Evaluación del efecto del cambio del uso del suelo sobre los indicadores DHQ25 y DLQ75 en ecosistemas de páramo, caso de estudio: páramo de Berlín, Santander

Duván Enrique Posada Mendoza

Jefferson Jeancarlo Olarte Lancheros

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD en Ingeniería, énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental

Codirector

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD. en Agricultura, Alimentos y Desarrollo Rural

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánica

Escuela de Ingeniaría Civil

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo está dedicado a nuestros padres, quienes nos enseñaron que el mejor conocimiento que se puede tener es el que se aprende por sí mismo, le doy gracias por su acompañamiento durante el desarrollo de nuestra carrera profesional. A cada uno de los profesores que nos instruyeron a través del camino de este logro, dados conocimientos científico, político y sobre todo moral, motivándonos a continuar el camino sin importar los obstáculos y con el objetivo de generar un cambio en la humanidad, aportar al país y ayudar a la sociedad.

Tabla de contenido

Pág.

Introducción 10

1. Objetivos 12

1.1. Objetivo general.....12

1.2. Objetivos específicos 12

2. Marco conceptual.....15

2.1. Paramo.....15

2.2. Servicio hidrológico.....13

2.3. Indicadores hidrológicos 14

3. Estado del arte 16

4. Metodología.....25

4.1. Area de estudio 25

4.2. Estimación de indices hidorlogicos 26

5. Resultados e interpretación 30

6. Impacto en una cuenca natural por el cambio en el uso del suelo.....36

7. Alternativas para mejorar la retención y regulación en una cuenca intervenida. 38

8. Conclusiones.....41

9. Recomendaciones 40

Referencias Bibliográficas 44

Apéndices.....51

Listado de tablas

Pág.

Tabla 1. Resultados de Ochoa-Tocachi et al., (2020)……..….20

Tabla 2.Características de las microcuencas de Martínez, Coello & Feyen, (2017).....21

Tabla 3. Percentiles calculado por Arias & Castellanos, (2020).....23

Tabla 4. Caracterización de las cuencas pares. 26

Tabla 5. DHQ25 Y DLQ 75 de año de estudio (noviembre 2019 - octubre 2020)…….30

Tabla 6. Comparación de DHQ25 Y DLQ 75, de estudio del articulo por Arias & Castellanos, (2020), respecto al estudio realizado en este artículo. 34

Listado de figuras

Pág.

Figura 1. Ubicación de las unidades hidrológicas. 23

Figura 2. Caudales en las cuencas para el año de estudio.....28

Figura 3. Curva de duración de caudal para UHA y UHB 28

Figura 4. Precipitaciones mes a mes (agosto 2019 – febrero 2021). 29

Listado de apéndices

Pág.

Apéndice A. Análisis mes a mes del periodo noviembre 2019 – octubre 2020……..51

Apéndice B. Gráficas mes a mes noviembre 2019 – octubre 2020…….52

Apéndice C. Tabla de procesamiento de datos ……58

Resumen

Título: Evaluación del efecto del cambio del uso del suelo sobre los indicadores DHQ25 y DLQ75 en ecosistemas de páramo, caso de estudio: páramo de Berlín, Santander*

Autores: Duván Enrique Posada Mendoza & Jefferson Jeancarlo Olarte Lancheros**

Palabras claves: Berlín, páramo, DLQ75 y DHQ25, acciones antrópicas.

Descripción:

El páramo de Berlín es un importante ecosistema para Bucaramanga y el área metropolitana al ser principal regulador de agua de la zona, por ende, es imperioso realizar estudios que permitan identificar la incidencia de acciones antrópicas sobre las cuencas hídricas y proponer acciones para mejorar la regulación hídrica. Para el desarrollo de la investigación, inicialmente se identifican estudios en los que se cuantificó la variación de índices hidrológicos en cuencas pareadas por acciones antrópicas en ecosistemas de páramos; como resultado se encuentra que hay incidencia en los índices hidrológicos (DHQ25, DLQ75 e índice de Escorrentía) a partir de las siguientes actividades humanas: Pastoreo, cultivo y forestación. Posteriormente, se procesan datos de 10 meses de caudales en unidades hidrológicas (UH) pareadas del páramo de Berlín, las cuales han sido obtenidos y estudiados en investigaciones del grupo Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Los índices hidrológicos DLQ75 y DHQ25 se calcularon para las dos UH, una intervenida (UHB) y otra sin intervención (UHA). Los resultados muestran el gran impacto que tiene la actividad humana bajo condiciones meteorológicas en los índices de estudio, dado que para UHA, se tienen DHQ25 y DLQ75 con valores de 3,4 y 1,6 respectivamente, en cambio, para UHB su DHQ25 es de 4,2 y DLQ75 es de 0,6, como resultado de la acción antrópica UHB empieza con caudales altos, pero termina reduciéndose a caudales casi tres veces menor, una variación del 64 % respecto al DLQ75 de UHA, otro efecto de la intervención humana se ve reflejado en la pendiente de retención y regulación hídrica, donde para UHA se tiene un valor de 1% pero para UHB de 3,3 %, que muestra el rápido descenso de los caudales en UHB.

---

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánica. Escuela de Ingeniaría Civil. Director: PhD. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

Abstract

Title: Evaluation of the effect of land use change on DHQ25 and DLQ75 indicators in páramo ecosystems, case study: Páramo de Berlín, Santander*

Author: Duván Enrique Posada Mendoza & Jefferson Jeancarlo Olarte Lancheros **

Key word: Berlin, wasteland, DLQ75 and DHQ25, anthropic actions.

Description:

The Berlin páramo is an important ecosystem for Bucaramanga and the metropolitan area as it is the main water regulator in the area, therefore, it is imperative to carry out studies that allow identifying the incidence of anthropic actions on water basins and proposing actions to improve the hydric regulation. For the development of the research, initially studies are identified in which the variation of hydrological indices in basins paired by anthropic actions in moorland ecosystems was quantified; As a result, it is found that there is an incidence in the hydrological indices (DHQ25, DLQ75 and Runoff index) from the following human activities: Grazing, cultivation and afforestation. Subsequently, data of 10 months of flows are processed in paired hydrological units (HU) of the Berlin páramo, which have been obtained and studied in investigations of the Water Resources and Environmental Sanitation (GPH) group of the Industrial University of Santander (UIS). The hydrological indices DLQ75 and DHQ25 were calculated for the two UH, one operated (UHB) and the other without intervention (UHA). The results show the great impact that human activity has under meteorological conditions on the study indices, since for UHA, there are DHQ25 and DLQ75 with values of 3.4 and 1.6 respectively, on the other hand, for UHB its DHQ25 is of 4.2 and DLQ75 is 0.6, as a result of the anthropic action UHB begins with high flows, but ends up reducing to flows almost three times lower, a variation of 64% compared to the DLQ75 of UHA, another effect of the intervention It is reflected in the water retention and regulation slope, where for UHA there is a value of 1% but for UHB of 3.3%, which shows the rapid decrease in the flows in UHB

---

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physic-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: PhD. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

Introducción

El agua es el principal recurso para la vida, dado su composición en el cuerpo humano y lo indispensable en los procesos metabólicos, en otras palabras, es imperativo promover acciones que ayuden a la conservación del líquido vital.

A pesar del valor del recurso hídrico, se estima que el 40% de la población mundial no tiene acceso al recurso hídrico de manera constante, aproximadamente 2500 millones de persona (alrededor de 60 veces la población de Colombia), esto obliga a este gran grupo de personas a ingerir aguas no aptas para el consumo humano (Albao, 2011).

Ante la creciente cantidad de población a nivel mundial y local (Colombia), es obligatorio aplicar metodologías que generen resultados positivos en la regulación del recurso hídrico. Los páramos son fuente constante de agua, siendo el de Berlín el principal sustento de agua para Bucaramanga y el área metropolitana (Acevedo Tarazona & Correa Lugos, 2019). El equilibrio de este ecosistema de alta montaña es característico por su propia condición hidro climatológicas, edafológicas y bióticas, creando ambientes de alta regulación hídrica con tasas bajas de evapotranspiración, por consiguiente, presentan alta capacidad de absorción de agua y buen sistema de regulación (Albao, 2011).

Las actividades de origen antrópico afectan la capacidad de absorción y regulación de los páramos, situación que puede llegar a ser preocupante en situaciones extremas de sequía como el fenómeno del niño, entorno que se logró documentar en 1992, mostrando serios problemas de

racionalización del recurso hídrico en algunas regiones de Colombia, dado las fuertes actividades humanas realizadas en los páramos (Cortés, 1995).

Por lo expuesto anteriormente, nace la iniciativa del presente estudio, el cual estudia la variación de dos índices hidrológicos en cuencas pares para el páramo de Berlín, cuya conclusión puedes ser alarmante al extrapolar escenarios similares al fenómeno del niño, mostrando una reducción significativa del caudal de las cuencas cuando se realizan actividades antrópicas.

1.Objetivos

1.1.Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio del uso del suelo sobre los indicadores DHQ25 y DLQ75 durante un año hidrológico en dos unidades hidrológicas en el páramo de Berlín (Santander, Colombia).

1.2.Objetivos específicos

- Comparar los indicadores DHQ25 y DLQ75 en dos unidades hidrográficas (intervenida y no intervenida) aplicadas durante un año hidrológico en el área de estudio.
- Identificar alternativas de gestión que contribuyan a preservar los servicios de regulación y suministro en el área objeto de estudio.

2.Marco Conceptual

2.1.Paramo

ha evolucionado principalmente por la inmigración de plantas adaptadas al frio de regiones templadas (Cuello et al., 2010).

En la mayoría de los casos, estos ecosistemas proporcionan fuentes hídricas con una alta calidad y capacidad esta gran producción se debe principalmente a las elevadas precipitaciones, los eventos de lluvia en el ecosistema páramo son generalmente de alta frecuencia y baja intensidad (Buytaert et al., 2006) es así que para muchos países lo páramos representan un recurso de vital importancia para el desarrollo. En Colombia los páramos son el 1.3% de la superficie del país y en su mayoría corresponde a páramos húmedos con un 6% de paramos secos. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008).

Los páramos son fundamentales en la regulación hídrica, además, en su estado natural se encuentran cubiertos generalmente de musgos, pajonales, gramíneas y frailejones, que ayudan en los procesos de regulación y captación de agua que surge de la condensación. El potencial de regulación hídrica del páramo se relaciona con su alta capacidad de retención de agua debido a su basta vegetación alcanzado en condiciones de saturación un 80-90%. Son vitales para laeconomía a largo plazo dada su importancia hidrológica (Garavito, 2015).

2.2.Servicio hidrológico

Servicio del ecosistema dentro de este grupo se encuentran contenidos todos los beneficios que provee cualquier ecosistema, los servicios del ecosistema se clasifican en cuatro grupos que

son los servicios de aprovisionamiento como el agua fresca, servicio de regulación como el almacenamiento la escorrentía y la recarga que pueden verse afectados de forma notoria debido a los cambios drásticos del uso del suelo, servicios culturales y servicios de soporte donde se encuentra el ciclo del agua proveniente del ecosistema y esencial para la supervivencia de algunos organismos (Millennium Ecosystem Assessment., 2005).

2.3.Indicadores hidrológicos

Utilizados para describir diferentes aspectos de los regímenes de flujo de corriente también en la investigación fluvial, han sido desarrollados para caracterizar regiones particulares en términos de relevancia biológica, describir la variabilidad general en regímenes hidrológicos o globales y cuantificar el flujo, características que se cree que son sensibles a diversas formas de perturbación humana (Olden & Poff, 2003). Con estos índices hidrológicos se busca tener en cuenta las características de variabilidad de los flujos de agua que son “biológicamente relevantes” conformando procesos biológicos en fuentes hídricas. Surgen también técnicas asociadas con el medio ambiente, métodos de evaluación de flujos diseñados específicamente para poder evaluar las necesidades de flujo para ríos específicos (Olden & Poff, 2003).

Los indicadores hidrológicos representan una serie de condiciones hidrológicas y son utilizados para determinar la disponibilidad del recurso hídrico, además, pueden ser utilizados para comparar sitios en estudios ecológicos (Booker, 2015).

Muchos estudios buscan definir indicadores con los cuales se puede caracterizas las variaciones en las condiciones del agua y después poder realizar comparaciones mediante

diferentes métodos entre al antes y el después de los ecosistemas al sufrir cambios antrópicos (Richter, 1996).

En Colombia el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se desarrolló el sistema de indicadores hídricos que pretende responder a los cuestionamientos sobre la disponibilidad del recurso y las restricciones por afectación a la oferta o cantidad, índices asociados al régimen natural y la intervención antrópica (IDEAM).

Estado del arte

Los páramos se encuentran más elevado que la mayoría de los asentamientos humanos, convirtiéndolos en ecosistemas con poca actividad antropogénica y en “torres de agua natural” por acción gravitatoria (Messerli, Viviroli y Weingartner, 2004). Sin embargo, desde el siglo XX, los páramos han tenido que tolerar actividades/intervenciones humanas con frecuencia cada vez creciente (Roa-García et al., 2011). La actividad antropogénica se divide en tres grandes grupos: (1) cultivo, (2) forestación y (3) pastoreo (Célleri & Feyen, 2009). Para efectos prácticos del presente análisis de la literatura, se estudiarán los resultados de distintos autores que hallan investigado una o varias de las actividades antropogénicas mencionadas.

Brown et al., (2005) destaca lo importante de realizar estudios de cuencas pares, resaltando que deben estar situadas lo más cercano posible. Mediante análisis bibliográfico también concluye que la reducción de la vegetación (como deforestación) de un ecosistema (sea o no de alta montaña) reduce considerablemente la evatranspiracion anual del sistema, alcanzando una merma del 35% cuando la lluvia anual es de 3500 mm, esto se debe a la poca transpiración vegetal sobre el ecosistema, empobreciendo la capacidad de retención del agua. No obstante, no menciona ni cuantifica índices hidrológicos, como si lo realiza Buytaert et al., (2006) al mostrar que hay pocos estudios sobre la regulación hídrica realizados a paramos.

Buytaert et al., (2006) destaca que es prudente utilizar relación de caudales pico y flujo base (como DLQ75, DHQ25) para analizar el impacto de las actividades antropogénicas sobre los páramos, pues un flujo pico en un tiempo prolongado y un caudal bases en un intervalo de tiempo pequeño es un indicativo de la reducción de la capacidad de retención de agua de un ecosistema,

también explica, desde la lógica lo que sucede cuando se reduce la vegetación en un páramo: se crea un área mayor con luz directa de sol, aumentando, por ende, la evaporación del suelo, aunque se reduce la transpiración, es más intensa la evaporación.

Crespo et al., (2014) realizan un análisis resumido de distintos trabajos técnico-científicos sobre paramos húmedos ubicados en Ecuador con el fin de conocer los impactos del cambio de uso de la tierra sobre su hidrología, destacando, en primera instancia que "el pastoreo extensivo parece no afectar la respuesta hidrológica de las cuencas, principalmente porque la carga animal es baja; situación contraria se tiene con el cultivo, pues esta actividad antropogénica reduce la capacidad de regulación de la cuenca con un gran incremento en los caudales pico, una reducción de los caudales base y en general una disminución en el rendimiento hídrico.

La conclusión del párrafo anterior se puede identificar y cuantificar en Ochoa-Tocachi et al., (2020), los cuales enfatizan que el cambio en el suelo (como cultivo, forestación y/o pastoreo) en los Andes tropicales son las principales causas de alteraciones hidrológicas en su ecosistema, destacando al Páramo como un sistema frágil. Muestra que los estudios de cuencas pares son más precisos que el estudio prolongado de una sola cuenca, pues esta último no discrimina la participación de factores externos como la variabilidad climática. El estudio de Ochoa-Tocachi et al., (2020) analizan el pastoreo, la forestación y el cultivo mediante índices hidrológicos como DLQ75, DHQ25 y el coeficiente de escorrentía (C), mostrando lo ilustrado en la siguiente tabla, donde Alte es alterado y Sin Alte significa sin alterar.

Tabla 1.

Resultados de Ochoa-Tocachi et al., (2020)

	Cultivo		Forestación		Pastoreo	
	Alte.	Sin Alte.	Alte.	Sin Alte.	Alte.	Sin Alte.
DLQ75 (mm/min)	0,07-0,6	0.4-1,5	0,09-0,05	0,02-0,06	1-0,1	1-0,15
DHQ25 (mm/min)	3-20	2-20	0,5-0,15	0,2-0,09	6-30	6-30
(C)	0,60	0,70	0,28	0,4	0,65	0,64

La conclusión más importante es el poco impacto que tiene el pastoreo, la mediana participación de cultivar y lo altamente negativo de la forestación sobre los páramos. También se logra identificar que los caudales máximos aumentan cuando hay actividades humanas en el ecosistema, los caudales base presenta poca variación en el cultivo y pastoreo y los índices de escorrentía reducen en todos los casos y tal como menciona Crespo et al., (2014), es el pastoreo el menos dañino al medio rendimiento hídrico del ecosistema.

La reducción del coeficiente de escorrentía también lo destaca Ochoa, Buytaert & De Bièvre, (2016). Ellos analizaron la incidencia y el uso de suelos en entornos de alta variabilidad hidrológica, aplicando un modelo de regresión lineal a 24 cuencas pares con el índice de escorrentía (RR), índice de flujo base (BFI) y pendiente de la curva de duración del flujo (R2FDC), concluyendo que el uso de la tierra para ganadería en ecosistemas de alta montaña tiende a reducir el valor de índice de escorrentía y de R2FDC, sin embargo, con mayor impacto en R2FDC, aumentando lo cual indica una menor capacidad de retención del agua por parte del ecosistema.

Por su parte, Martínez, Coello & Feyen, (2017) realizaron un análisis descriptivo y comparativo de la escorrentía en un intervalo de tiempo de 8 años a tres microcuencas ubicadas en la zona central andina de Ecuador, dos de las cuencas (Pajonal y Pinos) equidistan menos de 500 metros entre sí, mientras Ortigas se encuentra a más de 2 km de las anteriores microcuencas, la información básica se encuentra en la Tabla 2. Para determinar el impacto del uso del suelo sobre la escorrentía de las microcuencas se utilizó el índice de Richard Baker, obtenido que la microcuenca de Pajonal tenga valores entre 0.15-0.25, la microcuenca de Pajonal oscile entre 0.90-0.20 y la microcuenca de Ortigas esté en un intervalo de 0.04-0.06, concluyendo que el uso de ganadería y la forestación (Pajonal y Pinos) inciden en el ecosistema afectando la capacidad de retención del agua.

Tabla 2.

Características principales de las microcuencas de Martínez, Coello & Feyen, (2017)

	Ortigas	Pajonal	Pinos
Uso de suelo	Bosque nativo	Ganadería extensiva	Pinos
Estado	Inalterada	Poco alterada	Forestada
Altura	2305-2880	2980-3740	3240-3700
Precipitación anual	1540,6	1267	1181

Otros estudios han mostrado que el cultivo tiende a reducir la capacidad de regulación de las cuencas (~40% de reducción) (Célleri & Feyen, 2009; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, Célleri, et al., 2016), aumentan la descarga máxima (~20%), reducen el flujo base (~50%) (Buytaert, Iñiguez, et al., 2006; Buytaert, Iñiguez, & Bièvre, 2007), y reducir la capacidad de

almacenamiento del suelo (hasta un 26% de reducción) (Sarmiento, 2000). Las áreas cultivadas también reducen la capacidad de campo del suelo (p. Ej., Del 100 al 83%) y el punto de marchitez (p. Ej., Del 83 al 63%) (Díaz & Paz, 2002), y aumentan las tasas de evapotranspiración hasta un 66% (Sarmiento, 2000).

Otro impacto que puede realizar la actividad antropogénica es la introducción de especies exóticas para la forestación, práctica común en los páramos andinos (Bonnesoeur et al., 2019). Los pinos, en particular, se han utilizado para mejorar la productividad de la tierra (Farley, Kelly y Hofstede, 2004). Sin embargo, esta práctica afecta la respuesta hidrológica de los ecosistemas de páramos. Experimentos de captación por pares en el sur de Ecuador mostraron que el flujo base se redujo hasta en un 66% (Buytaert, Célleri, et al., 2007; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, Célleri, et al., 2016) y el rendimiento de agua disminuyó entre 42 y 50% (Crespo et al., 2010; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, Célleri, et al., 2016) en pastizales forestados en comparación con pastizales nativos. Estos cambios en las respuestas hidrológicas son consecuencia de una mayor intercepción en el dosel y una mayor evapotranspiración de los árboles exóticos. La quema, otra práctica común en los páramos, aumenta la erosión del suelo, la escorrentía y reduce el tiempo de respuesta lluvia-escorrentía (Molina et al., 2007), así como la conductividad hidráulica del suelo saturado (Poulenard et al., 2001). Se ha informado de sequedad e hidrofobicidad (hasta un 40%) debido a la exposición directa de suelos oscuros a la luz solar (Buytaert et al., 2002). Sin embargo, un estudio reciente concluyó que los programas de conservación del suelo y el agua podrían utilizar la quema para lograr una cobertura vegetal adecuada a largo plazo en páramos perturbados (Bremer et al., 2019).

Hasta el momento no se ha mencionado el caso puntual del páramo de Berlín, sin embargo, dos estudios por parte de la UIS se han realizado y cuyo análisis es la parte final de este estado del arte. El estudio realizado por Prieto & Reyes, (2020) mediante cuencas pares para determinar el índice de regulación y retención hídrica en un periodo de tiempo de 89 días (50 de temporada húmeda y 39 de temporada seca), obtiene un valor de 0,30 para la cuenca con actividad humana (UHB) y 0.58 para la cuenca sin actividades antropogénicas (UHA), esto cataloga a UHB como muy baja y a UHA como baja con respecto a la capacidad de retención y regulación hídrica, mostrando que la acción humana efectivamente es nocivo para los páramos. Otro estudio con diseño metodológico similar y utilizando iguales cuencas es el realizado por Arias & Castellanos, (2020), sin embargo, ellos determinaron los índices hidrológicos DHQ25 y DLQ75, obtenido como resultado lo ilustrado en la Tabla 3, mostrando que los caudales altos tienen poca incidencia, explicando así la alta reducción de los caudales base, esto muestra que los páramos tendrían menos retención de agua cuando hay actividades antropogénicas.

Tabla 3.

Percentiles calculados por Arias & Castellanos, (2020).

Unidades hidrológicas	Caudal (L/s)	
	Percentil 25	Percentil 75
UHA	2,52	3,35
UHB	1,28	3,6

El estudio realizado por Arias & Castellanos, (2020) abarcó un periodo de tiempo corto (100 días), estos estudios realizados en periodos cortos de tiempo, pueden no ser suficientemente

concluyentes, ya que no incluyen un ciclo hidrológico completo. Por lo tanto, periodos más largos permiten análisis en los que se integre información del ciclo hidrológico, llevando a conclusiones más precisas del comportamiento del agua en la cuenca, como lo puede ser el indicador de regulación y retención.

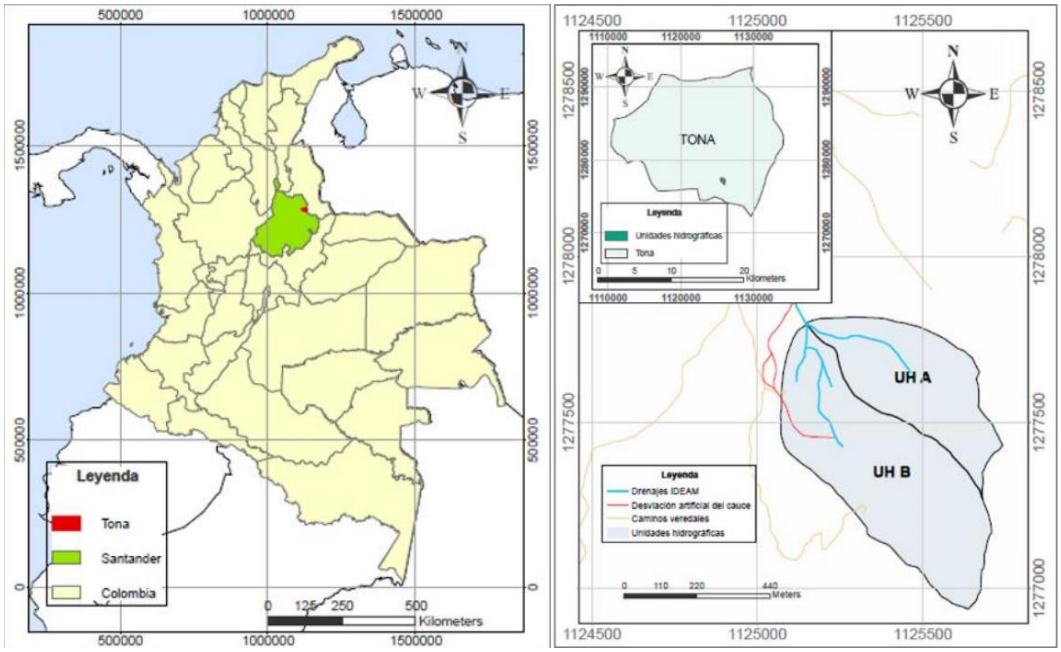
Metodología

4.1. Área de estudio

El área de estudio se puede resumir en la Figura 1, donde UHA es la cuenca no intervenida y UHB es la cuenca intervenida, el termino intervenido hace referencia a actividades antropomórficas alrededor o en la cuenca de estudio. Para caracterizar las características de las unidades hidrográficas, se resume la información en la Tabla 4.

Figura 1.

Ubicación de las unidades hidrológicas.



Nota: Adaptado de: Prieto & Reyes, (2020).

Tabla 4.

Caracterización de las cuencas pares.

Zona no intervenida (UHA)	Zona intervenida (UHB)
Vegetación nativa como : Pajonales, Herbáceas, Frailejones y plantas de cojín.	Cultivos como: Papa, Cebolla y pasto.
Pequeños humedales.	Sin humedales
Sin ganadería	Con ganadería a pequeña escala.
Sin vertedero de basura	Con vertedero de basura
Poco tránsito de personas y animales doméstico.	Alto tránsito de personas y animales domésticos.

Nota: Adaptado de: Prieto & Reyes, (2020).

4.2 Estimación de índices hidrológicos

Para calcular los índices hidrológicos DHQ25 y DLQ75, se necesitan datos de caudales en las cuencas de estudio. Para este estudio, se contó con datos de caudal de las dos UH tomados cada 5 minutos, en un período de un año.

Por medio de vertederos se puede calcular el caudal que a traviesa un terreno, en este caso se utilizó vertederos de pared triangular y los valores de precipitación fue medida por medio de pluviómetros. Estos datos fueron obtenidos por medio de equipos, instalados para previas investigaciones realizadas por Arias & Castellanos, (2020) y Prieto Reyes (2020), en estás se explican materiales, fabricación, instalación y especificaciones de los equipos.

Al obtener datos de caudal cada 5 minutos durante un año se conseguirán alrededor de 105.120 valores, lo cual son demasiados datos para su procesamiento, por lo tanto, con ayuda del Software Excel con una hoja de cálculo electrónica se calcula los promedios diarios, para así poder realizar

un análisis del año hidrológico sin una densa base de datos. No obstante, debido a la emergencia mundial del Covid-19 se perdieron aproximadamente 2 meses de datos, de todo el año hidrológico en estudio, ya que, se averiaron los instrumentos y se dificulto el acceso para su revisión y mantenimiento.

Para calcular índices se realizaron los siguientes pasos:

- Organizar los datos de caudal de mayor a menor.

- Enumerar los datos del 1 al “n”.

- Dividir, la cantidad de datos en secciones iguales de 100, para ello se toma el dato 1 (es posición, NO VALOR), para luego dividir en la cantidad de datos que tenemos “n”, luego multiplicar por 100 para saber su posición porcentual, este procedimiento hay que hacerlo con cada número de datos tomados

- Para estimar el DHQ25 se calcula el promedio de los datos que estén con un porcentaje de 0 al 25%

- Para estimar DLQ75 se calcula el promedio de los datos que este con un porcentaje del 75% al 100%.

Para mayor interpretación y comprensión de la información se realizan dos gráficas, en la primera se enfrenta en un mismo gráfico los caudales de UHA, los caudales de UHB y la lluvia versus el tiempo, en la segunda, se va a graficar lo que se conoce como curvas de duración de caudal donde los valores de posición porcentual obtenidos para calcular los índices hidrológicos,

son eje X, y para obtener la posición porcentual, se calcula caudales promedios diarios, ese será el eje Y el cual debe presentarse en escala logarítmica para buscar linealizar la gráfica.

Figura 2.

Caudales de UHA, caudales de UHB y la lluvia; del año de estudio (noviembre 2019 - octubre 2020)

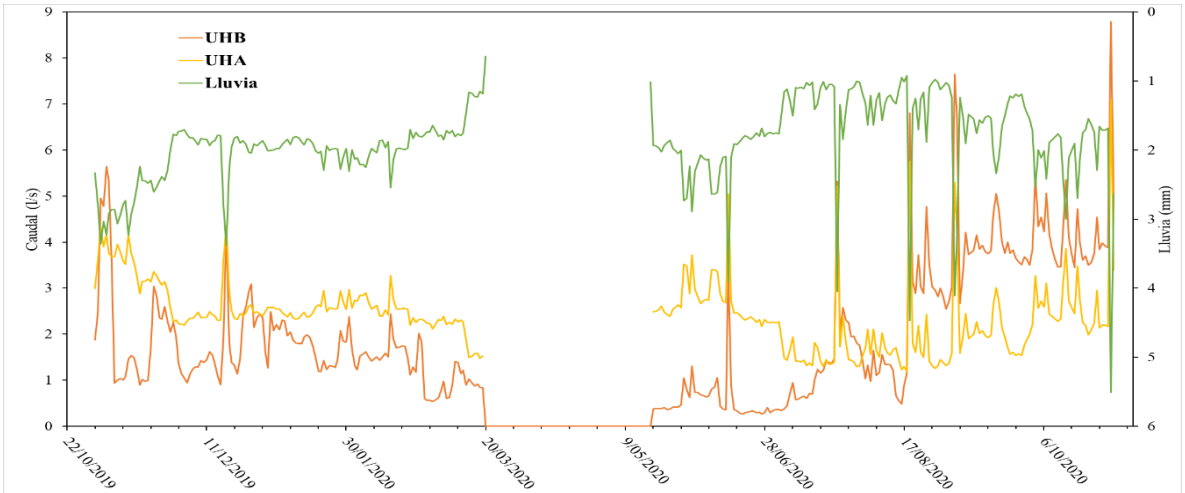


Figura 3.

Curvas de duración de caudal, para UHB y UHA.

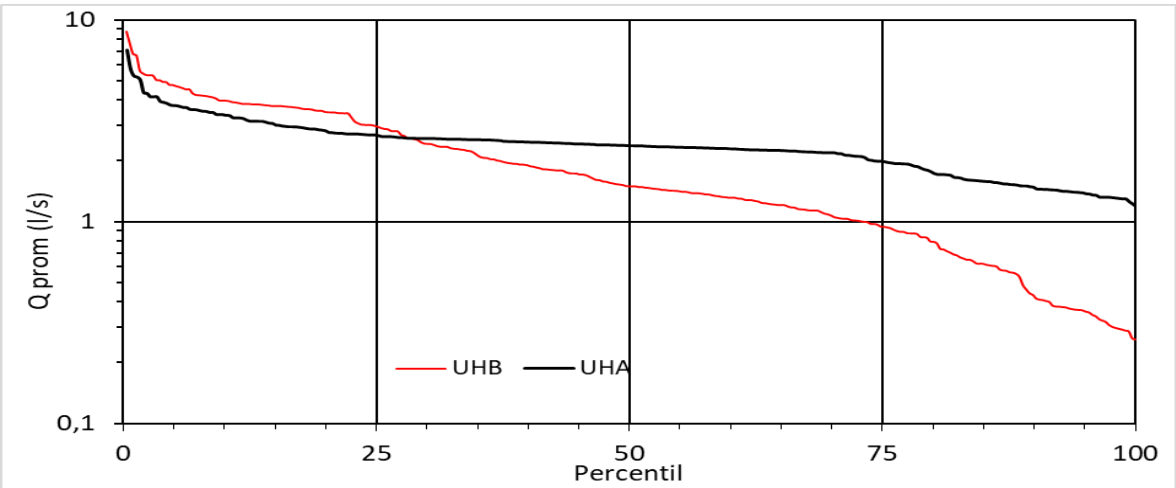
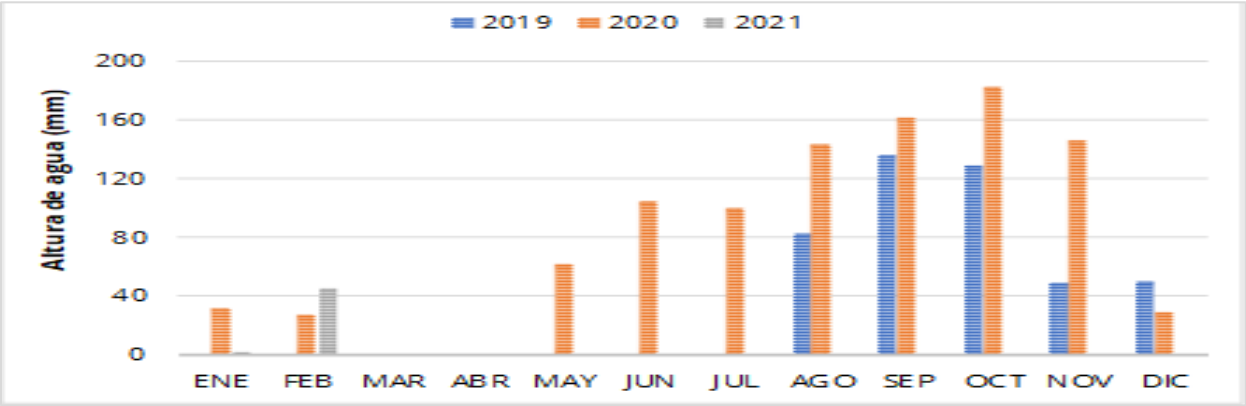


Figura 4.

Precipitaciones mes a mes (agosto 2019 – febrero 2021)



5. Resultados e interpretación

Al realizar el procesamiento de datos como primer resultado se tienen los indicadores hidrológicos para el año de estudio (Ver **Tabla 5**)

Tabla 5.

DHQ25 Y DLQ 75 de año de estudio (noviembre 2019 - octubre 2020)

	Caudal (L/s)		
	(UHA)	(UHB)	Variación (%)
DHQ25	3,4	4,2	22,9
DLQ75	1,6	0,6	63,9

Los resultados de variación en los indicadores hidrológicos **Tabla 5** se obtuvo porcentajes similares a los obtenidos por Ochoa et al. [18] Arias & Castellanos [4] y Ochoa et al. [19]. Lo que brinda veracidad en los datos tomados y procesados, pues los resultados son comparables y con un sentido lógico, para la zona de estudio.

En la **Figura 2** se observa que en los picos altos de lluvia ***(****línea verde*) también hay picos altos de caudales, un comportamiento interesante es que, la línea de UHB (*línea rojo*), permanece por debajo de la línea de UHA *(línea amarillo*) la mayor parte del tiempo, como se ve desde noviembre del 2019 hasta del julio 2020 pero en puntos de alta lluvia, se va por encima, como en los meses de agosto del 2020 hasta octubre del 2020, es decir que, UHB tiene caudales más altos que UHA, esto evidencia que en eventos de mucha lluvia UHB se satura rápidamente dando como resultado una entrega alta de caudales superficiales; (el espacio que se encuentra en el centro, es un

fenómeno particular en este estudio, ya que, por cuestiones del Covid-19 faltaron datos de aproximadamente dos meses).

La **Figura 3** son curvas de duración de caudal, esta curva muestra la variación de los caudales desde el valor más alto que se ha presentado durante el ciclo hidrológico en estudio en nuestro caso (noviembre 2019 – octubre 2020), hasta el más bajo.

En la **Figura 3** se observa que en el primer cuartil y ultimo cuartil se presenta la mayor variación, por ello es ahí donde se calcula los indicadores DHQ25 y DLQ75, que representan el caudal promedio en el primer cuartil y cuarto cuartil respectivamente, resultados de indicadores (ver **Tabla 5).**

Un comportamiento interesante es que en el primer cuartil la curva de UHB está por encima de la curva de UHA, pero en el cuarto cuartil sucede lo contrario la curva de UHB está por debajo de la curva de UHA y cómo se puede ver en la **Tabla 5** UHB tiene un DHQ25 igual 4,2 que es mayor al DHQ25 de UHA que es igual a 3,6, en cambio UHB tiene un DLQ75 igual a 0,6 que es menor al DLQ75 de UHA que es igual a 1,6.

El objetivo de linealizar las curvas de duración de caudal es poder obtener un valor de pendiente entre el segundo cuartil y tercer cuartil, ya que, es donde se presenta un comportamiento prácticamente como una línea recta, este valor de pendiente se refleja inversamente proporcional a la capacidad de retención y regulación hídrica, es decir, entre mayor pendiente es menor la capacidad de la cuenca de retener y regular el agua, como se aprecia UHB tiene mayor pendiente con 3,3% que UHA con 1%, por lo tanto, se puede deducir que UHB no tiene capacidad de retener

mucha agua lo que conlleva a que tenga baja regulación y entregue de manera rápida el agua que recoge durante la lluvia.

En las curvas de duración de caudal **Figura 3** no hay un orden cronológico, ni línea de **tiempo**, o sea, **no se sabe** por medio de la gráfica cuando sucedieron los eventos de más alta precipitación o los más bajos, **ni tampoco se puede intuir** que la curva representa el comportamiento cronológico de los caudales a través del ciclo hidrológico, pues los caudales se ordenan del valor mayor al menor y no por orden cronológico, si se desea valores con posición en el tiempo ver **Figura 2**.

Figura 3, se puede ver que, en el primer cuartil los caudales de UHB son más altos que los de UHA, lo que corrobora que UHB no tiene capacidad de retener mucha agua, saturándose rápidamente y llevándolo a elevados índices de escorrentía que permiten esos valores altos de caudal, en el otro extremo el cuarto cuartil hay una historia diferente UHA es mayor por mucho a UHB, como se puede ver en la **Tabla 5** para DHQ25 hay una variación del 22,9 %, pero en el DLQ75 del 63,9%, se redujo a menos de la mitad del caudal de UHA, otra forma de verlo es calcular el coeficiente entre (DLQ75 UHA/DLQ75 UHB) lo que da como resultado 2,67 que es prácticamente el triple, es decir que UHB tiene un caudal tres veces menor que el de UHA, lo que se infiere que UHB posee una pésima regulación, pues además de retener poca agua, también la entrega muy rápidamente, lo que se muestra en la pendiente pronunciada mostrada en la curva de duración de UHB, lo ideal de una curva de duración es acercarse en lo posible a una pendiente cero, lo que es evidencia de una entrega constante de un caudal base, curiosamente UHA presenta un comportamiento similar, pues al ser una cuenca de un páramo sin presencia humana su objetivo natural es retener agua para poder ofrecerla durante el año de una manera constante.

La **figura 3** permite concluir que, UHA tiene mayor capacidad de retención y regulación hídrica, al tener una pendiente tan baja (*visualmente prácticamente horizontal*) le permite tener caudales base estables en el tiempo, además entre DHQ25 y DLQ75 presenta un 53% de variación, que es un bajo rango de cambio entre los caudales más altos y bajos, en cambio, UHB presenta una variación del 86% entre el DHQ25 y el DLQ75 lo que hay un rango alto entre caudales altos bajos, además, la presentar una pendiente muy pronunciada, muestra su pobre capacidad de retención y regulación.

Con otros estudios nuestros resultados se mantienen una margen mínima de variación, pero el presentado en el artículo por Arias & Castellanos, (2020), se presenta algo interesante ver **Tabla 6**, el DHQ25 para la UHA apenas presenta variación y para UHB un poco más, lo interesante son los DLQ75 donde se muestra un alta variación, los indicadores expuestos en el artículo [10] son más altos y esto se debe que el estudio fue realizado con una base de datos de 3 meses (octubre 2019-diciembre 2019), casualmente le trimestre más precipitado del año, por lo tanto, los valores de caudal más bajos, siguen siendo altos, está comparación permite concluir, que realizar este tipo de estudios con tramos de tiempo cortos, no nos permite observar y tener resultados lógicos, dado que un caso contrario se hubiese hecho el estudio en un trimestre de sequía también resultaba en indicadores extraños pero en este caso para DHQ25, por lo tanto se recomienda realizar estudios hidrológicos, con datos que cumpla con un ciclo hidrológico anual, las irregularidades que se pueden presentar en tramos cortos de tiempo para estudio lo podemos ver al hacer estos cálculos mensual (ver **Apéndice A**)

Tabla 6.

Comparación de DHQ25 Y DLQ 75, de estudio del articulo por Arias & Castellanos, (2020), respecto al estudio realizado en este artículo.

	Caudal (L/s)		
	(UHA [2020])	(UHA[2021])	Variación (%)
DHQ25	3,35	3,4	1,47
DLQ75	2,52	1,6	36,5
	(UHB [2020])	(UHB [2021])	Variación (%)
DHQ25	3,6	4,2	14,29
DLQ75	1,6	0,6	62,5

El aumento del índice hidrológico DHQ25 de una cuenca con acción antrópica con respeto a otra natural es un indicativo del incremento de los caudales altos, esto indica que la unidad hidrológica intervenida oferta más agua que su contraparte, es decir, aminora la capacidad de regulación (Messerli, 2004); distintos autores muestran que la intervención antrópica tiende a aumentar los caudales altos (DHQ25) y a reducir los caudales base (DLQ75). Estos fenómenos generalizados en otras investigaciones se pueden presenciar en este estudio, por lo tanto, la acción antrópica en la zona de estudio ocasiona una disminución considerable en la retención y regulación del agua, como anteriormente se dijo en comparación con UHA, UHB tiene una mayor pendiente, es decir que tiene una oferta de precipitación horizontal decadente terminando en generar una diferencia en el DLQ75 de casi el triple respecto a UHA, este bajo caudal, puede presentar fenómenos de sequía en momentos de poca lluvia, generando que cuerpos de agua que se nutren de la cuenca se sequen, generando problemas de desabastecimiento de agua, para la población, por otro lado, tener un DHQ25 alto también representa una amenaza, pues este en el caso de UHB es

mayor que el de UHA, se presenta una situación contraria que con el de DLQ75, sucede que por parte de UHB hay una entrega alta de caudales por su baja retención, lo que se vuelve un problema, ya que, si no hay cuerpos de agua suficientes para almacenar ese volumen de agua, se convierten en inundaciones, como consecuencia se dañan cultivos, mueren animales y hasta se dañen las viviendas generando un problema social.

La importancia de mejorar las practicas del uso del suelo, es garantizar una entrega estable de caudal por parte de la cuenca, para que los cuerpos de agua aledaños puedan ofrecer una oferta adecuada y satisfactoria a la población instalada en UHB, por lo tanto, es importante implementar medidas para capacitar a los colonos de cómo tratar, cuidar y manejar su tierra, concientizándolos que están en un territorio delicado y de cuidado.

6. Impacto en una cuenca natural por el cambio en el uso del suelo.

La precipitación horizontal en los páramos es una fuente de agua por filtración a las cuencas, sin embargo, la alteración del suelo modifica la permeabilidad, alterando el flujo de agua hacia y desde la cuenca, lo que explica que en épocas de baja lluvia (donde la precipitación horizontal puede llegar a ser más relevante que la lluvia vertical) el caudal de agua en la cuenca con intervención antrópica sea considerablemente menor. Un suelo con cultivos tiene alto arado y modificación de la estructura del suelo. Por ende, cuando llueve hay una filtración muy rápida que incrementa los caudales de escorrentía y subsuperficial. Caso contario en la cuenca sin intervención, donde se da una regulación del flujo. Poulenard (2001), Buytaert (2002)

El uso del suelo por acción antrópica puede ser: cultivo, ganadería (pastoreo) y forestación. El cultivo comienza eliminando la vegetación nativa y es obligatoria voltear el suelo, secando la superficies y liberando nutrientes originales, no obstante, la mayor alteración es química (como el pH, contenido de fósforo y contenido orgánico), mientras la permeabilidad (responsable de la retención y regulación hídrica) es alterada por el pastoreo, ya que el suelo es compactado por el caminar humano y animal (este último compacta mejor el suelo por su peso y constancia en el terreno) (Tarazona y Correa, 2019; Prieto y Reyes, 2020). La ganadería compacta el suelo, reduciendo considerablemente la permeabilidad de la zona aledaña a la cuenca, lo que explica la poca capacidad de retención y regulación (Buytaert, 2004). La forestación tiene por objetivo aumentar el secuestro de carbono, sin embargo, esto disminuye la humedad del suelo, reduciendo la conductividad hidráulica y, por ende, la capacidad de regulación de la cuenca. Brown (2005)

Teniendo en cuenta las actividades principales en la zona de estudio, se puede explicar que lleva a esos cambios en los índices hidrológicos, por un lado, un suelo agrícola es descubierto debido al arado para su preparación ocasionando que pierda materia orgánica, la cual también se ve afectada por las sustancias para el crecimiento adecuado de estos cultivos, además al ararse el suelo es desprendido lo que genera mayor porosidad, lo que resulta en mayor infiltración (Patiño, 2021), por ende, retiene menor cantidad de agua, por otro lado, se tiene la ganadería, siendo el pastoreo, de uno de los animales más grandes y en mayor concentración, por lo tanto, el efecto negativo en el terreno es alto ya que el peso y las constantes pisadas de sus movimientos en el momento de cambiarlos de zona para su alimentación, van generando altas compactación en el suelo, que además modifican la estructura del suelo, El efecto de estas acciones lleva como resultado en el caso de UHB, presente una pendiente pronunciada en la curva de duración de caudal, ya que afecta la retención y regulación del agua, como resultado se refleja en los altos índices de DHQ25 y los muy bajos de DLQ75.

7. Alternativas para mejorar la retención y regulación en una cuenca intervenida.

Una investigación reciente en Colombia realizada por Cárdenas y Tobón (2017), muestra que las acciones correctivas pueden mejorar la capacidad de regulación de las cuencas hídricas en páramos, incluso cuando son acciones pasivas, no obstante, advierte que debe ser a largo plazo (mayor a dos años) y que la población aledaña debe comprender la importancia de mejorar la regulación hídrica. Para la ganadería es importante alejar los animales lo más posible de la zona limítrofe de la cuenca, esto tendería a normalizar la permeabilidad del terreno, logrando que a largo plazo se estabilice la regulación hídrica.

La ONG PANORAMA propone tres medidas para mejorar la regulación hídrica en los páramos:

(1) Mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos, consiste en realizar un fondo monetario, donde las personas que se benefician del uso del suelo, cauces o distintos aprovechamientos de la cuenca, paguen una tarifa, de modo que estos recursos económicos se puedan usar para financiar medidas para la conservación de la cuenca.

(2) Plan de manejo participativo de los páramos de la comunidad, por medio de expertos de hace un acercamiento con el objetivo de generar confianza con la comunidad para crear un espacio de participación y reflexión donde la población comparte sus conocimientos, percepción y experiencias en la zona de estudio, llevando a tener espacios de capacitación, concientización y con la comunidad crear planes de acción para la mejoría de la cuenca.

(3) Delimitación y manejo del área de conservación de páramos, zonificar la cuenca especificando, las actividades que se pueden realizar en zonas específicas, ayudan a controlar el impacto de las acciones antrópicas en el suelo, además de crear un documento que especifique lo métodos de cómo realizar tales actividades en las zonas especificadas.

Otro estudio del año 2020 realizado por la Universidad Nacional en el contexto de páramos con cultivos de papa, indica que es necesario implementar esquemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA), para controlar las actividades y la forma en que se desarrollan, como mecanismo para proteger la integridad de las cuencas (arado en zonas próximas, desecho de material contaminante, etc.) y captación masiva de agua.

Los planes de manejo participativo aparecen como una buena alternativa para iniciar con procesos tendientes a la conservación y uso sostenible del páramo. Las etapas en que se desarrollan estos planes pueden incluir:

- Realizar un acercamiento y establecer relaciones de confianza con la comunidad
- Desarrollar un diagnóstico participativo para obtener información sobre el páramo, los conocimientos y percepciones de la población local sobre el páramo que habitan; crear espacios de discusión y reflexión colectiva.
- Presentación del plan de acción por parte de la comunidad, donde ellos mismos asuman el monitoreo del plan, para dar seguimiento a las acciones propuestas para la conservación del páramo, a la dinámica de uso de la tierra, así como de algunos indicadores relacionados a su calidad de vida.

Algunas estrategias que pueden hacer parte del plan de acción incluyen: delimitar con la población la zona limítrofe de la cuenca y evitar, al máximo alterar la flora y fauna; Crear caminos con ayuda de la población local en donde se evite perturbar zonas de protección y con ayuda de la población y expertos en ingeniería ambiental planes de contingencia en temporadas de poca lluvia; además crear sistemas de transporte de agua para el ganado de tal forma que estos animales eviten pisar el suelo aledaño a las fuentes y regular el consumo de agua que se requiera en cultivos; agregado a esto cultivar lo menos próximo a las fuentes para evitar la alteración de la calidad del agua.

8. Conclusiones

Efectivamente, la acción antrópica genera modificaciones en las propiedades del suelo donde se encuentra como actividades alto impacto los cultivos por el arado con manejo de químicos para el adecuado cuidado de los mismos y la ganadería por las pisadas al mover los rebaños, estos cambios en el suelo afectan la retención y regulación hídrica, lo que como resultado genere indicadores de DHQ25 y DLQ75 diferentes a los obtenidos en una cuenca natural, ya que, la baja retención debido a la compactación del suelo genera altos caudales en elevadas lluvias y la filtración del agua se acelera por un suelo altamente poroso, lleva a crear caudales muy bajos en época de sequía.

El DHQ25 es un indicador de caudales altos, relacionado con la retención del agua y el DLQ75 de caudales bajos relaciona con la regulación hídrica; teniendo en cuenta los datos de una UH natural, podemos deducir cualitativamente los cambios en retención y regulación hídrica, en este caso UHB presenta valores más altos en el DHQ25, lo que resulta ser una cuenca con baja retención, es decir, que funciona inversamente proporcional, entre más alto sea el DHQ25 de UHB respecto al de UHA menor será la retención de agua, por otro lado el DLQ75 de UHB está por debajo del DLQ75 de UHA, como resultado UHB tiene baja regulación, o sea, que en este caso es proporcional, entre más bajo sea el DLQ75 de UHB respecto al de UHA menor será la regulación hídrica y dependiendo de la variación entre indicadores podemos idealizar la gravedad de la retención y regulación del agua.

9. Recomendaciones

Para mejorar la retención y regulación en la zona de estudio intervenida, se debe tomar medidas con los actores locales, siendo el fundamento y medio para analizar la situación, propagando medidas y líneas de acción que mejoren la cuenca, para ello ***se recomienda*** las medidas de implementación de un ***Plan de Manejo Participativo*** en el páramo de Berlín que contribuiría a:

- Conseguir una Relación de Colaboración muy necesaria con la Comunidad que habita la zona de estudio, sin la cual es prácticamente imposible lograr el éxito de un buen plan de manejo participativo, se trata de una relación de beneficio mutuo en la cual solo con la acción de las partes, (Comunidad y entidad Protectora del hábitat – investigador – Ambientalistas - ciudadanía) se puede llegar a resultados positivos para todos.
- Dignificar y reconocer la labor del cultivador de la zona de estudio, no solo como agente social fundamental en la generación de Fuentes de Alimentación para la Sociedad sino también como agente vital y Colaborador esencial en la aplicación de normas y reglas para la protección y la delimitación del área de intervención aledaña a las fuentes, mediante la bonificación económica de su trabajo en la protección Ambiental, lo cual se logra mediante la aplicación de los Pagos por Servicios Ambientales (PSA), que se encuentran implementados en muchos países que han logrado tener una conciencia muy clara de la importancia de la conservación del hábitat en las zonas de paramo y zonas especiales de protección ambiental en el mundo.
- Sin duda alguna lograr la menor afectación al ecosistema de paramos por el efecto antrópico generado por la presencia del ser humano en la zona, lo cual sin lugar a dudas está demostrado permitiría una gran recuperación de las zonas de paramos que actualmente se encuentran

afectadas por la falta del manejo controlado y la delimitación de las áreas de intervención, que han llevado a un manejo inadecuado que han afectado de manera suma toda la actividad del Páramo de Berlín y que se corrobora con los cambios paisajísticos en su Fauna y Flora que el mismo ha sufrido ante la presencia y aumento del urbanismo en su zona de influencia

Se recomienda continuar tomando datos durante los años venideros, pues para estimar el comportamiento de una cuenca es imposible con lapsos cortos de tiempo, como lo es un año, ya que los ciclos de lluvias no se repinten de igual manera cada doce meses o cada n meses, por lo tanto, para obtener curvas de duración de caudal que definan el comportamiento de una cuenca se necesita obtener una base de datos extensa para hacernos idea más precisa de su comportamiento.

Referencias Bibliográficas

Acevedo Tarazona, Á., & Correa Lugos, A. D. (2019). Pensar el cambio socioambiental: un acercamiento a las acciones colectivas por el páramo de Santurbán (Santander, Colombia). *Revista Colombiana de Sociología*, *42*(1), 157-175.

Arias, V & Castellanos V, (2020), Evaluación del servicio hidrológico de regulación en un sistema de cuencas pareadas mediante el concepto de reservorio lineal y uso de índices hidrológicos, Caso: Berlín,

Bonnesoeur, V,, Locatelli, B,, Guariguata, M, R,, Ochoa-Tocachi, B, F,, 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(December 2018), 569–584, https://doi,org/10,1016/j,foreco,2018,11,033

Booker, D, J, (2015), Hydrological indices for national environmental reporting, NIWA Client Report CHC2015-015, March, 39,

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,

Buytaert, W,, Célleri, R,, Bièvre, B, D,, & Iñiguez, V, (2007), The impact of pine plantations on water yield: a case study from the Ecuadorian Andes, Paper presented at: Third

International Symposium on Integrated Water Resources Management, pp, 225–229, Bochum, Germany,

Buytaert, W,, Célleri, R,, De Bièvre, B,, Cisneros, F,, Wyseure, G,, Deckers, J,, & Hofstede, R, (2006), Human impact on the hydrology of the Andean páramos, Earth-Science Reviews,79(1–2), 53–72, https://doi,org/10,1016/j,earscirev,2006,06,002

Buytaert, W,, Deckers, J,, Dercon, G,, Bièvre, B, D,, Poesen, J,, & Govers, G, (2002), Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador, Soil Use and Management [online], Retrieved from http://dspace,ucuenca,edu,ec/ handle/123456789/22202

Buytaert, W,, Iñiguez, V,, & Bièvre, B, D, (2007), The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo, Forest Ecology and Management, 251, 22–30,

Buytaert, W,, Iñiguez, V,, Célleri, R,, De Bièvre, B,, Wyseure, G,, & Deckers, J, (2006), 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), The Netherlands: Springer, https://link,springer,com/chapter/10,1007/1-4020-4228- 0_24,

Célleri, 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,

Crespo, P,, Célleri, R,, Buytaert, W,, Feyen, J,, Iñiguez, V,, Borja, P,, & De Bièvre, B, (2010), Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems, IAHS-

AISH Publication [online], Retrieved from: http://dspace,ucuenca,edu,ec/handle/123456789/ 22092,

Crespo, P,, Célleri, R,, Buytaert, W,, Ochoa, B,, Cárdenas, I,, Iñiguez, V,, 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, CONDESAN, 287–304, https://www,researchgate,net/publication/264416399

Crespo, P,, Célleri, R,, Buytaert, W,, Ochoa, B,, Cárdenas, I,, Iñiguez, V,, ,,, & 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, CONDESAN*, 288-304,

Cuello, N, L,, Cleef, A, M,, & Aymard, G, (2010), Phytogeography of the vascular páramo flora of Ramal de Guaramacal (Andes, Venezuela) and its ties to other páramo floras, Anales Del Jardin Botanico de Madrid, 67(2), 177–193, https://doi,org/10,3989/ajbm,2253

Diana, L,, Prieto, Faber, Reyes,, (2019), Análisis del efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo, Caso de estudio: Berlín (Santander), Pag 1-63

Díaz, E,, & Paz, L, (2002), Evaluación del régimen de humedad del suelo bajo diferentes usos, en los páramos Las Animas (Municipio de Silvia) y Piedra de León (Municipio de Sotará), departamento del Cauca,, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia,

Fabian, Arias,, Andrea, Castellanos,, (2019), Evaluación del servicio hidrológico de regulación de un sistema de cuencas pareadas mediante el concepto de reservorio lineal y el uso de indices hidrologicos caso: Berlin Santander 1–59,

FAO, (1997), Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos, In Documentacion,Ideam,Gov,Co, http://documentacion,ideam,gov,co/openbiblio/bvirtual/021109/LUCHACONTRALACONTAM INACION,pdf

Farley, K, A,, Kelly, E, F,, & Hofstede, R, G, M, (2004), Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes, Ecosystems, 7(7), 729–739, https://doi,org/ 10,1007/s10021-004-0047-5,

Garavito, L, (2015), Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo, Ingeniare, 19, 127–136, http://www,unilibrebaq,edu,co/ojsinvestigacion/index,php/ingeniare/article/view/704

Gélvez Acevedo, L, A, (2020), *Relaciones funcionales de tipo ambiental a traves del agua virtual: el caso de Barranquilla y sus principales proveedores de cebolla larga* (Master's thesis, Uniandes),

Martínez, E,, Coello, C, I,, & Feyen, J, (2017), Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal, *Maskana*, *8*(1), 129-144,

Messerli, B,, Viviroli, D,, & Weingartner, R, (2004), Mountains of the world: Vulnerable water towers for the 21st century, Ambio, 13, 29–34,

Millennium Ecosystem Assessment, 2005, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, Island Press, Washington, DC,

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, (2008), Plan Nacional de Páramos y su implementación: síntesis del documento final, Ccvvl, 76,

Ministerio del medio Ambiente, (2014), Colombia: Indicadores Hidrologicos, http://www,ideam,gov,co/web/agua/indicadores1

Molina, A,, Govers, G,, Vanacker, V,, Poesen, J,, Zeelmaekers, E,, & Cisneros, F, (2007), Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use, Catena, 71(2), 357–370, https://doi,org/10,1016/j,catena,2007,04,002

Ochoa-Tocachi, B, F,, Buytaert, W,, & De Bièvre, B, (2016), 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, F,, Buytaert, W,, De Bièvre, B,, Célleri, R,, Crespo, P,, Villacís, M,, Llerena, C, A,, Acosta, L,, Villazón, M,, Guallpa, M,, Gil-Ríos, J,, Fuentes, P,, Olaya, D,, Viñas, P,, Rojas, G,, & Arias, S, (2016), Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments, Hydrological Processes, 30(22), 4074–4089, https://doi,org/10,1002/hyp,10980

Ochoa-Tocachi, Boris,, Buytaert, Wouter,, Célleri, Rolando,, Crespo, Patricio,, Villacis, Marcos,, Llerena, Carlos,, Acosta, Luis,, Villazon, Mauricio,, Guallpa, Mario,, Gil-Ríos, Junior,, Fuentes, Paola,, Olaya, Dimas,, Viñas, Paul,, Rojas Mendoza, Gerver,, Arias, Sandro,,

Antiporta, Erick & De Bièvre, Bert, (2020), Impactos del uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas, 10,13140/RG,2,2,29456,43526,

Olden, J, D,, & Poff, N, L, (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

Poulenard, J,, Podwojewski, P,, Janeau, J,-L,, & Collinet, J, (2001), Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian páramo: Effect of tillage and burning, Catena, 45(3), 185–207, https://doi,org/10,1016/S0341-8162(01)00148-5,

Prieto, L & Reyes O, (2020), Análisis del efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo, Caso de estudio Berlín (Santander),

Restrepo, J,, Suárez, C, A,, & Álvarez, M, Y, (2008), Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales “Páramo de Berlín,” Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga,, 103,

Richter, B, D, (1996), A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems | Un metro para evaluar alteraciones hidrologicas dentro de ecosistemas, Conservation Biology, 10(4), 1163– 1174, https://doi,org/10,1046/j,1523-1739,1996,10041163,x

Roa-García, M, C,, Brown, S,, Schreier, H,, & Lavkulich, L, M, (2011), The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes, Water Resources Research, 47(5),

Sarmiento, L, (2000), Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes, Mred, 20(3), 246–253, https://doi,org/ 10,1659/0276-4741(2000)020[0246:WBASLU]2,0,CO.

S. Patiño, Y. Hernández, C. Plata, I. Domínguez, M. Daza, R. Oviedo-Ocaña, W. Buytaert, B.F. Ochoa-Tocachi, «Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andena páramos and its effect on streamflow buffering», *Catena* vol. 202, pp. 1-14, 2021

Apéndice A

Análisis mes a mes del periodo noviembre 2019 – octubre 2020

Tabla A.1.

Indicadores hidrológicos DHQ 25 y DLQ75, con su respectiva variación para cada mes de (noviembre 2019 – octubre 2020)

	DHQ 25 UHB	DHQ 25 UHA	Variación %	DLQ 75 UHB	DLQ 75 UHA	Variación %
2019 - Diciembre	4,63	4,21	22,90	0,88	2,54	63,87
2019 - Noviembre	3,09	3,19	5,13	0,86	1,98	65,74
2020 - Enero	2,60	3,03	3,44	1,10	2,05	56,24
2020 - Febrero	2,19	3,23	32,13	0,79	1,98	60,06
2020 - Marzo	1,36	2,60	47,66	0,50	1,38	64,00
2020 - Mayo	0,45	3,35	76,77	0,28	2,12	86,75
2020 - Junio	1,38	3,69	62,60	0,24	2,06	88,53
2020 - Julio	2,75	2,73	0,62	0,38	1,13	65,89
2020 - Agosto	0,43	2,78	55,66	0,68	1,10	38,36
2020 - Octubre	5,22	4,07	28,10	3,20	1,88	69,69

Al calcular los índices hidrológicos por cada mes y realizar sus respectivas gráficas, lo primero que se puede observar es que se presentan comportamientos muy extraños en las curvas de duración de caudal, hasta contradiciendo la teoría, por ejemplo, si analizamos el DLQ75 más bajo en UHB se encuentra en junio, donde se ve en la **Figura B.14.** que con respecto a la curva de UHA, hay una diferencia muy grande en los valores de caudales, por otro lado, si se ubica al DLQ75 más alto en UHB se encuentra en octubre que en la **Figura B.21.** se puede ver que la curva UHB siempre está por encima de la curve de UHA.

Observando estos extraños comportamientos en cada gráfica, se puede concluir que para analizar el comportamiento del caudal en un terreno se debe unificar información la mayor

cantidad de tiempo posible para poder realizar cálculos e interpretaciones de la conducta del agua a lo largo del tiempo, lo adecuado es cerrar un ciclo hidrológico, como lo presenta el objetivo de este estudio, para poder interpretar deducciones a partir de cómo ha evolucionado la zona de estudio a través de las distintas precipitaciones, pues como podemos ver en la **Figura A.1.** las precipitaciones funciona como una campana de Gauss, entonces dependiendo de que sección de ese ciclo realicemos el estudio, se por pedazos de 3 o 4 meses nos dará resultados muy diferentes que en otra sección del año, por eso no tiene ningún sentido lógico trabajar con indicadores hidrológicos calculados en secciones de meses menores de 12, para futuras investigaciones a través del tiempo es calcular estos indicadores cada año hidrológico y comprar con otro año hidrológico en otro punto del tiempo y correlacionar los cambios en lo sindicadores, ya que, por medio de estos podemos inferior los impactos que ha generado el uso del suelo a través del tiempo, cabe aclarar que para hacer conclusiones del impacto del uso del suelo es importante investigar la evolución del uso del suelo, aumento de población animal, y humana, cantidad de terreno cultivado y forestado, pues todo es un conjunto evolutivo que lleva a los resultado de los indicadores hidrológicos.

Apéndice B

Figura B.1.
Caudal en las cuencas para noviembre 2019.

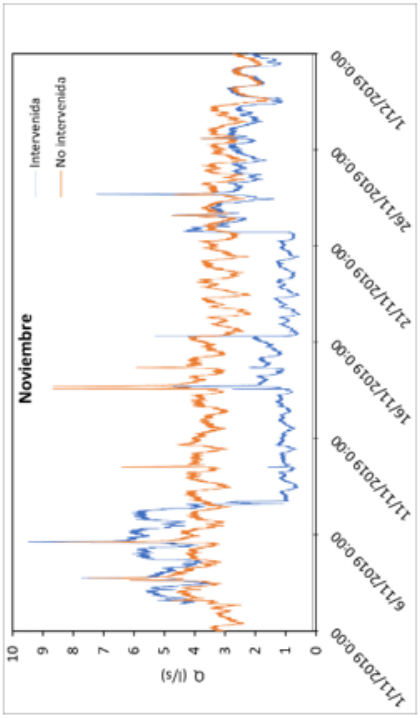


Figura B.2.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, noviembre 2019

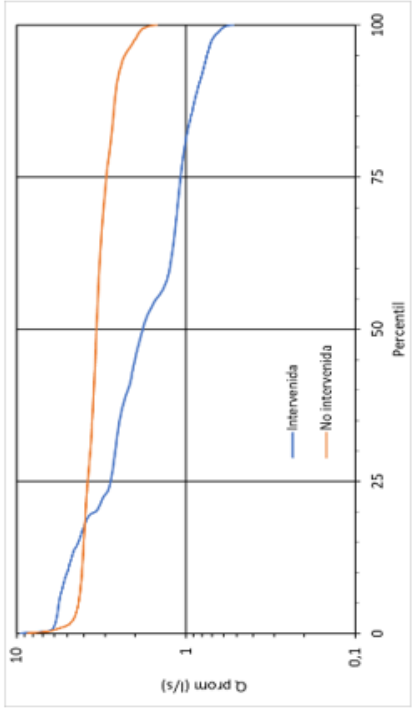


Figura B.3.
Caudal en las cuencas para diciembre 2019.

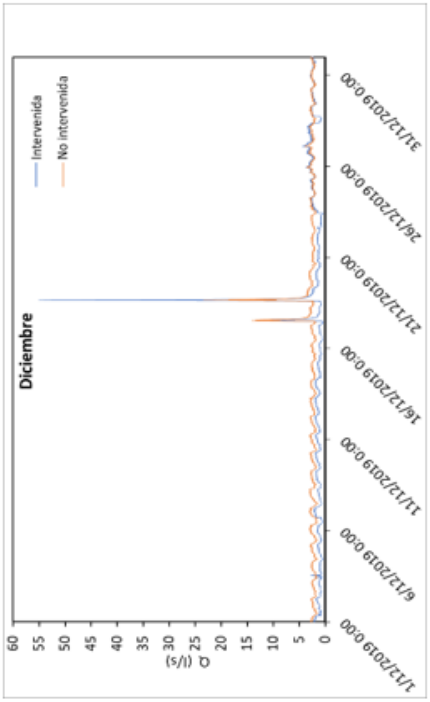


Figura B.4
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, diciembre 2019.

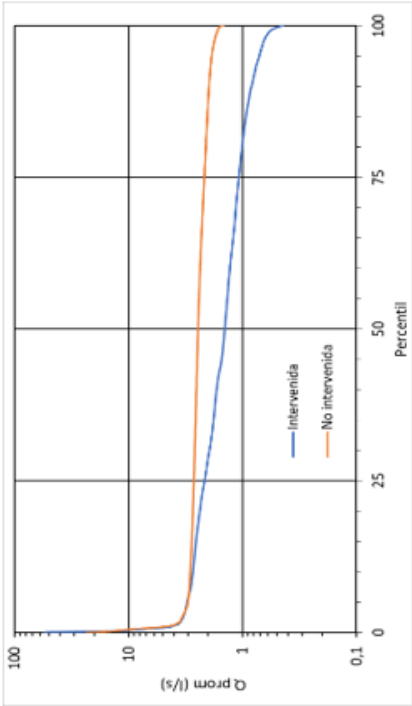


Figura B.5.
Caudal en las cuencas para enero 2020.

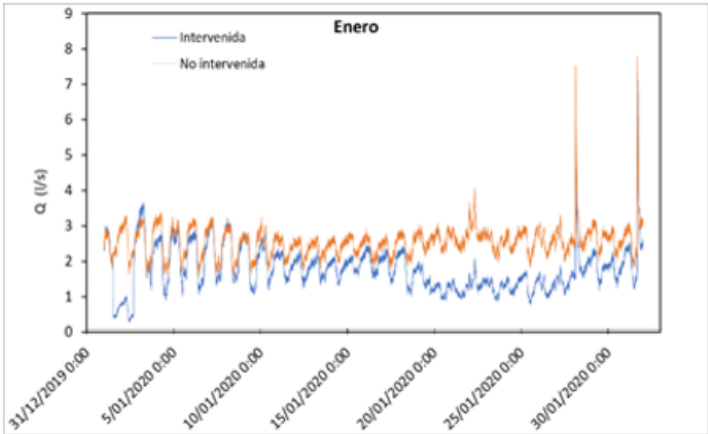


Figura B.6.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, enero 2020

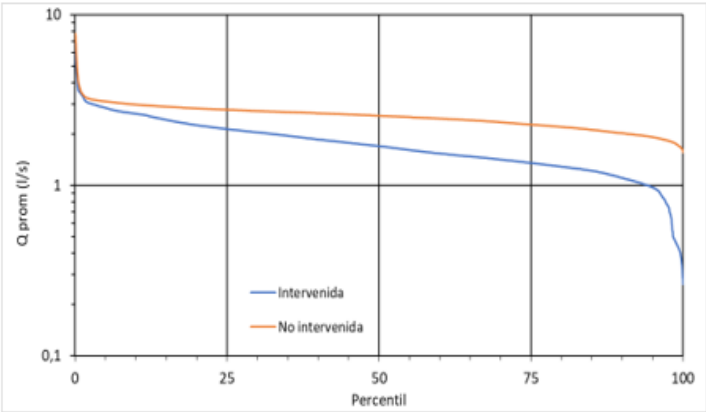


Figura B.7.
Caudal en las cuencas para febrero 2020.

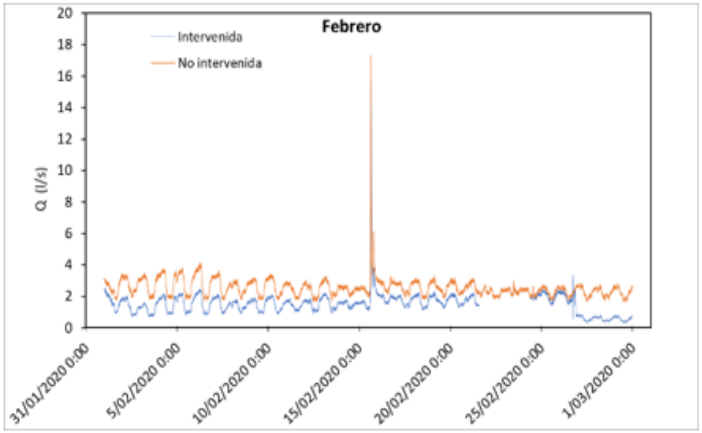


Figura B.8.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, febrero 2020.

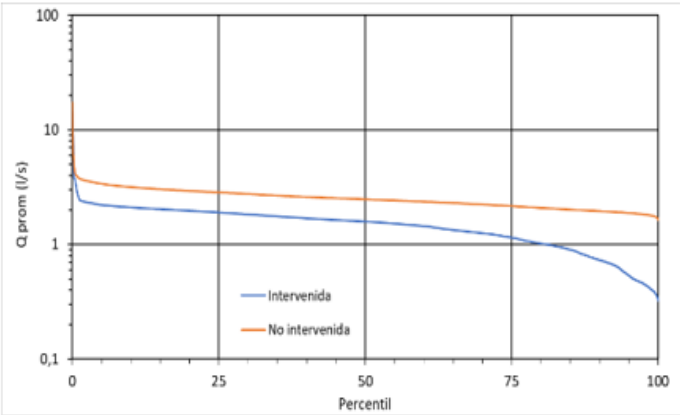


Figura B.9.
Caudal en las cuencas para marzo 2020.

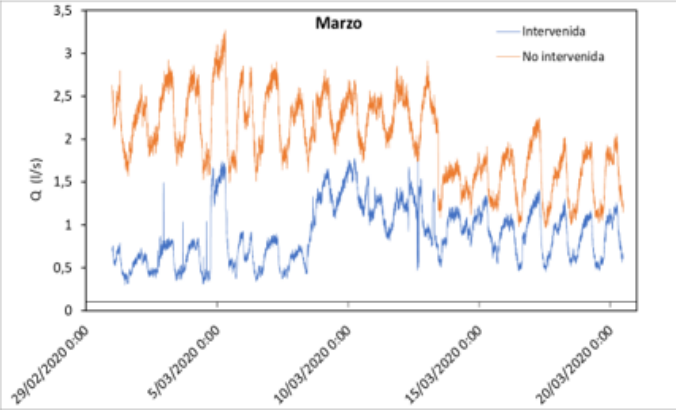


Figura B.10.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, marzo 2020

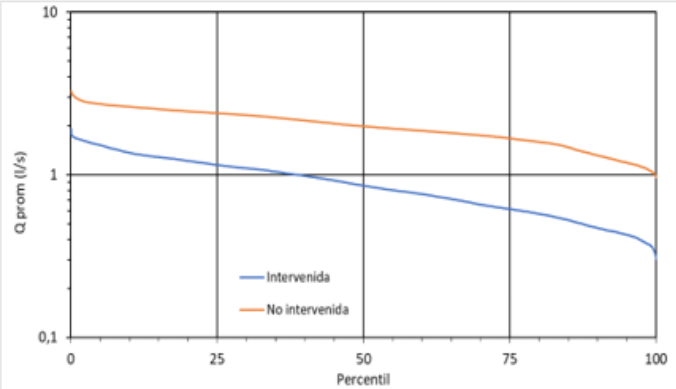


Figura B.11.
Caudal en las cuencas para mayo 2020.

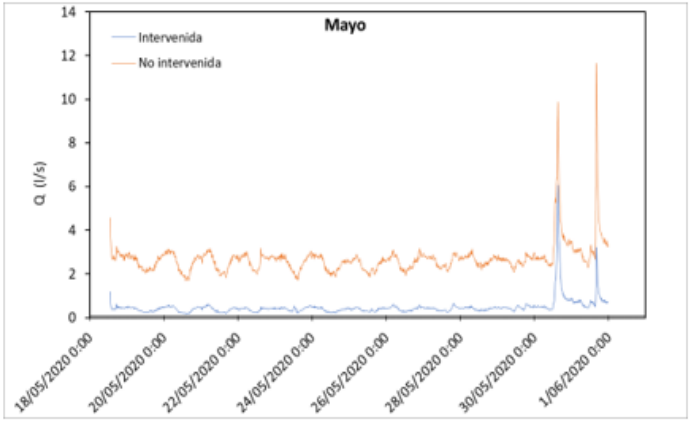


Figura B.12.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, mayo 2020.

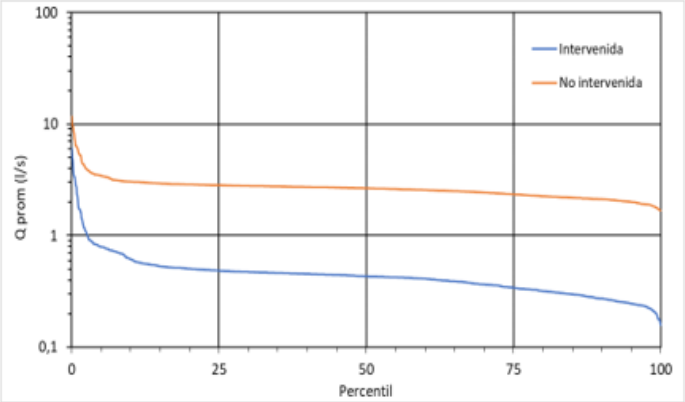


Figura B.13.
Caudal en las cuencas para junio 2020.

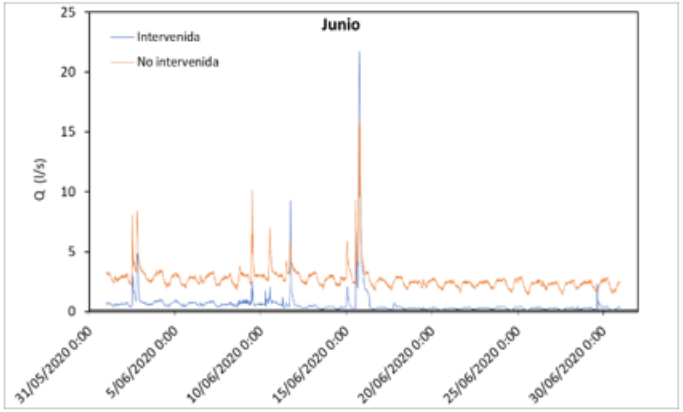


Figura B.14.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, junio 2020

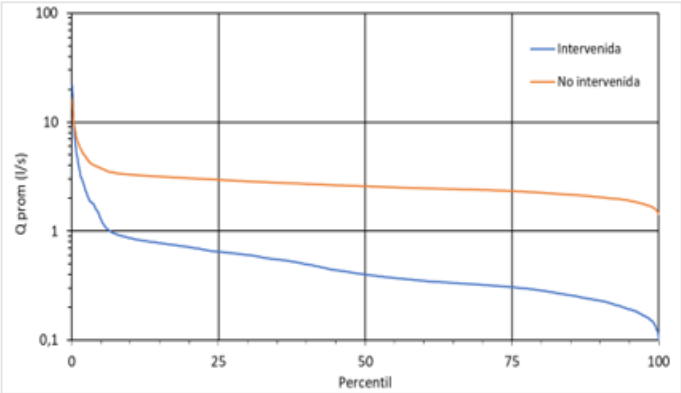


Figura B.15.
Caudal en las cuencas para julio 2020.

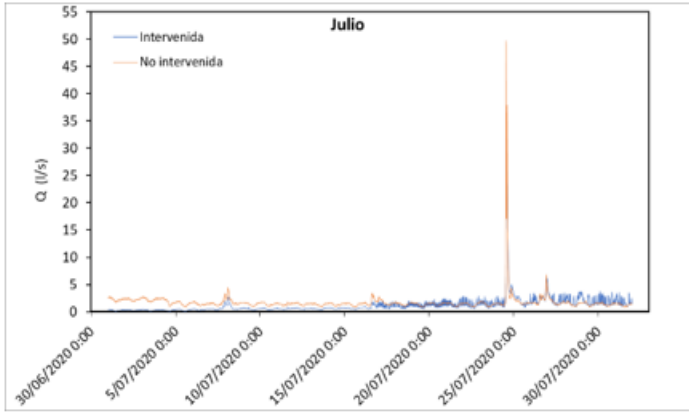


Figura B.16.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, julio 2020.

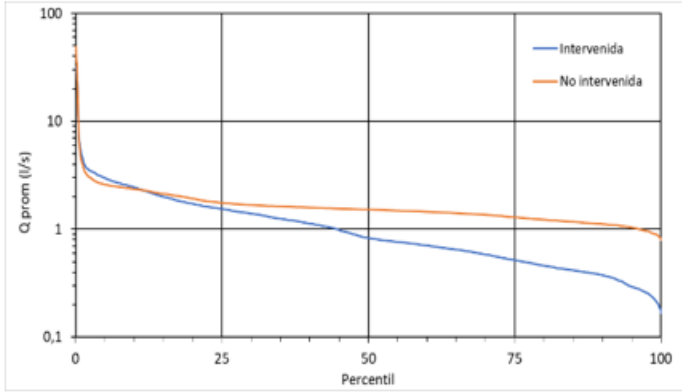


Figura B.17.
Caudal en las cuencas para agosto 2020.

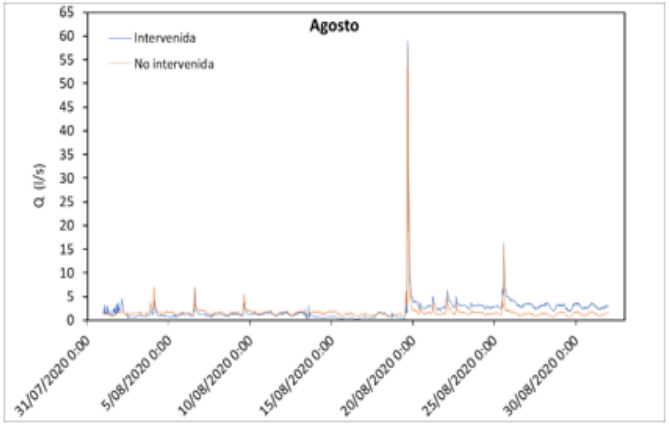


Figura B.18.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, agosto 2020

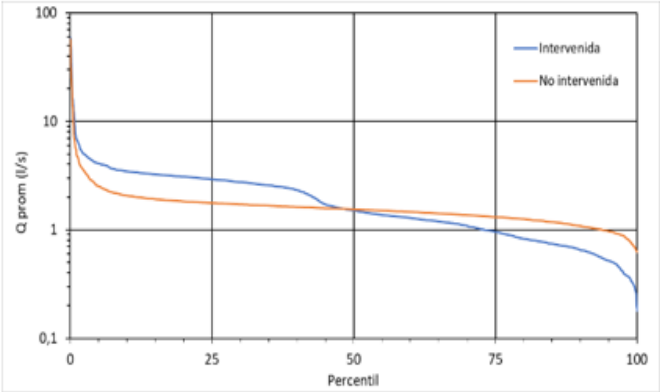


Figura B.19.
Caudal en las cuencas para octubre 2020.

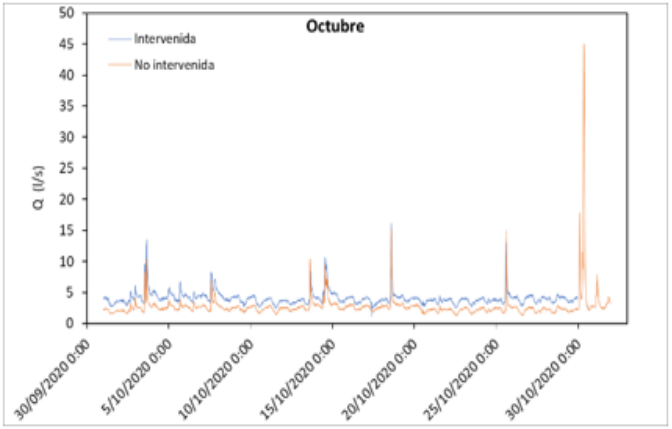
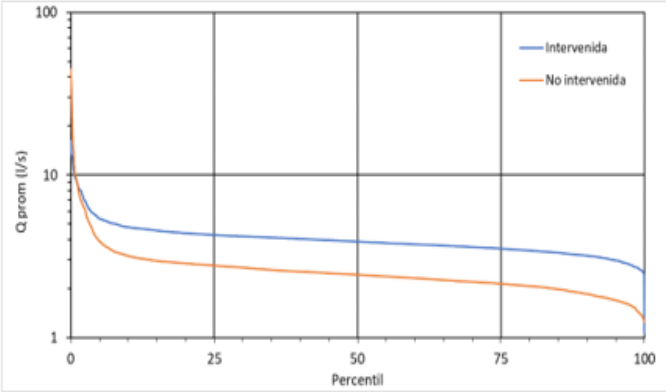


Figura B.20.
Curvas de duración de caudal para determinar DHQ25 y DLQ75, octubre 2020.



Apéndice C

Tabla C.1.

Datos obtenidos a través de los equipos instalados por

Arias & Castellanos, (2020) y Prieto Reyes (2020)

2	Año	Mes	Día	Hora	Caudal (l/s)
411	2019	11	2	10:00:00 a. m.	4,3439993
412	2019	11	2	10:05:00 a. m.	4,2929862
413	2019	11	2	10:10:00 a. m.	4,3439993
414	2019	11	2	10:15:00 a. m.	4,4992137
415	2019	11	2	10:20:00 a. m.	4,4298259
416	2019	11	2	10:25:00 a. m.	4,2845192
417	2019	11	2	10:30:00 a. m.	4,3269548
418	2019	11	2	10:35:00 a. m.	4,3014633
419	2019	11	2	10:40:00 a. m.	4,3953743
420	2019	11	2	10:45:00 a. m.	4,3269548
421	2019	11	2	10:50:00 a. m.	4,2591782
422	2019	11	2	10:55:00 a. m.	4,3867866
423	2019	11	2	11:00:00 a. m.	4,1670318
424	2019	11	2	11:05:00 a. m.	4,335472
425	2019	11	2	11:10:00 a. m.	4,3525366
426	2019	11	2	11:15:00 a. m.	4,3525366
427	2019	11	2	11:20:00 a. m.	4,4211978
428	2019	11	2	11:25:00 a. m.	4,3525366
429	2019	11	2	11:30:00 a. m.	4,3269548
430	2019	11	2	11:35:00 a. m.	4,2507513
431	2019	11	2	11:40:00 a. m.	4,1920427
432	2019	11	2	11:45:00 a. m.	4,3953743
433	2019	11	2	11:50:00 a. m.	4,1920427
434	2019	11	2	11:55:00 a. m.	4,3269548
435	2019	11	2	12:00:00 p. m.	4,0188469
436	2019	11	2	12:05:00 p. m.	4,2760622
437	2019	11	2	12:10:00 p. m.	4,2507513
438	2019	11	2	12:15:00 p. m.	4,2929862
439	2019	11	2	12:20:00 p. m.	4,2003997
440	2019	11	2	12:25:00 p. m.	4,2676152
441	2019	11	2	12:30:00 p. m.	4,361084
442	2019	11	2	12:35:00 p. m.	4,2087666
443	2019	11	2	12:40:00 p. m.	4,2255305
444	2019	11	2	12:45:00 p. m.	4,1007743

Intervenida | No Intervenida | Análisis

Nota: se obtuvieron datos cada 5 minutos de noviembre 2019 a octubre 2020

Tabla C.2.

Datos obtenidos por medio del procesamiento de datos, percentiles (Cuartiles).

1			Intervenida				
2	Número	Cuartil	Fecha	Año	Mes	Día	Q Prom. (l/s)
3	1	0,326797386	30/10/2020	2020	10	30	8,791722
4	2	0,653594771	4/09/2020	2020	9	4	7,651344
5	3	0,980392157	19/08/2020	2020	8	19	6,803036
6	4	1,307189542	5/09/2020	2020	9	5	6,684038
7	5	1,633986928	5/11/2019	2019	11	5	5,641972
8	6	1,960784314	3/10/2020	2020	10	3	5,445708
9	7	2,287581699	14/10/2020	2020	10	14	5,350694
10	8	2,614379085	6/11/2019	2019	11	6	5,336192
11	9	2,941176471	24/07/2020	2020	7	24	5,322858
12	10	3,267973856	7/10/2020	2020	10	7	5,058435
13	11	3,594771242	19/09/2020	2020	9	19	5,050223
14	12	3,921568627	3/11/2019	2019	11	3	4,948483
15	13	4,248366013	31/10/2020	2020	10	31	4,937004
16	14	4,575163399	4/11/2019	2019	11	4	4,783346
17	15	4,901960784	25/08/2020	2020	8	25	4,775184
18	16	5,22875817	18/10/2020	2020	10	18	4,717038
19	17	5,555555556	20/09/2020	2020	9	20	4,665227
20	18	5,882352941	18/09/2020	2020	9	18	4,608515
21	19	6,209150327	5/10/2020	2020	10	5	4,545609
22	20	6,535947712	25/10/2020	2020	10	25	4,543289
23	21	6,862745098	4/10/2020	2020	10	4	4,340342
24	22	7,189542484	18/12/2019	2019	12	18	4,2651
25	23	7,516339869	13/10/2020	2020	10	13	4,249334
26	24	7,843137255	6/10/2020	2020	10	6	4,233478
27	25	8,169934641	8/09/2020	2020	9	8	4,215591
28	26	8,496732026	8/10/2020	2020	10	8	4,183429
29	27	8,823529412	12/09/2020	2020	9	12	4,154009
30	28	9,150326797	15/10/2020	2020	10	15	4,101521
31	29	9,477124183	19/10/2020	2020	10	19	4,005601
32	30	9,803921569	23/09/2020	2020	9	23	3,997702
33	31	10,13071895	21/09/2020	2020	9	21	3,996173
34	32	10,45751634	27/10/2020	2020	10	27	3,977936
35	33	10,78431373	14/09/2020	2020	9	14	3,929987
36	34	11,11111111	28/10/2020	2020	10	28	3,916109
37	35	11,4379085	29/10/2020	2020	10	29	3,883774
38	36	11,76470588	13/09/2020	2020	9	13	3,853887

Nota: En esta tabla se calcular caudales promedio día, para así trabajar los percentiles, ya que al tener datos cada 5 minutos y ser tan extenso nuestro motor computarizado tardaba demasiado en el procesamiento.