

Análisis del efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo. Caso de estudio: Berlín (Santander)

Diana Lucía Prieto Jiménez

Faber Orlando Reyes Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD in Agriculture, Food and Rural Development

Codirector

Arley David Celis Vargas

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2020

Dedicatoria

*A mis padres Erasmo y María Helena, a mis hermanos Fernando y Natalia y a mis sobrinos
Juan Lucas y Sara por su apoyo y amor incondicional durante todo este tiempo.*

Diana Lucía Prieto Jiménez

Después de varios años de esfuerzo y dedicación, me he dado cuenta que he recibido apoyo de muchas personas, que de una u otra forma han ayudado a forjar este sueño de ser ingeniero.

Por eso, hoy quiero dedicarle a cada uno de ellos este último gran logro como estudiante, mi proyecto de grado.

La lista es larga, sin embargo, quiero iniciar esta dedicatoria con mi hermana Ariela, que sin lugar a dudas se la jugó por mí.

A mi tío Hulices por creer en mí y apoyarme en los inicios de esta carrera, cuando todo era incierto.

A mi padre y madre por darme la vida, la crianza que me dieron y los valores que me inculcaron.

A mi tío Omar por su apoyo y consejo

A mis hermanas Jaqueline, Aleyda y Nidia por brindarme apoyo

A mi prima Emilse por creer en este proyecto de vida.

A mis primos Estiven y Anderson por que más que ser familia son amigos de corazón

A los amigos que me deja la universidad, que poco a poco se convirtieron en mi segunda familia.

A Dios por brindarme la oportunidad de ser un ingeniero.

Y finalmente esta dedicatoria es para todos aquellos que tuvieron fe en mí.

Faber Orlando Reyes Rodríguez

Agradecimientos

Al grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental GPH por la colaboración prestada durante el proyecto. A la profesora Isabel Domínguez y al ingeniero Arley Celis por su buena disposición y su guía en el desarrollo del proyecto. A los profesores Ricardo Oviedo, Daniela Rey, Sully Gómez y a todas las personas que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto.

Gracias totales...

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo general	16
1.2 Objetivos específicos	16
2. Marco conceptual	17
2.1 Páramos	17
2.2 Servicios hidrológicos de los páramos	19
2.3 Evaluación de la regulación hídrica	20
2.4 Curva de duración de caudales	21
2.5 Índice de regulación y retención hídrica (irh)	24
2.6 Cuencas pareadas	26
3. Estado del arte	27
4. Metodología	29
4.1 Revisión de literatura	29
4.2 Área de estudio	30
4.3 Reconocimiento e identificación de las unidades hidrográficas	32
4.4 Selección, elaboración e instalación de las estructuras de medición de caudal	33
4.5 Instrumentación y calibración	35

4.6 Calibración de los equipos	36
4.7 Caracterización y cuantificación de extracciones	37
4.8 Manejo y recolección de datos	39
5. Resultados y discusión	41
5.1 Análisis de precipitación y caudales	41
5.2 Curva de duración de caudal	42
5.3 Índice de regulación y retención hídrica	47
5.4 Extracciones	48
6. Conclusiones	50
Referencias bibliográficas	52
Apéndices	56

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Categorías del índice de regulación hídrica	25
Tabla 2 Características morfológicas de las unidades hidrográficas	31
Tabla 3 Caracterización cualitativa de las unidades hidrográficas estudiadas	33
Tabla 4 Caracterización cualitativa de las extracciones encontradas en la Unidad Hidrográfica Intervenida	38

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Parte superior de la curva de duración de caudales	23
Figura 2 Parte inferior de la curva de duración de caudal	24
Figura 3 Ubicación de las unidades hidrográficas	31
Figura 4 Características del diseño de la estructura de adecuación de caudal	34
Figura 5 Ubicación de las extracciones	39
Figura 6 Gráfica de precipitación y caudal	41
Figura 7 Curvas de duración de caudal de las unidades hidrográficas estudiadas	43
Figura 8 Pendiente de las curvas de duración de caudales a escala horaria entre los percentiles 33% y 66%	45
Figura 9 Pendientes de las curvas de duración de caudales a escala diaria entre los percentiles 33% y 66%	46
Figura 10 Diagramas de caja de las extracciones	49

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A Evidencia fotográfica	56
Apéndice B Ubicación de la estación meteorológica y de las estructuras de medición de caudal	62
Apéndice C Caudales de las extracciones	63

Resumen

Título: Análisis del efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo. Caso de estudio: Berlín (Santander)*

Autores:

Diana Lucía Prieto Jiménez**

Faber Orlando Reyes Rodríguez**

Palabras clave: Curva de duración de caudales, páramo, uso del suelo, regulación hídrica

Descripción:

El servicio ecosistémico de abastecimiento de agua prestado por los páramos en Colombia, depende en gran medida del papel que estos tienen como reguladores hídricos. Los cambios o alteraciones a las características naturales de los páramos pueden afectar su capacidad de regulación hídrica, lo que pondría en riesgo el suministro de agua en las poblaciones que dependen de ellos. En este trabajo se analiza el efecto del uso de suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica mediante un enfoque de cuencas pareadas. El caso de estudio son dos unidades hidrográficas, ubicadas en el páramo de Berlín, Santander; en una unidad hidrográfica predomina la vegetación nativa (UH A) y en otra se presenta mayor intervención antrópica (UH B). Se realizó un monitoreo del caudal de dos unidades hidrográficas durante el periodo comprendido entre el 8 de octubre de 2019 y el 4 de enero de 2020, posterior a esto se realizaron curvas de duración de caudales (CDC) para ambas unidades. Al comparar las CDC se evidenció que la unidad hidrológica con vegetación nativa tiene una mejor capacidad de regulación y retención hídrica y que, la mayor parte del tiempo, también presenta un mayor rendimiento que la unidad hidrológica con intervención antrópica. Esto se confirma cuantitativamente mediante el índice de regulación y retención hídrica, que dio como resultado 0.58 catalogado como “baja” para UH A (natural) y 0.30 catalogado como “muy baja” para UH B (intervenida). Los niveles de capacidad de regulación y retención hídrica encontrados en las unidades hidrográficas estudiadas generan alerta, ya que esto indica que si llega a presentarse una temporada de sequía extrema podría haber desabastecimiento de agua.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Isabel

Cristina Domínguez Rivera. Ingeniera Sanitaria, MSc, PhD Codirector: Arley David Celis

Vargas. Ingeniero Civil

Abstract

Title: Analysis of the effect of land use on water retention and regulation capacity in micro basins of the páramo. Case study: Berlín (Santander)*

Author:

Diana Lucía Prieto Jiménez**

Faber Orlando Reyes Rodríguez**

Key words: Flow duration curve, paramo, land use, hydrological regulation

Description:

The ecosystem service of water supply provided by the páramos in Colombia, largely depends on their role as water regulators. Changes or alterations on the natural characteristics of Páramos could affect their capacity for hydrological regulation, which could affect water supply for the populations that depend on them. This work analyzes the effect of land use on retention capacity and hydrological regulation through a paired-catchment method. The case study was developed in two hydrographic units, located in the Berlin páramo, Santander. In one hydrographic unit, native vegetation predominates (UH A) and in another there is greater anthropic intervention (UH B). The streamflow of two hydrographic units was monitored during the period from October 8, 2019 to January 4, 2020, after this, flow duration curves (CDC) were performed for both units. When comparing the CDC it was evidenced that the hydrological unit with native vegetation has a better capacity for regulation and hydrological retention and most of the time, it also has a higher yield than the hydrological unit with anthropic intervention. This was quantitatively confirmed by the hydrological regulation and retention index, which resulted in 0.58 classified as "low" for UH A (natural) and 0.30 classified as "very low" for UH B (intervened). The levels of hydrological regulation and retention capacity found in the hydrographic units studied generate an alert, since this indicates that if a season of extreme drought occurs there could be water shortage.

* Bachelor Thesis

**Faculty of Physics and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Sanitary Engineer, MSc, PhD Codirector: Arley David Celis Vargas. Civil Engineer.

Introducción

Los páramos son ecosistemas que juegan un papel significativo en la retención y regulación hídrica (Melissa & Torres, 2016). Se ubican a una gran altitud sobre el nivel del mar entre la línea de bosque andino y la línea permanente de nieve (Cuello et al., 2010), por lo general entre altitudes de 3200 y 4500 msnm (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005). Estos se encuentran en la zona noroccidental de Sur América, en países como Venezuela, Colombia y Perú. El 49% del total de ecosistemas de páramo que hay en el planeta se encuentran ubicados en Colombia, abarcando un área de aproximadamente 14,434 km², correspondientes al 1.3% de la extensión continental del país. Además, el 70% del suministro de agua en Colombia proviene de los páramos (Castaño Uribe, 2002). Estos porcentajes dan un indicio de la gran dependencia y, por lo tanto, vulnerabilidad de la población ante los cambios en el sistema de regulación de estos ecosistemas.

Estudios anteriores como los realizados por Buytaert et al. (Buytaert, Célleri, et al., 2007; Buytaert, Iñiguez, et al., 2007), Ochoa et al. (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016) y Crespo et al. (Crespo et al., 2010), muestran que los cambios de uso del suelo en el páramo afectan de forma significativa el ciclo hidrológico en las cuencas (Buytaert, Célleri, et al., 2007). En el páramo de Berlín (Santander), gran parte de la vegetación nativa ha sido cambiada por cultivos (Arias, 2017; Puentes, 2017). No obstante, los estudios que muestren o cuantifiquen cómo afectan estos cultivos a los componentes del ciclo hidrológico son escasos, ya que se encontraron solo cinco artículos sobre el tema. Por esta razón, la presente investigación analiza el efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en dos unidades hidrológicas localizadas en el páramo de Berlín, como parte

del proyecto “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 – Colombia)” adelantado por el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH). Este análisis se hará bajo el enfoque metodológico de cuencas pareadas, el cual permite comparar el estado de dos cuencas, en una unidad hidrológica no intervenida (vegetación nativa) y una intervenida (cultivos de cebolla, papa y ganadería extensiva) con el fin de evidenciar la afectación producida por la intervención humana en la capacidad de regulación y retención hídrica en un ecosistema de páramo seco.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar el efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo. Caso de estudio: Berlín (Santander).

1.2 Objetivos específicos

Analizar información de caudales medios diarios del cauce de dos microcuencas con diferente uso del suelo, ubicadas en el páramo de Berlín, Santander.

Estimar las curvas de duración de caudales de dos microcuencas con diferente uso del suelo, ubicadas en el páramo de Berlín, Santander.

Calcular y comparar los índices de retención y regulación hídrica para evaluar la incidencia de los cultivos en el ciclo hidrológico de una de las microcuencas.

2. Marco conceptual

2.1 Páramos

Los Andes tropicales se pueden dividir en cinco tipologías de paisajes: páramo, puna, bosques andinos, valles interandinos y desiertos de montañas, éstos se distinguen entre sí por su temperatura y latitud (Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016). Los páramos son ecosistemas caracterizados por estar a una gran altitud sobre el nivel del mar, comúnmente comprendidos en la región por encima de la línea de bosque andino y bajo la línea permanente de nieve (Cuello et al., 2010). Los páramos se encuentran en la zona noroccidental de Sur América, se ubican desde la sierra nevada de Santa Marta, Colombia hasta la depresión de Huancabamba, Perú. Están presentes en países como Venezuela, Colombia, Perú, Ecuador y Costa Rica, siendo Colombia el país con mayor área de páramos (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005; Vásconez & Hofstede, 2006). El 49% del total de ecosistemas de páramo que hay en el planeta se encuentran ubicados en Colombia, abarcando un área de aproximadamente 14,434 km², correspondientes al

1.3% de la extensión continental del país. Además, el 70% del suministro de agua en Colombia proviene de los páramos (Castaño Uribe, 2002).

En los páramos se da una combinación única de factores como altitud, precipitación y radiación solar, que condicionan de manera drástica su climatología (República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, n.d.). La variación climática anual en estos ecosistemas es muy baja debido a que los páramos están ubicados cerca al Ecuador, otra consecuencia de esto es que la radiación solar es constante durante gran parte del año (Buytaert, Iñiguez, et al., 2007). Según Vásconez and R. Hofstede [3], las altitudes del límite inferior de los páramos varían considerablemente, dependiendo de las características geológicas, climáticas y antrópicas. Por ejemplo, en el Ecuador este límite es 3500 msnm, pero en otros páramos se considera a 2800 msnm. (Vásconez & Hofstede, 2006). Las precipitaciones en el páramo presentan variaciones estacionales y espaciales (Roa-García et al., 2011), la magnitud de éstas es muy variable también, hay páramos con precipitación anual menor a 1,000 mm, mientras muchos otros superan los 3000 mm, independientemente de la precipitación anual de un páramo, su rendimiento hídrico es alto. El alto rendimiento hídrico se debe a que la precipitación no es la única fuente de agua, también se presenta un aporte significativo de precipitación horizontal, donde debido a las bajas temperaturas, las partículas de agua en el aire se condensan y precipitan en la vegetación, que absorbe una parte, mientras otra parte se incorpora por goteo al suelo. Este aporte de agua llega a ser hasta de un 65% de las entradas hídricas. La vegetación en estas zonas tiene capacidad de retención de agua alta y la evapotranspiración es comúnmente baja, lo que se traduce en un buen rendimiento hídrico (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005).

En los páramos el clima no presenta una variación considerable durante el año, lo que muestra que no hay estacionalidad anual, no obstante, hay una gran brecha en las temperaturas medidas durante el día, presentando una estacionalidad diaria. Debido a las extremas condiciones climáticas a las que están sometidas, la flora y la fauna han evolucionado para adaptarse al clima, razón por la cual en estos ecosistemas se encuentran especies únicas, lo que hace de los páramos un componente importante de la biodiversidad del mundo (Vásconez & Hofstede, 2006).

Los suelos del páramo generalmente son formados en áreas volcánicas que tienen una gran cantidad de materia orgánica debido a que las bajas temperaturas retardan su proceso de descomposición, lo que hace que los páramos tengan una gran capacidad de almacenamiento de agua. En los primeros 30 cm de profundidad, el agua ocupa el 61.7% del volumen total del suelo, y es aquí donde se presenta uno de sus principales servicios como regulador hídrico (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005).

2.2 Servicios hidrológicos de los páramos

Los servicios ecosistémicos hidrológicos (SEH) son beneficios que las personas obtienen de un ecosistema y mejoran su bienestar y su calidad de vida, entre estos están los servicios ecosistémicos de soporte, la provisión de agua, la regulación de flujos de agua y la reducción de riesgos por crecientes. Uno de los servicios hidrológicos más importantes ofertados por el ecosistema de páramo es el servicio de regulación y retención hídrica (Arellano Monterrosas & Ruiz Meza, 2018). Esto ocurre porque en estos ecosistemas “la vegetación en general intercepta y retiene agua” (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005). Las temporadas más húmedas en que se presentan eventos de precipitación de gran magnitud comúnmente producen puntos en que los

caudales de un cauce son máximos. Así mismo, en temporadas secas, cuando la precipitación es baja se presentan mínimos en el caudal. Si un ecosistema tiene la capacidad de compensar valores mínimos con valores máximos, es decir amortiguar los caudales muy grandes y disminuir la escasez de agua en temporadas de sequía, se dice que la capacidad de regulación y retención hídrica es buena.

La capacidad de retención y regulación hídrica puede ser influenciada positiva o negativamente por la vegetación cultivada en la zona (García, 2007). El cambio de cobertura vegetal de un páramo, ya sea por uso agrícola o cualquier uso de tipo antrópico, genera perturbaciones en el ciclo del agua; reduce los caudales medios y aumenta los caudales extremos, por lo que se presentan inundaciones y sequías cada vez más fuertes y con mayor frecuencia. También induce aumentos en la temperatura superficial y disminuciones en la humedad del suelo, la evapotranspiración y la nubosidad (Poveda Jaramillo & Mesa Sánchez, 1995). En consecuencia, el páramo es frágil a los cambios en el uso de suelo, ya que, al ser alterada la estructura de suelo, esta no es capaz de recuperarse, perdiendo la capacidad de regulación del ciclo hidrológico (Vásquez & Hofstede, 2006).

2.3 Evaluación de la regulación hídrica

Existen varios métodos para evaluar la regulación hídrica, entre los que se encuentran: el método de curva número, en el que se calcula qué porcentaje de la precipitación se retendrá, se volverá escorrentía superficial y se evapotranspirará (Jullian et al., 2018); el coeficiente de escurrimiento que consiste en una relación entre volúmenes de precipitación y escorrentía (Arellano Monterrosas & Ruiz Meza, 2018); el índice de flujo base, que relaciona el flujo base y

el flujo total de un cauce (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016) y la curva de duración de caudales, que representa la frecuencia de ocurrencia de un caudal (Chereque Morán, 1989). En este trabajo se utilizará este último, la curva de duración de caudales, debido a que es un método cuyas variables son relativamente sencillas de monitorear y aportan información valiosa sobre la regulación hídrica. A continuación, se explica en detalle este método y el enfoque de cuencas pareadas.

2.4 Curva de duración de caudales

La curva de duración de caudales (CDC) o curva de persistencia representa gráficamente los caudales registrados de un cauce, ordenados de forma decreciente de tal modo que cada registro de caudal está correlacionado a un intervalo de tiempo, expresado en porcentaje (Monsalve Sáenz, 1999). Esta curva indica en qué valor porcentual un caudal es igualado o excedido (Chereque Morán, 1989).

La CDC se obtiene ordenando los caudales de forma decreciente, para hacer un análisis de los datos agrupando los caudales en intervalos para definir la frecuencia acumulada de ocurrencia de estos (Franco, 2007). Luego de esto, se grafican los caudales correspondientes a cada intervalo en el eje de las coordenadas y la frecuencia acumulada en el eje de las abscisas; esta gráfica se puede hacer con datos horarios, diarios, anuales, mensuales o estacionales (Monsalve Sáenz, 1999). Por lo que los datos se pueden llevar a cualquier escala temporal en un mismo estudio, dependiendo de las necesidades del proyecto, el nivel de detalle y el tamaño del registro histórico de datos. Por ejemplo, en los anteproyectos de derivación de cauces sin regulación, se usa como

unidad el día, en los de diseño de embalses o hidroeléctricas es suficiente el mes o el año (Fattorelli & Fernández, 2007).

La forma de la CDC suministra información cualitativa acerca del caudal que lleva un cauce durante el tiempo de registro de datos. Una curva con pendiente baja señala que la cuenca es autorregulada, es decir, que los caudales con grandes variaciones no son reiterados en el tiempo, mientras que una curva con pendiente alta indica una mayor frecuencia de caudales altos y bajos (Fattorelli & Fernández, 2007).

Las partes superior e inferior de la curva también dan indicios del comportamiento del cauce. Cuando la parte superior de la curva es convexa (curva 2 de la Figura 1) hay menor cantidad de caudales altos, lo que implicaría que es la cuenca de un río pequeño con crecientes de corta duración, su área de drenaje es pequeña, posiblemente la cuenca está localizada en una zona montañosa, el drenaje es bueno, la retención de agua es mala y la precipitación se presenta en cortos periodos del año. Si la parte superior de la curva es cóncava (curva 1 de la Figura 1) indica una mayor cantidad de caudales altos, afloramientos de agua desfasados, caudales máximos no muy grandes, siendo una curva típica en zonas donde la nieve se derrite y llega al cauce (Monsalve Sáenz, 1999).

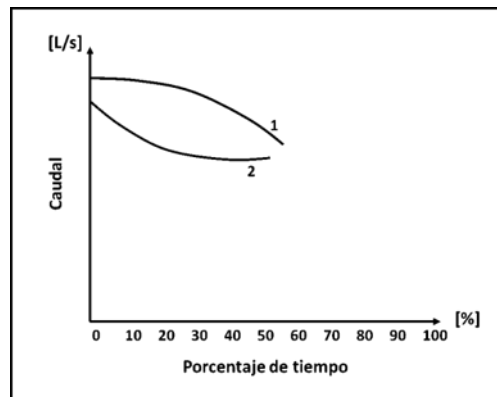


Figura 1 Parte superior de la curva de duración de caudales. Monsalve Sáenz G.

(Monsalve Sáenz, 1999)

Para la parte inferior de la gráfica se presentan tres posibles comportamientos: la curva 1 (Figura 2) indicaría que hay agua subterránea en la cuenca y ésta aporta al caudal, además que tiene baja permeabilidad y buena retención de agua. La curva 3 (Figura 2) indicaría un buen sistema de drenaje superficial, permeabilidad alta y, además, como termina antes del percentil 100, se podría tratar de un río intermitente, es decir, que en época de verano puede secarse completamente y en época de lluvias reaparecer. La curva 2 (Figura 2) presenta un punto intermedio entre las dos anteriores, donde el agua subterránea solo aporta a los caudales bajos, la retención no es tan buena como en la curva 1 y su permeabilidad un poco mayor que esta (Monsalve Sáenz, 1999).

Como se dijo anteriormente, la CDC representa la frecuencia de ocurrencia de los caudales en un cauce, pero esta no evidencia el orden cronológico en que estos ocurren, por lo tanto, no se podría conocer cuando hubo caudales bajos o altos durante el tiempo de registro de datos (Chereque Morán, 1989).

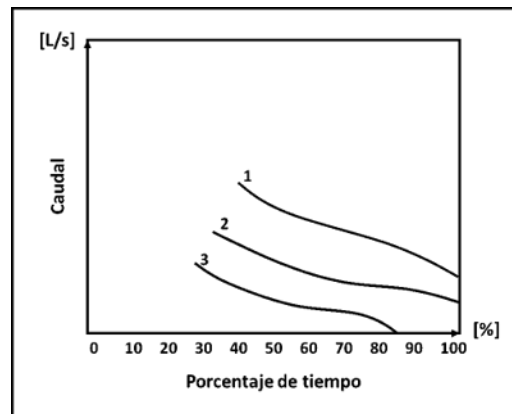


Figura 2 Parte inferior de la curva de duración de caudal. *Monsalve Sáenz G.* (Monsalve Sáenz, 1999)

2.5 Índice de regulación y retención hídrica (IRH)

Este índice fue establecido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y tiene como objetivo caracterizar el régimen de los flujos horizontales de una cuenca relacionado a su regulación hídrica. El índice representa la respuesta de los caudales de un cauce frente a variaciones climáticas o estacionales evidenciando de forma cualitativa la capacidad que tiene una cuenca para retener la humedad y mantener el volumen del cuerpo de agua constante. El índice de retención y regulación hídrica se calcula utilizando la curva de duración de caudales por medio de una relación entre el caudal y el área. El índice se calcula usando la Ecuación 1:

$$IRH = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

Donde V_p es el volumen parcial equivalente al área bajo la línea de caudal medio y V_t es el volumen total equivalente al área bajo la curva de duración de caudal (IDEAM, 2015, 2019).

Los valores de IRH se clasifican en las categorías que aparecen en la Tabla 1:

Tabla 1

Categorías del índice de regulación hídrica

IRH	Categoría
$IRH \leq 0.50$	Muy baja
$0.50 < IRH \leq 0.65$	Baja
$0.65 < IRH \leq 0.75$	Moderada
$0.75 < IRH \leq 0.85$	Alta
$IRH < 8.85$	Muy alta

Nota: IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018.*

http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf

Si se desea estimar los impactos del efecto antrópico sobre la regulación hídrica de una cuenca es recomendable comparar el comportamiento de la cuenca, por ejemplo, comparando la curva de duración de caudales o el índice de regulación hídrica, antes y después de la intervención humana, esto se puede hacer usando enfoques como el de cuencas pareadas, como se explica a continuación.

2.6 Cuencas pareadas

La forma ideal de evaluar el impacto del cambio de uso de suelo en una cuenca es, inicialmente seleccionar un periodo de calibración en el cual la cuenca no ha sufrido alteraciones de ningún tipo, posteriormente se realizan los cambios requeridos y monitorea durante un tiempo determinado. Sin embargo, realizarlo de esta forma resulta poco práctico ya que requiere una gran cantidad de tiempo, una solución a esto es “intercambiar espacio por tiempo” (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016), seleccionando otra cuenca que será la cuenca de control. Al realizar este intercambio hay posibilidades de que la diferencia en el comportamiento hidrológico de las cuencas no se deba totalmente al uso de suelo sino también a características propias de cada cuenca (Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016). Para superar esas limitaciones, el enfoque de cuencas pareadas contribuye a disminuir esta incertidumbre, ya que consiste en un estudio comparativo en que se seleccionan dos o más cuencas con características morfológicas similares tales como área, topografía, pendiente, altura, condiciones climáticas, tipo de suelo, vegetación, y demás. De esta manera, el único factor diferenciador entre estas cuencas sería el tipo de uso que se le da al suelo y en vista de que generalmente los cambios en el uso de suelo se realizaron hace mucho tiempo, se considera que la cuenca es estable. Una vez seleccionadas las cuencas con esas características, se le hace seguimiento a las variables que se requiera evaluar en las dos cuencas, la cuenca de control será la que no esté alterada (Roa-García et al., 2011; Yao et al., 2012).

El enfoque de cuencas pareadas ha sido muy utilizado para evaluar los cambios en el régimen hidrológico causados por la intervención antrópica, se pueden distinguir claramente cuatro categorías: estudios de forestación, donde se altera la vegetación nativa; estudios de

deforestación, donde los ecosistemas con gran cantidad de vegetación son cambiados por pastos; estudios de regeneración, donde se remueve la vegetación antigua y se reemplaza por una del mismo tipo pero más joven; y estudios de conversión forestal, donde la vegetación existente es reemplazada de forma permanente por una de otro tipo (Brown et al., 2005). La categoría en la cual está orientado este proyecto es la de conversión forestal.

3. Estado del arte

Tras la revisión de literatura se encontraron cinco artículos que evalúan la capacidad de retención y regulación hídrica en cuencas de páramo analizando las curvas de duración de caudales. En estos estudios se analizaron cuencas repartidas a lo largo de tres países: Ecuador, Bolivia y Perú. En todos los casos se adoptó el enfoque de cuencas pareadas.

En cuanto a las características morfológicas de las cuencas que se estudiaron en estos artículos, se tiene que Buytaert et al. (Buytaert, Célleri, et al., 2007; Buytaert, Iñiguez, et al., 2007) estudiaron cuatro cuencas con áreas entre 0.63 km² y 2.58 km² y con alturas que oscilan entre 3400 y 3900 msnm; Ochoa et al. (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016) analizaron un rango más grande de áreas, ya que realizaron el estudio para 24 cuencas cuyas áreas estaban entre 0.5 km² y 7.8 km² y alturas entre 2682 msnm y 4840 msnm. Por último, Crespo et al. (Crespo et al., 2010) realizaron su estudio para 7 cuencas con áreas entre 0.63 km² y 5.01 km² y alturas entre 2900 msnm y 3960 msnm. En todos estos estudios se tenían cuencas cuyo uso de suelo se puede clasificar en una o varias de las siguientes

categorías: vegetación natural, cultivos, forestación y pastoreo intensivo o extensivo; por ello los resultados que obtuvieron se clasifican respecto al uso de suelo.

Buytaert et al. (Buytaert, Célleri, et al., 2007; Buytaert, Iñiguez, et al., 2007) y Ochoa et al. (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016) encontraron que los caudales en cuencas con vegetación natural presentan baja variabilidad y escasos picos de caudal, lo que se ve reflejado en el perfil casi plano de las CDC, concluyendo que tienen una capacidad de regulación y retención hídrica muy alta y una respuesta dominada por el flujo base.

Buytaert et al. (Buytaert, Célleri, et al., 2007; Buytaert, Iñiguez, et al., 2007) y Ochoa et al. (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016) coinciden en que, las cuencas cuyo uso predominante es de cultivos muestran una disminución de los caudales bajos mientras que los caudales altos parecen mantenerse. En cuanto al rendimiento, el caudal base disminuye notablemente, también se evidencia que la pendiente de la CDC es mayor que en las cuencas naturales, lo que indica una disminución en la capacidad de regulación y retención hídrica. Todos estos impactos se atribuyen a la alta conductividad hidráulica del suelo cultivado y los drenajes artificiales. Crespo et al. (Crespo et al., 2010) también obtuvieron resultados acerca de los cultivos, pero estos impactos fueron evaluados en combinación con pastoreo intensivo, por lo que se nombraran en esa categoría.

Ochoa et al. (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016) encontraron que las cuencas forestadas con pinos presentan una CDC mucho más inclinada que en la cuenca natural y además que tanto los flujos altos como los flujos bajos se ven bastante disminuidos, esto es confirmado por Buytaert et al. (Buytaert, Célleri, et al., 2007; Buytaert, Iñiguez, et al., 2007) y Crespo et al. (Crespo et al., 2010) al obtener que la

plantación de pinos reduce el rendimiento del agua hasta en un 50%. Estos tres autores coinciden en que esto podría ser causado por la evapotranspiración, ya que plantean que esta es mayor en plantaciones de pino que en la vegetación natural del páramo.

Ochoa et al. (Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016) y Crespo et al. (Crespo et al., 2010) llegaron a las mismas conclusiones en cuanto al pastoreo, ya que según la CDC el pastoreo extensivo no parece generar afectaciones en la pendiente, mientras que, para el caso del pastoreo intensivo se producen picos de caudal más altos, lo que refleja una disminución en la capacidad de regulación hídrica. Adicionalmente Crespo et al. (Crespo et al., 2010) evidenciaron una disminución de los caudales bajos, pero esto podría ser causado por que se analizó el efecto de los cultivos en conjunto con el del pastoreo.

4. Metodología

4.1 Revisión de literatura

Se realizó una revisión de bibliografía en bases de datos (libros, revistas, artículos) y bibliotecas digitales (libros electrónicos), enfocándose en la capacidad de retención y regulación hídrica en ecosistemas de páramo. Los parámetros de búsqueda utilizados fueron: cuencas pareadas, curvas de duración de caudales e índice de regulación y retención hídrica. La información fue buscada en el catálogo bibliográfico de la Universidad Industrial de Santander (UIS). En la búsqueda de artículos se hizo un filtro preliminar por título, resumen y metodología,

luego para la selección final se revisó el artículo completo. Finalmente, de los documentos seleccionados, se extrajo la información de interés para construir el artículo.

4.2 Área de estudio

El páramo de Berlín se encuentra ubicado en el nororiente de Colombia, entre los departamentos de Santander, con un 33.6% de su área, y Norte de Santander, con el 66.4% restante. Berlín hace parte de la Unidad biogeográfica de Santurbán, localizado a una altitud que oscila entre los 2,200 y 4,100 msnm. En cuanto al uso del suelo, en el páramo de Berlín, el 80.58% tiene una cobertura de vegetación nativa (pajonales, herbáceas de páramo y arbustos), lo que corresponde a 35,675 ha. El área apta para uso agrícola es de 1,716 hectáreas, de las cuales 610 están dedicadas al cultivo de cebolla *junca* (CDMB et al., 2008).

Para este estudio se consideraron dos unidades hidrográficas (UH), denominadas A y B. Las UH están ubicadas en el km 50 vía Bucaramanga – Cúcuta, en la vereda Parra Juan Rodríguez. La Figura 3 muestra la ubicación de las dos unidades hidrográficas. En la UH-A predomina la vegetación nativa y en la UH-B predominan los cultivos. Las características de cada unidad se encuentran en la Tabla 2 (Celis, 2019).

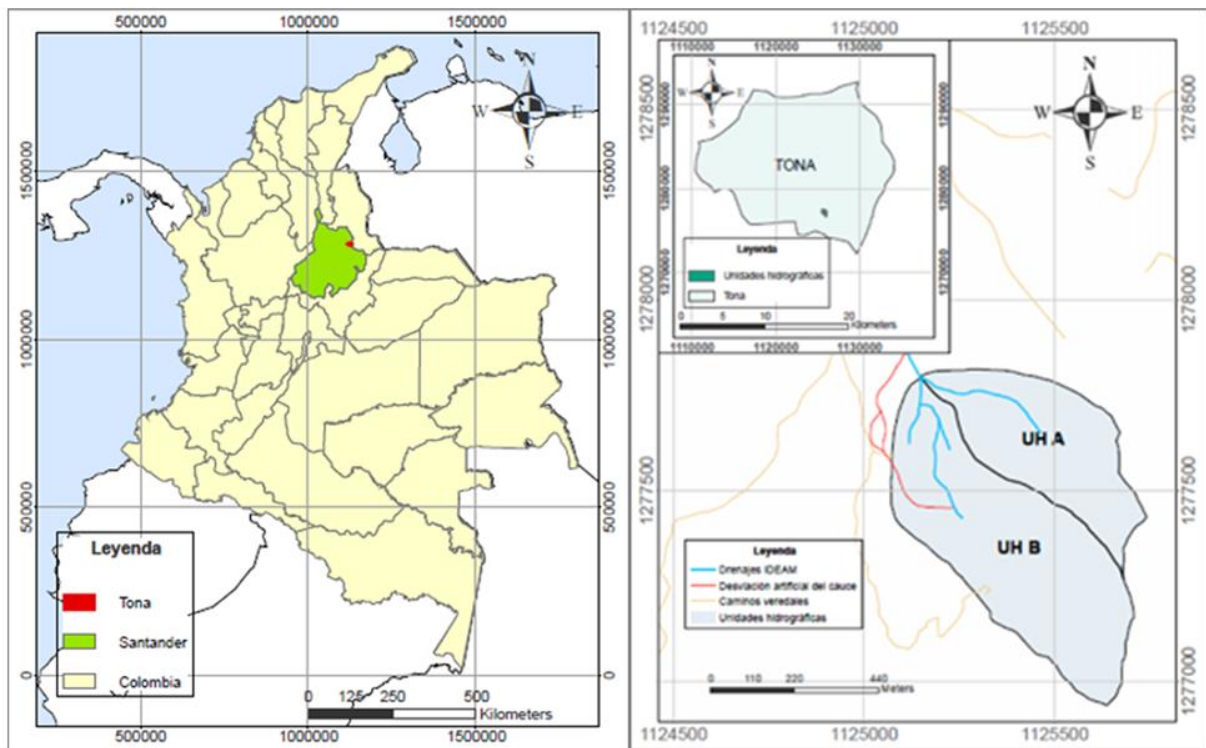


Figura 3 Ubicación de las unidades hidrográficas. *Elaboración propia basado en Celis A.*

(Celis, 2019)

Tabla 2

Características morfológicas de las unidades hidrográficas

UH	Área [ha]	Perímetro [m]	Elevación	Elevación	Longitud Corriente principal [m]	Pendiente cauce [%]
			máxima corriente [msnm]	mínima corriente [msnm]		
A	15.91	2225	3501	3431	447.7	15.6
B	20.88	3275	3565	3431	772.3	17.4

Nota: Celis, A. (2019). 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.

4.3 Reconocimiento e identificación de las unidades hidrográficas

Definida el área estudio (Unidades A y B) se realizó reconocimiento de las UH a través de salidas de campo con el fin de evaluar e identificar algún tipo de intervención humana en las unidades, tales como cultivos, ganadería, salidas de agua (extracciones de agua), residuos, deforestación y tránsito de personas. También se observó el estado de la vegetación nativa del páramo en cada una de las UH.

En las salidas de campo el reconocimiento de las UH se basó en la observación del equipo de trabajo. Para ello, se realizó un recorrido minucioso a lo largo de cada una de las unidades con el fin de caracterizar cualitativamente la intervención en estas y el estado de la vegetación nativa. Como resultado del reconocimiento cualitativo de las UH se pudo identificar la unidad A como no intervenida y la unidad B como intervenida, las características de estas dos se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3**Caracterización cualitativa de las unidades hidrográficas estudiadas**

Unidad hidrográfica A (No intervenida)	Unidad hidrográfica B (Intervenida)
<ul style="list-style-type: none"> •Vegetación nativa: <ul style="list-style-type: none"> - Pajonales - Herbáceas - Frailejones - Plantas de cojín •Pequeños humedales •Sin cultivos •Sin extracciones de agua •Sin ganadería •Sin desechos de basura •Rastros de estiércol de ganado •Poco tránsito de personas y animales domésticos 	<ul style="list-style-type: none"> •Cultivos: <ul style="list-style-type: none"> - Papa - Cebolla - Pasto •Extracciones de agua (salidas de agua): <ul style="list-style-type: none"> - Consumo humano - Uso agrícola y ganadero •Ganadería en pequeña escala •Desechos de basura •Tránsito de personas y animales domésticos

4.4 Selección, elaboración e instalación de las estructuras de medición de caudal

Para el proceso de diseño de las estructuras de medición se realizó inicialmente una caracterización del cauce con el fin de conocer la topografía de las zonas donde serían instaladas (ver Foto A1 -Anexo A). Posterior a esto, se realizó una jornada de aforos volumétricos para obtener un valor estimado del caudal de diseño. Esto se hizo dos semanas antes de la instalación, únicamente en los puntos en que serían instaladas las estructuras. Debido a la magnitud de los caudales, se buscó una estructura sensible a caudales pequeños. Se consideró un vertedero triangular de pared delgada de 30° de abertura, ya que, para un mismo caudal este registra valores de altura mayores que los que registraría un vertedero rectangular (Pérez, 2005). El diseño de la estructura, además del vertedero triangular, incorporó un canal de sección constante,

con una longitud suficiente (120 cm), para normalizar el flujo del agua. La Figura 4 incluye aspectos del diseño de la estructura de medición de caudal realizado como parte de un proyecto de investigación de maestría asociado al presente estudio (Celis, 2019).

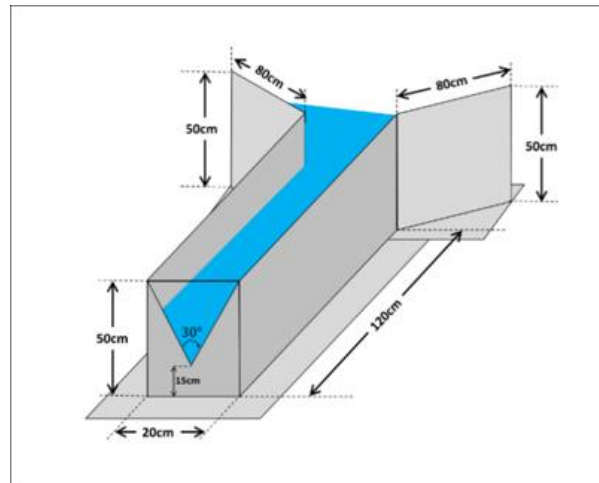


Figura 4 Características del diseño de la estructura de adecuación de caudal.

Elaboración propia basado en Celis A. (Celis, 2019)

La estructura de medición fue fabricada en acrílico, por ser un material resistente a la corrosión, manejable para facilitar su construcción y durable a lo largo del tiempo. La elaboración del canal consistió en corte y ensamble de acrílico, según lo estipulado en el diseño (Celis, 2019). Para el corte del acrílico se utilizó una sierra de mesa y para el ensamble se usó tornillería. Después de ensamblar las piezas de acrílico se impermeabilizaron las juntas del canal con silicona resistente al agua (ver Foto A2 - Anexo A).

Para la instalación de los canales (UH-A y UH-B) fue necesario hacer una adecuación del terreno, de tal forma que los canales quedaran completamente asentados sobre el cauce de cada una de las unidades hidrográficas. Debido al suelo arenoso y la geometría del canal fue necesario

impermeabilizar con plástico la superficie del suelo, para generar empozamiento en la captación de cada uno de los canales y controlar las filtraciones de agua por debajo y en los costados del canal, para garantizar que la mayor parte del flujo transitara por la estructura (ver Foto A3 – Anexo A).

4.5 Instrumentación y calibración

La instrumentación para la determinación de los caudales consistió en la instalación de un medidor de presión hidrostática auto-asistido (diver) en cada canal y un medidor de presión atmosférica (barodiver). Cada diver se instaló sumergido en el agua dentro de cada canal, introducido dentro de un tubo de PVC con orificios, para asegurar una posición vertical y la captura de mediciones siempre en el mismo punto, es decir, sin ser arrastrados por la corriente. Los tubos que protegen los diver fueron unidos al fondo del canal con una silicona resistente al agua y en la parte superior se dispuso una tapa a la cual fueron anclados mediante un perno con argolla (ver Foto A4 – Anexo A). Esto permite que la punta del diver, donde está localizado el sensor, esté exactamente a cinco centímetros del fondo del canal, para evitar que toque el fondo del canal y marque valores de presión erróneos debido a la acumulación de sedimentos.

Para monitorear la presión atmosférica se instaló un baro diver a 6 metros de los canales. Este baro diver está protegido por un tubo PVC que tiene la misma configuración de los tubos que protegen los diver de los canales. La única diferencia es que el barodiver también tiene una tapa en la parte inferior. El baro diver se apoya en un tubo metálico que está empotrado en el suelo. Los dos diver y el barodiver están programados para registrar la presión de agua y la atmosférica cada cinco minutos.

Para el monitoreo de precipitación se instaló una estación meteorológica (Watchdog 2900 ET) que además de medir precipitación, medía otras variables como velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar, temperatura, entre otras. Esta se encuentra apoyada en un tubo metálico que esta empotrado en el suelo y también fue programada para registrar datos cada cinco minutos. La ubicación de los canales y de la estación meteorológica se muestra en el mapa del Anexo B.

4.6 Calibración de los equipos

Para el proceso de calibración de los diver, se hicieron 5 aforos volumétricos cada 45 minutos a partir de las 8 de la mañana, esto se hacía con una periodicidad quincenal durante el tiempo de monitoreo, midiendo el volumen de agua que pasa por el vertedero de cada canal en un determinado tiempo. Se tomó la hora en que hizo cada aforo, luego se extrajeron los datos de los diver para las horas en que se midió caudal y adicionalmente se midió el nivel del agua para rectificar con la información de los diver. Los datos de presión suministrada por los diver en kilopascales, fueron convertidos a centímetros columna de agua. Posteriormente, para hallar la altura del agua en el canal se hizo la diferencia de entre los datos del baro diver y del diver respectivo en cada canal y se sumaron los cinco centímetros de distancia entre la punta del diver y el fondo de cada canal. Con estas alturas y con los caudales medidos se encontró la constante μ para el vertedero triangular (ecuación 2):

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu h^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Donde Q es el caudal en $\frac{m^3}{s}$, g es la aceleración de la gravedad en $\frac{m}{s^2}$, θ es el ángulo de abertura del vertedero en grados, h es la altura en m del agua sobre la cresta del vertedero y μ es una constante adimensional del vertedero (Sotelo Avila, 1991). Las constantes μ para la ecuación de vertedero de cada canal dieron como resultado 1.668 y 1.593 para la UH-A y UH-B.

4.7 Caracterización y cuantificación de extracciones

La caracterización de extracciones, salidas de agua para usos domésticos y productivos realizadas por diferentes pobladores de la zona, se realizó por medio de salidas de campo. En estas salidas se identificaron 3 extracciones puntuales que fueron nombradas E1, E2 y E3, todas ubicadas en la UH-B como se muestra en la Figura 5. La extracción E1 es la más cercana a la cabecera de UH B, mediante las salidas de campo se identificó que esta extracción no capta agua de forma constante. La extracción desemboca nuevamente en el cauce principal unos metros aguas abajo. La extracción E3 es la más cercana al cierre de UH B en comparación con E1 y E2, el flujo de E3 se considera variable en el tiempo puesto depende del consumo de la población aguas abajo (ver Fotos A5 – Anexo A). Las características de estas tres se encuentran sintetizadas en la Tabla 4.

Tabla 4

Caracterización cualitativa de las extracciones encontradas en la Unidad Hidrográfica

Intervenida

	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>
<i>Tipo de extracción</i>	Dique artesanal del que sale una manguera	Desviación artificial del cauce mediante zanja	Dique artesanal del que salen dos mangueras
<i>Diámetro [Pulgadas]</i>	2	No aplica	2
<i>Material</i>	Polietileno	No aplica	Polietileno
<i>Uso</i>	Riego de cultivos	Consumo humano, agrícola, pecuario o ganadero	Consumo humano, agrícola, pecuario o ganadero

Todas las extracciones se aforaron usando el método volumétrico, con un recipiente de 30 L, una jarra de 5 L, una probeta de 1 L y un cronómetro. Se utilizaron dos métodos para hacer los aforos: para las extracciones E1 y E3 se buscaron las uniones de las mangueras, se separaron durante el tiempo de realización del aforo y luego se volvieron a unir, como estaban originalmente; para la extracción E2 se hizo artesanalmente un vertedero lateral y se impidió el paso del agua unos centímetros más delante de este, con el fin de represarla y que saliera solamente por el vertedero (ver Foto A6 – Anexo A). Una vez terminados los aforos se restableció el paso del agua por la zanja original y se tapó el vertedero lateral.

Las mediciones de caudal en estas extracciones se hicieron cuatro días (1, 3, 4 y 5 de septiembre de 2019), cada dos horas, entre las ocho de la mañana y las dos de la tarde, resultando un total de 4 mediciones por día por cada extracción. En cada medición se tomaron 5 datos de caudal, con el objeto de disminuir la incertidumbre del valor medido. No se realizó un mayor

número de aforos porque esto generaba molestias a los usuarios de las extracciones, asociadas las interrupciones del flujo y alteraciones de la calidad del agua durante las mediciones.

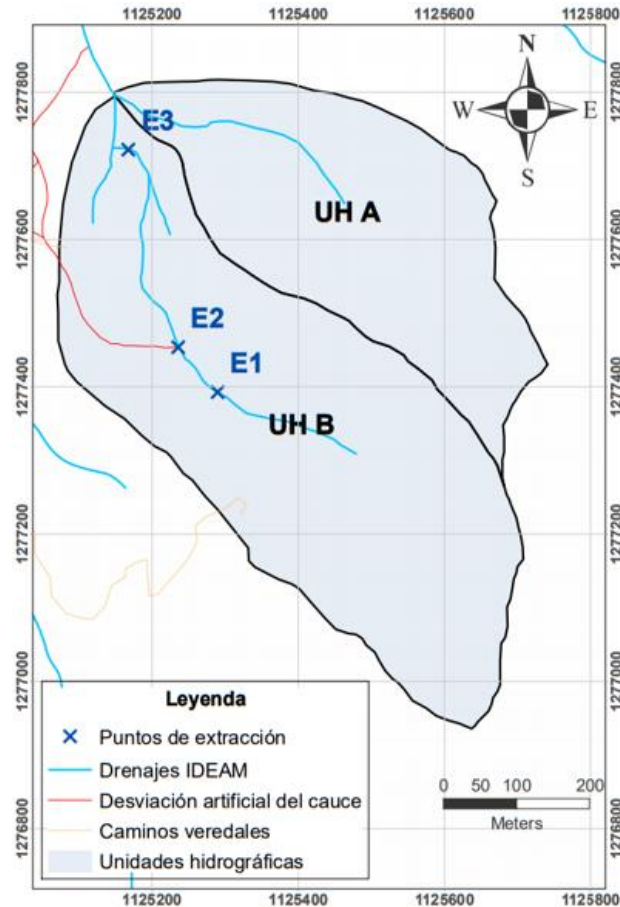


Figura 5 Ubicación de las extracciones. Elaboración propia basado en Celis A.(Celis, 2019)

4.8 Manejo y recolección de datos

Una vez calibrados los diver, la medición de datos de presión inició el 8 de octubre de 2019 y terminó el 4 de enero de 2020, completando un tiempo de monitoreo de 89 días, los cuales se suponen 50 días de temporada húmeda y 39 días de temporada seca. Los equipos fueron

programados para realizar mediciones en intervalos de cinco minutos. Se realizaron visitas cada quince días para recolectar los datos, realizar calibración y remover los sedimentos acumulados en los dos canales.

Con los datos de presión de los diver y la ecuación del vertedero de cada canal se calculó el caudal medio diario promediando los datos obtenidos cada cinco minutos durante cada día. Estos caudales fueron empleados para construir la curva de duración de caudales mediante un análisis de frecuencias y posteriormente se calculó el índice de retención y regulación hídrica por medio de una relación de áreas.

Para la cuantificación de extracciones, los datos de caudal se ordenaron por extracción y por día para evaluar el comportamiento de las extracciones durante el día y se realizaron gráficas de caudal en el eje de las ordenadas contra tiempo en el eje de las abscisas. Adicionalmente, con la totalidad de datos recolectados de caudal para cada extracción, se hicieron diagramas de caja y de bigotes para evidenciar la forma de distribución de los datos e identificar los valores atípicos.

Por último, se descargaron datos de precipitación de las estaciones pluviométricas que fueron instaladas previamente en la zona, para evaluar la respuesta de las unidades hidrográficas estudiadas ante eventos de lluvia.

5. Resultados y discusión

5.1 Análisis de precipitación y caudales

Los registros de precipitación se realizaron a partir del 8 de octubre de 2019 y finalizaron el 4 de enero de 2020, de estos registros se aprecia que las primeras siete semanas de monitoreo hubo precipitaciones frecuentemente mientras que a partir de la séptima semana hubo una tendencia marcada de sequía como se muestra en la Figura 6.

En cuanto a los registros de caudales es evidente la respuesta inmediata de UH B a las precipitaciones, con cada evento de lluvia esta sobrepasa los valores de caudal de UH A, también se observa que durante las semanas de sequía los caudales de UH B siempre son menores que los de UH A (ver Figura 6), lo que refleja un comportamiento más amortiguado en UH A.

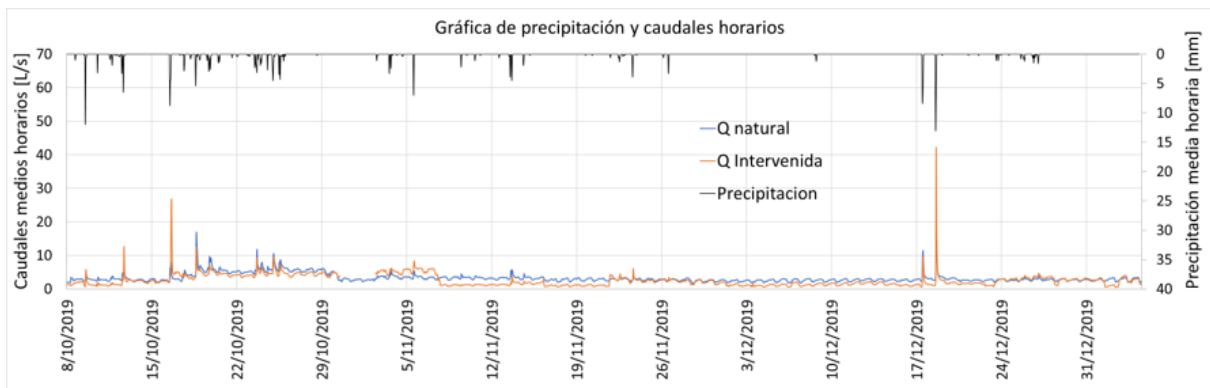


Figura 6 Gráfica de precipitación y caudal.

5.2 Curva de duración de caudal

Las curvas de duración de caudal se hicieron en una escala temporal diaria, horaria y cada cinco minutos para observar sus tendencias. Cuando se realizó la curva a escala diaria se perdían detalles de picos de caudal ocurridos durante el día; sin embargo, debido a que la capacidad de regulación y retención hídrica depende del volumen de agua acumulada por la cuenca, estos picos no representarían gran diferencia en la curva de duración de caudal si esta se realiza para un tiempo de monitoreo mayor. Al realizar la curva con datos cada cinco minutos el tratamiento de la información se dificultó bastante debido al volumen de datos que de los que se disponía y además no presentó diferencias significativas con los detalles que aportaba una escala horaria. Por estas razones y por el corto tiempo de monitoreo que se tenía se decidió analizar la curva en una escala horaria para apreciar los detalles de caudal. En la Figura 7 se muestran las curvas de duración de caudales en escala horaria de las dos unidades hidrográficas estudiadas.

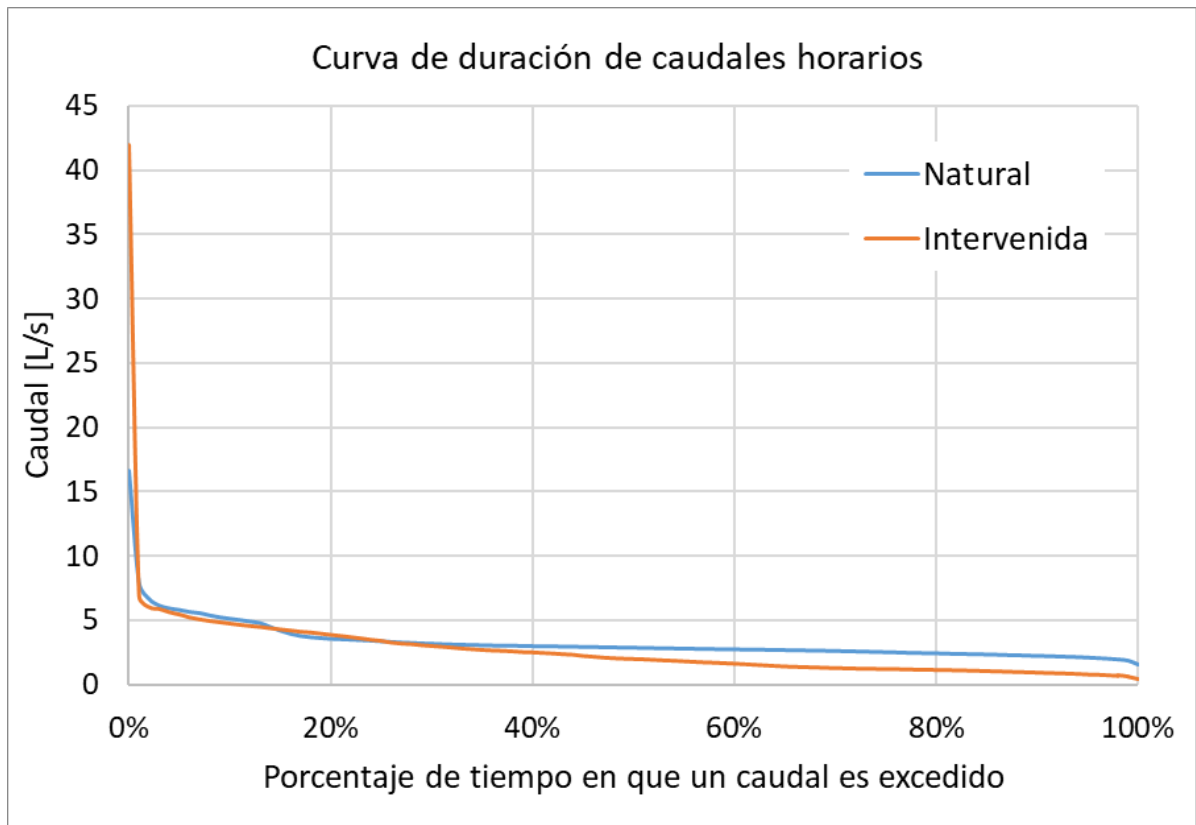


Figura 7 Curvas de duración de caudal de las unidades hidrográficas estudiadas.

Analizando gráficamente el comportamiento de las curvas, se puede observar que el extremo superior tiene forma convexa y que esto sucede para las dos unidades hidrográficas. Según Monsalve Sáenz (Monsalve Sáenz, 1999), esta forma indica que se presenta una menor cantidad de caudales altos, por lo que podría tratarse de un río pequeño cuyas crecientes son de corta duración. Esta afirmación concuerda con los caudales monitoreados en las dos unidades hidrográficas, donde se puede ver que los picos en los caudales duran poco tiempo (entre 3 y 6 horas). El extremo inferior de ambas curvas tiene una tendencia cóncava. Sin embargo, la curva de la unidad hidrográfica natural (UH A) termina más arriba que la otra curva (UH B). Esto

indica que la retención de agua en UH A es mayor que en UH B (Monsalve Sáenz, 1999). (ver Figura 8).

Ahora, el análisis de las pendientes de las curvas se puede observar que UH A tiene una menor inclinación que UH B, lo que se traduce en un mayor amortiguamiento de caudales y una mejor capacidad de almacenamiento en UH A. Una estimación cuantitativa de esta inclinación se puede realizar calculando la pendiente entre los percentiles 33% y 66%, criterio utilizado frecuentemente por varios autores para evaluar regulación hídrica (Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016). De esta manera, se encontró que para las UH A y UH B se tienen valores de pendientes de -1.2779 y -4.308, respectivamente, como se muestra en la figura 8. Estos valores confirman que UH A presenta una mejor capacidad de regulación y retención hídrica que UH B.

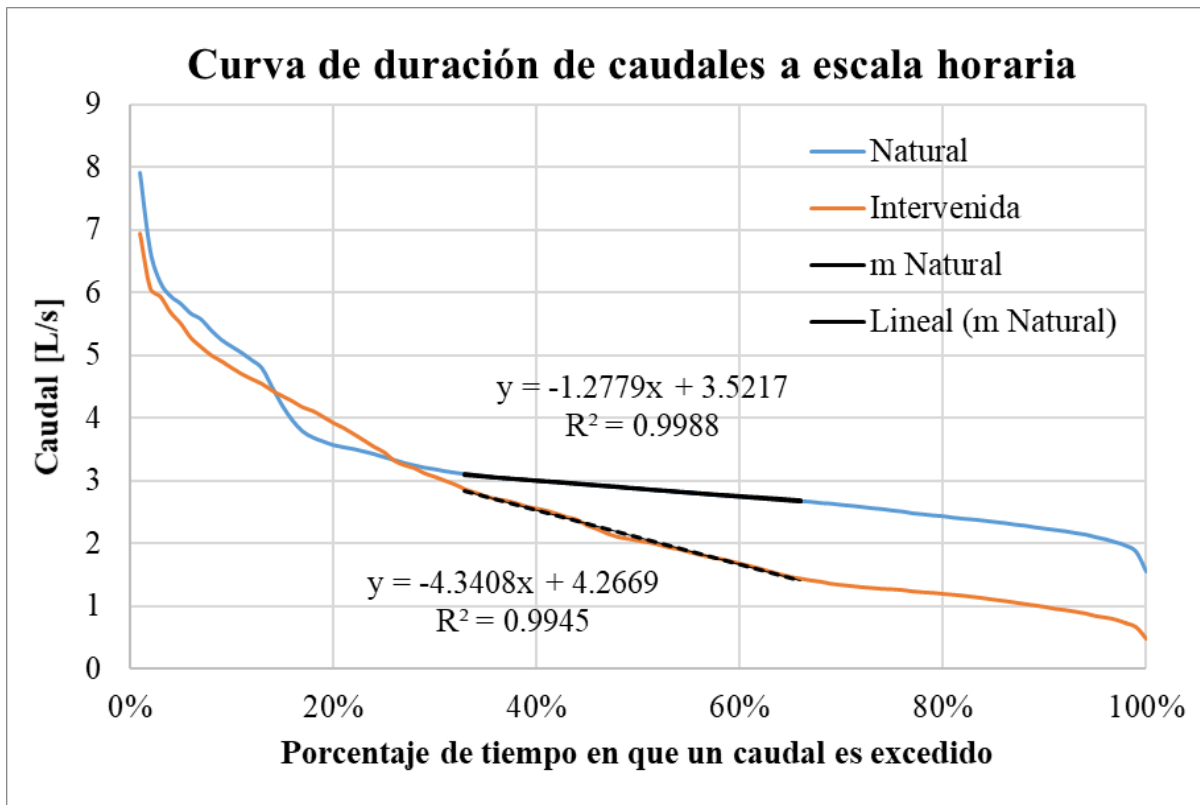


Figura 8 Pendiente de las curvas de duración de caudales a escala horaria entre los percentiles 33% y 66%.

En la figura 9 se muestra la curva de duración de caudales a una escala diaria donde se aprecia que las tendencias de las pendientes se mantienen respecto a la curva a escala horaria, por lo tanto, la comparación de las pendientes se podría realizar a ambas escalas dando valores cualitativos iguales en cuanto la capacidad de regulación y retención hídrica, sin embargo, una comparación cuantitativa de las pendientes muestra que estas varían levemente respecto a las pendientes calculadas en la curva a escala horaria, siendo 1.363 y 3.834 para UH A y UH B respectivamente para la curva a escala diaria. Otro factor que se observa en la curva a escala diaria es que se pierden detalles de los extremos, que son apreciables en la curva a escala horaria.

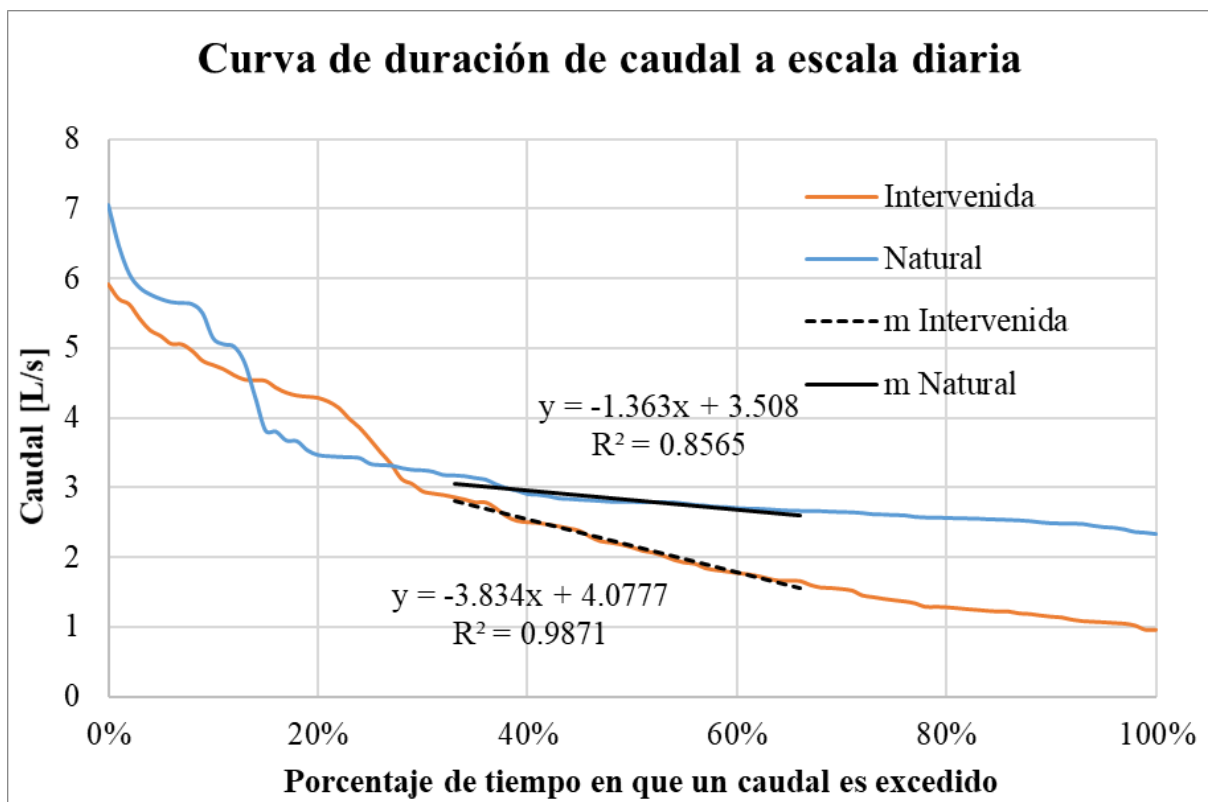


Figura 9 Pendientes de las curvas de duración de caudales a escala diaria entre los percentiles 33% y 66%.

Otro elemento que por inspección visual se hace notorio, es que la mayor parte del tiempo la curva de UH A está por encima de la curva de UH B, lo que indica que los caudales de UH A son mayores, y debido a que la precipitación es considerada igual en ambas unidades hidrográficas, se puede afirmar que UH A presenta un mayor rendimiento hídrico que UH B (Roa-García et al., 2011). La diferencia entre los caudales monitoreados podría ser causada mayormente por las extracciones, más que por los otros tipos de intervención antrópica (cultivos, ganadería, etc.), ya que durante la caracterización de las unidades hidrográficas fue evidente la

disminución del caudal después de las extracciones, incluso algunas extraían casi la totalidad del caudal.

5.3 Índice de regulación y retención hídrica

El índice de regulación y retención hídrica es un valor adimensional que debe estar entre cero y uno, donde uno indica una muy alta capacidad de regulación y retención hídrica y cero una muy baja (IDEAM, 2019). Para las unidades hidrográficas estudiadas estos valores dieron 0.58 y 0.30 para UH A y UH B, respectivamente. Según la clasificación realizada por el IDEAM, UH A está catalogada con una capacidad de retención y regulación hídrica “baja” mientras que UH B se encuentra en la categoría de “muy baja”. Estos resultados concuerdan con la revisión de literatura, ya que en los estudios encontrados (Buytaert, Céleri, et al., 2007; Buytaert, Iñiguez, et al., 2007; Crespo et al., 2010; Ochoa-Tocachi, Buytaert, & De Bièvre, 2016; Ochoa-Tocachi, Buytaert, De Bièvre, et al., 2016), las cuencas con vegetación nativa presentaron una mejor capacidad de retención y regulación hídrica que las cuencas con intervención antrópica.

Las unidades hidrográficas estudiadas hacen parte de la microcuenca del río Jordán, perteneciente a la cuenca del río Chitagá (CDMB et al., 2008), el cual, según el IDEAM tiene una categoría de regulación hídrica “moderada”, con un valor de IRH de 0.71. Adicionalmente, toda la zona hidrográfica del río Arauca (zona a la cual pertenece la cuenca del río Chitagá) está en la categoría de “moderado” (IDEAM, 2019). De acuerdo a lo anterior y aunque la regulación hídrica de UHA y UHB no guarde una dependencia muy marcada con respecto a la regulación hídrica de sus microcuencas y cuencas subsecuentes a su ramificación hídrica (en este caso el río

Jordán y río Chitagá) da un indicio de la capacidad de regulación hídrica que podrían tener las unidades hidrográficas del presente estudio.

Sin embargo, existen microcuencas del páramo de Santurbán como el río Pamplonita y el río Zulia, pertenecientes a la zona hidrográfica del río Catatumbo, que tienen una categoría de regulación y de retención hídrica “bajo” (CORPONOR, 2009; IDEAM, 2019). Por tanto, los resultados obtenidos para UH A y UH B no se encuentran alejados del panorama hídrico de Santurbán, puesto que la capacidad de retención y regulación hídrica de UH A se encuentra en la misma categoría de algunas de sus microcuencas. En el caso de UH B que su capacidad de regulación y retención hídrica es “muy baja” es debido al nivel de intervención antrópica presentado en esta, como se analizó anteriormente. En general la incertidumbre que se genera con la categorización hídrica de UH A y UH B gira entorno al corto tiempo de monitoreo, ya que un registro así de corto no logra monitorear las temporadas climáticas que se presentan en un año (época seca y lluviosa), sería recomendable realizar un monitoreo de al menos un año para tener registro de estas variaciones.

5.4 Extracciones

Tras analizar los caudales de extracciones no se encontró un patrón o tendencia en que estas ocurren. En la Tabla C1 del Anexo C se puede ver el registro de los caudales medidos en diferentes horas del día. Una revisión detallada de estos valores muestra su alta variabilidad, por lo cual se decidió realizar diagramas de cajas por extracción para analizar gráficamente la distribución de los datos (ver Figura 10).

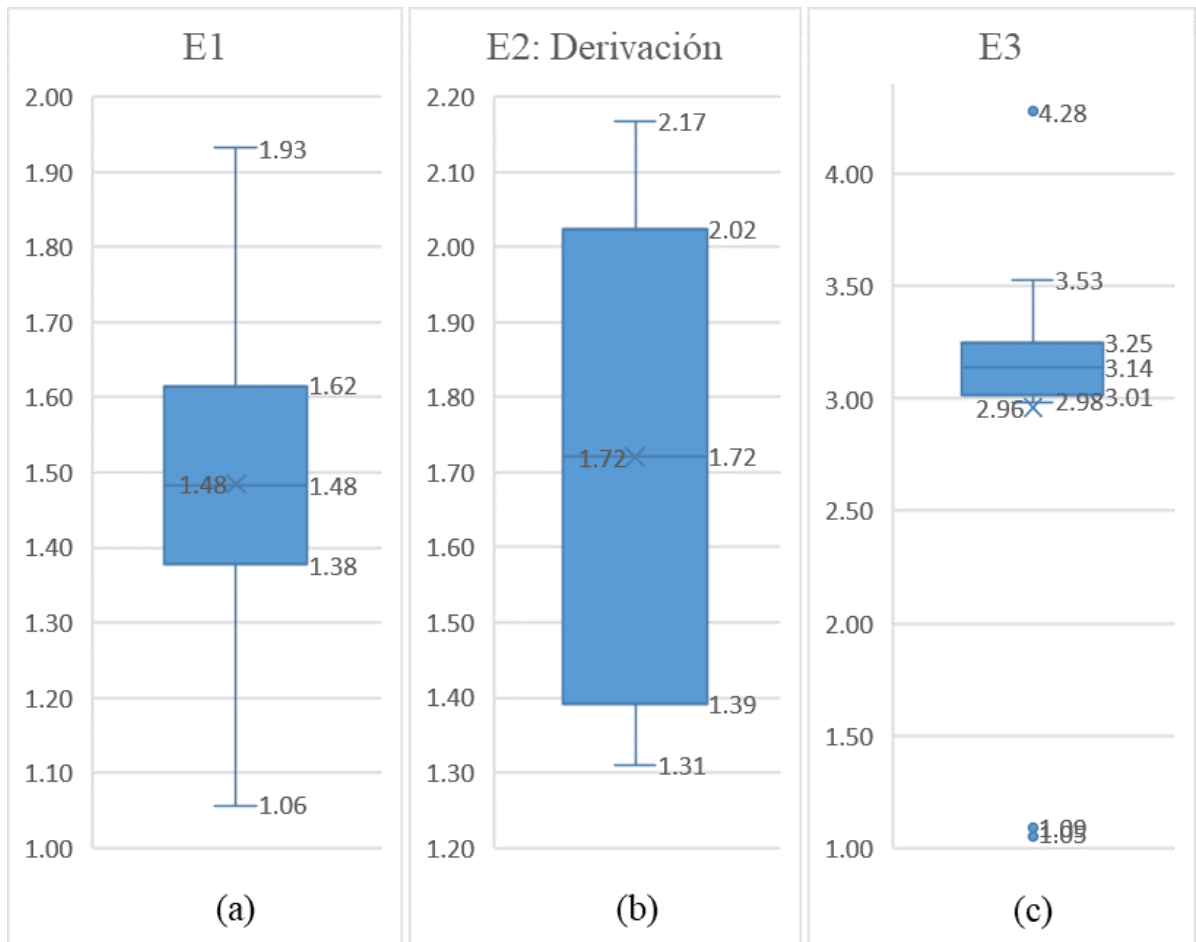


Figura 10 Diagramas de caja de las extracciones.

La principal razón por la que los caudales de las extracciones muestran un comportamiento tan impredecible es que estas son para consumo doméstico y agropecuario. Por lo tanto, no es constante, ya que durante el día hay franjas horarias donde se presenta mayor consumo, incluso durante el año hay temporadas donde el consumo aumenta, esto está sujeto a la rutina de las personas en la zona. Otro factor que influye en este comportamiento es que las extracciones son realizadas mediante mangueras, por lo tanto, son susceptibles a obstruirse con hojas o sedimentos presentes en el cauce, disminuyendo así el caudal. Esto último se evidenció en la manguera 1 de la extracción 3, donde el 5 de septiembre en la tercera ronda de medición el

caudal medido aumentó de 0.34 L/s a 2.63 L/s por limpieza y mantenimiento hecha por los pobladores de la zona, lo que representó un aumento de 773% en el caudal, esto una noción de lo cambiantes que pueden ser estos valores. De modo que se tiene cierta incertidumbre acerca del valor real del caudal extraído debido a que este estudio analizó una cantidad muy limitada de datos de caudales durante algunos días de una semana en concreto. Por lo tanto, realizar un monitoreo continuo, que no es viable en este caso, mejoraría la comprensión de estos flujos.

6. Conclusiones

En el páramo de Berlín, parte de la vegetación nativa ha sido reemplazada por cultivos y ganadería lo que podría causar un cambio en los componentes del ciclo hidrológico (Buytaert, Célleri, et al., 2007; Puentes, 2017). Por lo cual en este estudio se evaluaron los efectos del cambio en el uso del suelo sobre la capacidad de regulación y retención hídrica de dos unidades hidrográficas en ecosistema de páramo mediante el análisis comparativo de las curvas de duración de caudales obtenidas para cada una de estas unidades hidrográficas y, un indicador derivado de las mismas (IRH), esto se realizó monitoreando las unidades hidrográficas durante el periodo comprendido entre el 8 de octubre de 2019 y el 4 de enero de 2020.

Para realizar el análisis gráfico de las curvas de duración de caudales (CDC) se calculó la pendiente entre los percentiles 33% y 66% mediante una regresión lineal, donde se puede observar la marcada diferencia de pendientes entre las dos unidades de estudio, teniendo -1.2779 y -4.308 para UH A y UH B respectivamente, siendo 3 veces mayor la pendiente de UH B; también se observa que la CDC de UH B está por debajo de la CDC de UH A. Del análisis

cuantitativo se tiene que los índices de retención y regulación hídrica (IRH) de las unidades dieron 0.58 para UH A y 0.30 para UH B, clasificándolas como baja y muy baja respectivamente. Estos resultados sugieren que la intervención antrópica afecta negativamente la capacidad de retención y regulación hídrica en la cuenca intervenida, disminuyendo esta capacidad respecto a su par no intervenido, esto es coincidente con estudios realizados sobre el tema.

Este tipo de estudios, donde se aplica el método de cuencas pareadas, representa una ventaja en comparación con los métodos convencionales de evaluación de cambios en el uso de suelo, ya que no se requiere monitorear las fases de pretratamiento, tratamiento y post tratamiento de las cuencas, lo que disminuye sustancialmente el tiempo de monitoreo. Esto permitió realizar la comparación de las unidades hidrográficas en un periodo corto de tiempo. No obstante, un periodo de monitoreo mayor podría haber aportado resultados más confiables acerca de la capacidad de regulación y retención hídrica de las unidades, por lo que recomienda que para futuros estudios se monitoree durante al menos un año para tener registro las variaciones estacionales.

Los caudales de extracciones medidos en campo presentan una gran incertidumbre respecto al valor real del caudal extraído. Por lo tanto, es necesario realizar un monitoreo más detallado durante un periodo más largo de tiempo para obtener una estimación confiable del caudal extraído en la cuenca intervenida. De este modo se podrá tener certeza de la magnitud del caudal extraído en la UH B, y así comparar la descompensación hídrica que generan estos drenajes artificiales frente al efecto que puede causar la agricultura y ganadería en la capacidad de retención y regulación hídrica de la cuenca.

Referencias bibliográficas

- Arellano Monterrosas, J. L. L., & Ruiz Meza, L. E. (2018). Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 95, 0.
- Arias, H. (2017). *Auxiliar de investigación en el proyecto para la selección de materiales para el acondicionamiento de los residuos de gallinaza y postcosecha del cultivo de la cebolla junca con miras a su compostaje. Caso: Páramo de Berlín (Santander)*.
- 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., Célleri, R., De Bièvre, B., & Iñiguez, V. (2007). The impact of pine plantations on water yield: A case study from the Ecuadorian Andes. *IAHS-AISH Publication*, 317, 225–228.
- 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(1–2), 22–30.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- 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). Santafé de Bogotá, DC.

CDMB, CORPONOR, & Instituto Alexander Von Humboldt. (2008). *Plan integral de manejo del distrito de manejo integrado de los recursos naturales “Páramo de Berlín.”*

Celis, A. (2019). *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.*

Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología: para estudiantes de ingeniería civil.*

CORPONOR. (2009). *Estudio del estado actual y plan de manejo ambiental del páramo de Santurbán.*

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.*

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 | Phytogeography of the vascular páramo flora of Ramal de Guaramacal (Andes, Venezuela) and its ties to other páramo floras. *Anales Del Jardín Botánico de Madrid*, 67(2), 177–193.
<https://doi.org/10.3989/ajbm.2253>

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

Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2007). *Diseño hidrológico*. Zeta Editores.

Franco, V. V. (2007). *Estadística descriptiva para ingeniería ambiental con SPSS*. Univ. Nacional de Colombia.

García, C. (2007). Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá D.C. *Revista Colombia Forestal*, 10.

<https://doi.org/https://doi.org/10.14483/issn.2256-201X>

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*.

http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf

Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de regulación hídrica ante escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 277–289.

Melissa, A.-H., & Torres, G. A. M. (2016). Floristic characterization of a high andean forest in the purace national Naturalpark, Cauca, Colombia | Caracterización florística de un bosque alto andino en el parque nacional naturalpuracé, Cauca, Colombia. *Boletín Científico Del Centro de Museos*, 20(1), 27–39. <https://doi.org/10.17151/bccm.2016.20.1.3>

Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. *Alfaomega, Colombia*.

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>

Pérez, R. V. M. (2005). *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*.

<http://bdigital.unal.edu.co/12697/>

Poveda Jaramillo, G., & Mesa Sánchez, Ó. J. (1995). Efectos hidrológicos de la deforestación.

Energética, 16, 91–102.

Puentes, A. (2017). *Evaluación de aspectos administrativos, financieros y legales de la*

sostenibilidad de abastecimientos de agua rurales colectivos en ecosistema de páramo:

caso de estudio Berlín (Santander - Colombia).

República de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente. Instituto de Hidrología Meteorología y

Estudios Ambientales, (IDEAM). (n.d.). *Segunda comunicación nacional ante la*

convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático.

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021658/2Comunicacion/IDEAMTO>

MOIICap1.pdf

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). <https://doi.org/10.1029/2010WR009582>

Sotelo Avila, G. (1991). *Hidráulica general; fundamentos*. Limusa.

Vásconez, P. M., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de Los*

Andes Centrales. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

Yao, Y., Cai, T., Wei, X., Zhang, M., & Ju, C. (2012). Effect of forest recovery on summer

streamflow in small forested watersheds, Northeastern China. *Hydrological Processes*,

26(8), 1208–1214. <https://doi.org/10.1002/hyp.8204>

Apéndices

Apéndice A. Evidencia fotográfica



Foto A1. Caracterización del cauce en las zonas de monitoreo



Foto A2. Estructura de medición de caudal



Foto A3. Instalación de la estructura de medición de caudal



Foto A4. Configuración e instalación de los diver

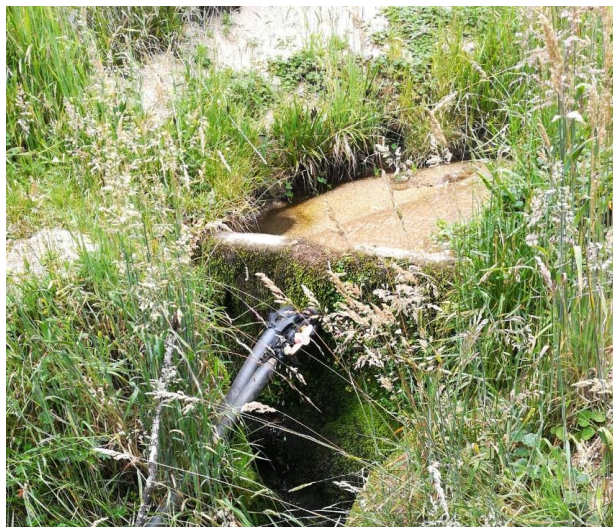
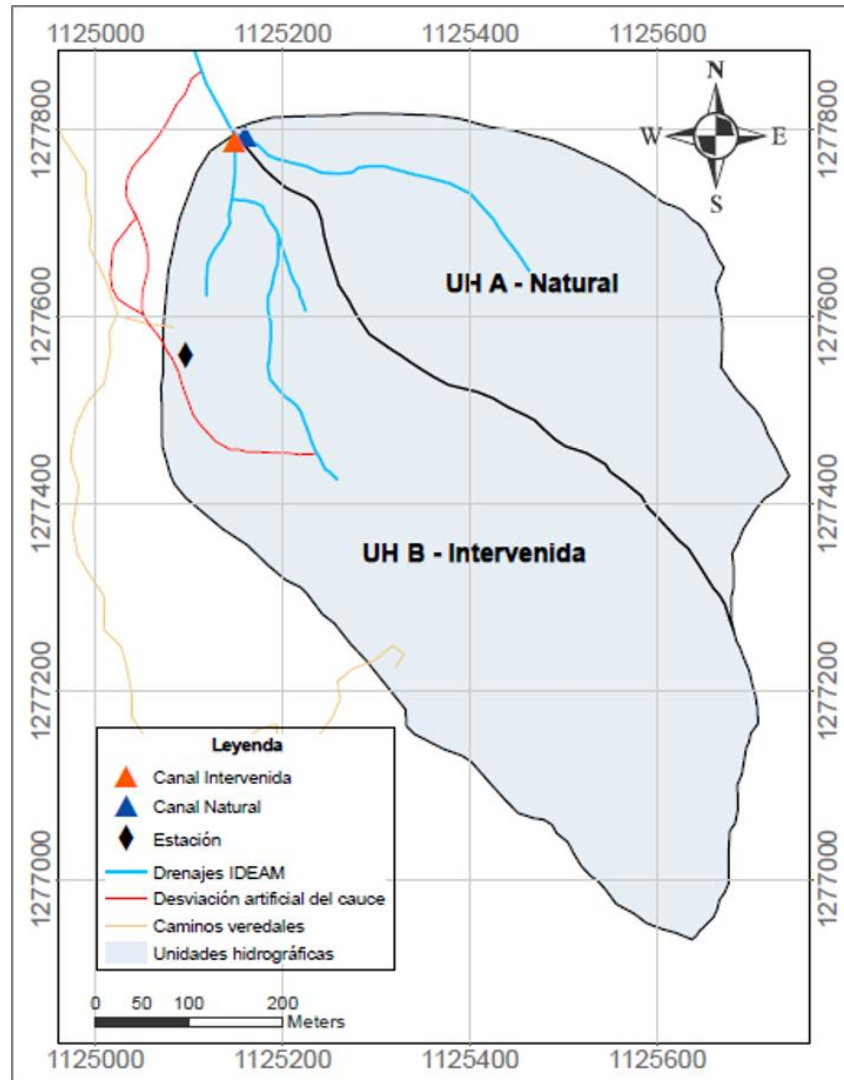


Foto A5. Extracciones identificadas en la unidad hidrográfica intervenida



Foto A6. Aforos realizados en las extracciones

Apéndice B. Ubicación de la estación meteorológica y de las estructuras de medición de caudal



Apéndice C. Caudales de las extracciones

Tabla C1. Caudales de las extracciones

Fecha	CAUDALES PROMEDIO DE LAS EXTRACCIONES EN [L/s]															
	01-09-2019			03-09-2019				04-09-2019				05-09-2019				
E1	1.74	1.53	1.62	1.93	1.57	1.48	1.50	1.42	1.66	1.46	1.48	1.11	1.06	1.38	1.33	
E2: Derivación	1.92	1.96	1.80	1.39	1.38	1.38	1.31	2.11	2.17	2.02	2.07	1.65	1.72	1.42	1.49	
E3:Maguera 1	0.22	0.19	0.35	0.33	0.24	0.27	0.18	0.47	0.23	0.26	0.28	0.38	0.34	2.63	2.15	
E3:Maguera 2	0.83	0.90	2.82	2.81	2.78	2.72	2.85	2.86	2.79	2.85	2.87	2.87	2.89	1.64	1.38	
Total E3	1.05	1.09	3.17	3.14	3.03	2.98	3.04	3.33	3.01	3.11	3.15	3.25	3.23	4.28	3.53	