

ANÁLISIS DE INDICADORES HIDROLÓGICOS PARA DETERMINAR LA
AFECTACIÓN DE LOS SERVICIOS DE REGULACIÓN Y SUMINISTRO
HÍDRICO EN MICROCUENCAS DE PÁRAMO DEBIDO AL USO DEL SUELO.
CASO DE ESTUDIO: BERLÍN (SANTANDER).

YEISON CAMILO CASTRO CARO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2021

ANÁLISIS DE INDICADORES HIDROLÓGICOS PARA DETERMINAR LA
AFECTACIÓN DE LOS SERVICIOS DE REGULACIÓN Y SUMINISTRO
HÍDRICO EN MICROCUENCAS DE PÁRAMO DEBIDO AL USO DEL SUELO.
CASO DE ESTUDIO: BERLÍN (SANTANDER).

YEISON CAMILO CASTRO CARO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA

DOCTOR EN INGENIERÍA, ÉNFASIS INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

A Dios primeramente por ser el creador de todas las cosas, que me ha dado la fortaleza para continuar siempre ante cualquier obstáculo, por las cosas que ha hecho, está siendo y seguirá haciendo en mi vida.

A mis padres y hermanos, por su formación llena de buenos hábitos y valores complementado con gran esfuerzo, amor y confianza, sin duda un apoyo incondicional, personas que me llenan de orgullo y felicidad en cada momento para ser mejor cada día.

A mi amor, por el constante apoyo que ha sido en mi vida.

Mi amor y gratitud siempre.

Yeison Camilo Castro Caro

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a las personas que participaron en mi formación universitaria:

A la UIS, por brindarme tal oportunidad de formación integra y de gran exigencia.

A mi director Edgar Ricardo Oviedo por su excelente orientación y forma de transmitir conocimiento.

A mis profesores, por la formación brindada durante mi progreso universitario.

A mis amigos especialmente a Sebastián, Daniel, Cristian, Duban y Sley por los momentos de estudio, las risas y aprendizaje adquirido.

A mis padres y mis hermanos, por impulsarme a ser mejor en cada propósito, convirtiéndose en mi mayor inspiración.

A mi amor, por la motivación y el apoyo constante.

Este logro es uno de los muchos que serán dedicados a cada uno de ellos que cree y confía en mí, y aquellos que me brindan la oportunidad para obtener cada triunfo propuesto.

Yeison Camilo Castro Caro

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	10
1. OBJETIVOS.....	13
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	13
2. CUERPO DEL TRABAJO.....	14
2.1. MARCO CONCEPTUAL.....	14
2.1.1. Páramos.....	14
2.1.2. Servicios hidrológicos.....	14
2.1.3. Regulación y suministro.....	15
2.1.4. Índices hidrológicos.....	15
2.2. ESTADO DEL ARTE.....	16
2.3. METODOLOGÍA.....	20
2.3.1. Fase I. Selección de indicadores hidrológicos.....	21
2.3.2. Fase II. Aplicación de los indicadores hidrológicos.....	22
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
2.4.1. Selección de indicadores hidrológicos.....	25
2.4.2. Aplicación de los indicadores hidrológicos.....	27
2.4.2.1. Índice de escorrentía (RR):.....	27
2.4.2.2. Índice de regulación hidrológica (IRH):.....	28
2.4.2.3. Variabilidad del flujo diario (QVAR):.....	28
2.4.2.4. Pendiente de la curva de duración de flujo (R2FDC):.....	29
2.4.2.5. Discusión estado del arte.....	29
3. CONCLUSIONES.....	33
REFERENCIAS.....	34

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de las dos unidades hidrológicas de estudio	20
Figura 2. Ubicación de las estaciones de medición de caudales y precipitaciones	22
Figura 3. Hidrograma y hietograma unidad hidrológica intervenida durante meses monitoreados	24
Figura 4. Hidrograma y hietograma unidad hidrológica natural durante meses monitoreados	24

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características e información de las dos unidades hidrológicas que fueron monitoreadas	25
Tabla 2. Índices hidrológicos planteados para seleccionar	26
Tabla 3. Índices hidrológicos seleccionados	27
Tabla 4. Resultados obtenidos de los índices hidrológicos seleccionados	27
Tabla 5. Resultados obtenidos de índices hidrológicos aplicados en cuencas andinas.	30

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE INDICADORES HIDROLÓGICOS PARA DETERMINAR LA AFECTACIÓN DE LOS SERVICIOS DE REGULACIÓN Y SUMINISTRO HÍDRICO EN MICROCUENCAS DE PÁRAMO DEBIDO AL USO DEL SUELO. CASO DE ESTUDIO: BERLÍN (SANTANDER).

AUTOR: YEISON CAMILO CASTRO CARO

PALABRAS CLAVE: PÁRAMO, USO DEL SUELO, REGULACIÓN HÍDRICA, SUMINISTRO HÍDRICO.

DESCRIPCIÓN: Los páramos son ecosistemas estratégicos en el ciclo hidrológico para brindar servicios de suministro de agua. Este recurso hídrico ha venido siendo afectado debido a los diferentes usos a los que se ven sometidos los suelos, ocasionando impactos negativos en servicios hidrológicos como la regulación y el suministro, repercutiendo sobre poblaciones que dependen de dicha fuente. En esta investigación se busca determinar la afectación que produce el uso del suelo sobre los servicios mencionados mediante indicadores hidrológicos; para tal efecto, se seleccionaron como caso de estudio dos unidades hidrográficas, ubicadas en el páramo de Berlín - Santander - Colombia. Estas unidades son apropiadas ya que hay una unidad hidrográfica natural donde predomina la vegetación nativa (UHN) y la otra unidad intervenida con diferentes cultivos y ganadería (UHI). Las dos unidades se monitorearon por un año. Seguidamente se revisaron artículos mediante bases de datos disponibles por la Universidad Industrial de Santander (UIS), donde se evidenció aplicaciones de indicadores hidrológicos en el contexto de estudio. En conjunto con miembros del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) se seleccionaron cuatro índices hidrológicos: el índice de escorrentía (RR) resultó tener 9% más escorrentía, en el índice de regulación hídrica (IRH) se obtuvo resultados de 0.27 vs 0.43 siendo mayor en la UHN catalogado como bueno, la variabilidad del flujo diario (QVAR) donde se observó que tiene más variabilidad la UHI y en la pendiente de la curva de duración de flujo (R2FDC) la pendiente es mayor en la UHI con 0.71 vs 0.31 en la UHN. Los resultados de los cuatro indicadores demostraron que la UHN presenta mayor capacidad de regulación y suministro. La investigación refleja la importancia de la adecuada planeación del uso del suelo en el territorio y el efecto que tienen las alteraciones sobre los servicios hidrológicos.

Trabajo de Grado

Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería civil, Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Doctor en ingeniería, énfasis ingeniería sanitaria y ambiental.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF HYDROLOGICAL INDICATORS TO DETERMINE THE IMPACT OF WATER REGULATION AND SUPPLY SERVICES IN PÁRAMO MICRO-BASINS DUE TO LAND USE. CASE STUDY: BERLIN (SANTANDER).

AUTHOR: YEISON CAMILO CASTRO CARO

KEYWORDS: PÁRAMO, LAND USE, WATER REGULATION, WATER SUPPLY.

DESCRIPTION: Páramos are strategic ecosystems in the hydrological cycle that provide water supply services. This water resource has been affected due to the different uses to which soils are subjected, causing negative impacts on hydrological services such as water regulation and supply, having repercussions on the populations that depend on this source. This research seeks to determine the impact that land use produces on the aforementioned services through hydrological indicators; For this purpose, two hydrographic units, located in the Berlin - Santander - Colombia páramo were selected as a case study. These units are appropriate since there is a natural hydrographic unit in which native vegetation predominates (UHN) and the other unit intervened with different crops and livestock (UHI). The two units were monitored for one year. Next, articles were reviewed using databases available at Universidad Industrial de Santander (UIS), where applications of hydrological indicators were evidenced in the study context. Together with members of the Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), these four hydrological indices were selected: the runoff ratio (RR) needs to have 9% more runoff, the hydrological regulation index (IRH), which was obtained results of 0.27 vs 0.43 being higher in the UHN cataloged as very good, daily flow variability (QVAR) where it was observed that the UHI has more variability of the flow and slope of the flow duration curve (R2FDC) where the slope is greater in the UHI with 0.71 vs 0.31 in the UHN. The results of the four indicators showed that the UHN has a greater regulation and supply capacity. The results of the four indicators showed that the UHN has greater regulation and supply capacity. The research reflects the importance of proper land use planning in the territory and the effect that changes have on hydrological services and supply.

Degree work

Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Doctor of Engineering, emphasis on sanitary and environmental engineering.

INTRODUCCIÓN

Los páramos son muy importantes en la regulación y suministro del recurso hídrico, estos, han sido afectados debido a los diferentes usos a los que se ven sometidos los suelos, ocasionando impactos negativos en los servicios hidrológicos de estudio¹. Sin embargo, estos efectos deben estudiarse para verificar la magnitud que los usos del suelo tienen sobre la disponibilidad de agua (cantidad y calidad) y de esta manera, identificar alternativas de gestión que buscan maximizar tanto el beneficio que producen los páramos a los usuarios y la producción del suelo, permitiendo un mejor bienestar social².

El deterioro en los servicios de regulación y suministro del agua en las cuencas hidrográficas se deben a los diferentes usos que se les ha dado a los suelos como lo son la agricultura, la industria o habitacional, y otras actividades antrópicas tales como los incendios forestales periódicos o invasión de especies exóticas afectando las características edáficas e hidrológicas de estos suelos, modificando los ciclos hidrogenoquímicos en las cuencas hidrográficas³. Esta modificación se debe a que el suelo tiene alteraciones en la porosidad, densidad y/o textura, que afectan directamente la infiltración, percolación y escorrentía⁴. Esa cuantificación del deterioro en los servicios de regulación y suministro puede hacerse a través de la aplicación de índices hidrológicos para conocer el efecto real de los usos a los que se pueden ver sometidos el ecosistema de páramo⁵. Las condiciones de los límites

¹ PELLICER MARTÍNEZ, Francisco. Huella hídrica y planificación hidrológica: Aplicación en la demarcación hidrográfica del Segura. Tesis de doctorado en Tecnología, Administración y Gestión del Agua. Murcia: Universidad de Murcia. Facultad de Biología, 2014. p. 37. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edstdx&AN=edstdx.10803.277218&lang=es&site=eds-live>.

² ROEBELING, Peter y VAN GRIEKEN, Martin. Explorando el costo-efectividad de instrumentos basados en el mercado para la mejora de la calidad del agua: una modelación espacial económico-ambiental. En: Revista Iberoamericana de Economía ecológica. Septiembre, 2009. vol. 11, p 17-28.

³ ACCIETTO, Ricardo, *et al.* Cambios en el uso del suelo: Capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). En: Ciencia del Suelo. Agosto, 2019. vol. 37, n.2, p. 16-20.

⁴ DAZA TORRES, Martha C. HERNANDEZ FLORES, Fanny y TRIANA, Flor A. Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. En: Rev. Fac. Nac. Agron. Junio, 2017. vol. 67, no. 1, p. 7189–7200. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>.

⁵ GOLDSTEIN, Joshua, *et al.* Spatial planning for a green economy: National-level hydrologic ecosystem services priority areas for Gabon. In: Plos One, 2017. Vol 12, No. 6, p. 1-21. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179008>.

meteorológicos, el tipo de vegetación, suelos, geología y topografía conduce a procesos hidrológicos diversos y no estacionarios a múltiples escalas, complicando las predicciones hidrológicas sobre todo en zonas no supervisadas⁶.

El páramo de Santurbán es de vital importancia para las comunidades que están a los alrededores porque les brinda el suministro hídrico, este servicio se ha visto afectado por los diferentes usos del suelo en la zona de páramo, principalmente por prácticas agrícolas como cebolla junca y papa, además por ganado extensivo⁷.

La naturaleza es frágil ante uso excesivo e inadecuado del uso del suelo, donde puede esperarse repercusiones negativas en los servicios hidrológicos, sin embargo, cuantificar estos impactos sigue siendo uno de los problemas más difíciles en hidrología⁸. La cuantificación de los efectos del uso de la tierra sobre la disponibilidad de los servicios hídricos es crítica, particularmente donde las comunidades dependen de pequeñas fuentes de agua que son más vulnerables a las fluctuaciones interanuales de las precipitaciones y también al cambio climático⁹. En entornos tropicales, los datos hidrológicos son escasos y se concentran en grandes ríos a pesar del hecho de que son los pequeños arroyos los que suministran agua directamente para la mayor parte del uso humano, particularmente en las zonas montañosas. El conocimiento sobre la hidrología de las cuencas hidrográficas de pequeñas montañas tropicales sigue siendo limitado¹⁰.

⁶ WANG, Jianxin y WOLF, David. Estimating Rain Rates from Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements. In: *J. Atmos. Ocean. Technol.* January, 2008. Vol. 25, No. 1, p. 43–56. Available at: <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA895.1>

⁷ MÉNDEZ POLO, Olga Lucia. Los intereses emergentes sobre la alta montaña y la vida campesina: tensiones y contradicciones de la delimitación de páramos en Colombia. Diciembre, 2019. vol. 28, no. 2, p. 322-339. Available at: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n2.70549>.

⁸ RAINER, Gerhard. El cambio del uso del suelo y los conflictos respectivos en el Valle de Tafi. En: *Poblac. soc.* Diciembre, 2011. vol. 18, no. 2, p. 228–231.

⁹ WOHL, Ellen, *et al.* The hydrology of the humid tropics. En: *Nat. Clim. Chang.* Septiembre, 2012. vol. 2, no. 9, p. 655–662. Available at: <https://doi.org/10.1038/nclimate1556>.

¹⁰ ROA GARCÍA, María Cecilia, *et al.* The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. In: *Water Resour. Res.* Mayo, 2011. vol. 47, no. 5. Available at: <https://doi.org/10.1029/2010WR009582>.

En este trabajo se realiza la cuantificación de deterioro de los servicios de regulación y suministro mediante la recolección de datos de precipitación y caudal en dos cuencas pareadas, una con uso de suelo de vegetación nativa en gran proporción del área y la otra con cultivos de cebolla, papa y ganadería, ubicadas en el corregimiento de Berlín, municipio de Tona, Santander, Colombia, complejo ecosistema de páramo de Santurbán; para tal efecto se identificaron indicadores hidrológicos clave para ser aplicados en las dos unidades hidrográficas objeto de estudio. Este análisis será complementado con datos que se han adquirido en dos estudios de (Arias y Castellanos, 2020) y (Prieto y Reyes, 2020) realizados en el proyecto de investigación desarrollado por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), titulado “Análisis Participativo de la Influencia del Uso del Suelo en los Servicios Hidrológicos de Suministro y Regulación Ofertados por el Ecosistema de Páramo Seco. Caso: Berlín (Complejo Santurbán, Santander – Colombia)” comprendido entre 27/09/2019 y el 27/09/2020.

La información obtenida a través de este proyecto permitirá analizar el efecto del uso del suelo sobre los servicios hidrológicos y además, suministrará información clave para lograr la planificación hidrológica del territorio en conjunto con las comunidades, buscando así uso sostenible del agua, a través de una gestión integral, que permitirá el buen estado ecológico de las aguas superficiales y subterránea¹¹.

¹¹ PELLICER MARTINEZ.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar indicadores hidrológicos de regulación y suministro de agua condicionados por los usos del suelo en el páramo de Berlín.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

1.1.1. Selección de indicadores hidrológicos clave para determinar los servicios de regulación y suministro aplicables al contexto de estudio.

1.1.2. Comparar los indicadores hidrológicos de regulación y suministro en las dos unidades hidrográficas objeto de estudio.

2. CUERPO DEL TRABAJO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Páramos. Los páramos son zonas biogeográficas generalmente de alta montaña y vegetación natural¹². Hidrológicamente estos ecosistemas presentan una buena regulación de los caudales bases, como resultado de los componentes de precipitación, humedad del suelo y evapotranspiración, teniendo un suministro continuo del recurso hídrico. Estos tienen gran capacidad de retener el agua debido a la cantidad de microporos y de carbono orgánico, además, brindan una gran cantidad de servicios hidrológicos, dentro de los cuales se destacan los que se estudian en este trabajo que son regulación y suministro¹³. Los páramos son caracterizados por tener una respuesta hidrológica lenta y una buena regulación del agua, causada por una alta conductividad hidráulica¹⁴.

2.1.2. Servicios hidrológicos. Son los encargados de suplir una necesidad y brindar un beneficio a las personas, pueden ser suministro, regulación y culturales, mediante los ecosistemas terrestres de agua dulce, estos servicios se caracterizan por su calidad, cantidad, localización y tiempo de flujo, y son modificados por condiciones de los ecosistemas¹⁵. Los servicios hidrológicos se ven favorecidos por la topografía irregular del terreno, que generalmente presentan pantanos y lagos, así, aumentando la capacidad de almacenamiento y regulación, también se ve favorecido por las condiciones climáticas, que facilita el suministro de agua gracias a las formaciones de hielo, todos estos servicios

¹² PROAÑOS SANTOS, Carlos Oswaldo. y TORRES ROMERO, Sergio Fernando. Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. En: La Granja Rev. Septiembre, 2018. vol. 28, no. 2. Disponible en: <https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>.

¹³ TORRES AND TRIANA.

¹⁴ BUYTAERT, Wouter, *et al.* The effect of land use changes on the hydrological behaviour of histic Andosols in south Ecuador. In: *Hydrol. Process.* Agosto, 2005. vol. 19, no. 20, p. 12–16. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>.

¹⁵ CÁRDENAS, María Fernanda y TOBÓN, Conrado. Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. En: *rev. udca, actual. divulg. cient.* Julio, 2017. Vol. 20, No. 2, p. 403–412.

han sido afectados por los diferentes usos del suelo en los que se han realizado actividades humanas¹⁶.

2.1.3. Regulación y suministro. La regulación hídrica se define como la capacidad de los ecosistemas de mantener un flujo mínimo en afluentes durante periodos secos del año a través del almacenamiento y la liberación progresiva durante dicho tiempo, este comportamiento es importante debido a que reduce la escasez de agua, los impactos de la sequía y escorrentía reduciendo la frecuencia de inundaciones¹⁷.

El suministro hídrico da como función principal la oferta del agua en las viviendas, industrias e instituciones existentes en diferentes entornos¹⁸. La investigación se remonta a una oferta hídrica que es dada por las cuencas hidrológicas, en las que se puede analizar y cuantificar el suministro que genera dichas cuencas. La regulación y el suministro hídrico en los páramos se puede cuantificar mediante índices hidrológicos que se va a profundizar en el siguiente ítem.

2.1.4. Índices hidrológicos. Los índices hidrológicos cuantifican aspectos en los regímenes de flujo de una corriente, caracterizando mediante variables de flujo relevantes que son sensibles a los factores antrópicos. En la investigación de este proyecto se profundiza en cuatro índices hidrológicos, seleccionados

¹⁶ BUYTAERT, Wouter, *et al.* Human impact on the hydrology of the Andean páramos. In: *Earth Sci. Rev.* January, 2006. Vol. 79, No. 1, p. 7–12. Available at: <http://10.0.3.248/j.earscirev.2006.06.002>.

¹⁷ BONNESOEUR, V, *et al.* Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *For. Ecol. Manag.* Febrero, 2019. vol. 433, p. 569–584. Available at: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edo&AN=133972016&lang=es&site=eds-live>.

¹⁸ BURBANO OTAYA, Leodán Andrés, VÁSQUEZ VELÁSQUEZ, Guillermo León, and BUSTAMANTE CARMONA Guillermo de Jesús. Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, 2008, Vol. 61.1, no 1 p. 66–80. Disponible en: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.692bb08e158741da8ae828d6b6e1006f&lang=es&site=eds-live>.

como parte de este trabajo, con los cuales se puede cuantificar los servicios hidrológicos de regulación y suministro¹⁹.

2.2. ESTADO DEL ARTE

En Colombia se publicó una investigación de este tipo donde usaban 3 cuencas ubicadas en el municipio de Finlandia (Quindío), donde los usos de los suelos eran muy similares y mezclados entre bosques, humedales y ganadería extensiva, mediante el concepto de reservorio lineal que requieren del uso de datos de caudal y precipitación. Se analizó por medio de la definición de caudales (los caudales excedieron entre el 70% y el 99% de las veces), solo los caudales excedidos más del 90% de las veces muestran reducciones significativas. En dos cuencas se muestran un comportamiento similar durante el 60% del tiempo cuando los flujos son más altos. Finalmente, se concluyó que las cuencas boscosas y con humedales tienen mejor regulación hídrica y en las cuencas con pastizales había poca capacidad de almacenamiento y una mayor tasa de escorrentía²⁰.

En Ecuador también se realizó un estudio con dos microcuencas, usando pluviómetros de una precisión de 0.2 [mm], vertederos triangulares y para medir el caudal usaban medidores de niveles de agua que arrojaban datos cada 15 minutos, estos datos fueron recolectados por 14 meses en una cuenca determinando 24 picos de eventos de lluvia homogéneos y regulares y en la otra cuenca 12 meses, determinando 18 picos de eventos de lluvia homogéneos y regulares. Mediante la información recolectada se realizaron comparaciones entre las microcuencas debido al análisis de forma gráfica y analítica, que les permitió determinar tres valores para la constante de tiempo T, dos microcuencas con respuestas rápida y una microcuenca con respuesta lenta, además, se calcularon valores estadísticos como la media, la varianza y la diferencia porcentual. Con este estudio de las tres microcuencas en Ecuador se concluyó

¹⁹ OLDEN, Julian y POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. En: *River Res. Appl.* Marzo, 2003. Vol. 19, No. 2, pp. 101–121. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.700>.

²⁰ ROA GARCIA, et al.

que el método de reservorio lineal es adecuado para observar las afectaciones de servicios hídricos debido al uso del suelo y que la microcuenca intervenida era menor en un 40% de capacidad de almacenamiento²¹.

A partir de la investigación de los impactos del cambio del uso del suelo sobre la hidrología en los páramos húmedos andinos, se analizaron siete cuencas. Los resultados mostraron que el caudal de salida de la cuenca cultivada era menor que la cuenca con cobertura natural con 1064 y 649 mm respectivamente, sin embargo, con algunas diferencias entre precipitaciones. En la cuenca cultivada se observa una disminución en los caudales bajos y medios y un aumento en los caudales pico, por tanto, es evidente una considerable pérdida de la capacidad de regulación de agua. Por otra parte, el pastoreo extensivo lleva a una disminución en la cantidad de agua que sale de la cuenca²².

Otra investigación llevada a cabo en los páramos andinos de Ecuador acerca de la deforestación en donde se tomaron datos de precipitación cada 15 minutos, se observó una conductividad hidráulica saturada promedio en la cuenca natural con captaciones entre 10 y 20 mm cada hora, con valores máximos de hasta 70 mm por hora. Por lo tanto, la cuenca natural está dominada por una base lenta en respuesta de flujo. Las curvas de duración del flujo se comparan en pares para evaluar el impacto de la forestación y el cultivo. Debido a los cultivos los resultados fueron que la curva tenía ciertos cambios, donde el flujo base fue un 20% menor en la cuenca cultivada que en cuenca natural²³.

²¹ BUYTAERT, Wouter, et al. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* January, 2004. Vol. 8, no. 1, p. 8–114. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-8-108-2004>.

²² CÉLLERI, Rolando, et al. 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, 2014. p. 10-18. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/264416399_Impactos_del_cambio_de_uso_de_la_tierra_sobre_la_hidrologia_de_los_paramos_humedos_andinos.

²³ BUYTAERT, Wouter; BIEVRE, Bert De y INIGUEZ, Vicente. Effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. In: *Forest ecology and management*. October, 2017. vol. 251, p. 1-9. Available at: 10.1016/j.foreco.2007.06.035.

En una de las investigaciones realizadas en el año 2019 en el páramo de Berlín, municipio de Tona, Santander, Colombia se aplicaron índices hidrológicos que describen la duración de pulsos altos mediante el índice DHQ25 donde la condición media diaria del agua aumenta por encima de un percentil 75 y pulsos bajos mediante el índice DLQ75 donde la condición media diaria del agua cae por debajo del percentil 25. Estos índices permiten evaluar el servicio hidrológico de regulación, esta investigación se realizó por cuatro meses, donde se encontraron resultados en donde el índice DLQ75 en la unidad intervenida predominaron los pulsos bajos, en teoría tiende a retornar a su caudal base más rápido después de un evento de precipitación en comparación a la unidad natural, mientras que en el índice DHQ25 arrojó resultados no esperados ya que según la unidad intervenida tenía mayor capacidad para mantener por más tiempo los eventos de lluvia²⁴.

En la otra investigación realizada en el páramo de Berlín, municipio de Tona, Santander, Colombia se aplicó el índice de regulación y retención hídrica que 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. Para las unidades hidrográficas estudiadas estos valores dieron 0.58 para la unidad de vegetación nativa, siendo catalogada con una capacidad de retención y regulación hídrica “baja” y 0.30 para la unidad con intervención en diferentes usos del suelo categoría de “muy baja”. Estos resultados concuerdan con la revisión de la literatura que las cuencas con vegetación nativa presentaron una mejor capacidad de retención y regulación hídrica que las cuencas con intervención antrópica²⁵.

En los Andes tropicales de Ecuador se realizó una investigación en el año 2016 sobre el impacto de intervenciones humanas como cultivo, forestación y pastoreo en biomas de Páramo, jalca y puna a través del uso de índices hidrológicos. Este

²⁴ VIVIANA, Andrea y CASTELLANOS, Arias. Reservorio lineal y el uso de índices. Berlín, Santander. Octubre 2019 p. 8-15.

²⁵ PRIETO JIMÉNEZ, Lucía y REYES RODRÍGUEZ, Faber Orlando. Retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo. Berlín, Santander. Julio 2019 p. 8-17.

estudio se realizó en 25 cuencas con un área alrededor de 0.5 y 7.8 km² y altitudes comprendidas entre 2682 y 4840 msnm, donde se instalaron medidores de caudal y precipitación para la toma de datos, usando vertederos, cada uno con un transductor de presión para medir el flujo en tiempos entre 5 y 15 minutos, además, cada cuenca conto con dos pluviómetros con precisiones de 0.254, 0.5 o 0.1 [mm]. En este estudio se concluyó que en zona de páramo no cultivada el índice es muy bajo (QVAR<1.10), lo que significa que el flujo está bien distribuido durante todo el año, mientras que en zona de jalca y puna cuando esta cultivado el índice es alto, produciendo volúmenes de descarga muy variables (QVAR>1.61). Los ecosistemas andinos están asociados con una pendiente baja que indica una buena capacidad de regulación hidrológica (R2FDC ~ 0, IRH> 0.50), adicionalmente, los RR promedio de las cuencas naturales están entre 0.37 y 0.72 en el páramo, 0.60 en jalca y entre 0.30 y 0.70 en la puna²⁶.

Según los resultados obtenidos en los estudios previos, se evidencia que el uso del suelo juega un papel fundamental en los servicios hídricos ²⁷. Se observa que las unidades hidrográficas con vegetación nativa pueden mantener por más tiempo eventos de lluvia y no tienen mayores cambios en la pendiente de caudal, evidenciando una mayor capacidad de regulación y suministro hídrico, en cambio, cuando hay intervenciones por cultivos o ganadería extensiva en la unidad hidrológica, esta tiende a ser un sistema frágil, con afectaciones en los servicios hidrológicos, sufriendo picos altos y bajos de caudales, donde el flujo retorna más rápido a el caudal base y tienen una disminución en la cantidad de agua que llega a las comunidades cercanas²⁸.

La ocurrencia de los desastres naturales es directamente proporcional a las afectaciones que se producen por las intervenciones en el uso del suelo, debido

²⁶ BONNESOEUR, et al.

²⁷ TORRES and TRIANA.

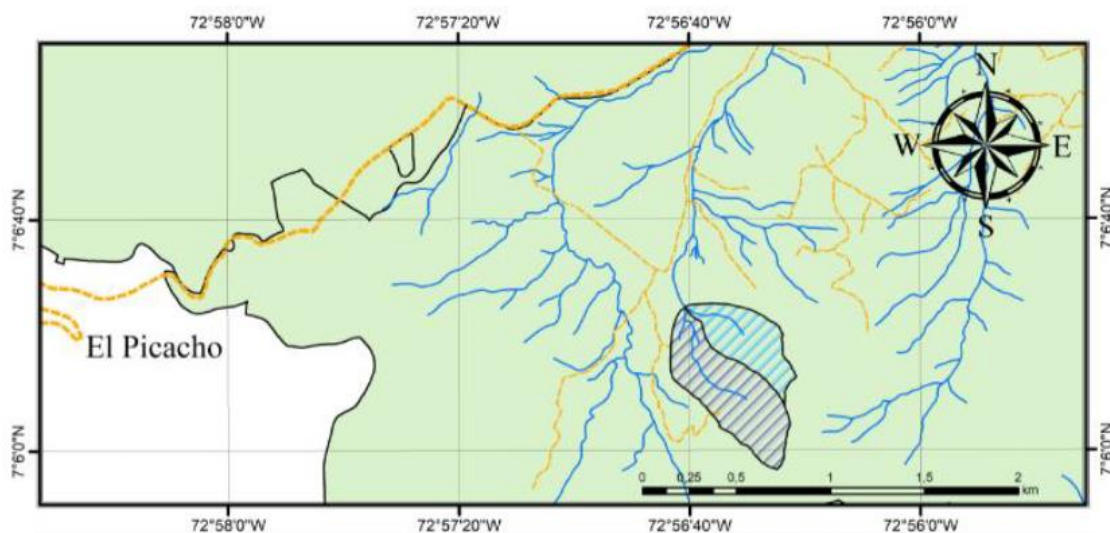
²⁸ MOSQUERA, Giovanni, *et al.* Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, Febrero 2015, Vol. 125. p. 10–28 Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>.

a escorrentías voluminosas y rápida²⁹. Las cuencas boscosas pueden llegar a captar del 10% al 35% de la precipitación que se puede llegar a presentar, es el proceso hidrológico de depósito de agua³⁰.

2.3. METODOLOGÍA

El trabajo de grado se realizó en el marco de proyectos de investigación realizados por el grupo de investigación GPH, mediante dos cuencas emparejadas en zona de paramo, que fueron monitoreadas por varios años para determinar la afectación que se produce en los servicios de suministro y regulación hídrica, a partir de comparar los usos del suelo como cultivo, ganadería y zona sin intervenciones³¹. Este trabajo de grado se realizó en dos fases las cuales se dividieron en la búsqueda y selección de indicadores hidrológicos y en la aplicación de los indicadores hidrológicos escogidos.

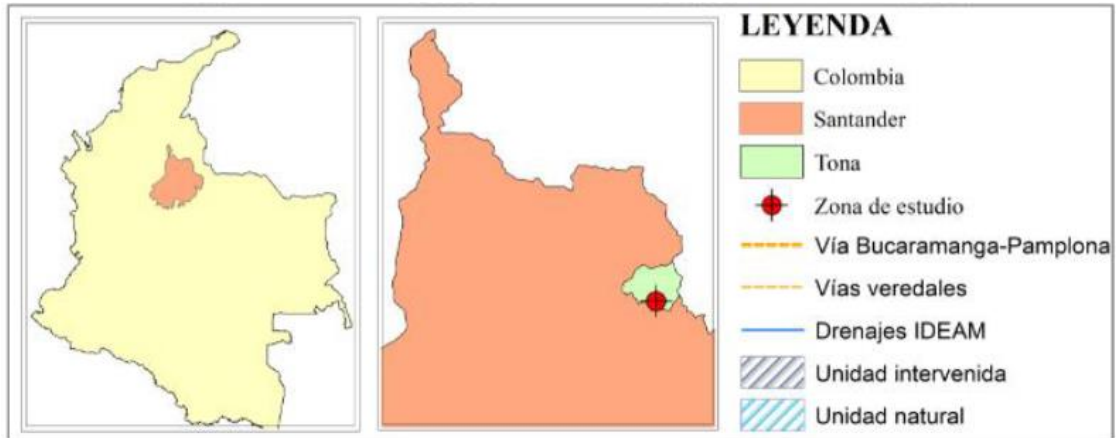
Figura 1. Ubicación de las dos unidades hidrológicas de estudio.



²⁹ PAIBA ANGEL, Oswaldo Antonio y MONROY AVILA, Edinson Fabian. Modelación hidrodinámica y determinación de la calidad del agua en el río Botello, Facatativá, Cundinamarca, Colombia. En: *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.* Enero, 2015. Vol. 6, No. 1, p. 19. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.1272>.

³⁰ PRYET, Alexandre, *et al.* Quantification of cloud water interception along the windward slope of Santa Cruz Island, Galapagos (Ecuador). In: *Agric. For. Meteorol.*, August, 2012. vol. 161, p. 94–106. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.03.018>.

³¹ VIVIANA and CASTELLANOS.



Fuente: VIVIANA, Andrea y CASTELLANOS, Arias.

La investigación se desarrolló en dos unidades hidrológicas, ubicadas en ecosistemas de páramo pertenecientes al páramo de Berlín, municipio de Tona, departamento de Santander, Colombia, perteneciente a la zona demarcada páramo de Santurbán (Figura 1), caracterizado por alta montaña se encuentra entre 3000 msnm y 4500 msnm en la que se distingue por su riqueza ecológica³².

2.3.1. Fase I. Selección de indicadores hidrológicos. Se examinó en bases de datos para hacer una revisión de la literatura recopilando información acerca de la aplicación de índices hidrológicos o métodos que se han desarrollado para investigar a fondo la afectación del uso del suelo en los servicios hidrológicos en zona de páramo. Para esto se realizó la búsqueda en plataformas disponibles por la Universidad Industrial de Santander - UIS, especialmente Sciencedirect y Scopus mediante palabras clave como lo son: hydrological índices, páramo, land uses, water regulation services and water supply services, estas palabras permitieron encontrar artículos de investigación que sumaron para definir la aplicación de los indicadores hidrológicos enfocados a regulación y suministro. Además, se plantearon unas reuniones con miembros del grupo GPH para revisar los indicadores y seleccionar conjuntamente los más adecuados aplicables al contexto de estudio.

A partir de este proceso se logró investigar y plantear algunos índices hidrológicos, para evaluar los impactos de cultivo de cebolla y papa y ganadería

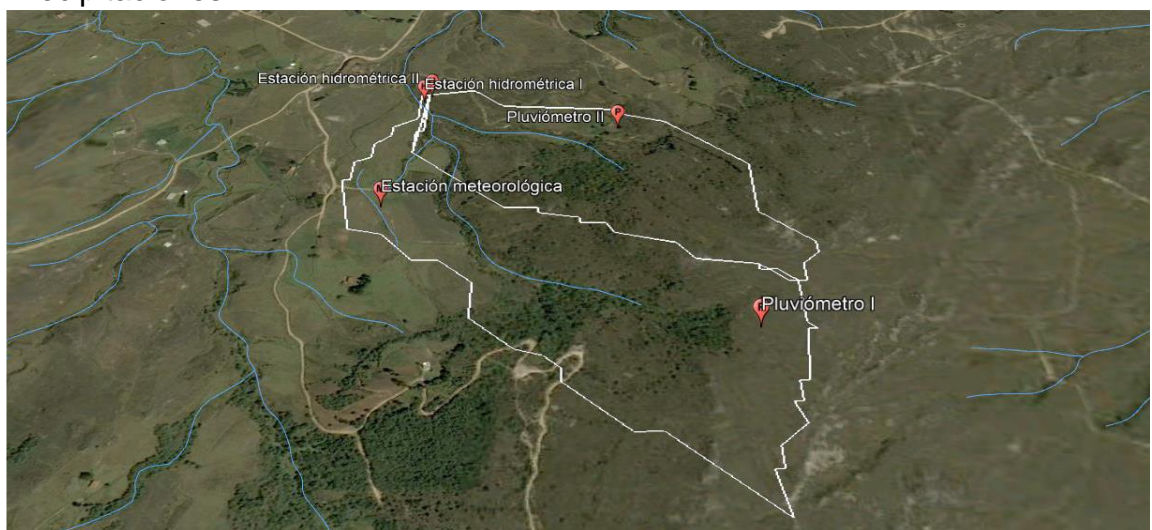
³² VIVIANA AND CASTELLANOS.

extensiva en la respuesta hidrológica y el rendimiento hídrico, mediante la búsqueda de índices hidrológicos para seleccionarlos y compararlos.

2.3.2. Fase II. Aplicación de los indicadores hidrológicos. Se aplicaron los índices hidrológicos escogidos mediante los datos recolectados de caudal y precipitación en cada unidad hidrológica, se procesaron en el software de Excel, donde se organizaron por días y meses, se valoraron y se verificaron que estuvieran acordes. A partir de allí se obtuvieron variables de los índices hidrológicos como lo son los percentiles de caudal y las desviaciones estándar, que permiten observar un umbral de caudal. Los resultados se verificaron y se confrontaron entre las unidades de estudio y con la literatura.

Se recolectaron datos de precipitación de la estación climatológica que está dentro del área de las unidades hidrológicas a investigar (Figura 2), y los datos de caudal se miden a partir de un vertedero triangular que está al cierre de cada unidad hidrológica con un medidor de presión hidrostática y atmosférica que permite la medición de caudales³³. Estas variables fueron usadas en los índices hidrológicos.

Figura 2. Ubicación de las estaciones de medición de caudales y Precipitaciones.



Fuente: GPH - UIS.

³³ PRIETO JIMÉNEZ, Lucia y REYES RODRÍGUEZ, Faber Orlando.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta investigación analizó las diferencias a partir del método de cuencas pareadas donde se evaluaron los impactos en los servicios hidrológicos a partir del uso del suelo. En general, las intervenciones antropogénicas dan como resultado una mayor variabilidad del caudal y reducciones significativas en la capacidad de regulación de la cuenca y el rendimiento de agua, independientemente de las propiedades hidrológicas del bioma original ³⁴. La cuantificación de la afectación que tiene los usos del suelo sobre los servicios de regulación y suministro hídrico se dificulta por la variabilidad climática natural y otros factores de confusión ³⁵. El método de cuencas pareadas ofrece respuestas más rápidas al intercambiar espacio por tiempo, pero complica la atribución de las diferencias observadas a la singularidad³⁶, ya que, el uso del suelo no es el único factor que afecta la respuesta hidrológica³⁷. La evaluación de estos impactos se basa en analizar las señales de cambio a lo largo del tiempo, y además, contrastar las diferencias en las respuestas hidrológicas sobre las cuencas analizadas³⁸.

Los cambios en el uso del suelo y cobertura de la tierra son las principales razones de la alteración hidrológica en las cuencas, donde, cuantificar sus

³⁴ OCHOA-TOCACHI, Boris F, *et al.* Impactos del uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas. Agosto, 2020. Vol. 52, p. 10–19. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29456.43526>.

³⁵ BULYGINA, N; MCINTYRE, N; and WHEATER, H. Conditioning Rainfall-Runoff Model Parameters for Ungauged Catchments and Land Management Impacts Analysis. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London, UK. Jun, 2009. Vol. 13.6, p. 893–904. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-13-893-2009>.

³⁶ SIVAPALAN, Murugesu, *et al.* Functional Model of Water Balance Variability at the Catchment Scale: Evidence of Hydrologic Similarity and Space-Time Symmetry. In *Water* 2011. *Resources Research*, Vol. 47 No. 2, p. 1–18 Available at: <https://doi.org/10.1029/2010WR009568>.

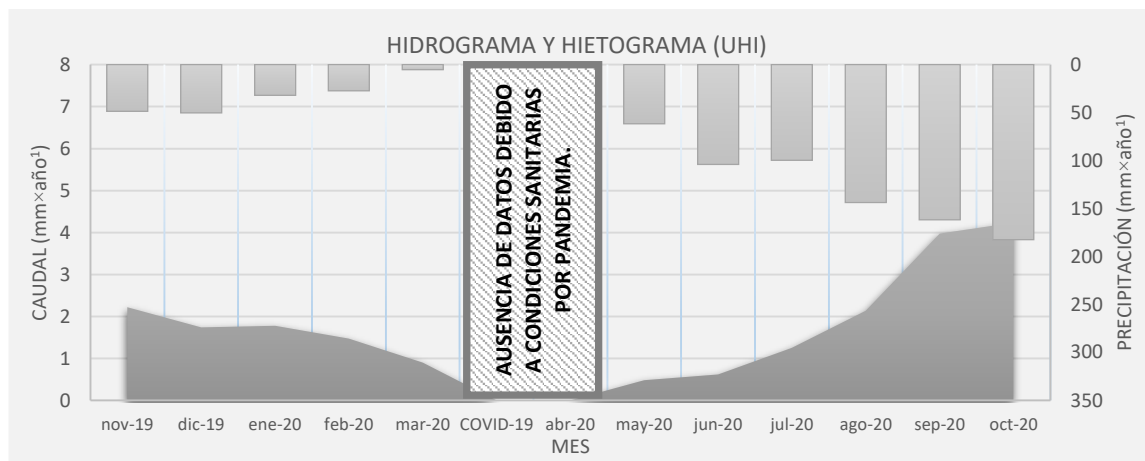
³⁷ BOSCH, J M, and HEWLETT, J D'. A Review of Catchment Experiments to Determine the Effect of Vegetation Changes on Water Yield and Evapotranspiration. University of Georgia, Athens, U.S.A. Vol. 55.1 March, 1982, p. 3–23. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2)

³⁸ MCINTYRE, Neil, *et al.* Modelling the Hydrological Impacts of Rural Land Use Change. *Hydrology Research*, Vol. 45 No. 6, 2014, p. 7–14 Available: <https://doi.org/10.2166/nh.2013.145>.

impactos resulta complicado debido a la diversidad extrema de condiciones meteorológicas, lo que se combina con los pocos estudios acerca del tema³⁹.

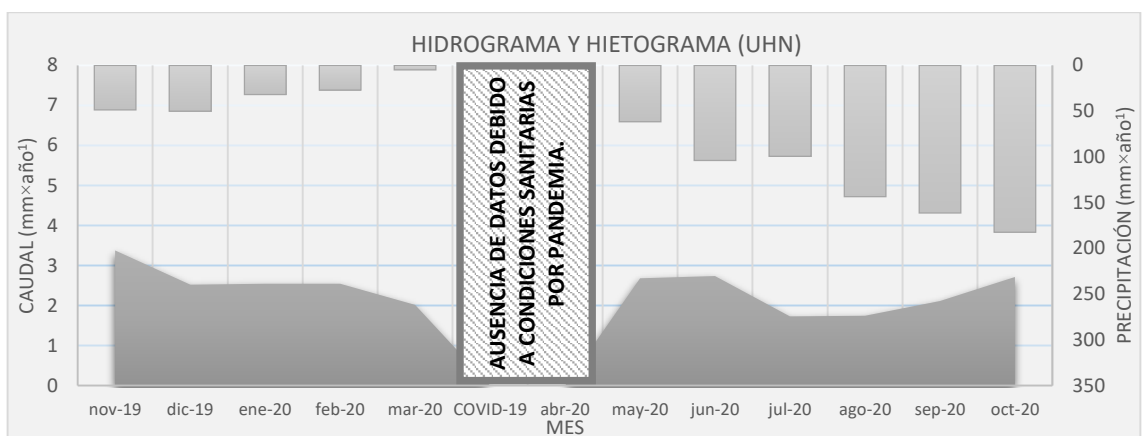
El periodo de monitoreo de la precipitación y el caudal en las dos unidades estuvo comprendido entre el 1 de noviembre de 2019 hasta el 31 de octubre de 2020. Este periodo de monitoreo estuvo afectado entre el 20 de marzo del 2020 y el 18 de mayo debido a pandemia por el Covid-19.

Figura 3. Hidrograma y hietograma unidad hidrológica intervenida durante meses monitoreados



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Hidrograma y hietograma unidad hidrológica natural durante meses monitoreados.



Fuente: Elaboración propia.

³⁹ BUYTAERT, Wouter, *et al.* Influence of Land Use on Hydro-Physical Soil Properties of Andean páramos and Its Effect on Streamflow Buffering. *Catena*. Julio, 2021. Vol. 202. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>.

En las figuras 3 y 4 se muestran los datos de precipitación y caudal adquiridos en el seguimiento a las dos unidades hidrográficas de estudio por un tiempo de un año, donde se representa diferentes características hídricas en zona de páramo.

2.4.1. Selección de indicadores hidrológicos. Se encontraron 12 índices hidrológicos relacionados con los servicios de regulación y suministro (Tabla 2), seleccionando los que cumplieron con las características e información obtenida de las dos unidades hidrológicas de estudio (Tabla 1), como lo es: la aplicabilidad en el ecosistema, el uso del suelo, los datos y variables que se recolectaron y la relación con los servicios hidrológicos de regulación y suministro hídrico.

Tabla 1. Características e información de las dos unidades hidrológicas que fueron monitoreadas.

Unidad Hidrológica	Natural (UHN)	Intervenida (UHI)
Área	15.91 ha	20.88 ha
Perímetro	2225 m	3275 m
Ecosistema	Páramo	Páramo
Uso de suelo	Vegetación propia de la zona y ganadería extensiva	Cultivos de cebolla, papa y ganadería extensiva
Rango altitudinal	3431-3501 msnm	3431-3565 m
Datos obtenidos	Caudal y Precipitación	Caudal y Precipitación

UHN: Unidad hidrológica natural

UHI: Unidad hidrológica intervenida

Fuente: PRIETO JIMÉNEZ, Lucia y REYES RODRÍGUEZ, Faber Orlando.

Tabla 2. Índices hidrológicos planteados para seleccionar.

DESIGNACIÓN	NOMBRE	FORMULA DE REFERENCIA	DATOS NECESARIOS
ET 0	Índice de evapotranspiración de referencia.	$0,0023 (T \text{ media} + 17,8) (T \text{ máx} - T \text{ mín}) 0,5 R_a$	Temperatura.
I _a	Coefficiente de escorrentía.	$I_a = P/E$	Caudales, precipitación, evapotranspiración.
SINDEX	Índice de estacionalidad.	$(1 / P \text{ año}) (\sum P \text{ mes} - P \text{ año} / 12) (6/11)$	Precipitación.
DAYP0	Proporción anual de días con precipitación cero.	$D P < R_{Gres} / D \text{ total}$	Precipitación.
RR	Índice de escorrentía.	$Q \text{ año} / P \text{ año}$	Caudal y precipitación.
PVAR	Variabilidad de la precipitación diaria.	$\sigma P / P \text{ media}$	Precipitación.
IRH	Índice de regulación hidrológica.	$\sum (Q Q < Q_{50}) / \sum (Q)$	Caudal.
CN	El valor CN empírico.	$CN_{iii} = CN_{2a} / (0.427 + 0.005 73^{\circ} CN_{2a})$	Precipitación, Pendiente, humedad y regulación.
QVAR	Variabilidad del flujo diario.	$\sigma Q / Q \text{ media}$	Caudal.
R2FDC	Pendiente de la curva de duración del flujo.	$(\log 10 (Q 66) - \log 10 (Q 33)) / (0.66 - 0.33)$	Caudal.
DLQ75	Duración promedio de los flujos por debajo del 25 ° fluyen percentil (Q75).	$\sum (D Q < Q_{75}) / N Q < Q_{75}$	Caudal.
QHQ25	Duración promedio de los flujos por encima de la 75 ° fluya percentil (Q25).	$\sum (D Q > Q_{25}) / N Q > Q_{25}$	Caudal.

Fuente: OCHOA-TOCACHI, Boris F, *et al*; CÉLLERI, Rolando, *et al* y AGUAYO, Mauricio, *et al*.

Se realizó un análisis de cada uno de los índices hidrológicos donde todos cumplían el enfoque de cuantificar servicios hidrológicos, sin embargo, se descartaron los índices ET₀, I_a y valor CN debido a que no se contaba con los datos de temperatura, evapotranspiración, coeficiente de escorrentía, pendiente y humedad, que se requería para poder ejecutarlos. Igualmente se excluyó los índices hidrológicos SINDEX, DAYP0 y PVAR ya que no estaban enfocados a los servicios hidrológicos de suministro y regulación; finalmente los índices hidrológicos DLQ75 y QHQ25 se excluyeron debido a que ya se habían aplicado en las cuencas de estudio por estudiantes de la UIS en el año 2019⁴⁰.

⁴⁰ VIVIANA y CASTELLANOS.

Por tanto, los índices hidrológicos de RR, IRH, QVAR y R2FDC (Tabla 3), se seleccionaron porque cumplían con los parámetros ya mencionados.

Tabla 3. Índices hidrológicos seleccionados.

ÍNDICES HIDROLÓGICOS		FORMULA
RR	Índice de escorrentía.	$Q \text{ prom} / P \text{ prom}$
IRH	Índice de regulación hidrológica.	$\Sigma (Q \text{ } Q < Q_{50}) / \Sigma (Q)$
QVAR	La variabilidad del flujo diario.	$\sigma Q / Q \text{ media}$
R2FDC	Pendiente de la curva de duración de flujo.	$(\log_{10} (Q_{66}) - \log_{10} (Q_{33})) / (0.66 - 0.33)$

Fuente: OCHOA-TOCACHI, Boris F, *et al.*

2.4.2. Aplicación de los indicadores hidrológicos. Llevada a cabo la aplicación de los índices hidrológicos se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados obtenidos de los índices hidrológicos seleccionados.

UNIDAD HIDROLÓGICA		Natural (UHN)	Intervenida (UHI)
ÍNDICES HIDROLÓGICOS	RR	0.03	0.02
	IRH	0.43	0.27
	QVAR	0.20	0.65
	R2FDC	0.31	0.71

RR: Índice de escorrentía.

IRH: Índice de regulación hidrológica.

QVAR: Variabilidad del flujo diario.

R2FDC: Pendiente de la curva de duración de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2.1. Índice de escorrentía (RR): El índice de escorrentía es la relación entre el volumen de descarga promedio y el volumen de lluvia promedio durante el período monitoreado⁴¹. En las figuras 3 y 4 se observa que la unidad

⁴¹ OCHOA-TOCACHI, Boris F, *et al.*

hidrográfica cultivada responde a eventos de lluvia con caudales más altos y rápidos, lo que indica claramente una pérdida en la capacidad de regulación y suministro hídrico, relacionándolo con el índice de RR en la unidad hidrológica natural (UHN) es igual a 0.03, mientras en la unidad hidrológica intervenida (UHI) el RR igual a 0.02, allí se observa que la unidad hidrológica natural tiene 9% más flujo que la unidad hidrológica intervenida, esto es debido que a la gran diferencia entre el volumen de descarga promedio y el volumen de lluvia promedio del periodo analizado.

2.4.2.2. Índice de regulación hidrológica (IRH): Volumen por debajo de la 50^o fluya percentil (Q50) en la curva de duración de flujo dividido por el volumen total, el rango esta entre 0 que representa una pésima distribución del flujo y 0.5 que representa una buena distribución del flujo, siendo el valor ideal⁴². En la unidad hidrológica natural dio 0.43, mientras que la unidad hidrológica intervenida el resultado fue 0.27. Como se puede ver en las figuras 4 se evidencia que la UHN contiene un perfil más horizontal, en cambio en la UHI se denota una mayor diferencia entre caudales altos y bajos.

2.4.2.3. Variabilidad del flujo diario (QVAR): El coeficiente de variación de los flujos diarios durante el período monitoreado, su fórmula es la desviación estándar dividida por la media, siendo la medida de la variación relativa con respecto al promedio de los caudales⁴³. En la unidad hidrológica intervenida (UHI) presenta una curva de escorrentía más pronunciada durante tiempo de invierno (QVAR<0.65), posiblemente porque tiende a que en tiempo de sequía sus caudales tiendan a cero, es un fenómeno de extracciones, sin embargo, en la unidad hidrológica natural (UHN) las descargas diarias se consideran más estables, pequeñas y sostenidas (QVAR<0.20), es decir tiene menos conductividad hidráulica, porque puede regular mejor el flujo al no tener

⁴² OCHOA-TOCACHI, Boris F, *et al.*

⁴³ *Ibid.*, p. 9.

intervenciones de usos del suelo. Se observa que tiene más variabilidad del flujo la UHI.

2.4.2.4. Pendiente de la curva de duración de flujo (R2FDC): Pendiente en el tercio medio de la curva de duración del flujo en escala logarítmica que esta analizada entre el 33% y 66% de la curva de duración del flujo⁴⁴. Donde una pendiente pronunciada se asocia con una alta respuesta llamativa a la precipitación de entrada, mientras que una curva más plana representa un comportamiento amortiguado y una mayor capacidad de almacenamiento⁴⁵. Los ecosistemas de páramo están asociados a una pendiente del flujo baja que indica una buena capacidad de regulación y suministro hídrico, al igual que una gran diferencia entre el caudal y la precipitación, hace referencia a una poca capacidad de estos servicios hídricos, donde en la unidad hidrológica natural (UHN) el índice de R2FDC es igual a 0.31, mientras en la unidad hidrológica intervenida (UHI) el R2FDC dio un resultado de 0.75.

2.4.2.5. Discusión estado del arte. La Tabla 5 muestra resultados de tres estudios realizados sobre los índices hidrológicos de estudio, uno en Paute – Ecuador se analizaron dos unidades hidrológicas una natural y una con intervenciones en cultivo, con características muy similares a las de estudio, están ubicadas en zona de páramo aproximadamente a 4000 m.s.n.m en. En Tiquipaya – Bolivia, muestra dos unidades hidrológicas una natural y una con intervenciones en cultivo y pastoreo, están ubicadas en zona de puna húmeda aproximadamente a 4200 m.s.n.m.

⁴⁴ YADAV, Maitreya, WAGENER, Thorsten, and GUPTA, Hoshin. Regionalization of Constraints on Expected Watershed Response Behavior for Improved Predictions in Ungauged Basins. *Advances in Water Resources*, Vol. 30 No. 8, 2007, p. 6–14. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>.

⁴⁵ BUYTAERT, Wouter; BIEVRE, Bert De y INIGUEZ.

Tabla 5. Resultados obtenidos de índices hidrológicos aplicados en cuencas andinas.

UNIDAD (CODIGO)	PAUTE - ECUADOR		TIQUIPAYA - BOLIVIA		CASO DE ESTUDIO: BERLÍN - SANTANDER - COLOMBIA	
	PAU_01 Natural	PAU_04 Intervenida	TIQ_02 Natural	TIQ_01 Intervenida	UHN Natural	UHI Intervenida
Uso del suelo	Vegetación nativa	Cultivo	Vegetación nativa	Cultivo y pastoreo	Vegetación nativa	Cultivo y pastoreo
RR	0.72	0.61	0.3	0.29	0.03	0.02
IRH	0.63	0.43	0.35	0.15	0.92	0.76
QVAR	0.85	1.33	2.12	2.17	0.2	0.65
R2FDC	-0.32	-1.12	-0.58	-1.99	0.31	0.71

RR: Índice de escorrentía.

IRH: Índice de regulación hidrológica.

QVAR: Variabilidad del flujo diario.

R2FDC: Pendiente de la curva de duración de flujo.

Fuente: OCHOA-TOCACHI, Boris F, *et al.*

Al relacionar los resultados de estudio con los de esta investigación se observa que concuerdan, ya que la RR, el IRH son mayores en la unidad natural, y también el QVAR y la R2FDC son menores en la cuenca natural, demostrando una mejor regulación y suministro hídrico.

Estos resultados concuerdan con los artículos citados en el estado del arte, donde en todos se afirma que una cuenca intervenida con diferentes usos de suelo presenta afectaciones en los servicios de regulación y suministro hídrico.

En el estudio presentado en Finlandia (Quindío) se coincide en que las cuencas boscosas y con humedales tienen mejor regulación hídrica en cambio las cuencas con pastizales tenían poca capacidad de almacenamiento y una mayor tasa de escorrentía, realizado por medio del concepto de reservorio lineal⁴⁶. Así mismo contrastando con el estudio realizado en Ecuador, donde se observó las afectaciones de servicios hídricos debido al uso del suelo y que la microcuenca intervenida era menor en un 40% de capacidad de almacenamiento por medio del análisis de la constante de tiempo T y reservorio lineal, así mismo, en esta

⁴⁶ ROA GARCIA, et al.

investigación la UHN tiene 28% más de capacidad de almacenamiento que la UHI⁴⁷.

Relacionando con la investigación de las siete cuencas de los páramos andinos, se evidenció que la cuenca cultivada tiene una disminución en los caudales bajos y medios y un aumento en los caudales pico, por tanto, es evidente una considerable pérdida de la capacidad de regulación de agua. Por otra parte, el pastoreo extensivo lleva a una disminución en la cantidad de agua que sale de la cuenca⁴⁸. Otra investigación llevada a cabo en los páramos andinos de Ecuador concuerda con este trabajo, ya que la cuenca natural está dominada por una base lenta en respuesta de flujo, además, debido a los cultivos los resultados fueron que la curva de duración de caudales tenía ciertos cambios, donde el flujo base fue un 20% menor en la cuenca cultivada que en cuenca natural, en la investigación es un 21% más el flujo en la UHN⁴⁹

La investigación también realizada en el páramo de Berlín, municipio de Tona, Santander, Colombia donde se aplicó el índice de regulación y retención hídrica, donde los valores dieron 0.58 para la unidad de vegetación nativa siendo catalogada con una capacidad de retención y regulación hídrica “baja” y 0.30 para la unidad con intervención en diferentes usos del suelo categoría de “muy baja”, en el caso de estudio el IRH presento resultados de 0.92 en la UHN y 0.76 en la UHI. Donde en ambos estudios se concuerda con la revisión de la literatura que conlleva a que las cuencas con vegetación nativa presentaron una mejor capacidad de regulación y suministro hídrico que las cuencas con intervención antrópica⁵⁰.

También se confrontan resultados con la investigación realizada en los andes tropicales de Ecuador, la cual se realizó en 25 cuencas, por medio de datos obtenidos de precipitación y caudal donde se concluyó que en zona de páramo

⁴⁷ BUYTAERT, Wouter; BIEVRE, Bert De y INIGUEZ

⁴⁸ CRASPO, et al.

⁴⁹ BUYTAERT, Wouter; BIEVRE, Bert De y INIGUEZ

⁵⁰ PRIETO JIMÉNEZ, Lucia y REYES RODRÍGUEZ, Faber Orlando.

no cultivada el índice es muy bajo ($QVAR < 1.10$), en esta investigación el resultado de la UHN es 0.20, lo que significa que el flujo está bien distribuido durante todo el año, mientras que en zona de jalca y puna cuando esta cultivado el índice es alto esto produce volúmenes de descarga muy variables ($QVAR > 1.61$), en este caso se encontraron resultados de 0.65 en la UHI, siendo así el valor más alto entre las dos unidades de estudio. Los ecosistemas andinos están asociados con una pendiente baja que indica una buena capacidad de regulación hidrológica ($R2FDC \sim 0$, $IRH > 0.50$), adicionalmente, los RR promedio de las cuencas naturales están entre 0.37 y 0.72 en el páramo, 0.60 en jalca y entre 0.30 y 0.70 en la puna⁵¹. Confrontando resultados se evidencia la tendencia de buenos resultados, ya que en la UHN también el índice $R2FDC \sim 0$ y el $IRH = 0.92$ siendo el valor más alto entre las dos unidades de estudio.

⁵¹ BONNESOEUR, et al.

3. CONCLUSIONES

Se cuantificó y se analizó la afectación que tienen los usos del suelo en los servicios de regulación y suministro hídrico, mediante los indicadores hidrológicos de RR, IRH, QVAR y la RFDC por el método de cuencas pareadas, en donde se utilizaron dos unidades hidrológicas una con vegetación nativa y la otra con cultivos y ganadería extensiva ubicadas en el páramo de Berlín.

Por medio de la revisión de literatura se encontraron 20 investigaciones, de donde se seleccionaron 4 índices hidrológicos que permitieron evaluar la afectación de los diferentes usos del suelo sobre los servicios de regulación y suministro hídrico en ecosistema de páramo, basados en plataformas disponibles por la Universidad Industrial de Santander - UIS, especialmente Sciencedirect y Scopus.

Los resultados de los índices hidrológicos tienen una tendencia, ya que, al confrontar los valores obtenidos con las investigaciones del estado del arte, se observa que los cultivos y la ganadería extensiva producen gran afectación en los servicios de regulación y suministro hídrico.

La capacidad de almacenamiento de la UHN es 28% mayor que la UHI, lo que demuestra la gran afectación que produce el cultivo y la ganadería extensiva en una unidad hidrológica.

En la UHN los caudales máximos se reducen y se retrasan cuando se producen lluvias, además mantienen un flujo base 21% mayor que la UHI, ya que está, tiene grandes pendientes en el flujo y no mantiene un buen nivel ante ausencia de precipitaciones.

La UHI con cultivos y ganadería extensiva reaccionan rápidamente a los eventos de lluvia empujando el flujo a picos altos y cayendo nuevamente a flujos base casi completamente secos por su gran conductividad que posee

REFERENCIAS

ACCIETTO, Ricardo, *et al.* Cambios en el uso del suelo: Capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). En: *Ciencia del Suelo*. Agosto, 2019. vol. 37, n.2, p. 16-20. (3)

AGUAYO, Mauricio, *et al.* 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. Agosto, 2018. Vol. 39, No. 2, p. 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277>. (49)

BONNESOEUR, V, *et al.* Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *For. Ecol. Manag.* February, 2019. Vol. 433, p. 569–584. Available at: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edo&AN=133972016&lang=es&site=eds-live>. (17)

BOSCH, J M, and HEWLETT, J D'. A Review of Catchment Experiments to Determine the Effect of Vegetation Changes on Water Yield and Evapotranspiration. University of Georgia, Athens, U.S.A. Vol. 55.1 March, 1982, p. 3–23. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2) (37)

BULYGINA, N; MCINTYRE, N; and WHEATER, H. Conditioning Rainfall-Runoff Model Parameters for Ungauged Catchments and Land Management Impacts Analysis. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London, UK. Jun, 2009. Vol. 13.6, p. 893–904. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-13-893-2009>. (35)

BURBANO OTAYA, Leodán Andrés, VÁSQUEZ VELÁSQUEZ, Guillermo León, and BUSTAMANTE CARMONA Guillermo de Jesús. Estimacion de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégico. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, 2008, Vol. 61.1, no 1 p. 66–80. Disponible en:

<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.692bb08e158741da8ae828d6b6e1006f&lang=es&site=eds-live>. (18)

BUYTAERT, Wouter, *et al.* Influence of Land Use on Hydro-Physical Soil Properties of Andean páramos and Its Effect on Streamflow Buffering. *Catena*. July, 2021. Vol. 20. Available: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>. (39)

BUYTAERT, Wouter, *et al.* The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* January, 2004. Vol. 8, No. 1, p. 8–114. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-8-108-2004>. (21)

BUYTAERT, Wouter; BIEVRE, Bert De y INIGUEZ, Vicente. Effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. In: *Forest ecology and management*. October, 2017. vol. 251, p. 1-9. Available at: [10.1016/j.foreco.2007.06.035](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035). (23)

BUYTAERT, Wouter, *et al.* The effect of land use changes on the hydrological behaviour of histic Andosols in south Ecuador. In: *Hydrol. Process*. August, 2005. vol. 19, No. 20, p. 12–16. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>. (14)

BUYTAERT, Wouter, *et al.* Human impact on the hydrology of the Andean páramos. In: *Earth Sci. Rev.* January, 2006. Vol. 79, No. 1, p. 7–12. Available at: <http://10.0.3.248/j.earscirev.2006.06.002>. (16)

CÁRDENAS, María Fernanda y TOBÓN, Conrado. Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. En: *rev. udca, actual. divulg. cient.* Julio, 2017. Vol. 20, No. 2, p. 403–412. (15)

CÉLLERI, Rolando, *et al.* 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, 2014. p. 10-18. Disponible en: https://researchgate.net/publication/264416399_Impactos_del_cambio_de_uso_de_la_tierra_sobre_la_hidrologia_de_los_paramos_humedos_andinos. (22)

DAZA TORRES, Martha C. HERNANDEZ FLORES, Fanny y TRIANA, Flor A. Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Rev. Fac. Nac. Agron.* Junio, 2017.vol. 67, No. 1, p. 7189–7200. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>. (4)

GOLDSTEIN, Joshua, *et al.* Spatial planning for a green economy: National-level hydrologic ecosystem services priority areas for Gabon. In: *Plos One*, 2017. Vol 12, No. 6, p. 1-21. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179008>. (5)

MCINTYRE, Neil, *et al.* Modelling the Hydrological Impacts of Rural Land Use Change. *Hydrology Research*, Vol. 45 No. 6, 2014, p. 7–14 Available at: <https://doi.org/10.2166/nh.2013.145>. (38)

MÉNDEZ POLO, Olga Lucia. Los intereses emergentes sobre la alta montaña y la vida campesina: tensiones y contradicciones de la delimitación de páramos en Colombia. Diciembre, 2019. vol. 28, no. 2, p. 322-339. Available at: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n2.70549>. (7)

MOSQUERA, Giovanni, *et al.* Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, Febrero 2015, Vol. 125. p. 10–28 Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>. (28)

OCHOA-TOCACHI, Boris F, *et al.* Impactos del uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas. Agosto, 2020. Vol. 52, p. 10–19. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29456.43526>. (34)

OLDEN, Julian y POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. En: *River Res. Appl.* Marzo, 2003. Vol. 19,

No. 2, pp. 101–121. Available at: <https://doi.org/10.1002/rra.700>. (19)

PAIBA ANGEL, Oswaldo Antonio y MONROY AVILA, Edinson Fabian. Modelación hidrodinámica y determinación de la calidad del agua en el río Botello, Facatativá, Cundinamarca, Colombia. En: *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.* Enero, 2015. Vol. 6, No. 1, p. 19. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.1272>. (29)

PELLICER MARTÍNEZ, Francisco. Huella hídrica y planificación hidrológica: Aplicación en la demarcación hidrográfica del Segura. Tesis de doctorado en Tecnología, Administración y Gestión del Agua. Murcia: Universidad de Murcia. Facultad de Biología, 2014. p. 37.

<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edstdx&AN=edstdx.10803.277218&lang=es&site=live>. (1)

PRIETO JIMÉNEZ, Lucia y REYES RODRÍGUEZ, Faber Orlando. Retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo. Berlín, Santander. Julio 2019 p. 8-17. (47)

PROAÑOS SANTOS, Carlos Oswaldo. y TORRES ROMERO, Sergio Fernando. Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. En: *La Granja Rev. Ciencias la Vida*. Septiembre, 2018. vol. 28, no. 2. Disponible en: <https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>. (11)

PRYET, Alexandre, *et al.* Quantification of cloud water interception along the windward slope of Santa Cruz Island, Galapagos (Ecuador). In: *Agric. For. Meteorol.*, August, 2012. vol. 161, p. 14–19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.03.018>. (30)

RAINER, Gerhard. El cambio del uso del suelo y los conflictos respectivos en el Valle de Tafí. En: *Poblac. soc.* Diciembre, 2011. vol. 18, no. 2, p. 228–231. (8)

ROA GARCÍA, María Cecilia, et al. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resour.* Mayo, 2011. Vol. 47, No. 5. Available at: <https://doi.org/10.1029/2010WR009582>. (10)

ROEBELING, Peter y VAN GRIEKEN, Martin. Explorando el costo-efectividad de instrumentos basados en el mercado para la mejora de la calidad del agua: una modelación espacial económico-ambiental. En: *Revista Iberoamericana de Economía ecológica*. Septiembre, 2009. vol. 11, p 17-28. (2)

SIVAPALAN, Murugesu, et al. Functional Model of Water Balance Variability at the Catchment Scale: Evidence of Hydrologic Similarity and Space-Time Symmetry. In *Water 2011. Resources Research*, Vol. 47 No. 2, p. 1–18 Available at: <https://doi.org/10.1029/2010WR009568>. (36)

VIVIANA, Andrea y CASTELLANOS, Arias. Reservorio lineal y el uso de índices. Berlín, Santander. Octubre 2019 p. 8-15. (24)

WANG, Jianxin y WOLF, David. Estimating Rain Rates from Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements. In: *J. Atmos. Ocean. Technol.* January, 2008. Vol. 25, No. 1, p. 43–56. Available at: <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA895.1> (6)

WOHL, Ellen, et al. The hydrology of the humid tropics. En: *Nat. Clim. Chang.* Septiembre, 2012. vol. 2, no. 9, p. 655–662. Available at: <https://doi.org/10.1038/nclimate1556>. (9)

YADAV, Maitreya, WAGENER, Thorsten, and GUPTA, Hoshin. Regionalization of Constraints on Expected Watershed Response Behavior for Improved Predictions in Ungauged Basins. *Advances in Water Resources*, Vol. 30 No. 8, 2007, p. 6–14. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>. (41)