in the Upper Paraná River Basin. *Journal of Environmental Management*, 309(April 2021), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114651>
- Agarwala, M., Atkinson, G., Fry, B., Homewood, K., Mourato, S., Rowcliffe, Jm., Wallace, G., & Milner-Gulland, E. (2014). Assessing the Relationship Between Human Well-being and Ecosystem Services: A Review of Frameworks. *Conservation and Society*, 12(4), 437. <https://doi.org/10.4103/0972-4923.155592>
- Agisoft. (2021). *Discover intelligent photogrammetry with Metashape*. <https://www.agisoft.com/>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE*, 56, 1–300. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Antunez, R., & Hernández, L. (2011). Análisis geométricos en SIG basada en un algoritmo genérico independiente del sistema de referencia. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 5(3), 1–18. <https://www.redalyc.org/pdf/3783/378343673002.pdf>
- Aparicio, F. (2005). *Fundamentos de hidrología de superficie* (Reimpresión). Limusa S. A. Grupo Noriega.
- Arias, A., Sáez, V., & Siso, E. (2017). Inundaciones ocurridas entre 1970 y 2005 y su relación con la precipitación del percentil 25%. Región Central de Venezuela. *Terra Nueva Etapa*, XXXIII(53), 219–246. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72152384010>
- Ariza, C., Maselli, D., & Kohler, T. (2013). *Las montañas: nuestra vida, nuestro futuro. Avances y perspectivas en el desarrollo sostenible de las regiones de montaña, de Río 1992 a Río 2012 y más allá*. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDE) de la Universidad de Berna. https://www.weadapt.org/sites/weadapt.org/files/2017/may/low_fullversion_sp_layout_synthesis_report_2013.pdf
- Astorga, Y. (2013). *Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal*. Global Water Partnership (GWP). https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/guia-girh-a-escala-municipal.pdf
- Avellaneda-Torres, L., León, T., Guerra, E., & Torres, E. (2020). Potato cultivation and livestock effects on microorganism functional groups in soils from the neotropical high Andean Páramo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 44, 1–25. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190122>
- Avellaneda-Torres, L., Torres, E., & León, T. (2015). Alternativas ante el conflicto entre autoridades ambientales y habitantes de áreas protegidas en páramos colombianos. *Mundo Agrario*, 16(31), 26. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84539280010>
- Avenza Systems Inc. (2021). *Go ahead. Explore the middle of nowhere*. Avenza Maps. <https://www.avenza.com/avenza-maps/>
- Baker, D., Richards, R., Loftus, T., & Kramer, J. (2004). A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(2), 503–522. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x>
- Bejarano, D., & Navas, A. (2018). *Análisis estructural de los patrones de fracturamiento y su relación con el flujo de aguas subterráneas e inmediaciones del municipio de Tona, Macizo de Santander*. Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Bekessy, S., Runge, M., Kusmanoff, A., Keith, D., & Wintle, B. (2018). Ask not what nature can do for you: A critique of ecosystem services as a communication strategy. *Biological*

- Conservation*, 224(March), 71–74. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.05.017>
- Benavides, I., Solarte, M., Pabón, V., Ordoñez, A., Beltrán, E., Rosero, S., & Torres, C. (2018). The variation of infiltration rates and physical-chemical soil properties across a land cover and land use gradient in a Paramo of southwestern Colombia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4), 400–410. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.400>
- Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A., & Vertessy, R. (2003). *A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability*. Murray-Darling Basin Commission. <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=procite:fcdfd12f-dca1-41c0-85ce-d06d0c542e7c&dsid=DS1>
- Bloomfield, J., Allen, D., & Griffiths, K. (2009). Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. *Journal of Hydrology*, 373(1–2), 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.025>
- Bonneau, J., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Witt, R., Drysdale, R. N., & Costelloe, J. F. (2018). The impact of urbanization on subsurface flow paths – A paired-catchment isotopic study. *Journal of Hydrology*, 561(April), 413–426. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.022>
- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M., Ochoa-Tocachi, B., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., & Mathez-Stiefel, S.-L. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433(November 2018), 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>
- Bosch, J., & Hewlett, J. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1–4), 3–23. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2)
- Brauman, K., Daily, G., Duarte, T. K., & Mooney, H. (2007). The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1), 67–98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Brédy, J., Gallichand, J., Celicourt, P., & Gumiere, S. J. (2020). Water table depth forecasting in cranberry fields using two decision-tree-modeling approaches. *Agricultural Water Management*, 233(February), 106090. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106090>
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1–4), 28–61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006A). Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador. In J. Krecek & M. Haigh (Eds.), *Environmental Role of Wetlands in Headwaters*. (pp. 271–281). NATO Science Series. https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24
- Buytaert, W., Celleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006B). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 108–114. <https://doi.org/10.5194/hess-8-108-2004>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>

- Buytaert, W, Sevink, J., & Cuesta, F. (2014). Cambio climático: la nueva amenaza para los páramos. In *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos* (pp. 505–525). CONDESAN. https://pure.uva.nl/ws/files/2291788/152958_Cambio_clim_tico.pdf
- Buytaert, W, Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19(20), 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Buytaert, W, Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006C). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Cabrera, M., & Ramírez, W. (2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia: transformación y herramientas para su conservación* (1st ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://www.humboldt.org.co/es/estado-de-los-recursos-naturales/item/562-restauracion-paramos>
- Calderón, L. (2014). Conflictos asociados al uso del suelo: una aproximación al área de conservación óptima en el Páramo de Santurbán. *Coyuntura Económica: Investigación Económica y Social*, XLIV(2), 61–104. https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/1926/Co_Eco_Diciembre_2014_Calderón.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Calderón, Y. (2017). *Estandarización al sistema de riego por goteo en el Cultivo de Rosa, en Flores IPANEMA S.A.S.* [Universidad de Cundinamarca]. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/2429/EstandarizacionAlSistemaDeRiegoPorGoteoEnElCultivoDeRosa,EnFloresIpanemaS.a.s.pdf?sequence=1>
- Camacho, V., & Ruiz, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista BioCiencias*, 1(4), 3–15.
- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López de Armentia, A., Del Río, J., & De Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73–97. <http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/pdf/reuge/v27n1/v27n1a05.pdf>
- Campos, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (Tercera Re). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <https://ninive.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Cárdenas, M, & Tobón, C. (2017). Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 403–412. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.381>
- Cárdenas, M, Tobón, C., & Buytaert, W. (2017). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*, 31(24), 4440–4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>
- Cárdenas, M, Tobón, C., Rock, B., & Del Valle, J. (2018). Ecophysiology of frailejones (*Espeletia* spp.), and its contribution to the hydrological functioning of páramo ecosystems. *Plant Ecology*, 219(2), 185–198. <https://doi.org/10.1007/s11258-017-0787-x>
- Caro-Caro, C., & Torres-Mora, M. (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas. *Orinoquia*, 19(2), 237. <https://doi.org/10.22579/20112629.338>
- Carreño, S. (2019). *Evaluación de estrategias para la integración de los usos múltiples de agua en un sistema de abastecimiento colectivo rural en ecosistema de páramo: caso de estudio Berlín (Santander - Colombia)*. Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Castaño-Uribe, C. (2002). *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

- Ambientales (IDEAM).
- CCB. (2015). *Manual Papa* (pp. 1–54). Cámara de Comercio de Bogotá (CCB). <https://www.ccb.org.co/content/download/13727/175111/file/Papa.pdf>
- CDMB, & CORPONOR. (2007). *Acuerdo CDMB No. 1103 y CORPONOR No. 17 de 23 de noviembre de 2007* (p. 24). Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). http://corponor.gov.co/areasnaturalesestrategicas/descargas/DMI_Berlin_acuerdo1103-17_nov2007.pdf
- CDMB, & CORPONOR. (2008). *Plan Integral de Manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales “Páramo de Berlín”* (p. 101). Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). https://corponor.gov.co/areasnaturalesestrategicas/descargas/DMI_Berlin_PMA_aprobado_agosto2008.pdf
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Cetina, M. (2019). *Modelo hidrodinámico de flujos subterráneos en sistemas carsticos y su interacción con las rocas adyacentes. Caso de estudio: parte alta de la cuenca del río de Oro, departamento de Santander*. Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada* (M. Suárez (ed.)). McGRAW-HILL, Inc.
- Coltorti, M., & Ollier, C. (2000). Geomorphic and tectonic evolution of the Ecuadorian Andes. *Geomorphology*, 32(1–2), 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00036-7)
- CONDESAN. (2012). *Buenas prácticas para la gestión de los páramos: Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú*. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). <https://condesan.org/wp-content/uploads/2017/07/Libro2.pdf>
- CONDESAN. (2022). *Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA)*. Redes de Investigación. <https://condesan.org/redes-de-investigacion/iniciativa-regional-de-monitoreo-hidrologico-de-ecosistemas-andinos-imhea/>
- Congreso Nacional. (1993). *Ley 99 de 1993* (p. 43). El Congreso de Colombia. <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/Normativo/1993-12-22-ley-99-crea-el-sina-y-mma.pdf>
- Congreso Nacional. (2010). *Ley 1382 de 2010* (p. 8). El Congreso de Colombia. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=38863
- Corte Constitucional. (2017). *Sentencia T-361* (p. 323). Corte Constitucional de la República de Colombia. <https://www.ramajudicial.gov.co/documents/2209728/12544222/SENTENCIA+T-361+DE+2017+H.C.C..pdf/47e8a899-f222-47cb-930b-925f473548c0>
- Cortés-Duque, J., & Sarmiento, C. (2013). *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Cortés, J., & Ortiz, C. (2017). *Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos en 30 Reservas Naturales de la Sociedad Civil en el Corredor de Conservación de Páramos: Chingaza, Sumapaz, Guerrero, Cerros Orientales y su área de influencia*. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/2017LPV/Menu_Transparencia/ambiental/4_Biodiv_Serv_Ecosist_30ReserNat_SociedadCivil_CorrConservacion.pdf

- Cortinovis, C., Geneletti, D., & Hedlund, K. (2021). Synthesizing multiple ecosystem service assessments for urban planning: A review of approaches, and recommendations. *Landscape and Urban Planning*, 213(April), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104129>
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Vicente, I., Borja, P., & De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos, CODESAN.*, 287–304.
- Cruz, B., Gaspari, F., Rodríguez, A., Carrillo, F., & Téllez, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23(64), 26–34. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=674/67441039004>
- Cuatrecasas, J. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 10(40), 221–264. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.570>
- DANE. (2020). *Informe técnico: Caracterización poblacional de áreas de páramo a partir de los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV 2018)*. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/Informe-tecnico-caracterizacion-poblacional-paramos-CNPV2018.pdf>
- Danley, B., & Widmark, C. (2016). Evaluating conceptual definitions of ecosystem services and their implications. *Ecological Economics*, 126, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.04.003>
- Daza, M., Hernández, F., & Triana, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189–7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- De Groot, R. (1992). *Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making*. Wolters-Noordhoff B.V. https://www.amazon.com/-/es/Rudolf-S-Groot/dp/9001355943/ref=sr_1_1?keywords=9789001355944&linkCode=qs&qid=1650208616&s=books&sr=1-1
- Del Toro, N., Gomariz-Castillo, F., Cánovas-García, F., & Alonso-Sarría, F. (2015). Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del río Argos (región de Murcia). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 67, 327–347. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5035579>
- Díaz-Granados, M., Navarrete, J., & Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64–75. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200008
- Díaz, C., Mamadou, K., Iturbe, A., Esteller, M., & Reyna, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *CIENCIA Ergo-Sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 6(2), 124–134. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10401504>
- Diez, J., Escudero, B., Carballeda, A., Barberena, M., Hallak, Z., Rocha, E., Massera, C., Vázquez, A., Barceló, M., Coñuecar, V., Gómez, P., Gómez, D., Feü, C., Martínez, N., & Rometro, N. (2012). *Cartografía social: investigaciones e intervención desde las ciencias sociales: métodos y experiencias de aplicación* (1st ed.). Comodoro Rivadavia : Universitaria de la Patagonia. <https://www.margen.org/Libro1.pdf>
- Duarte-Abadía, B., & Boelens, R. (2016). Disputes over territorial boundaries and diverging valuation languages: the Santurban hydrosocial highlands territory in Colombia. *Water International*, 41(1), 15–36. <https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1117271>

- Duarte, J. (2022). *Modelación del impacto del uso del suelo en la oferta hídrica. Caso de estudio: cuenca del Río Jordán en el Distrito de Manejo Integrado (DMI) “Páramo de Berlín.”* Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Egan, P., & Price, M. (2014). *Las montañas como torres de agua del mundo: Protegiendo el agua y los servicios ecosistémicos de montaña ante el cambio climático* (p. 6). <https://www.iucn.org/node/21265>
- Espinosa, J., & Rivera, D. (2016). Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes. *Environmental Earth Sciences*, 75(16), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5962-1>
- ESRI. (2020). *Instalar ArcGIS Desktop en su equipo*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.5/get-started/installation-guide/installing-on-your-computer.htm>
- FAO. (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Flores-López, F., Galaiti, S., Escobar, M., & Purkey, D. (2016). Modeling of Andean páramo ecosystems' hydrological response to environmental change. *Water (Switzerland)*, 8(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w8030094>
- Forero, J. (2012). *Modelo hidrológico distribuido de la Cuenca Superior del Río de Oro*. [Universidad Industrial de Santander (UIS)]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/142967.pdf>
- Forero, L., & Veloza, P. (2018). *Propuesta de sistema de suministro de agua potable para fincas agrícolas de la vereda Guayabal en Onzaga Santander* [Universidad Católica de Colombia]. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22575/1/PROPUESTA DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA FINCAS AGRICOLAS DE LA VEREDA GUAYABAL EN ONZAGA SAN.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22575/1/PROPUESTA%20DE%20SUMINISTRO%20DE%20AGUA%20POTABLE%20PARA%20FINCAS%20AGRICOLAS%20DE%20LA%20VEREDA%20GUAYABAL%20EN%20ONZAGA%20SAN.pdf)
- Franco, J. (2009). *Prospección geoelectrica en el páramo de Berlín-Tona Santander*.
- Fries, A., Silva, K., Pucha-Cofrep, F., Oñate-Valdivieso, F., & Ochoa-Cueva, P. (2020). Water Balance and Soil Moisture Deficit of Different Vegetation Units under Semiarid Conditions in the Andes of Southern Ecuador. *Climate*, 8(2), 30. <https://doi.org/10.3390/cli8020030>
- Gallego, J. (2001). Comparing CORINE land cover with a more detailed database in Arezzo (Italy). *Towards Agrienvironmental Indicators, Topic Report 6/2001.*, 1–8. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.500.971&rep=rep1&type=pdf>
- García, T., & Mas, J. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 67, 7–19. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000300002
- Garzón-Sánchez, H., Loaiza-Usuga, J. C., & Vélez-Upégui, J. I. (2021). Soil Moisture Behavior in Relation to Topography and Land Use for Two Andean Colombian Catchments. *Water*, 13(11), 1448. <https://doi.org/10.3390/w13111448>
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revista Científica Del Comité de Medio Ambiente Del Grupo Montevideo*, 4, 143–158. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/25777>
- Gil, E., & Tobón, C. (2016). Hydrological modelling with TOPMODEL of Chingaza páramo, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7919–7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Gomez-Isidro, S., & Gómez-Ríos, V. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and

- numerical algorithms in mountain basins: Surata's river and Oro's river (Santander, Colombia). *DYNA*, 83(196), 213–222. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>
- Gómez, V. (2022). *Evaluación del comportamiento de la evapotranspiración en una unidad hidrográfica no intervenida de ecosistema de páramo*. Universidad Industrial de Santander (UIS).
- González, L., Aragón, A., & Moreno, R. (2015). *Determinar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico del páramo Guerrero y establecer las posibles medidas de adaptación y mitigación* [Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/2717>
- GPH, CEMOS, & G-PAD. (2018). *Análisis Participativo de la Influencia del Uso del Suelo en los Servicios Hidrológicos de Suministro y Regulación Ofertados por el Ecosistema de Páramo Seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander - Colombia)* (p. 1). Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH). http://civil.uis.edu.co/eisi/grupo/gph/#views/gm46/investigacion/proyectos_de_investigacion
- Gualpa, M., & Céleri, R. (2013). Efecto de la estimación de la presión atmosférica sobre el cálculo de niveles de agua y caudales. *Aqua-LAC*, 5(2), 56–68. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2013-v5-2-06>
- Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M., & Wyseure, G. (2015). Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador. *Hydrological Processes*, 29(14), 3051–3064. <https://doi.org/10.1002/hyp.10422>
- GWP. (2008). *Principios de gestión integrada de los recursos hídricos: Bases para el desarrollo de planes nacionales* (p. 12). Global Water Partnership (GWP). https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/sobre-girh/2008-principios-de-girh-base-para-el-desarrollo-de-planes-nacionales.pdf
- GWP. (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*. Global Water Partnership (GWP) - International Network of Basin Organizations (INBO).
- Hamill, L. (2011). *Understanding Hydraulics* (3rd ed.). Red Globe Press. <https://www.macmillanihe.com/page/detail/Understanding-Hydraulics/?K=9780230242753>
- Hanley, T., & Cutts, L. (2013). What is a systematic review? *Counselling Psychology Review*, 28(4), 3–6. [https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/what-is-a-systematic-review\(ec60903a-ac4d-4638-a789-93ee215b8905\)/export.html](https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/publications/what-is-a-systematic-review(ec60903a-ac4d-4638-a789-93ee215b8905)/export.html)
- Harden, C., Hartsig, J., Farley, K., Lee, J., & Bremer, L. (2013). Effects of Land-Use Change on Water in Andean Páramo Grassland Soils. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 375–384. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.754655>
- Harden, C. P. (2006). Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*, 79(3–4), 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.021>
- Harris, J., Quatman, C., Manring, M., Siston, R., & Flanigan, D. (2014). How to Write a Systematic Review. *The American Journal of Sports Medicine*, 42(11), 2761–2768. <https://doi.org/10.1177/0363546513497567>
- Harrison-Atlas, D., Theobald, D., & Goldstein, J. (2016). A systematic review of approaches to quantify hydrologic ecosystem services to inform decision-making. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 12(3), 160–171. <https://doi.org/10.1080/21513732.2016.1181105>
- Hewlett, J., & Pienaar, L. (1973). Design and analysis of the catchment experiment. *Symposium on Use of Small Watersheds in Determining Effects of Forest Land Use on Water Quality* Land Use on Water Quality, 88–106.

- Hibbert, A. (1967). Forest Treatment Effects on Water Yield. *Coweeta Hydrologic Laboratory, Southeastern Forest Experiment Station, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Asheville, North Carolina.*, 527–543. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.545.6751>
- Hincapié, G., & Veloza, J. (2009). *Informe hidrogeológico del Macizo de Santander*.
- Hofstede, R. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, 173(1), 111–132. <https://doi.org/10.1007/BF00155524>
- Hofstede, R. (2011). *Los Servicios del Ecosistema Páramo: Una Visión desde la Evaluación de Ecosistemas del Milenio* (pp. 5–18). Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). https://www.portalces.org/sites/default/files/references/097_Hofstede2011bMilenio.pdf
- Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). *Los Páramos del Mundo* (1st ed.). Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56486.pdf>
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Howard, D. (1967). Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 51(11), 2246–2259. <https://doi.org/10.1306/5D25C26D-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- IAvH. (2010). *Definición de criterios para la delimitación de páramos del país y de lineamientos para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- IAvH. (2014). *Informe final componente coberturas de la tierra en los páramos priorizados a escala 1:25.000 (metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia)*. <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9580/13-13-014-093CE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- IAvH. (2016). *Biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://www.humboldt.org.co/es/estado-de-los-recursos-naturales/item/898-bio2015>
- IAvH. (2020). *Identificación de plataformas regionales de monitoreo de alta montaña en Colombia* (pp. 1–13). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35655>
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). [http://www.purace-cauca.gov.co/MiMunicipio/DocumentosGestinRiesgoYDesastres/Estudios gestión del riesgo Puracé/Leyenda nacional coberturas tierra.pdf](http://www.purace-cauca.gov.co/MiMunicipio/DocumentosGestinRiesgoYDesastres/Estudios%20gesti%C3%B3n%20del%20riesgo%20Purac%C3%A9/Leyenda%20nacional%20coberturas%20tierra.pdf)
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). <https://cta.org.co/descargables-biblionet/agua-y-medio-ambiente/Estudio-Nacional-del-Agua-2018.pdf>
- IGAC. (2003). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Santander*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18252>

- IMTA. (1992). *Manual de aforos* (A. Kennedy, F. Fragoza, E. Peña, & E. Moreno (eds.); 1st ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/971/IMTA_028.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- INE. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro*. Instituto Nacional de Ecología (INE). https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Past, present and future land use changes and their impact on water balance. *Journal of Environmental Management*, 197, 582–596. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.018>
- Lambin, E., Geist, H., & Rindfuss, R. (2006). Introduction: Local Processes with Global Impacts. In E. Lambin & H. Geist (Eds.), *Land-use and Land-cover Change: Local Processes and Global Impacts* (pp. 1–8). Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-32202-7>
- Lauer, W. (1981). Ecoclimatological Conditions of the Paramo Belt in the Tropical High Mountains. *Mountain Research and Development*, 1(3/4), 209–221. <https://doi.org/10.2307/3673058>
- Lazo, P., Mosquera, G., McDonnell, J., & Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean Páramo catchments. *Journal of Hydrology*, 572(March), 805–819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.050>
- Lis-Gutiérrez, M., Rubiano-Sanabria, Y., & Loaiza, J. (2019). Soils and land use in the study of soil organic carbon in Colombian highlands catena. *AUC Geographica*, 54(1), 15–23. <https://doi.org/10.14712/23361980.2019.2>
- Liu, J., & Deng, X. (2010). Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC. *Chinese Science Bulletin*, 55(3), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0733-y>
- Liu, S., Leslie, L. M., Speer, M., Bunker, R., & Mo, X. (2004). The effects of bushfires on hydrological processes using a paired-catchment analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 86(1–2), 31–44. <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0614-x>
- Llambí, L., Soto, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa-Tocachi, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos*. Proyecto Páramo Andino.
- Löwer, C. (2020). *What impact does grazing intensity have on the degradation of vegetation structure in a dry páramo?* Universidad de Bayreuth.
- Luteyn, J. (1999). *Paramos: a checklist of plant diversity, geographical distribuion, and botanical literature*. The New York Botanical Garden Press.
- Mace, G. (2014). Whose conservation? *Science*, 345(6204), 1558–1560. <https://doi.org/10.1126/science.1254704>
- Macias, Y., & Omaña, H. (2018). *Validación de la metodología Corine Land Cover para generación de mapa de cobertura del suelo: caso cuenca del río Jordan (Tona, Santander)* [Universidad Industrial de Santander]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/172638.pdf>
- Marín, F., Dahik, C., Mosquera, G., Feyen, J., Cisneros, P., & Crespo, P. (2019). Changes in Soil Hydro-Physical Properties and SOM Due to Pine Afforestation and Grazing in Andean Environments Cannot Be Generalized. *Forests*, 10(17), 23. <https://doi.org/10.3390/f10010017>
- Martín-López, B., Gómez-Baggethun, E., González, J., Lomas, P., & Montes, C. (2009). The Assessment of Ecosystem Services Provided by Biodiversity: Re-Thinking Concepts and

- Research Needs. In *Handbook of Nature Conservation: Global, Environmental and Economic Issues* (pp. 1–22). Nova Science Publishers. https://books.google.com.co/books/about/Handbook_of_Nature_Conservation.html?id=9EbWAAAAMAAJ&redir_esc=y
- MEA. (2003). *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Island Press. <https://www.unep.org/resources/report/ecosystem-and-human-well-being-framework-assessment>
- MinAgricultura. (2017A). Cebolla de rama. In *Evaluaciones Agropecuarias Municipales* (p. 4). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.agronet.gov.co/Documents/15-CEBOLLA_DE_RAMA_2017.pdf
- MinAgricultura. (2017B). Papa. In *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural* (p. 4). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.agronet.gov.co/Documents/5-PAPA_2017_2017.pdf
- MinAmbiente. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/direccion-integral-de-recurso-hidrico/politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>
- MinAmbiente. (2016). *Política para la Gestión Sostenible del Suelo*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/suelo/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Mokondoko, P., Flores, A., González, I., González, D., Machorro, J., & Ríos, E. (2018). *Servicios ecosistémicos. Fundamentos desde el manejo de cuencas* (1st ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Monsalve, G. (2008). *Hidrología en la ingeniería* (2nd ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería (Reimpresión).
- Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A., & Célleri, R. (2019). Impact of tussock grasses removal on soil water content dynamics of a tropical mountain hillslope. *Ecohydrology*, 12(8), 1–12. <https://doi.org/10.1002/eco.2146>
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, J., Olaya, É., Posada, E., & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Mosquera, G., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B., Román-Dañobeytia, F., & Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of The Total Environment*, 804, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>
- NASA. (2017). *Serie de capacitaciones avanzadas de clasificación de manto terrestre ARSET Invierno 2017* (pp. 1–17). Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Exercise 1 - Creating a Supervised Land Cover Classification %28Spanish%29.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Exercise%201%20Creating%20a%20Supervised%20Land%20Cover%20Classification%20Spanish.pdf)
- Neary, D. (2016). Long-Term Forest Paired Catchment Studies: What Do They Tell Us That Landscape-Level Monitoring Does Not? *Forests*, 7(12), 164. <https://doi.org/10.3390/f7080164>
- Nieto, M., Cardona, L., & Agudelo, C. (2015). Análisis de servicios ecosistémicos. Provisión y regulación hídrica. In P. Ungar (Ed.), *Hojas de ruta. Guías para el estudio socioecológico de la alta montaña en Colombia*. (p. 96). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., Sucozhañay, A., & Célleri, R. (2019). Actual

- Evapotranspiration in the High Andean Grasslands: A Comparison of Measurement and Estimation Methods. *Frontiers in Earth Science - Hydrosphere*, 7(55), 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00055>
- Ochoa-Tocachi, B., Buytaert, W., & De Bièvre, B. (2016B). Regionalization of land-use impacts on streamflow using a network of paired catchments. *Water Resources Research*, 52(9), 6710–6729. <https://doi.org/10.1002/2016WR018596>
- Ochoa-Tocachi, B., Buytaert, W., & De Bièvre, B. (2018). Participatory Monitoring of the Impact of Watershed Interventions in the Tropical Andes. In *Andean Hydrology* (1st ed., pp. 127–163). <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315155982-6/participatory-monitoring-impact-watershed-interventions-tropical-andes-boris-ochoa-tocachi-wouter-buytaert-bert-de-bievre>
- Ochoa-Tocachi, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016A). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Oesterheld, M. (2008). Impacto de la agricultura sobre los ecosistemas. Fundamentos ecológicos y problemas más relevantes. *Ecología Austral*, 18(3), 337–346. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2008000300007&lng=en&tlng=en
- Ojeda-Trejo, E., León, J., Christine, D., & Cajuste-Bontemps, L. (2014). Cartografía Participativa Para El Ordenamiento Territorial Comunitario. *IX Congreso de Sociedades Rurales Latinoamericanas. Diversidades, Contrastes y Alternativas*, 1, 1–22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2791.6327>
- Olden, J., & Poff, N. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2), 101–121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
- OMM. (2012). *International Glossary of Hydrology*. Organización Meteorológica Mundial (OMM). http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- Onset. (2018). *Manual HOB0 U20L Water Level Logger (U20L-0x)* (p. 8). https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/17153-G U20L Manual.pdf
- ONU. (1992). *Cumbre para la Tierra: Programa 21*. Organización de las Naciones Unidas (ONU). <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21sptoc.htm>
- ONU. (2002). *Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible: Johannesburgo (Sudáfrica), 26 de agosto a 4 de septiembre de 2002*. Organización de las Naciones Unidas (ONU). <https://undocs.org/es/A/CONF.199/20>
- ONU. (2012). *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible. Río de Janeiro (Brasil) 20 a 22 de junio de 2012*. Organización de las Naciones Unidas (ONU). <https://undocs.org/pdf?symbol=es/A/CONF.216/16>
- ONU. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*. Organización de las Naciones Unidas (ONU). <https://www.undp.org/content/dam/argentina/Publications/Agenda2030/PNUDArgent-DossierODS.pdf>
- ONU. (2017). *Marco de indicadores mundiales para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (p. 24). Organización de las Naciones Unidas (ONU). https://unstats.un.org/sdgs/indicators/GlobalIndicatorFrameworkafter2020review_Spa.pdf
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla técnica: ¿Qué es una cuenca hidrológica?* (Z. Novoa (ed.); 1st ed.).

Foro Peruano para el Agua - GWP.

- Otero, J., Figueroa, A., Muñoz, F., & Peña, M. (2011). Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area. *Ecological Engineering*, 37(12), 2035–2043. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.001>
- Oudin, L., Kay, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2010). Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? *Water Resources Research*, 46(11), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2009WR008887>
- Ouyang, Y., Paz, J. O., Feng, G., Read, J. J., Adeli, A., & Jenkins, J. N. (2017). A Model to Estimate Hydrological Processes and Water Budget in an Irrigation Farm Pond. *Water Resources Management*, 31(7), 2225–2241. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1639-0>
- Padrón, R., Wilcox, B., Crespo, P., & Céleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Pati, D., & Lorusso, L. (2018). How to Write a Systematic Review of the Literature. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 11(1), 15–30. <https://doi.org/10.1177/1937586717747384>
- Patiño, S. (2020). *Evaluación del efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en ecosistema de páramo asociadas a los servicios de suministro y regulación hídrica*. Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Piper, R. (2013). *How to write a systematic literature review: a guide for medical students* (pp. 1–8). National AMR - Fostering Medical Research. <http://sites.cardiff.ac.uk/curesmed/files/2014/10/NSAMR-Systematic-Review.pdf>
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2002). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18(1), 45–55. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00049.x>
- Posada, L. (1994). *Hidráulica fluvial: transporte de sedimentos*. Universidad Nacional de Colombia (UNAL).
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, J., Barco, O., & Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología Colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6, 121–130. http://gfnun.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero06/06_13.pdf
- Price, M. (1998). Las montañas : ecosistemas de importancia mundial. *Unasylva*, 49(195), 1–11. [http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s03.htm#las montañas: ecosistemas de importancia mundial](http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s03.htm#las%20monta%C3%B1as:%20ecosistemas%20de%20importancia%20mundial)
- Quiroz, C., Crespo, P., Stimm, B., Murtinho, F., Weber, M., & Hildebrandt, P. (2018). Contrasting Stakeholders' Perceptions of Pine Plantations in the Páramo Ecosystem of Ecuador. *Sustainability*, 10(6), 1707. <https://doi.org/10.3390/su10061707>
- Rangel, J. (2000). *Colombia. Diversidad biótica III. La región de vida paramuna*. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Reyes, P., Molano, J., González, F., Cortés, A., Rangel, O., Flórez, A., Iriarte, P., & Kraus, E. (1995). *El páramo: un ecosistema de alta montaña* (1st ed.). Santa Fé de Bogotá: Fundación Ecosistemas Andinos, Gobernación de Boyacá.
- Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., & Braun, D. (1996). A Method for Assessing Hydrologic

- Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- Rincón-Ruiz, A., Echeverry-Duque, M., Piñeros, A., Tapia, C., David, A., Arias-Arévalo, P., & Zuluaga, P. (2014). *Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/32547>
- Rosero-López, D., Cowen, E., Walter, M., De Bièvre, B., González-Zeas, D., Flecker, A., Osorio, R., & Dangles, O. (2020). Design of a paired-weir system for experimental manipulation of environmental flows in streams. *Journal of Ecohydraulics*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1830002>
- Rost, S., Gerten, D., & Heyder, U. (2008). Human alterations of the terrestrial water cycle through land management. *Advances in Geosciences*, 18, 43–50. <https://doi.org/10.5194/adgeo-18-43-2008>
- RStudio. (2020). *Productos de RStudio*. <https://rstudio.com/products/rstudio/>
- Sahin, V., & Hall, M. (1996). The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178(1–4), 293–309. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02825-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02825-0)
- Sarmiento, C., Cadena, C., Sarmiento, M., & Zapata, J. (2013). *Aportes a la conservación estratégica de los Páramos de Colombia: Actualización de la cartografía de los complejos de páramo a escala 1:100.000*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://www.humboldt.org.co/es/component/k2/item/408-apuntes-a-la-conservacion-estrategica-de-los-paramos-de-colombia>
- Sarmiento, C., & León, O. (2015). *Transición bosque-páramo. Bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Sarmiento, C., Osejo, A., Ungar, P., & Zapata, J. (2017). Páramos habitados: desafíos para la gobernanza ambiental de la alta montaña en Colombia. *Biodiversidad En La Práctica*, 2(1), 122–145.
- Schumm, S. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Searcy, J. (1959). Flow-Duration Curves. Manual of Hydrology: Part 2. Low-Flow Techniques. In *Geological Survey Water-Supply Paper 1542-A*. <https://pubs.usgs.gov/wsp/1542a/report.pdf>
- Segarra, P. (2002). Mapeo participativo involucrando a la comunidad en el manejo del páramo. *Congreso Mundial de Páramos*, 482–495. <http://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/35416#page=1>
- Semana. (2021, April 25). ¿Para cuándo la delimitación de Santurbán? *Sección de Sostenibilidad*, 1–12. <https://www.semana.com/nacion/articulo/para-cuando-la-delimitacion-de-santurban/202115/?fbclid=IwAR3ns9S1YUkCsd4eginxHmBdmXVc1FjP3wMD3ZZMFjsZXplu7x49FgtD8aE>
- SenseFly. (2014). *User Manual: S110 RGB/NIR/RE camera* (pp. 1–40). SenseFly Ltd. [http://95.110.228.56/documentUAV/camera manual/%5BENG%5D_2014_user_manual_s110_v3.pdf](http://95.110.228.56/documentUAV/camera%20manual/%5BENG%5D_2014_user_manual_s110_v3.pdf)
- Serrano, N. (2020). *Diagnóstico participativo de los usos del paisaje de la cuenca del río Jordán en el páramo de Berlín* [Universidad Industrial de Santander (UIS)]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2020/178921.pdf>

- Sotelo, G. (1994). *Hidráulica general: Fundamentos (Vol. I)* (Primera). Editorial Limusa - Grupo Noriega.
- Stednick, J. (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176(1–4), 79–95. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02780-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02780-7)
- Strahler, A. (1950). Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. *American Journal of Science*, 248(10), 673–696. <https://doi.org/10.2475/ajs.248.10.673>
- Strahler, A. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin Of The Geological Society Of America*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Thompson, J., Zurita-Arthos, L., Müller, F., Chimbolema, S., & Suárez, E. (2021). Land use change in the Ecuadorian páramo: The impact of expanding agriculture on soil carbon storage. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 53(1), 48–59. <https://doi.org/10.1080/15230430.2021.1873055>
- Toebes, C., & Ouryvaev, V. (1970). *Las cuencas representativas y experimentales: guía internacional de prácticas en materia de investigación*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Torres, J., & Durán, J. (2019). *Efecto De La Agricultura Sobre La Calidad Del Agua En Microcuencas De Páramo. Caso: Páramo de Berlín (Santander, Colombia)* [Universidad Industrial de Santander (UIS)]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2019/178037.pdf>
- Torres, J., Frías, C., & De la Torre, C. (2014). *Adaptación al cambio climático en zonas de montaña* (1st ed.). Soluciones Prácticas. <http://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/346530/>
- Torres, S., & Proaño, C. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *La Granja*, 28(2), 52–66. <https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>
- Tuffwing. (2015). *UAV Mapper*. http://www.tuffwing.com/products/drone_mapper.html
- Ulloa, A., & Gómez, S. (2007). *Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central del departamento de Santander. Tomo I Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander*.
- Valencia-Leguizamón, J., & Tobón, C. (2017). Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Ecosistemas*, 26(2), 10–17. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.02>
- Van Loon, A., Rangelcroft, S., Coxon, G., Breña, J., Van Ogtrop, F., & Van Lanen, H. (2019). Using paired catchments to quantify the human influence on hydrological droughts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1725–1739. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1725-2019>
- Vásquez, A., & Buitrago, A. (2011). *El gran libro de los páramos* (1st ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Proyecto Páramo Andino.
- Vélez, J., & Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58–71. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622372006>
- Verdugo, M. (2017). *Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el bosque y vegetación protectora Aguarondo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Vörösmarty, C., & Sahagian, D. (2000). Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle. *BioScience*, 50(9), 753–765. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0753:ADO](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0753:ADO)

TTW]2.0.CO;2

- Watson, F., Vertessy, R., McMahon, T., Rhodes, B., & Watson, I. (2001). Improved methods to assess water yield changes from paired-catchment studies: application to the Maroondah catchments. *Forest Ecology and Management*, 143(1–3), 189–204. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00517-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00517-X)
- Wehrli, A. (2014). Why Mountains Matter for Sustainable Development. *Mountain Research and Development*, 34(4), 405–409. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00096.1>
- Westman, W. (1977). How Much Are Nature's Services Worth? *Science*, 197(4307), 960–964. <https://doi.org/10.1126/science.197.4307.960>
- WRadio. (2021, June 25). ¿Por qué tarda tanto la delimitación del Páramo de Santurbán? *Regiones*, 1–2. <https://www.wradio.com.co/noticias/regionales/por-que-tarda-tanto-la-delimitacion-del-paramo-de-santurban/20210625/nota/4146408.aspx>
- WV. (2004). *Manual de manejo de cuencas* (J. Girón, C. Gómez, & A. Recalde (eds.); 2nd ed.). World Vision (WI) El Salvador.
- Zégre, N., Skaugset, A., Som, N., McDonnell, J., & Ganio, L. (2010). In lieu of the paired catchment approach: Hydrologic model change detection at the catchment scale. *Water Resources Research*, 46(11), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2009WR008601>

Apéndices

Apéndice A. Metodología y resultados de la aplicación de la revisión sistemática de literatura.

Etapa	Paso	Actividad	Resultado
Aprendizaje	1	Familiarización con el enfoque	Lectura de los documentos publicados por: Harris et al. (2014); Pati y Lorusso (2018); y Piper (2013).
Precisión del estudio	2	Identificación de la pregunta central de investigación	¿Cuál es el estado de los servicios de abastecimiento y regulación hídrica de dos unidades hidrográficas de páramo, sometidas a diferentes niveles de alteración en el uso y la cobertura de los suelos?
	3	Identificación de los conceptos claves del estudio	Se identificaron los conceptos clave de la pregunta de investigación, los cuales correspondieron a: cambio del uso del suelo (<i>land use change</i>); cambio de las coberturas del suelo (<i>land cover change</i>); regulación hídrica (<i>water regulation</i>); abastecimiento hídrico (<i>water production</i>); y páramo (<i>paramo</i>).
Definición de criterios	4	Selección de las bases de datos relevantes para el tema	Se seleccionaron las bases de datos SCOPUS y ScienceDirect, debido a que contienen los artículos de las revistas más especializadas en el área de interés (p. ej., <i>Hydrological Processes</i> y <i>Journal of Hydrology</i>). También se realizaron búsquedas de textos en la plataforma académica de Google (p. ej., capítulos de libros, artículos de revistas locales y guías de entes gubernamentales).
	5	Definición de los criterios de inclusión y exclusión	Se definieron los criterios siguientes: idioma (español o inglés); período (entre 1990 y 2021); tipo de literatura (revisada por pares o institucional); y tipos de documentos (artículos de investigación, revisiones, capítulos de libros y publicaciones de congresos).
Búsqueda	6	Búsqueda en las bases de datos con operadores booleanos	Se usaron las siguientes ecuaciones de búsqueda en inglés y sus versiones traducidas al español: <i>article title: land change hydrology paramo (OR)</i> <i>abstract: land change hydrology paramo</i> <i>article title: land change water paramo (OR)</i> <i>abstract: land change water paramo</i>
Revisión de documentos	7	Caracterización de los documentos encontrados	Se construyó una tabla en Microsoft Excel con información relativa a: código de identificación, resumen, objetivo, año, título, revista, tipo de documento, autores, metodología central, caracterización del sitio de estudio, criterio de inclusión de los servicios de abastecimiento y regulación, y resumen de resultados.
	8	Revisión de los títulos	No se descartaron documentos por el título.
	9	Revisión de los resúmenes	Se descartaron cuatro documentos por el resumen, debido a que los estudios no abordaron la pregunta de investigación planteada.
	10	Revisión de los textos completos	Se revisaron 51 documentos.
Ponderación	11	Ponderación numérica del investigador principal	Se estableció el criterio de ponderación siguiente: valor 1: documentos que responden la pregunta de investigación desde enfoques similares a los establecidos en este estudio; valor 2: documentos que responden la pregunta de investigación desde enfoques diferentes a los establecidos en este estudio; y valor 3: documentos de soporte que abordan la temática de la pregunta de investigación, pero que no evalúan específicamente todos sus elementos (ver paso 3).
	12	Ponderación numérica del par académico	Un investigador asociado a un proyecto afín en la misma área de estudio, realizó la ponderación de los documentos bajo los mismos criterios descritos. Los resultados de ponderación mostraron consenso en el 76.5% de los documentos. En los demás (12 documentos), la discrepancia fue mínima, pues se trataron de documentos entre los valores 2 y 3.
Discusión	13	Análisis de los textos compilados	Se discutieron objetivamente los resultados de las investigaciones recopiladas.

Apéndice B. Características del vehículo aéreo no tripulado (UAV) usado en los sobrevuelos.

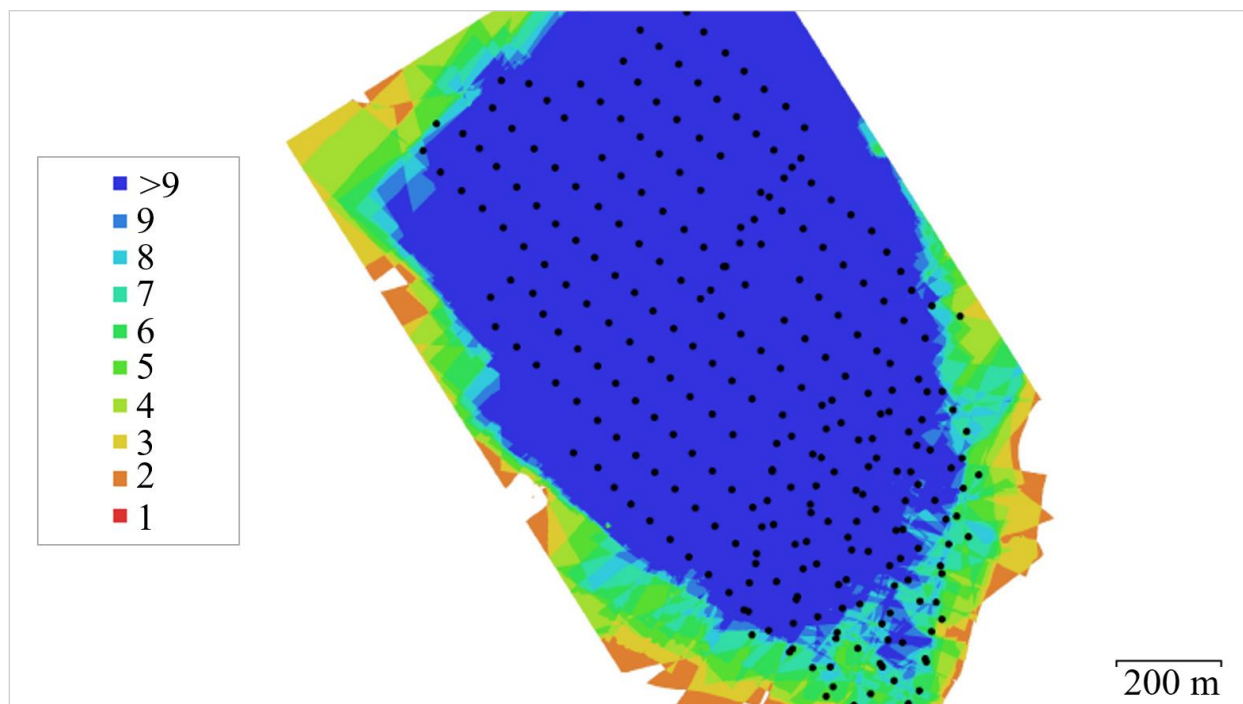


Tomado de Tuffwing (2015).

Característica	Resultado
Longitud de las alas	1.22 m
Área de cada ala	151 cm ²
Peso total	1.9 kg
Material	Tubos de fibra de carbono, madera contrachapada, coroplast y goma de polipropileno expandido.
Modelo de cámara	Canon S110 NIR
Batería	5000 – 6000 mAh, 4 celdas de litio.
Programa de planificación de vuelos	Mission Planner®
Duración de vuelo	40 minutos
Método de lanzamiento	Manual o en plataforma
Método de georreferenciación de imágenes	Sistema GPS a bordo
Sistema de orientación	Mediante de brújula
Sistema de medición de presión	Sensor de tubo Pitot

Adaptado de Tuffwing (2015).

Apéndice C. Mapa de concentración de las fotografías e informe de procesamiento del MDE.



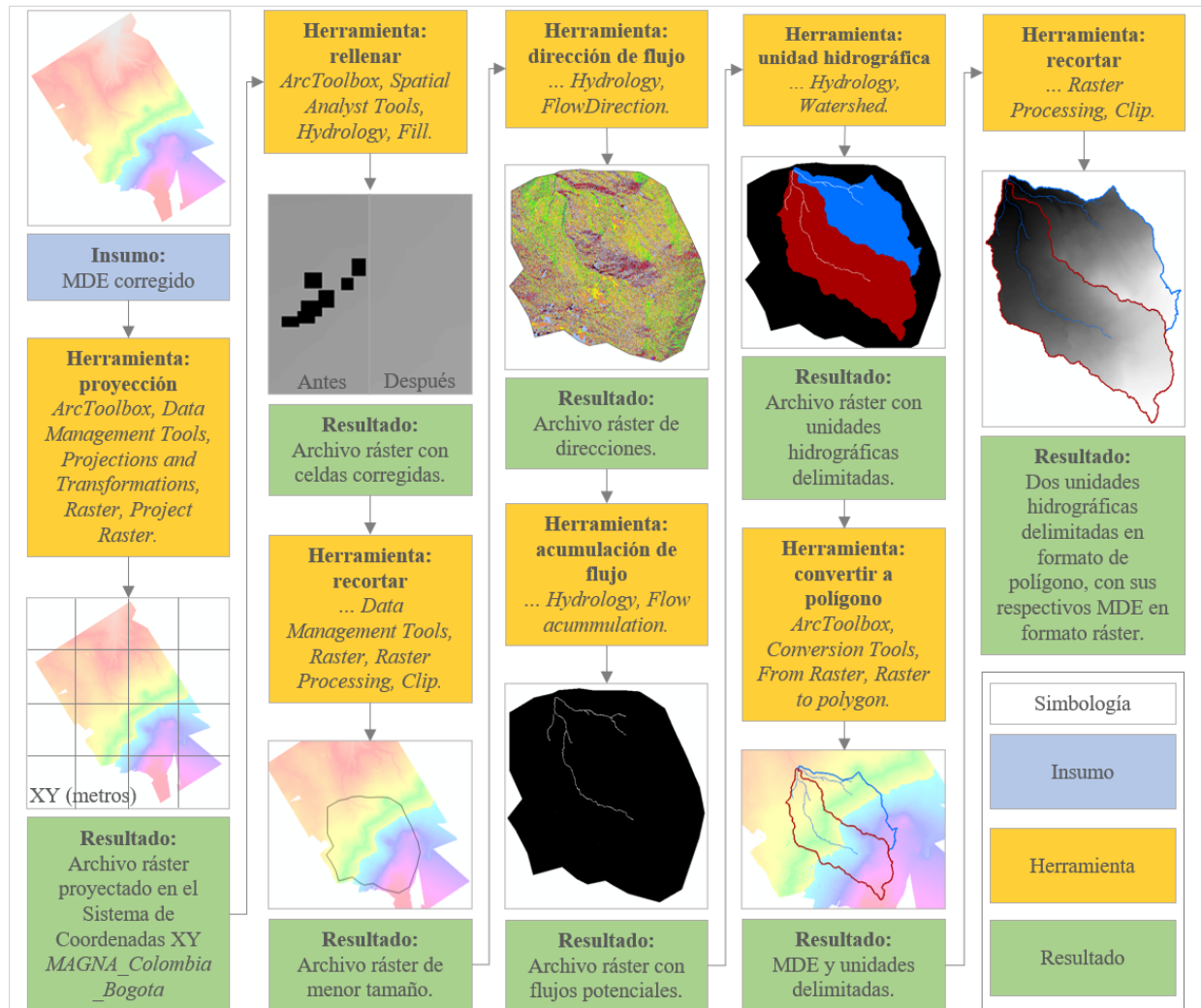
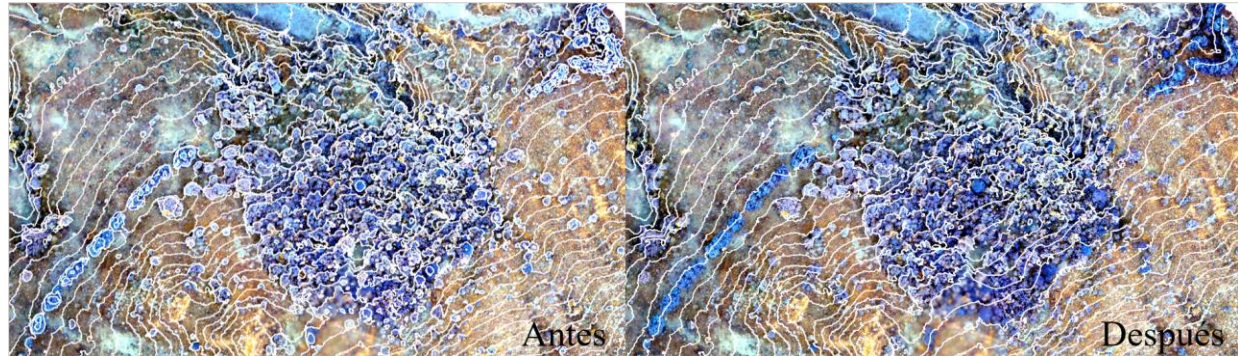
Proceso	Característica	Resultado
General	Cámaras alineadas	284 de 304
	Marcadores	10 de 10
	Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG: 4326)
Nube de puntos	Puntos	230726 de 256281
	Error de reproyección RMS	0.221991 (1.27952 píxeles)
	Error máximo de reproyección	0.668881 (35.5462 píxeles)
	Tamaño medio del punto clave	5.93 píxeles
	Cantidad de puntos de la nube densa	300324595
	Tiempo de generación de la nube densa	1 día y 8 horas
	Calidad de construcción de la nube densa	Ultra alta
Parámetros de alineación	Exactitud	Alta
	Límite de puntos clave	40000
	Límite de puntos de empate	4000
	Ajuste del modelo de cámara adaptable	Sí
	Tiempo de coincidencia	8 minutos y 45 segundos
	Tiempo de alineación	2 minutos y 56 segundos
Parámetros de reconstrucción del MDE	Fuente de datos	Nube densa
	Interpolación	Habilitada
	Tiempo de generación del MDE	3 minutos y 31 segundos
MDE	Tamaño	22855 x 25755
	Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG: 4326)

Nota:

Tabla construida a partir del informe de resultados generado por el programa Agisoft Metashape.

Apéndice D. Correcciones al MDE y delimitación de las unidades hidrográficas de estudio.

Tras la creación del MDE en la Etapa 3 de la Figura 14, se sustrajeron los valores de las zonas arbustivas de la nube. El procedimiento aplicado consistió en realizar selecciones basadas en altura y color de la nube de puntos densa. La selección permitió diferenciar mediante la asignación de clases, los puntos asociados a la superficie del terreno de los puntos asociados a los árboles. Una muestra de la aplicación de esta metodología se ilustra en la imagen siguiente.



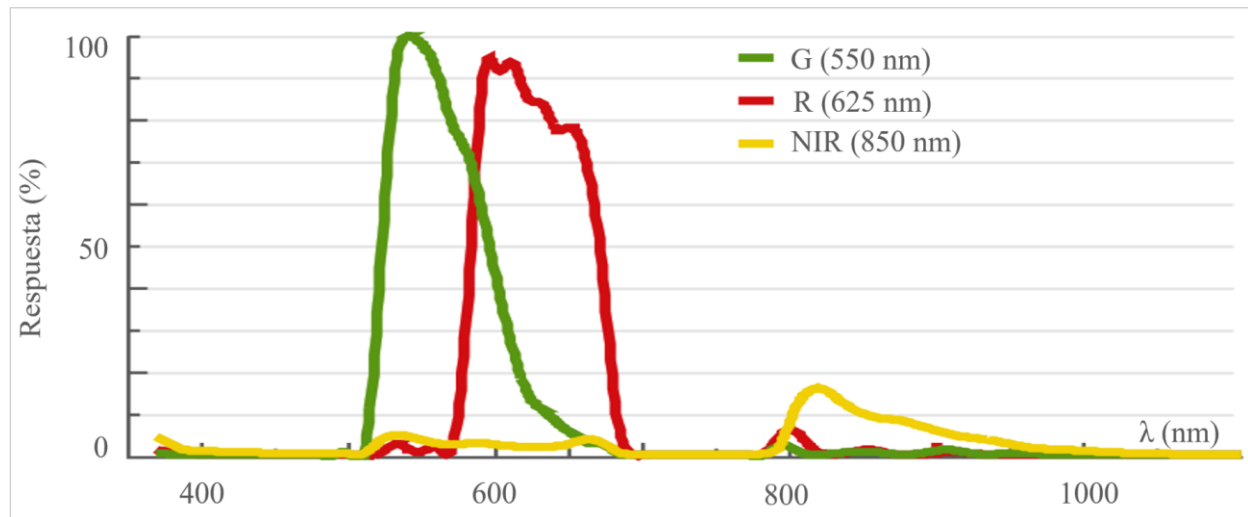
Apéndice E. Metodología para el cálculo de los parámetros morfológicos.

Parámetro		Programa	Ruta de comandos
Localización	Lat.	ArcMap	<i>Open Attribute Table, Add Field, Calculate Geometry, Y Coordinate of Centroid.</i>
	Long.	ArcMap	<i>Open Attribute Table, Add Field, Calculate Geometry, X Coordinate of Centroid.</i>
Área		ArcMap	<i>Open Attribute Table, Add Field, Calculate Geometry, Area.</i>
Perímetro		ArcMap	<i>Open Attribute Table, Add Field, Calculate Geometry, Perimeter.</i>
Longitud		ArcMap	<i>Tools, Measure.</i>
Índice de alargamiento		ArcMap	<i>Tools, Measure.</i>
Altitud máxima		ArcMap	<i>Layer Properties, Statistics.</i>
Altitud mínima		ArcMap	<i>Layer Properties, Statistics.</i>
Altitud media		ArcMap	<i>Layer Properties, Statistics.</i>
Nonagésimo quinto percentil (95th) de elevación		RStudio	<i>library (raster), setwd ("directory"), Alt<-raster (x=" file name"), quantile (Alt, prob=0.95).</i>
Quinto percentil (5th) de elevación		RStudio	<i>library (raster), setwd ("directory"), Alt<-raster (x=" file name"), quantile (Alt, prob=0.05).</i>
Histograma de valores de altimetría		RStudio	<i>library (raster), setwd ("directory"), Alt<-raster (x=" file name"), hist (Alt).</i>
Curva hipsométrica		ArcMap	<i>ArcToolbox, Spatial Analyst Tools, Reclass, Reclassify, Zonal, Zonal Statistics as Table.</i>
Perfil topográfico de la corriente principal		ArcMap	<i>ArcToolbox, 3D Analyst Tools, Functional Surface, Interpolate Shape, 3D Analyst, Profile Graph.</i>
Pendiente máxima de la unidad		ArcMap	<i>Layer Properties, Statistics.</i>
Pendiente mínima de la unidad		ArcMap	<i>Layer Properties, Statistics.</i>
Pendiente media de la unidad		ArcMap	<i>Layer Properties, Statistics.</i>
Histograma de valores de pendiente		RStudio	<i>library (raster), setwd ("directory"), Slope<-raster (x=" file name"), hist (Slope).</i>
Longitud de las corrientes		ArcMap	<i>Open Attribute Table, Add Field, Calculate Geometry, Length.</i>
Longitud de la corriente principal		ArcMap	<i>Open Attribute Table, Add Field, Calculate Geometry, Length.</i>

Nota:

Los demás parámetros morfológicos que no aparecen en la tabla fueron hallados de manera directa mediante ecuaciones o simplemente de forma cualitativa.

Apéndice F. Características de las tres bandas y especificaciones de la cámara digital.



Tomado de SenseFly (2014).

Característica	Resultado
Modelo de cámara	Canon S110 NIR
Sensor	1/1.7" <i>back-illuminated</i> CMOS
Tamaño de imagen	12.1 Mpx.
Máximo número f	f/2.0
Velocidad máxima del obturador	1/2000 s
Formatos de salida	JPEG y RAW
Condiciones ambientales de operación	0 – 40°C y 10 – 90% de humedad
Peso	153 g sin batería

Adaptado de SenseFly (2014).

Apéndice G. Informe de construcción del ortomosaico en Agisoft Metashape.

Proceso	Característica	Resultado
Parámetros de reconstrucción del ortomosaico	Modo de fusión	Mosaico
	Llenado de agujeros	Habilitado
	Tiempo de generación del ortomosaico	8 minutos y 54 segundos
Ortomosaico	Tamaño	19854 x 23821
	Sistema de coordenadas	WGS 84 (EPSG: 4326)
	Cantidad de bandas	3 (R, G, NIR)

Nota:

Tabla construida a partir del informe de resultados, generado por el programa Agisoft Metashape.

Apéndice H. Metodología general para el registro de los objetos de entrenamiento.



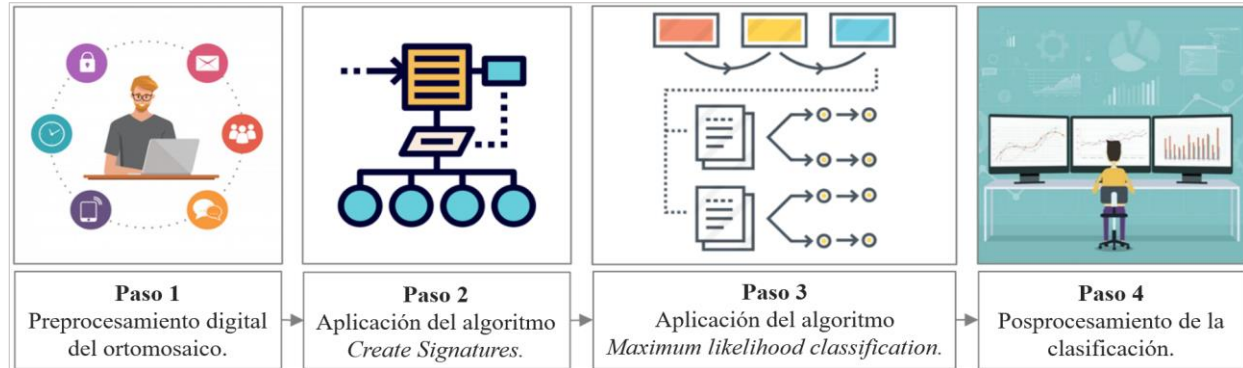
La primera parte de la metodología se fundamentó en la creación de un mapa en formato de documento portátil (PDF) mediante el uso de ArcMap. El procedimiento consistió en importar el ortomosaico en formato de imagen (tipo TIFF) con el objetivo de georreferenciarlo en el sistema de coordenadas locales. Después se procedió a generar y exportar el mapa en formato PDF mediante el uso de la ventana de diseño del programa.

La segunda parte de la metodología se basó en importar el mapa generado en PDF al aplicativo móvil Avenza Maps, con el fin de usarlo como plantilla de localización de los sitios de entrenamiento. Posteriormente, se recorrieron las dos unidades hidrográficas en dos visitas. En las visitas se georreferenciaron los sitios de entrenamiento, se capturaron fotografías y se redactaron descripciones de las diferentes clases de coberturas identificadas. Toda la información se registró en el aplicativo.

La tercera parte de la metodología consistió en el procesamiento en oficina de los datos registrados. Esta parte se basó en la exportación de los puntos, desde el aplicativo Avenza, a los programas computacionales ArcMap y Google Earth Pro. En ambos programas se chequeó la validez de todos los puntos georreferenciados en las visitas.

Finalmente, en la cuarta parte de la metodología, se procedió a generar los objetos de entrenamiento en ArcMap. Se dibujaron los círculos tomando como referencia los puntos validados y adquiridos en campo. De esta manera, se consolidó un archivo tipo *shapefile* con todos los objetos de entrenamiento, este archivo constituyó uno de los insumos más relevantes de la clasificación supervisada.

Apéndice I. Pasos para la clasificación supervisada de las coberturas usando el algoritmo MLC.



El primer paso consistió en la aplicación de procedimientos preliminares, con la finalidad de facilitar el análisis de la imagen. En ArcMap se ejecutaron las herramientas de proyección y recorte. La proyección se ejecutó con el objetivo de georreferenciar todos los objetos en el sistema de proyección nacional. En cuanto al recorte, se empleó con el fin de priorizar en el ortomosaico las dos unidades hidrográficas, puesto que de esta manera se agiliza el tiempo de procesamiento.

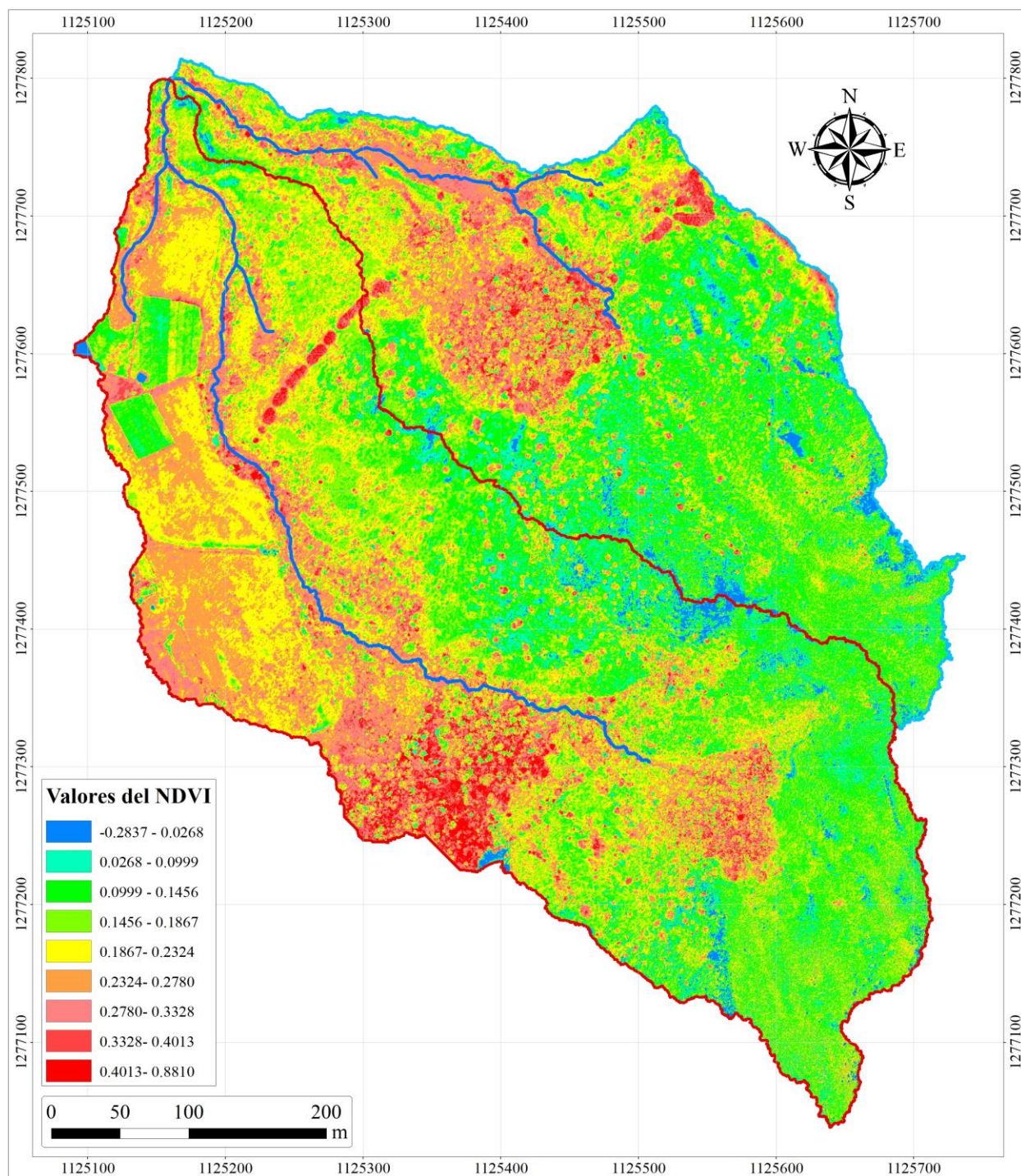
El segundo paso se basó en la creación de un archivo de firma en formato ASCII. Este archivo de firma de cada una de las clases definidas, se generó a partir de los datos de los objetos de entrenamiento y el conjunto de las tres bandas tipo ráster del ortomosaico. La herramienta generó un archivo con una descripción estadística de cada una de las clases, incluyendo: información de los píxeles clasificados, el número de muestras y las matrices de medias y covarianzas.

El tercer paso residió en la aplicación del algoritmo MLC. Este algoritmo operó tomando como insumos el archivo de firmas generado y el ortomosaico. Mediante el uso del teorema de Bayes, las medias y covarianzas de las firmas de las celdas, calculó la probabilidad de que cada una se clasificara en una clase. Adicionalmente, en el procedimiento se especificó la opción de igualdad (*equal*), para que cada píxel se asignara a la clase más semejante en términos estadísticos.

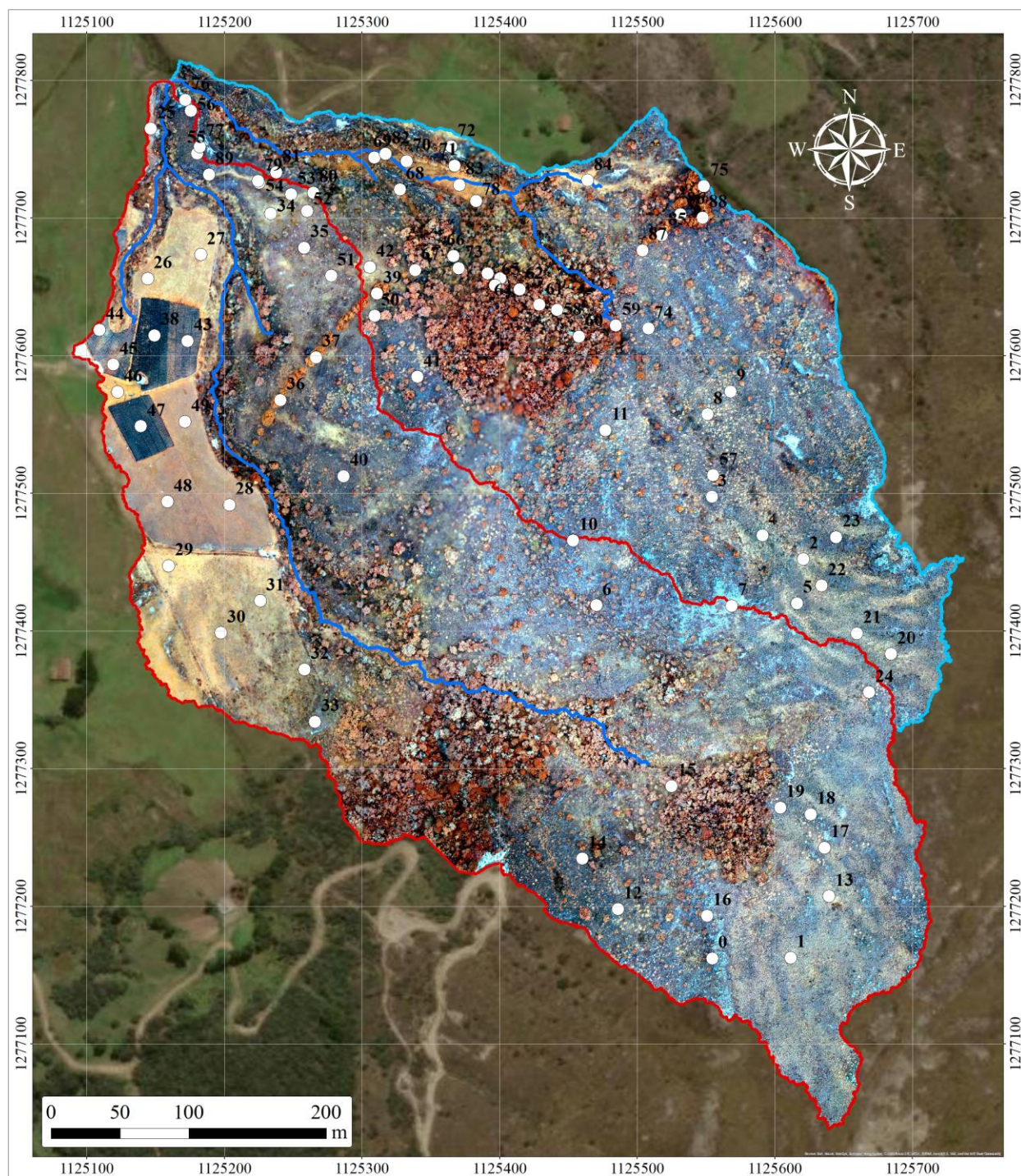
El cuarto paso consistió en el mejoramiento del resultado obtenido tras la aplicación del algoritmo MLC. Es común que los resultados de clasificación presenten clases mal asignadas, celdas sin valores, bordes poco definidos y zonas que están por debajo del umbral de visualización. Por lo cual, para mejorar estas imperfecciones se aplicaron las herramientas de: filtro mayoritario (*Majority Filter Tool*), refinado de límites (*Boundary Clean Tool*), grupo de regiones (*Region Group Tool*), establecimiento de nulos (*Set Null Tool*) y reemplazo (*Nibble*). Al final, el archivo ráster de la clasificación se convirtió a formato vectorial mediante el uso de la herramienta *Raster to Polygon*. En síntesis, la figura siguiente presenta el orden y las rutas de las herramientas usadas.



Apéndice J. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de las dos unidades.



Apéndice K. Sitios asignados para el chequeo de la clasificación de las coberturas.

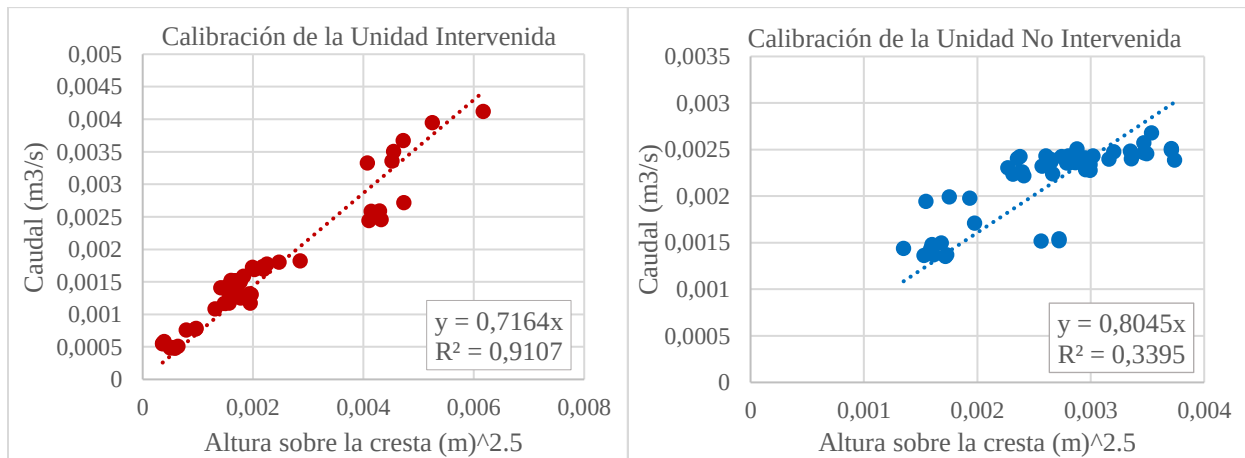


Apéndice L. Procedimiento de calibración de las estaciones hidrométricas.

Inicialmente, se realizaron 12 visitas de campo para la ejecución de los aforos volumétricos en cada una de las dos estaciones hidrométricas. En las visitas, se midieron los caudales descargados por los vertederos y los niveles en los sitios dispuestos para los transductores. La imagen siguiente ilustra parte del procedimiento ejecutado en una de las salidas.



Posteriormente, se procesaron los registros capturados siguiendo la metodología descrita por Hamill (2011), que se basa en relacionar los caudales y las alturas sobre las crestas, para calcular el coeficiente de descarga de las estaciones hidrométricas. En este sentido, las gráficas siguientes presentan la correlación de los registros capturados.



Finalmente, las ecuaciones resultantes correspondieron a:

$$\text{Ud. Intervenido: } \text{Caudal} \left[\frac{l}{s} \right] = 1000 \left(\frac{8}{15} \tan \left(\frac{30^\circ}{2} \right)^2 \sqrt{2 * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} * 1.13176 \left(\frac{\text{Nivel}[cm] - 15}{100} \right)^{\frac{5}{2}} \right)$$

$$\text{Ud. No Intervenido: } \text{Caudal} \left[\frac{l}{s} \right] = 1000 \left(\frac{8}{15} \tan \left(\frac{30^\circ}{2} \right)^2 \sqrt{2 * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} * 1.27094 \left(\frac{\text{Nivel}[cm] - 15}{100} \right)^{\frac{5}{2}} \right)$$

Apéndice M. Etapas para la caracterización de las extracciones hídricas.

Primera etapa: identificación del sistema

Esta etapa se basó en la realización de dos recorridos de campo. El primero, consistió en un trayecto por las corrientes hídricas de ambas unidades hidrográficas, con la finalidad de identificar preliminarmente la localización de los puntos y los sistemas de extracción. En otras palabras, esta salida fue una visita de familiarización con la temática de las extracciones en la zona de estudio. En la segunda visita, se procedió a caracterizar las extracciones de la Unidad Intervenida en términos de: (i) la localización de los puntos de extracción; (ii) la descripción hidráulica de los sistemas de extracción; (iii) la recopilación de registros fotográficos; y (iv) la consulta a los habitantes locales acerca de los usos del agua extraída.

La localización de los puntos de extracción, se desarrolló por medio del uso del aplicativo móvil Avenza Maps (Avenza Systems Inc., 2021). Primero, se generaron mapas de vistas satelitales en ArcMap y luego se cargaron al aplicativo. Con estos insumos se realizó la salida de campo y se georreferenciaron cada uno de los puntos de extracción. En cuanto a la descripción hidráulica de los sistemas de extracción, esta consistió en identificar el diámetro de los conductos, su material y las rutas de las tuberías que hacen parte del sistema.

En relación con la recopilación de los registros fotográficos, esta se realizó mediante la toma de fotografías de los puntos más representativos del sistema (p. ej., captaciones, cambios de diámetro, derivaciones, etc.). Con estos insumos visuales, se soportó la identificación del material de las tuberías y se realizaron discusiones con el grupo de trabajo, acerca del funcionamiento y el uso de los sistemas. Finalmente, se indagó con los habitantes de los predios acerca de los usos y la dinámica de las extracciones. Esta actividad se realizó mediante una breve entrevista soportada en insumos físicos, como fotografías y mapas impresos que guiaron el proceso.

Segunda etapa: registro de caudales

Tras la caracterización preliminar, se procedió a especificar el sistema de extracción en términos de sus caudales. En esta etapa, se realizaron seis visitas de campo para efectuar aforos volumétricos en diferentes épocas del año, horas del día y distintos puntos, siguiendo las normas procedimentales descritas por el IMTA (1992).

El almacenamiento del volumen se llevó a cabo mediante el uso de recipientes graduados de 20, 12, 5 y 1 litro. En las salidas se contó con la participación de dos individuos: uno que se encargó de las tomas del tiempo y, otro que se asignó a la tarea de almacenamiento y lectura del volumen capturado en los recipientes. Para cada registro de caudal se realizaron mínimo cuatro repeticiones con la finalidad de disminuir la incertidumbre de los datos. Los demás detalles alusivos a las visitas para el aforo de las extracciones se pueden consultar en la tabla siguiente.

Contador de visitas	Fecha	Temporada del año	Número de tomas	Intervalo de horas aforado
1	01/09/2019	Húmeda	5 tomas por cada registro. Total 60 tomas.	09:32:00 a. m. – 02:18:00 p. m.
2	03/09/2019	Húmeda	5 tomas por cada registro. Total 80 tomas.	08:21:00 a. m. – 01:44:00 p. m.
3	04/09/2019	Húmeda	5 tomas por cada registro. Total 80 tomas.	07:55:00 a. m. – 01:26:00 p. m.
4	05/09/2019	Húmeda	5 tomas por cada registro. Total 80 tomas.	08:20:00 a. m. – 01:14:00 p. m.
5	30/10/2019	Húmeda	4 tomas por cada registro. Total 40 tomas.	08:30:00 a. m. – 11:40:00 a. m.
6	03/12/2019	Seca	4 tomas por cada registro. Total 36 tomas.	08:15:00 a. m. – 01:20:00 p. m.

Tercera etapa: análisis de caudales

La tercera etapa se basó en el análisis de los caudales aforados en la fase anterior. El análisis se desarrolló en dos componentes: el primero, un análisis de estadística descriptiva del conjunto de datos y; el segundo, un análisis por medio de índices hidrológicos usados en las distintas versiones del Estudio Nacional del Agua (ENA). Para el análisis de estadística descriptiva se utilizaron diagramas de cajas. En cuanto a los índices hidrológicos, se aplicaron los índices IUA e IVH. Ambos índices se estimaron según la metodología sugerida por el IDEAM (2015).

El IUA se adoptó como la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores, en el período monitoreado para la Unidad Hidrográfica Intervenida, en relación con la oferta hídrica superficial disponible en la misma unidad. Este índice se estimó mediante el uso de la fórmula que se presenta a continuación, y su resultado se interpretó según los rangos sugeridos en la tabla inferior.

$$IUA = \frac{D_h}{O_h} * 100$$

Donde:

D_h : demanda hídrica sectorial.

O_h : oferta hídrica superficial disponible. Estimada como la oferta hídrica natural menos el caudal ambiental. El caudal ambiental se estimó a partir de la CDC, según como lo estipula el criterio del 70% del IRH en IDEAM (2019).

Rango de IUA	Categoría IUA	Interpretación
>100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta.
50.01 – 100	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible.
20.01 – 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible.
10.01 – 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible.
1.0 – 20	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible.
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible.

Adaptado de IDEAM (2015).

En cuanto al IVH, se adoptó como un indicador que mide el grado de vulnerabilidad de la unidad hidrográfica, para mantener una oferta de suministro ante amenazas de desabastecimiento (p. ej., períodos de estiaje) (IDEAM, 2015). El resultado de este índice se obtuvo a partir de la estimación del IRH y el IUA, tal como lo ilustra la matriz de la tabla siguiente.

IUA (%)		IRH			
Rango	Categoría	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
<1	Muy bajo	Muy baja	Baja	Media	Media
1 – 10	Bajo	Baja	Baja	Media	Media
10 – 20	Moderado	Media	Media	Alta	Alta
20 – 50	Alto	Media	Alta	Alta	Muy alta
50 – 100	Muy alto	Media	Alta	Alta	Muy alta
>100	Crítico	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

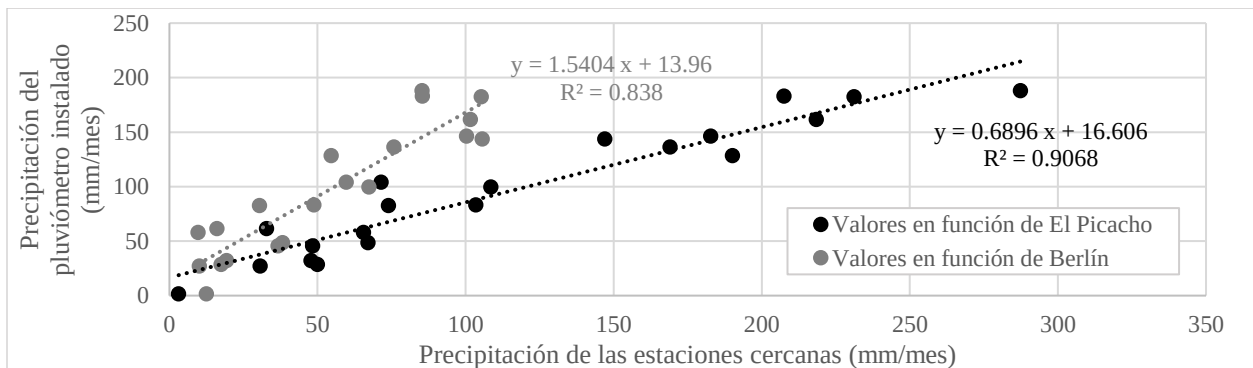
Adaptado de IDEAM (2015).

Apéndice N. Llenado de los registros de precipitación de marzo y abril de 2020 para el pluviómetro instalado en las dos unidades hidrográficas.

Para el llenado de los registros de marzo y abril de 2020 del pluviómetro instalado en las unidades, se emplearon como insumos los registros mensuales monitoreados por las estaciones El Picacho y Berlín, los cuales se presentan en la tabla siguiente.

Mes	Pluviómetro instalado	Estación El Picacho	Estación Berlín
	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)	Precipitación (mm)
08/2019	82.70	73.90	30.40
09/2019	136.50	169.00	75.80
10/2019	128.50	190.10	54.60
11/2019	48.70	67.00	38.20
12/2019	58.00	65.50	9.70
01/2020	32.00	47.80	19.30
02/2020	27.20	30.60	10.10
03/2020	Registro faltante	27.70	34.40
04/2020	Registro faltante	64.70	18.00
05/2020	61.60	32.80	16.00
06/2020	104.10	71.50	59.70
07/2020	99.70	108.50	67.40
08/2020	143.60	147.00	105.60
09/2020	161.60	218.40	101.60
10/2020	182.50	231.20	105.30
11/2020	146.30	182.80	100.30
12/2020	28.70	50.00	17.40
01/2021	1.60	3.10	12.50
02/2021	45.60	48.30	36.70
03/2021	83.10	103.50	48.80
04/2021	188.10	287.30	85.30
05/2021	182.90	207.50	85.40

Posteriormente, se graficaron los registros y generaron funciones de tendencia lineales para la interpolación de los meses faltantes, tal como se presenta en el gráfico siguiente.



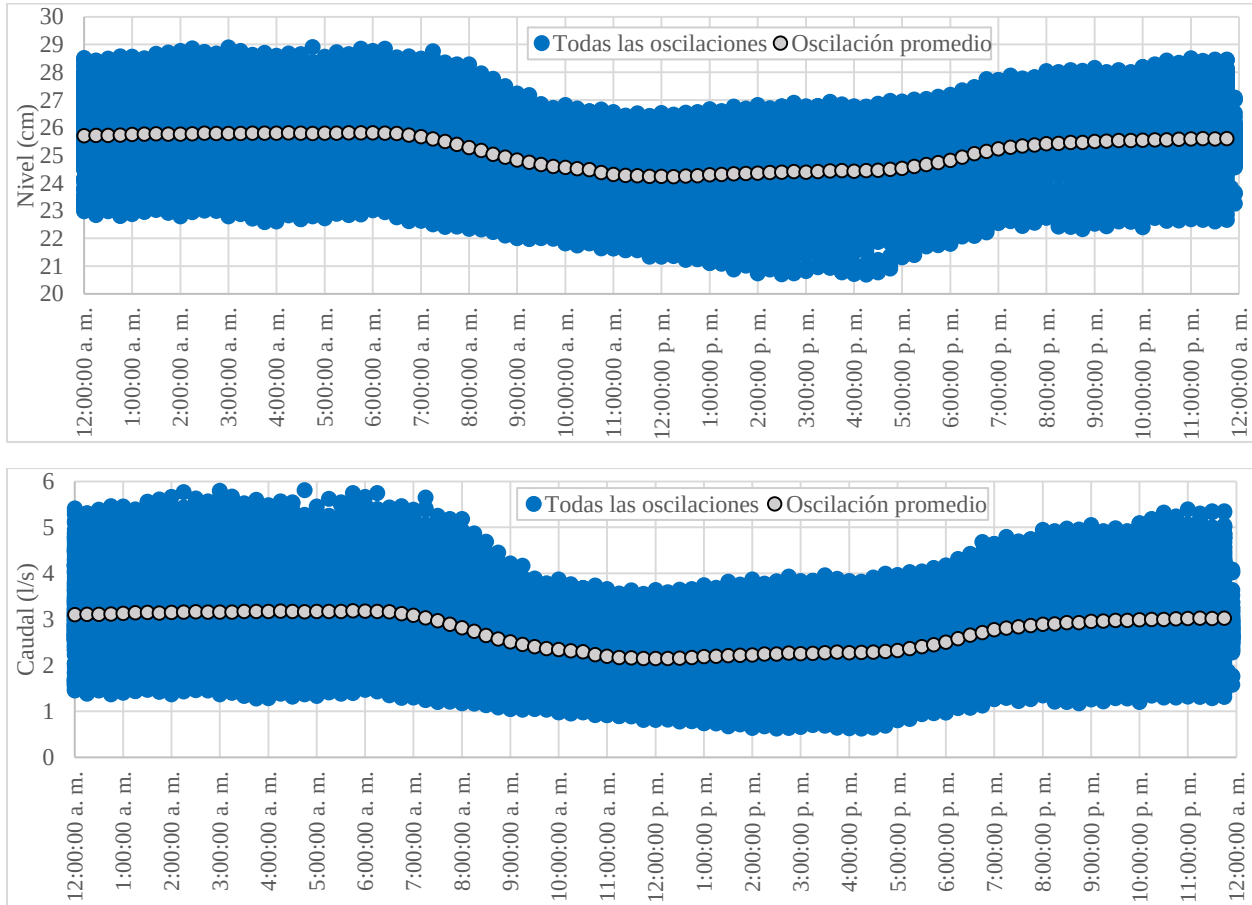
Finalmente se calcularon los registros de los meses faltantes de la siguiente manera:

$$P_{\text{Marzo},2020} = \frac{(0.6896 * 27.70 + 16.606) + (1.5404 * 34.40 + 13.96)}{2} = 51.33 \text{ mm}$$

$$P_{\text{Abril},2020} = \frac{(0.6896 * 64.70 + 16.606) + (1.5404 * 18.00 + 13.96)}{2} = 51.46 \text{ mm}$$

Apéndice O. Análisis de la variación intradiaria asociada al patrón oscilatorio de los caudales.

Para analizar este fenómeno, inicialmente se caracterizaron los niveles y caudales de la Unidad No Intervenida de los días que no presentaron precipitaciones. Estos criterios se establecieron con la finalidad de aislar el análisis de otras interferencias que pueden generar variaciones; como la presencia de extracciones hídricas y la influencia de lluvias. Como resultado, se generaron dos gráficos de dispersión que sintetizan el comportamiento del patrón oscilatorio a escala intradiaria, de todos los niveles y caudales de los días seleccionados bajo los criterios descritos, tal como se presenta en las gráficas siguientes.

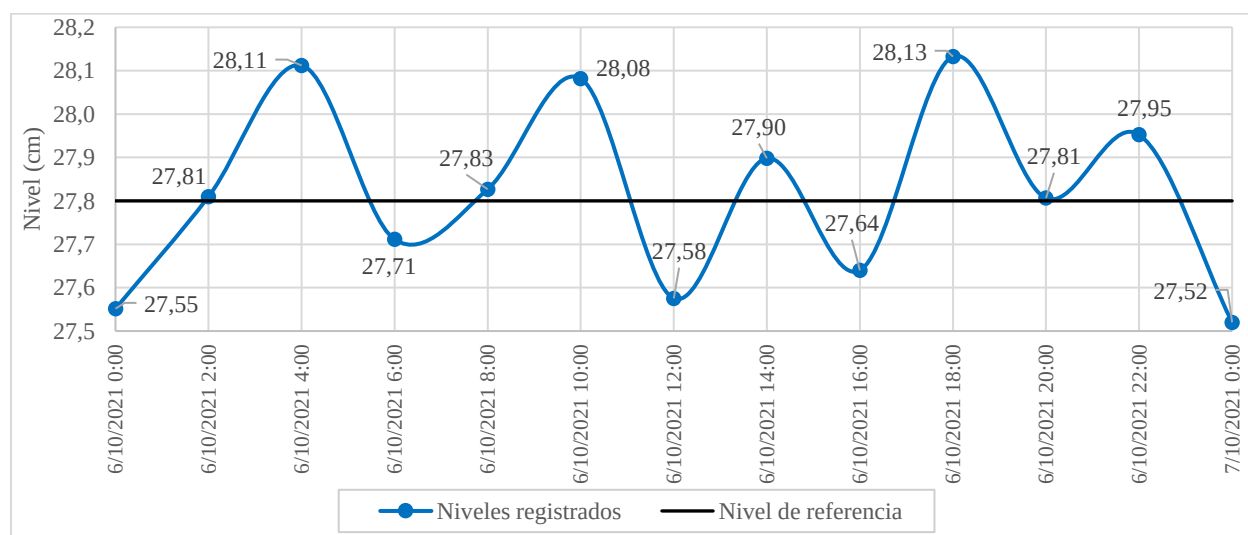


Las gráficas anteriores permitieron identificar los rangos de tiempo entre los cuales, el patrón oscilatorio presenta los valores más altos y bajos de nivel y caudal. En este sentido, se identificó que los registros más altos se suelen dar entre las 07:00:00 p. m. y las 07:00:00 a. m., mientras que, los valores más bajos normalmente se presentan entre las 07:00:00 a. m. y las 07:00:00 p. m. De otro lado, del análisis de los patrones de oscilación de cada uno de los registros diarios recopilados, en términos de sus niveles y caudales, se encontró que los rangos de variación medios corresponden a 2.264 cm y 1.463 l/s, respectivamente.

Tras conocer estos aspectos, se procedió a diseñar un experimento con la finalidad de validar el funcionamiento de los medidores de nivel. Esta idea surgió como un primer filtro para descartar que el comportamiento oscilatorio fuera producido por aspectos técnicos asociados a los transductores de presión. En función de lo anterior, se realizó el montaje experimental que se ilustra a continuación.

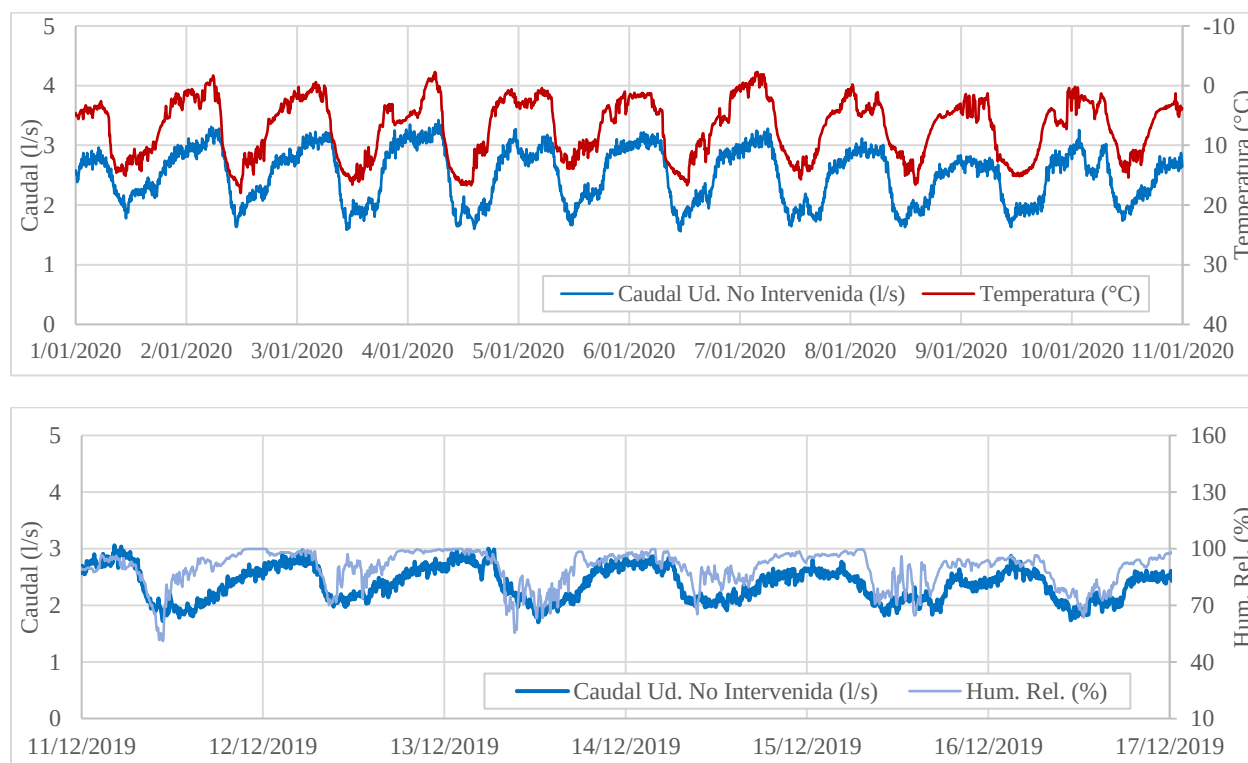


El montaje consistió en sumergir el medidor de nivel en una probeta plástica por un período de 24 horas. Posteriormente, se fijó un tirante hidráulico de 27.8 cm, con la finalidad de usar esta medida como referente frente a los niveles registrados por el transductor de presión. Para realizar las compensaciones de nivel, cada dos horas se extrajo el medidor por un período de 12 minutos, con el objetivo de registrar la presión atmosférica antes de sumergirlo de nuevo. Finalmente, de la aplicación del procedimiento descrito, se obtuvo una gráfica con la variación de los niveles registrados por el transductor de presión en intervalos de dos horas. Los resultados de este proceso se pueden visualizar en la gráfica dispuesta a continuación.



Los valores evidenciaron que el funcionamiento del equipo es adecuado, ya que las variaciones se mantuvieron en el rango de error esperado, el cual según el manual del medidor es de ± 0.4 cm (Onset, 2018). Además de ello, los resultados tampoco evidenciaron el comportamiento oscilatorio típico de los registros de nivel en las unidades de estudio. Por estas razones, se consideró que el equipo funciona apropiadamente y que, en vez de ello, es probable que las causas del patrón oscilatorio obedezcan a otros motivos diferentes a los aspectos técnicos.

Entre las alternativas, se consideró que las oscilaciones se pueden explicar a través de aspectos meteorológicos. Para ello, se estudiaron los patrones de variación intradiaria de cada una de las variables monitoreadas por la estación meteorológica instalada. De este procedimiento se encontró que la temperatura y la humedad relativa presentaron los patrones de variación más similares al de los caudales, tal como se puede apreciar en las muestras de datos de las gráficas siguientes.



En la primera gráfica se puede observar que cuando la temperatura presenta los valores más altos, los niveles de caudal muestran los registros más bajos; comportamiento que también ocurre de manera invertida. Debido a esta observación, se puede afirmar que las dos variables presentan un tipo de proporcionalidad inversa que podría explicar las oscilaciones, a través de una hipótesis relacionada con procesos de congelamiento y descongelamiento. Esta hipótesis consiste en que, en horas de la noche, podría producirse un proceso de solidificación que incremente el volumen del agua; mientras que, en las horas del día, podría darse un efecto contrario que genere una interfase más líquida y de menor volumen. De esta manera, los cambios de volúmenes serían los responsables de las variaciones en los niveles registrados por los equipos.

Con respecto a la relación de los caudales con la humedad relativa, se puede observar que los patrones presentan un tipo de proporcionalidad directa; es decir, que cuando la humedad relativa aumenta, los valores de caudal también se incrementan. Esta observación permitió proponer otra hipótesis que podría explicar la variación intradiaria de los flujos. En este caso, la hipótesis consiste en que los caudales se verían incrementados en las horas de la noche debido a que la humedad relativa adquiere valores cercanos a 100%, lo cual promueve la condensación del aire en pequeñas partículas de agua que conforman procesos de precipitación oculta u horizontal.

En síntesis, según los análisis realizados se considera que la explicación al fenómeno oscilatorio de los caudales, podría residir en las dos hipótesis planteadas. Sin embargo, también se considera que este fenómeno podría obedecer a otras causas que deben ser investigadas con más profundidad.

Apéndice P. Estimación del IUA e IVH para la unidad hidrográfica sometida a intervención.

Para desarrollar esta tarea, inicialmente se estimó el valor del IUA y posteriormente el del IVH, siguiendo la metodología general planteada en el Apéndice M. En este orden de ideas, el cálculo partió de la consideración de los caudales promedio de cada punto de extracción, además de, el flujo diario medio registrado en la estación hidrométrica de la Unidad Intervenido. En concordancia con lo anterior, los valores enunciados se presentan a continuación.

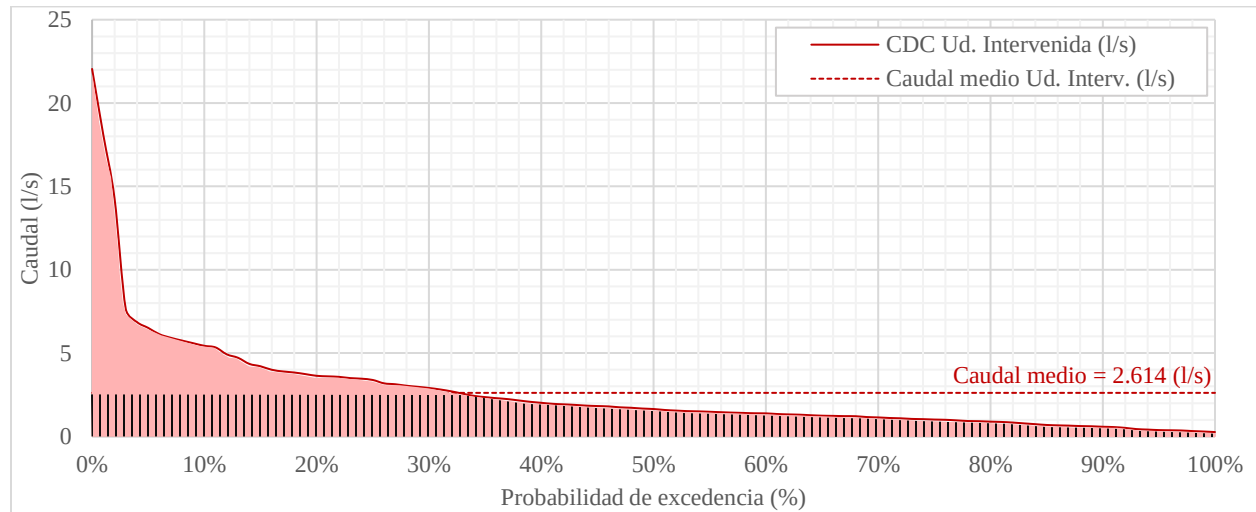
$$Q_{Prom.E1} = 1.428 \text{ (l/s)}$$

$$Q_{Prom.E2} = 1.779 \text{ (l/s)}$$

$$Q_{Prom.E3} = 2.826 \text{ (l/s)}$$

$$Q_{Prom.Ud.Intervenida} = 2.614 \text{ (l/s)}$$

Tras conocer los caudales principales asociados a los flujos de oferta y demanda de la unidad hidrográfica, se prosiguió con la estimación del caudal ambiental, con la finalidad de restarlo de la oferta hídrica global. Para realizar este procedimiento, se siguió la metodología planteada por el IDEAM (2015), la cual se basa en el trazado de la Curva de Duración de Caudales (CDC), con el objetivo de estimar el valor del Índice de Regulación Hidrológica (IRH) y el caudal ambiental, a partir de la aplicación de un percentil. En función de lo enunciado, la gráfica siguiente presenta la CDC de la Unidad Hidrográfica No Intervenida.



Posteriormente, a partir de la información recopilada en el gráfico anterior, se estimó el IRH a través de la relación entre el área acotada bajo la línea del caudal medio y la CDC (marcada con barras verticales), y la superficie delimitada bajo la gráfica de la CDC (marcada en color rosado). Los detalles de la aplicación de este procedimiento se muestran en las ecuaciones siguientes.

$$IRH = \frac{\sum(Q < Q_{Medio})}{\sum(Q)} \rightarrow IRH = \frac{170.520}{269.466} \rightarrow IRH = 63.281\%$$

Ahora bien, siguiendo la metodología estipulada por el IDEAM (2015), debido a que el IRH resultó menor que 70%, el caudal ambiental corresponde al caudal de la CDC asociado al percentil 25%; es decir, se refiere al flujo que es igualado o superado el 75% del tiempo. Teniendo en cuenta el planteamiento anterior, el caudal ambiental adquiere el valor que se presenta a continuación.

$$Q_{Ambiental} = 1.013 \left(l/s \right)$$

Tras haber culminado el cálculo del caudal ambiental, es posible estimar el IUA para los dos escenarios planteados (pesimista y optimista), mediante la aplicación de las ecuaciones siguientes.

$$IUA_{Pesimista} = \frac{Demanda\ pesimista}{Oferta} \rightarrow$$

$$IUA_{Pesimista} = \frac{Q_{Prom.E1} + Q_{Prom.E2} + Q_{Prom.E3}}{Q_{Prom.Ud.Intervenida} + Q_{Prom.E1} + Q_{Prom.E2} + Q_{Prom.E3} - Q_{Ambiental}} \rightarrow$$

$$IUA_{Pesimista} = \frac{1.428 + 1.779 + 2.826}{2.614 + 1.428 + 1.779 + 2.826 - 1.013} \rightarrow IUA_{Pesimista} = 79.0\%$$

$$IUA_{Optimista} = \frac{Demanda\ optimista}{Oferta} \rightarrow$$

$$IUA_{Optimista} = \frac{Q_{Prom.E2}}{Q_{Prom.Ud.Intervenida} + Q_{Prom.E1} + Q_{Prom.E2} + Q_{Prom.E3} - Q_{Ambiental}} \rightarrow$$

$$IUA_{Optimista} = \frac{1.779}{2.614 + 1.428 + 1.779 + 2.826 - 1.013} \rightarrow IUA_{Optimista} = 23.3\%$$

Finalmente, al tener en cuenta que los resultados del IUA para los escenarios pesimista y optimista resultaron de 79.0 y 23.3%, respectivamente, además de que el IRH presentó un valor de 63.281%, se pueden estimar cualitativamente los IVH por medio del uso de la matriz descrita en el Apéndice M. Tras la aplicación del procedimiento enunciado, se encontraron los valores del IVH descritos a continuación.

$$IVH_{Pesimista} = f(IUA_{Pesimista}, IRH) \rightarrow IVH_{Pesimista} = Alto$$

$$IVH_{Optimista} = f(IUA_{Optimista}, IRH) \rightarrow IVH_{Optimista} = Alto$$

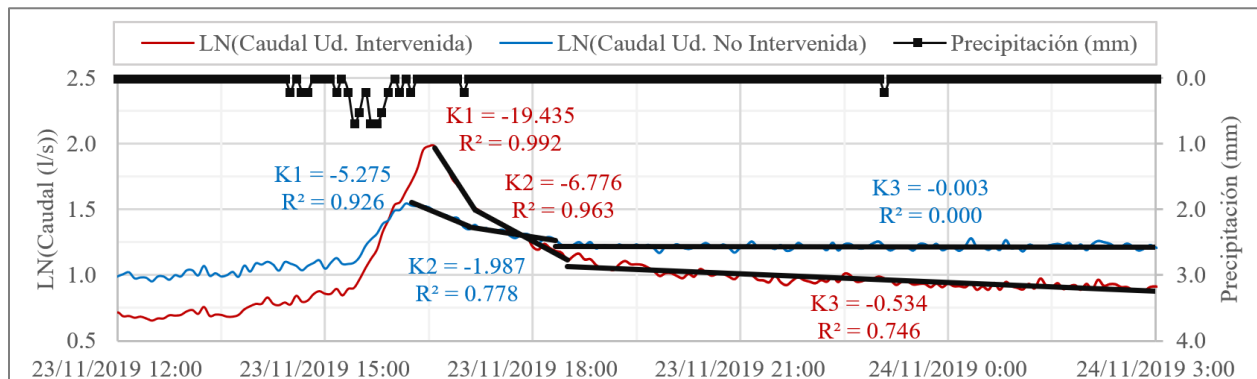
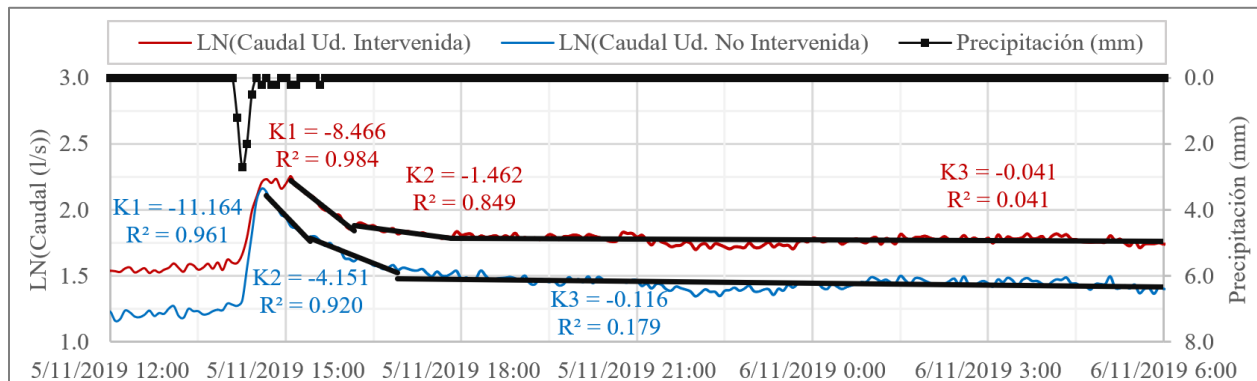
Apéndice Q. Indicadores de los tiempos asociados a las constantes de recesión de eventos.

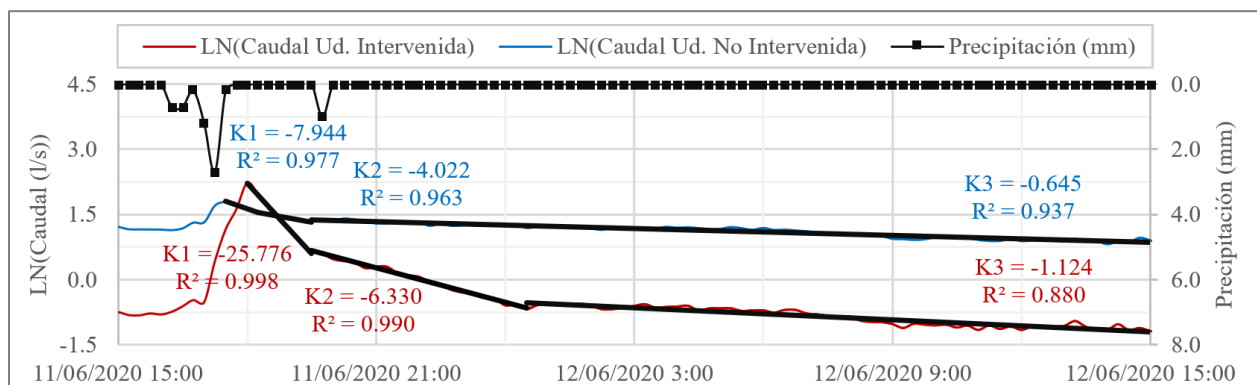
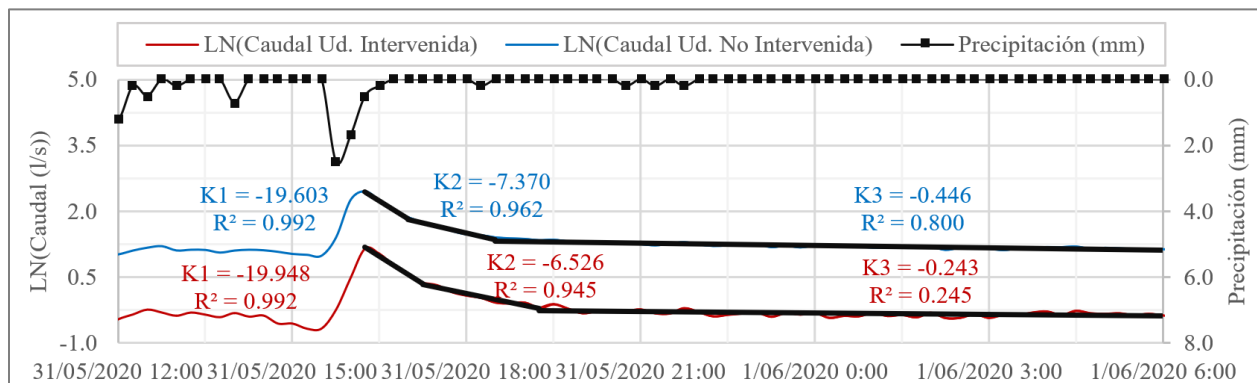
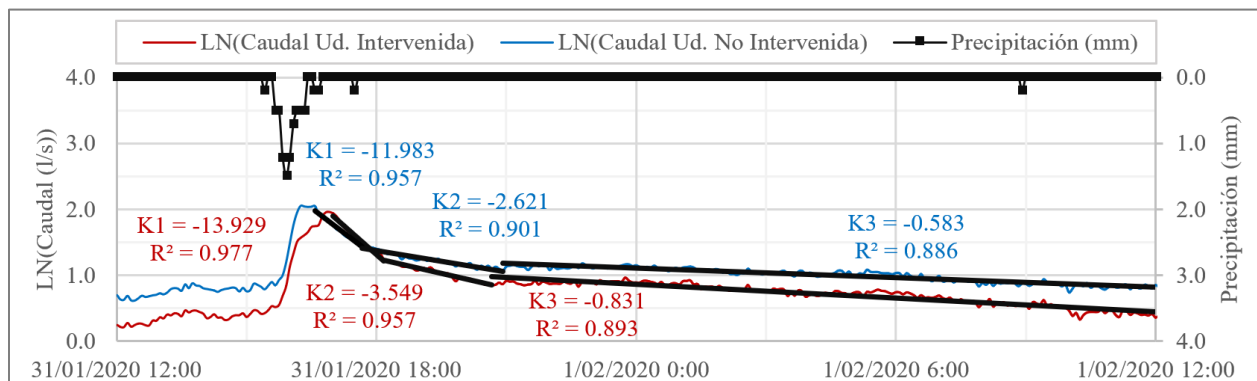
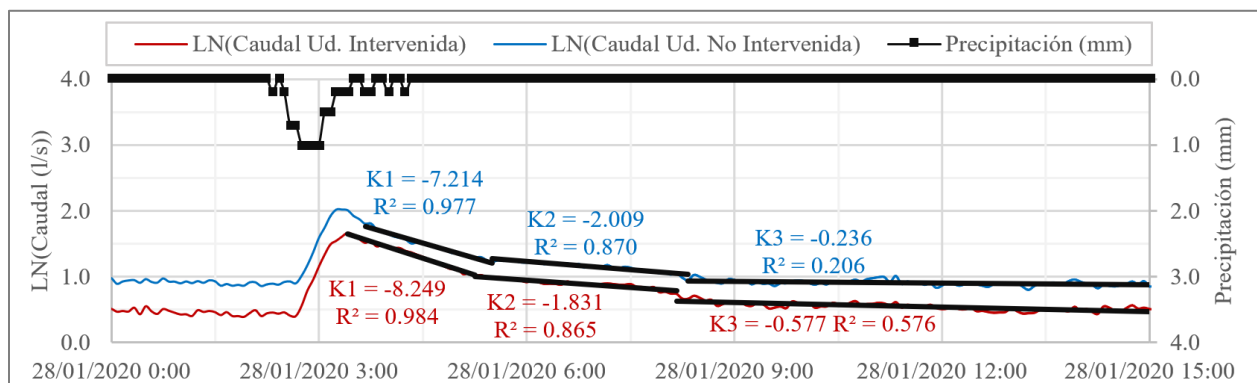
Este apéndice tiene como finalidad mostrar parte de los insumos, procedimientos y resultados que sustentan el cálculo de los indicadores T1, T2 y T3 (Tabla 23), relacionados con las duraciones de la recesión de eventos de precipitación.

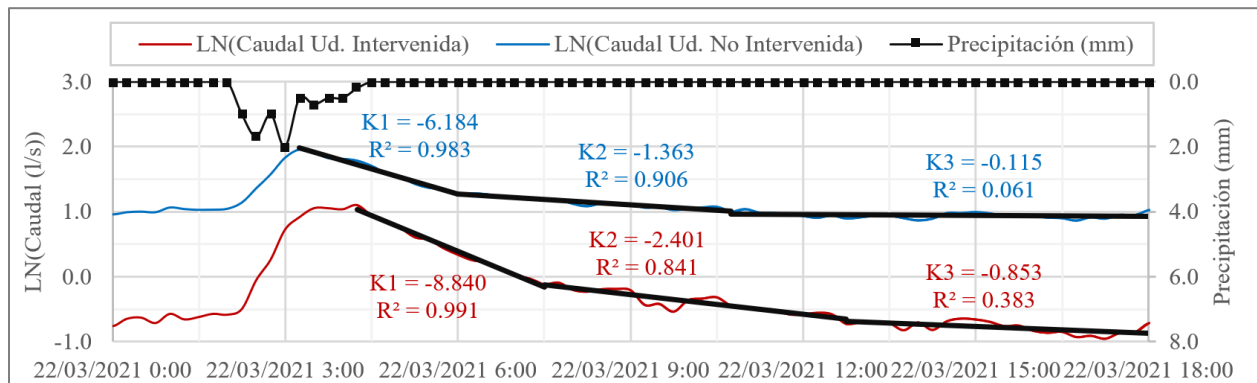
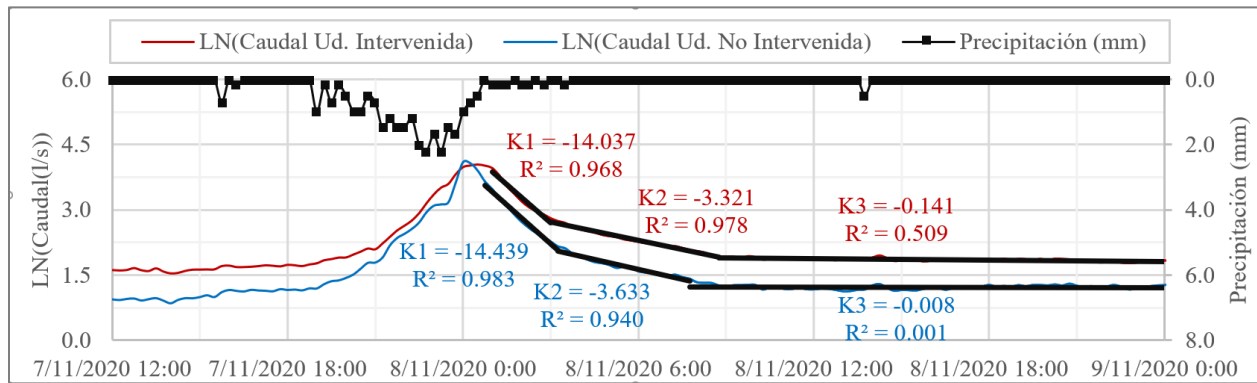
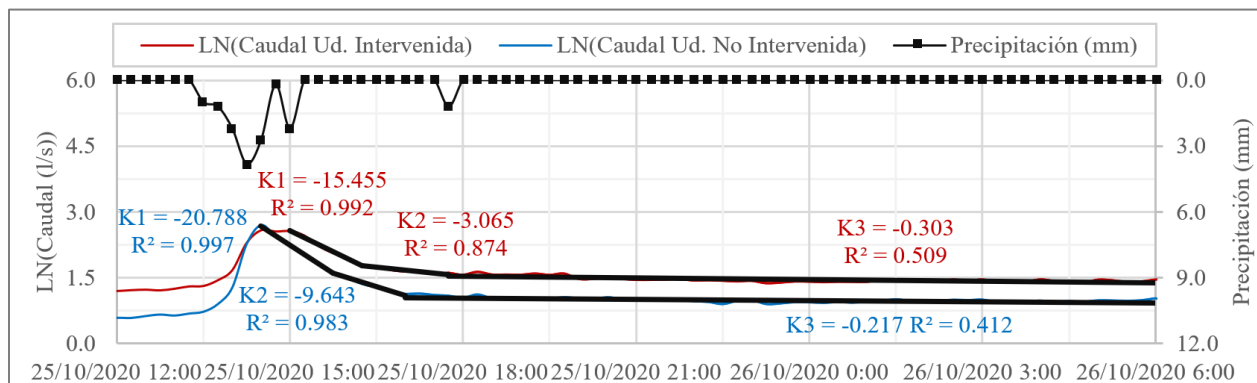
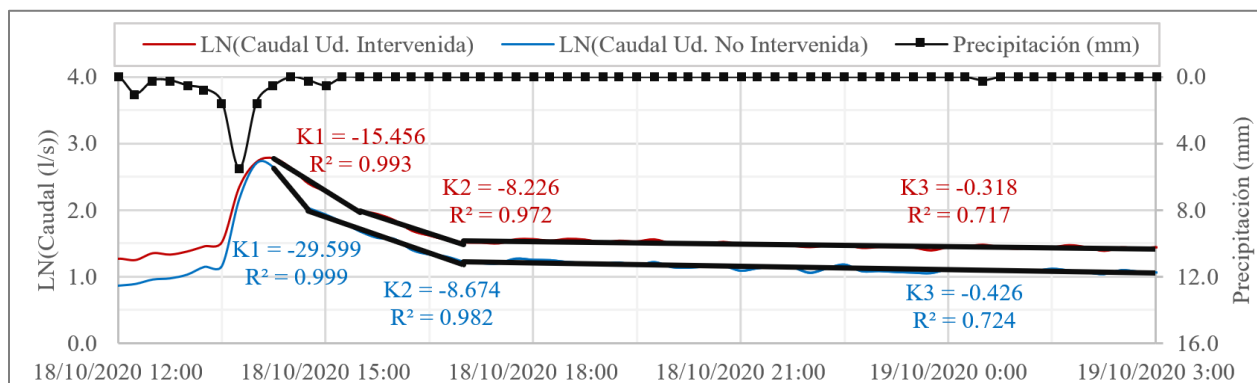
Inicialmente, se debe considerar que diferentes eventos de precipitación generan hidrogramas distintos, pudiendo estos ascensos de caudal presentar uno, dos o más picos, dependiendo del tipo de hietograma de la tormenta. A pesar de ello, si las condiciones de la tormenta son las idóneas para generar un gráfico de un solo pico, es posible identificar la existencia de tres zonas representativas en el hidrograma, las cuales exhiben comportamientos similares a los de una línea recta al graficar los datos en una escala semilogarítmica.

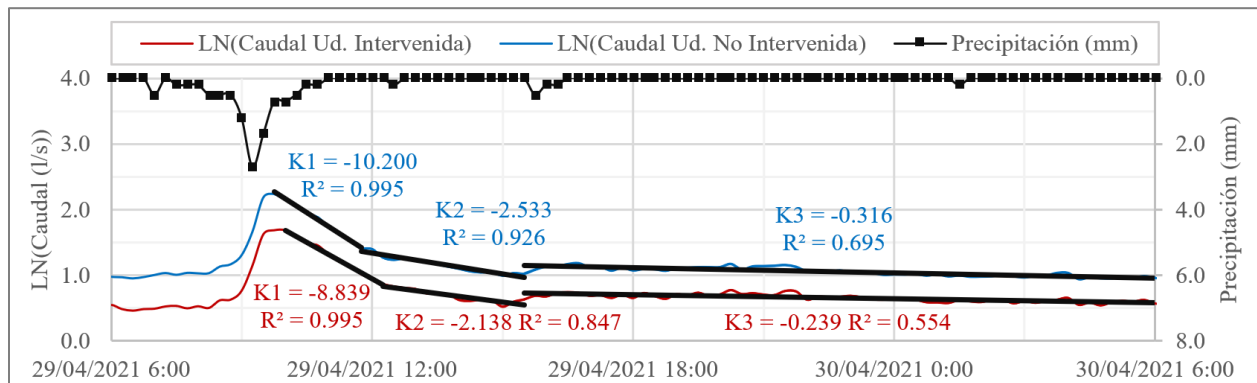
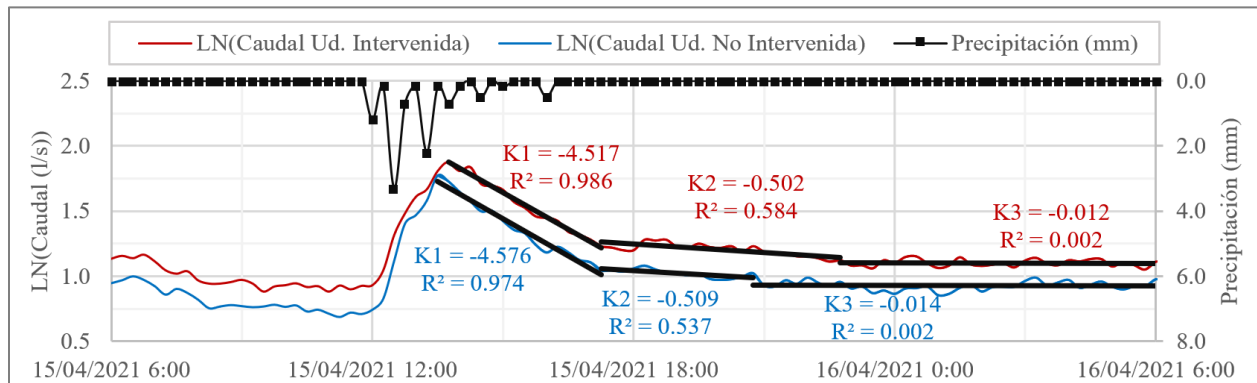
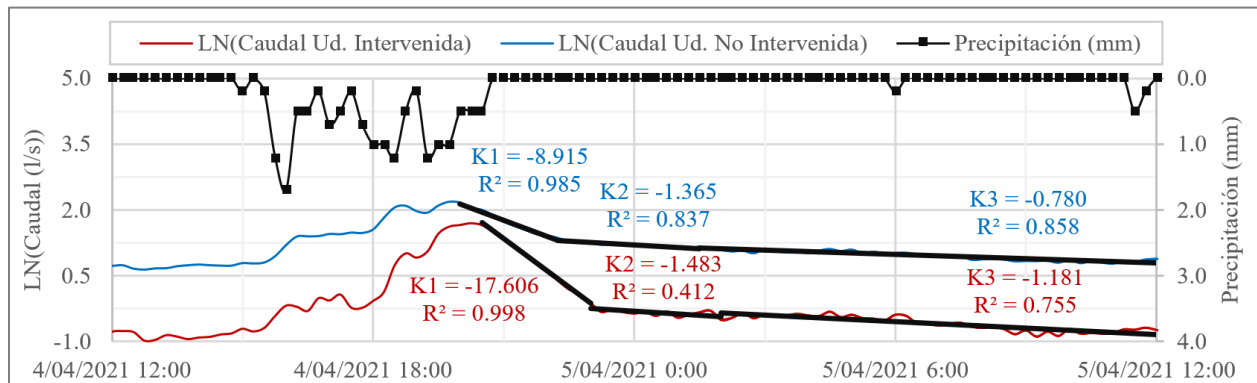
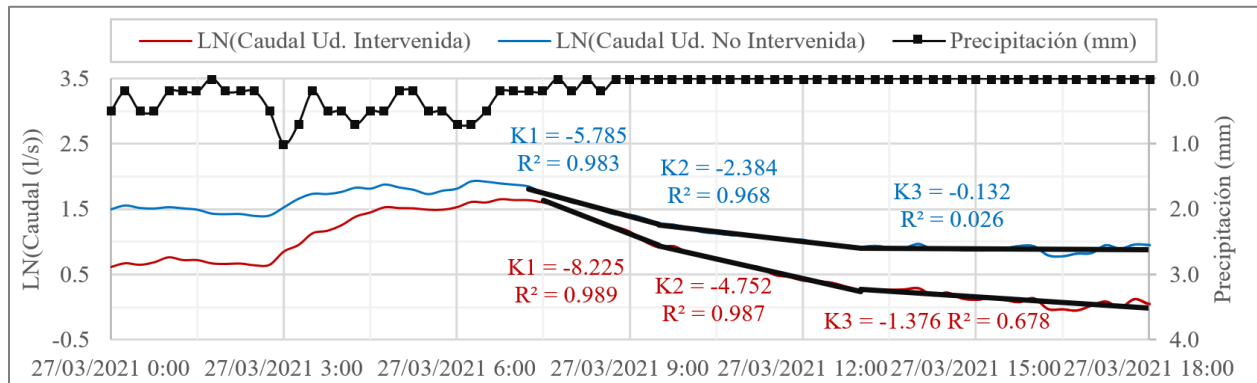
El anterior fenómeno hidrológico, se puede representar a través de un modelo de lluvia y escorrentía denominado «*The linear reservoir concept*» (Buytaert et al., 2004). Este modelo básicamente simplifica el funcionamiento de la unidad hidrográfica, haciendo una analogía entre el fenómeno real y una cadena paralela de tres tanques con diferentes tiempos de descarga, todo esto, mediado por la ecuación siguiente: $Q(t) = Q_0 * e^{Kt}$. Donde: $Q(t)$ se refiere al flujo en el instante de tiempo t ; Q_0 corresponde al caudal en $t = 0$; y K hace referencia a una tasa de descarga, cuyo valor inverso corresponde a la constante de tiempo T (las cuales llamamos T1, T2 y T3).

Teniendo en cuenta la síntesis descrita del modelo lineal, en este estudio se estimaron los valores de las constantes de tiempo T1, T2 y T3 para diferentes eventos, tomando como insumos los registros de caudal capturados en escalas de 5 y 15 minutos, realizando los gráficos semilogarítmicos de estos registros, trazando las tendencias lineales y convirtiendo los valores de las constantes K a las variables T . Como resultado de este procedimiento, se generaron valores T para 14 eventos capturados en el período monitoreado, los cuales se presentan en las siguientes gráficas y se resumen en la tabla dispuesta al final de este apéndice.









Contador de eventos	Unidad Intervenido			Unidad No Intervenido		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3
1	-8.466	-1.462	-0.041	-11.164	-4.151	-0.116
2	-19.435	-6.776	-0.534	-5.275	-1.987	-0.003
3	-8.249	-1.831	-0.577	-7.214	-2.009	-0.236
4	-13.929	-3.549	-0.831	-11.983	-2.621	-0.583
5	-19.948	-6.526	-0.243	-19.603	-7.370	-0.446
6	-25.776	-6.330	-1.124	-7.944	-4.022	-0.645
7	-15.456	-8.226	-0.318	-29.599	-8.674	-0.426
8	-15.455	-3.065	-0.303	-20.788	-9.643	-0.217
9	-14.037	-3.321	-0.141	-14.439	-3.633	-0.008
10	-8.840	-2.401	-0.853	-6.184	-1.363	-0.115
11	-8.225	-4.752	-1.376	-5.785	-2.384	-0.132
12	-17.606	-1.483	-1.181	-8.915	-1.365	-0.780
13	-4.517	-0.502	-0.012	-4.576	-0.509	-0.014
14	-8.839	-2.138	-0.239	-10.200	-2.533	-0.316
K Prom.	-13.484	-3.740	-0.555	-11.691	-3.733	-0.288
T Prom (h)	1.780	6.417	43.227	2.053	6.429	83.230

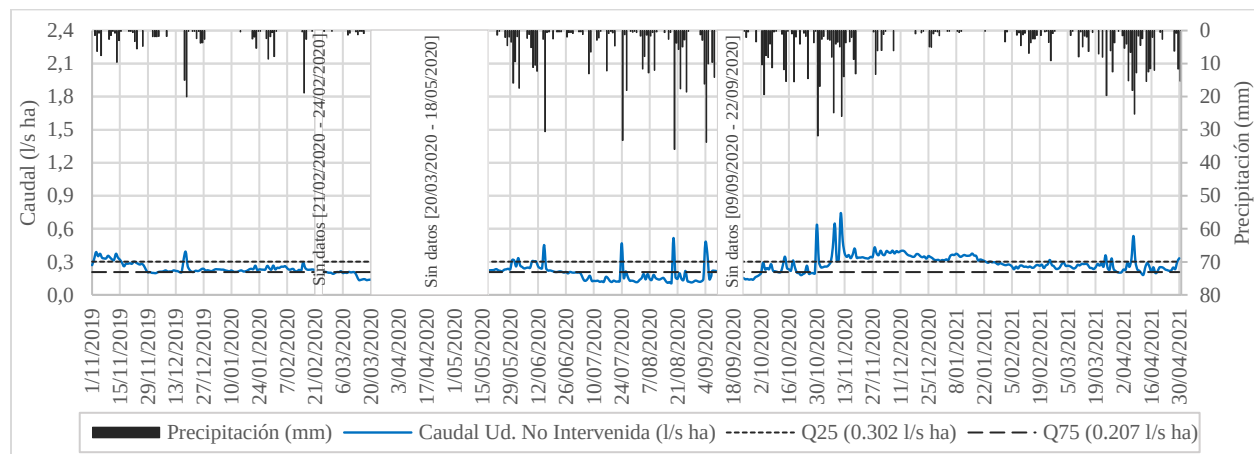
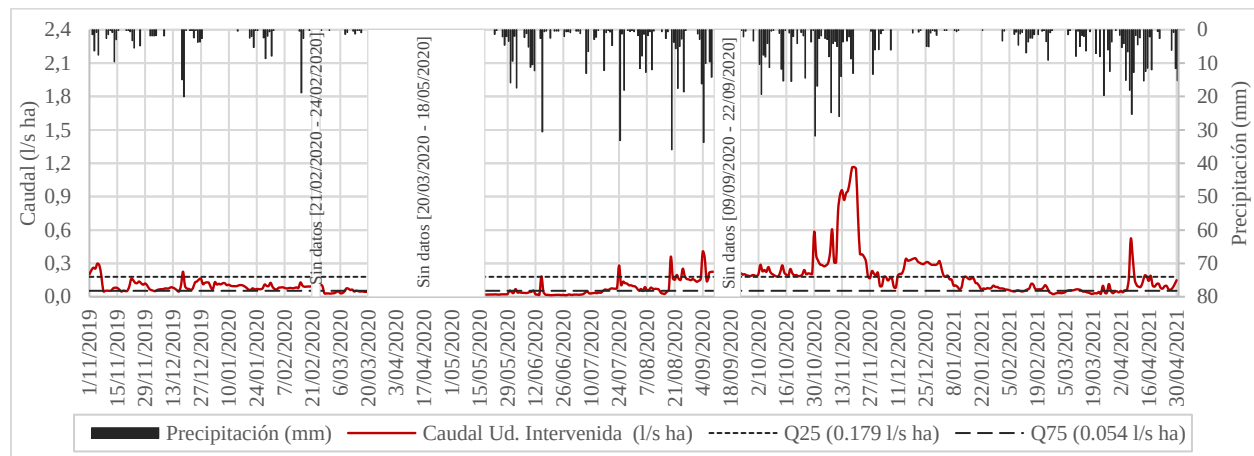
Apéndice R. Indicadores asociados a la cantidad y duración de los flujos altos y bajos.

Este apéndice tiene como objetivo presentar parte de los insumos, procedimientos y resultados que soportan el cálculo de los indicadores FH, DHQ25, FL y DLQ75 (Tabla 23), asociados a las cantidades y duraciones de los flujos altos y bajos de la serie de caudales registrada.

En primera instancia, se debe saber que a lo largo del año los valores de caudal se ven afectados por la presencia y ausencia de precipitaciones, dando lugar a crecidas en tiempos de lluvias y estiajes en épocas de sequía. La diferencia entre estos flujos altos y bajos está vinculada a los usos y las coberturas de las unidades hidrográficas, pudiendo existir: unidades con bajas capacidades de regulación, que presentan eventos hidrológicos de gran magnitud y poca duración; y unidades con altos niveles de regulación, que poseen eventos de poca magnitud y mayor duración.

Para estudiar este comportamiento en unidades hidrográficas de páramo, Ochoa-Tocachi et al. (2016A) propuso los indicadores FH y FL, los cuales contabilizan la cantidad de picos y valles de caudal, por encima y por debajo de los percentiles 0.75 y 0.25 de los flujos diarios. Además de ello, propusieron los indicadores DHQ25 y DLQ75 con la finalidad de estimar la duración promedio de los diferentes picos y valles del hidrograma, respectivamente.

De acuerdo con lo enunciado, en esta investigación se estimaron los cuatro indicadores a partir de: la conversión de la serie de registros base a registros de escala diaria; el cálculo de los percentiles 0.75 y 0.25 de flujo; y la revisión detallada de la cantidad y las duraciones de los caudales pico y valle, tal como se ejemplifica en las figuras siguientes.



Apéndice S. Indicadores restantes para el análisis de los servicios de regulación y abastecimiento hídrico.

Este apéndice tiene como finalidad presentar los insumos y los pasos a seguir para la estimación de los índices hidrológicos de la Tabla 23, que no se abordaron en los Apéndices Q y R. Con respecto a ello, teniendo en cuenta que la explicación detallada del cálculo de estos indicadores, implica la publicación de los datos monitoreados por el sistema hidrometeorológico instalado en las unidades hidrográficas de estudio, se sugiere que el posible interesado dirija su solicitud al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), con el objetivo de tener acceso a los cálculos realizados en la base de datos de los registros. Todo esto, teniendo en cuenta que este proyecto contó con financiación interna y tiene como objetivo la publicación académica de sus resultados.

Apéndice T. Caudales medios horarios monitoreados en las dos unidades hidrográficas.

