

Afectación de los servicios ecosistémicos hídricos en la cuenca del río Teatinos (páramo Rabanal) efecto del cambio de coberturas de la tierra – producto del cambio climático global

Affectation of water ecosystem services in the Teatinos river basin (Rabanal páramo) effect of the change in land cover – product of global climate change

Yulia Ivanova



Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

OPEN ACCESS

Recibido: 07/09/2022

Aceptado: 27/10/2022

Publicado: 29/11/2022

Correspondencia de autores:

Yulia.ivanova@unimilitar.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Los efectos del cambio climático global se reflejan en la afectación del régimen de las diferentes variables climáticas, produciendo impactos sobre los servicios ecosistémicos de cuencas hidrográficas que, en el contexto nacional, no se han evaluado hasta la fecha. Muchas de las cuencas abastecedoras del agua en el país nacen en los páramos que son importantes desde el punto de vista de provisión de servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica, ya que estos sustentan la biodiversidad y el desarrollo de diferentes actividades socio – económicas. En el estudio se analizó la afectación de los servicios de provisión y regulación del agua de la cuenca del río Teatinos del páramo Rabanal por el cambio de las coberturas de la tierra, producto del efecto del cambio climático global. **Metodología:** El estudio se realizó construyendo el balance hidro-climático distribuido multitemporal, integrando los estudios climáticos con las herramientas de teledetección. **Resultados:** Se encontró que en las últimas décadas no se evidencia una alteración en los valores promedios de la oferta hídrica por el aparente mecanismo de resiliencia de la cuenca ante las fuerzas forzantes externas, mientras que el servicio de regulación hídrica enfrenta una variabilidad temporal importante producto de pluviosidad y del cambio de las coberturas de la tierra en la cuenca hidrográfica. **Conclusiones:** Los resultados obtenidos hacen concluir sobre la complejidad del efecto del cambio climático sobre diferentes componentes del balance hídrico y servicios ecosistémicos de cuencas hidrográficas.

Palabras clave: páramo, servicios ecosistémicos, teledetección, servicio de provisión hídrica, regulación hídrica.

Abstract

Objective: The effects of global climate change are reflected in the affectation of the regime of the different climatic variables, producing impacts on the ecosystem services of hydrographic basins that, in the national context, have not been evaluated to date. Many of the water supply basins in the country are born in the páramo that are important from the point of view of provision of the ecosystem services of provision and water regulation, since these sustain biodiversity and the development of different socio-economic activities. The study analyzed the impact on the water provision and regulation services of the Teatinos river basin of the Rabanal páramo due to the change in land cover, as a result of the effect of global climate change. **Methodology:** the study was carried out by constructing the multi-temporal distributor hydro-climatic balance, integrating climate studies with remote sensing tools. **Results:** It was found that in recent decades there is no evidence of an alteration in the average values of the water supply due to the apparent resilience mechanism of the basin in the face of external forcing forces, while the water regulation service faces an important temporary product of rainfall and land cover change in the hydrographic basin. **Conclusions:** The results obtained make it possible to conclude on the effect of climate change on different components of the water balance and ecosystem services of hydrographic basins.

Keywords: páramo, ecosystem service, remote sensing, water supply service, water regulation service.

Introducción

Diferentes estudios afirman que estamos viviendo la época del cambio climático global [1, 2, 3] que afecta, inicialmente, el régimen de las variables climáticas [4] como temperatura [5], precipitaciones [6] y evapotranspiración [7]. Estos cambios afectan la disponibilidad [8] y la variabilidad del recurso hídrico [9, 10] que soportan la funcionalidad ambiental de los ecosistemas presentes en cuencas hidrográficas [11]. Una de estas respuestas se manifiesta a través del cambio de coberturas vegetales ante el avance de los pisos térmicos y modificación del régimen hídrico [12].

El cambio de coberturas de la tierra, en su parte, incide sobre las tasas de evapotranspiración, afectando la proporción de los componentes del balance hídrico. La dificultad en evaluar este impacto consiste en que en las zonas del país, y, más que todo en las zonas de páramos, la red de monitoreo hidrometeorológico es escasa y, a veces, es ausente [13]. No obstante, el acercamiento a estas evaluaciones es necesario es importante porque el 70 % de cuencas abastecedoras en Colombia nacen en los páramos y diferentes usos del agua [14], así como la conservación de integridad ecológica [15, 16], dependen del servicio de provisión y regulación hídrica.

Por este motivo, se debe acudir a los métodos indirectos para evaluar cómo el fenómeno del cambio climático global incide sobre los servicios de provisión y regulación hídrica. En el presente estudio se propone una metodología que integra los análisis hidro-climáticos con las herramientas de teledetección para cumplir con estos objetivos. La metodología se comprueba en la cuenca del río Teatinos del páramo Rabanal que es estratégica desde el punto de vista de abastecimiento del departamento de Boyacá.

Los resultados obtenidos sirven para evaluar de manera indirecta la disponibilidad del recurso hídrico que hasta la fecha no es monitoreada y ayudan a comprender si los cambios de coberturas de tierra en los últimos años conjunto con el efecto del calentamiento global han provocado algún cambio en la disponibilidad del agua y en la capacidad de regulación hídrica en la cuenca del río Teatinos. Adicionalmente, la metodología desarrollada puede ser replicada en otras cuencas hidrográficas del país que tiene deficiencias en red de monitoreo hidrológico.

Metodología

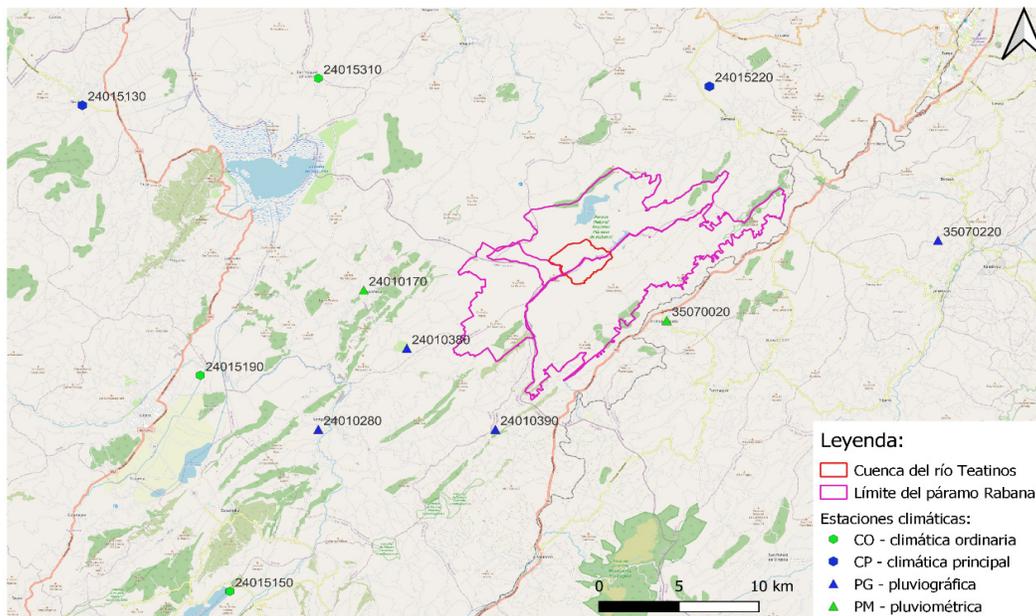
El páramo Rabanal se localiza a 1.093.706 Norte y 1.058.549 Este entre los Departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Según el Acuerdo 026 de 2009 el páramo es declarado Parque Natural Regional Páramo Rabanal con el fin de preservar y recuperar sus ecosistemas [17]. En el páramo nacen diferentes fuentes hídricas y para algunas se han hecho estudios relacionados con la evaluación de las principales problemáticas ambientales [18, 19, 20]. Aunque diferentes documentos afirman la importancia hidro-ecosistémica del páramo Rabanal [17], la red de monitoreo hidrológico en la zona es muy deficiente y los estudios hidrológicos son inexistentes. Lo último justifica la necesidad de realizar diagnóstico de servicios de provisión y regulación hídrica de diferentes cuencas hidrográficas que nacen en el páramo y su afectación por los cambios de coberturas de tierra con miras hacia la futura consolidación de los proyectos de conservación y restauración de servicios ecosistémicos.

En esta oportunidad se priorizó la cuenca del río Teatinos que se localiza en la parte sur del páramo Rabanal y comprende los municipios de Samacá, Cucaita, Tunja, Soracá, Ventaquemada, Boyacá, Ramiriquí y Jenesano. El río vierte sus aguas a la represa con el mismo nombre que es la principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad de Tunja. La cuenca está conformada por dos subcuencas que son la quebrada Cortaderal

y el río Teatinos que se unen a una altura de, aproximadamente 3 000 msnm. Adicionalmente, el río es la principal fuente de abastecimiento de la ciudad de Tunja, surte agua al acueducto veredal para las veredas Gacal y Tibaquira y al acueducto regional para abastecer la vereda Puente Boyacá y el sector San José de Gacal del municipio de Ventaquemada. Adicionalmente, las aguas de la cuenca se usan para abastecer demandas para la agricultura de cultivos transitorios (papa, principalmente) [17]. El sobreuso de la cuenca genera afectaciones sobre la calidad y la cantidad del recurso hídrico, que restringe su uso porque la disponibilidad del agua en las épocas de estiaje puede llegar a ser cercana a cero. Por lo mencionado anteriormente, la cuenca del río Teatinos tiene una importancia ecológica y estratégica desde el punto de vista del servicio de provisión del agua.

En la siguiente figura se presenta la ubicación de la cuenca del río Teatinos dentro del páramo Rabanal conjunto las estaciones hidrometeorológicas presentes en la zona que se usaron en el estudio.

Figura 1. Localización de las estaciones hidrometeorológicas en la región de la cuenca del río Teatinos.



Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver de la figura anterior, en la cuenca no hay estaciones hidroclimatológicas, pero hay unas estaciones que se encuentran en cercanía geográfica a esta.

Para evaluar el estado actual del recurso hídrico y su afectación por el cambio de coberturas de la tierra y posibles cambios de temperatura asociados al cambio climático, se diseñó una metodología que integra los análisis climáticos y estadísticos con las herramientas de teledetección. En el estudio se propuso desarrollar el balance hídrico – climático distribuido multi-temporal, partiendo de la ecuación general del balance hídrico:

$$Y = P - E - I - \Delta \quad (1)$$

Donde:

Y - Escorrentía superficial, mm

P - Precipitación, mm

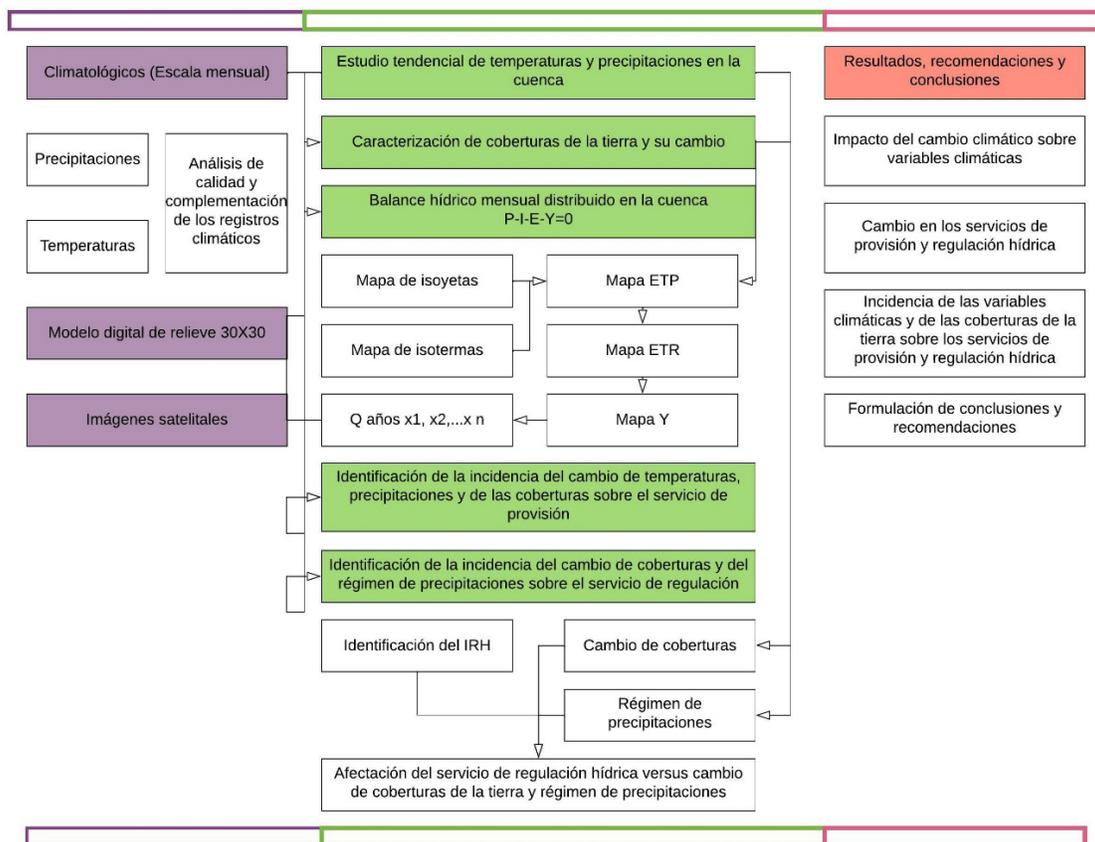
E - Evaporación, mm

I - Infiltración, mm

Δ - Demandas hídricas por agricultura, mm

Para llevar a cabo la investigación, la metodología se desarrolló en tres etapas que se presentan en la Figura 2. Con el color morado se presenta la etapa de la adquisición de los insumos para la investigación; el color verde se relaciona con el desarrollo metodológico y el color rosado indica la etapa final de interpretación de los resultados.

Figura 2. Principales etapas de la metodología



Fuente: elaboración propia.

Primera etapa (I): Inicialmente, se recopilan registros climáticos del IDEAM de series de precipitaciones totales mensuales y temperaturas medias mensuales de las estaciones meteorológicas, relacionadas en la Figura 1. Se procedió a realizarles el análisis de datos espurios a través del criterio de Grubb's para

eliminarlos posteriormente de los registros. Las series de precipitaciones y temperaturas medias mensuales con datos faltantes se complementaron a través del análisis correlativo con base en los registros completos de las estaciones cercanas, siempre cuando se demuestra su significancia estadística [21].

Otro de los insumos son las imágenes satelitales Landsat y Sentinel y modelo digital de relieve que se recopilaron desde la dirección <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las fechas de las imágenes satelitales se seleccionaron de tal forma para que coincidieran con el periodo de registro de las estaciones climáticas con el fin de relacionar resultados de estudios hidrológicos y análisis multi-temporal de coberturas.

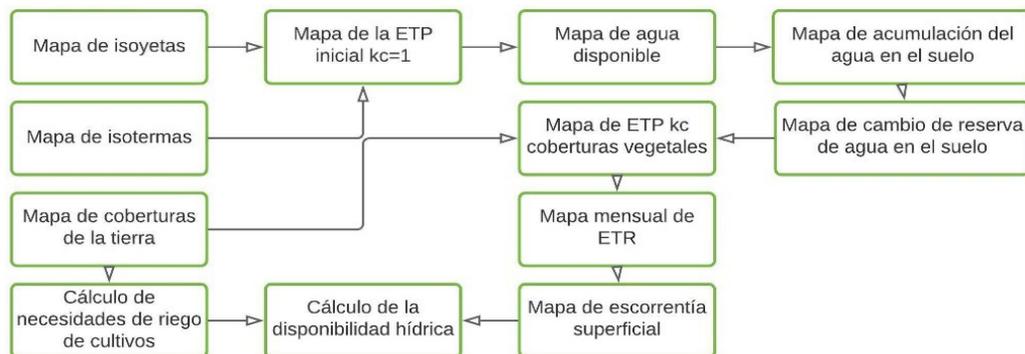
Segunda etapa (II): la segunda etapa consiste en el desarrollo metodológico.

II.I: Inicialmente, se procede a realizar el análisis tendencial de temperaturas y precipitaciones con su respectiva significancia estadística [22] para evaluar si su comportamiento se encuentra forzado por una fuerza motriz externa, posiblemente asociada al cambio climático global [23].

II.II: Posteriormente, se realiza la caracterización de las coberturas de la tierra. Esta se hace con la clasificación de CORINE Land Cover [24] a través del software Erdas hasta el tercer nivel de coberturas de la tierra. La validación de la clasificación supervisada se recomienda a hacer con el mapa de coberturas que se encuentra a través de [25]. En la metodología se maneja el supuesto que las coberturas de la tierra interpretadas para una fecha serán representativas para todo el año calendario. Para las coberturas de cultivos, se considerará su permanencia dentro del año y el cálculo de la demanda hídrica tendrá corte mensual, teniendo en cuenta distintas épocas de crecimiento.

II.III: El tercer paso en el desarrollo metodológico consiste en la construcción del balance hídrico- climático distribuido, cuyos pasos se presentan en la Figura 2 y se detallan en la Figura 3.

Figura 3. Mapa conceptual en la construcción del balance hídrico distribuido, integrando la información de coberturas vegetales en el proceso de evapotranspiración.



Fuente: elaboración propia.

Inicialmente, se construyen de los mapas de isoyetas totales mensuales para cada año de análisis y, posteriormente, se construyen los mapas de isotermas. Estos se obtienen con base en la relación altitudinal de temperaturas. Para este fin se obtiene una ecuación de regresión entre temperaturas medias mensuales y altitud para cada año de estudio, y utilizando el modelo digital de relieve, se contruyen mapas de isotermas a través de la herramienta QGis.

Después, se definen valores de evapotranspiración potencial mensual según los datos de las estaciones climáticas cercanas a la cuenca hidrográfica. En la investigación se usa el método de Thornthwaite que

demonstró ser uno de los más verídicos en el país [26] para estimar la evapotranspiración potencial. Posteriormente, los resultados numéricos de la evapotranspiración potencial se usan para construir los mapas mensuales de esta variable climática para cada año de análisis. En cada nodo del análisis se calcula el valor de la evapotranspiración potencial a través de la siguiente ecuación:

$$ETP_{inicial} = 16 \left(10 \frac{T}{I} \right)^\alpha \quad (1)$$

Dónde:

T Temperatura media mensual, C

I Índice calorífico anual dado por:

$$\alpha = (675 * 10^{-9})I^3 - (771 * 10^{-7})I^2 + (179 * 10^{-4})I + 0.492$$

$$i = \left(\left(\frac{T_{mensual}}{5} \right)^{1.514} \right)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

Los valores de evapotranspiración calculados por la ecuación anterior no incluyen el efecto de las coberturas en este proceso. Por eso, el siguiente paso consiste en calcular la evapotranspiración considerando el efecto de estas. En este paso de la metodología se integran los análisis de interpretación de coberturas de la tierra y el estudio climático. Es ampliamente conocido que diferentes coberturas vegetales tienen diferente capacidad de evaporar el agua. Para cada una de las coberturas la FAO recomienda los siguientes valores del coeficiente de cultivo para calcular los valores de la evapotranspiración con el efecto de dichas coberturas:

$$ET_c = K_c ET_{inicial} \quad (2)$$

Donde:

ETR_c - Evapotranspiración de cultivo, mm/mes

K_c - Coeficiente de cultivo, adimensional

$ETR_{inicial}$ - Evapotranspiración de referencia (pasto), mm/mes

Siguiendo la clasificación de coberturas de Corine Land Cover [24], en la cuenca del río Teatinos se presentan coberturas vegetales como: pastos y cultivos, pastos arbolados, vegetación de páramo o herbazal, tubérculos, bosque abierto y bosque ripario (de galería). A continuación, se presenta la asociación de las coberturas de la tierra versus el índice de cultivo:

Tubérculos y otros cultivos: Los valores del coeficiente de cultivo cambian dependiendo de la etapa de crecimiento de cultivo (inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada) que se pueden consultar en la [27], teniendo en cuenta que en la cuenca hay cultivos de papa.

Un especial interés presentan áreas con superficies agrícolas porque no solo influyen al proceso de evaporación, sino porque en algunas épocas del año necesitarán de actividades de riego, definidas como diferencia entre su necesidad de agua y precipitación efectiva [27]. El riego de cultivos disminuye oferta hídrica en la cuenca e influye a su variabilidad temporal. La estimación de la demanda hídrica de cultivos se hace a escala mensual para las zonas de la cuenca del río Teatinos que tiene cobertura de cultivos, según la interpretación de coberturas de la tierra. La verificación de tipo de cultivos se hace con base en las fuentes de información secundaria disponibles en la [28].

- Vegetación arbustal y pastos arbolados: para superficies extensas de este tipo de vegetación los valores del coeficiente de cultivo son menores o iguales a 1.4 ETP de referencia, incluso en las condiciones áridas del clima. El valor más exacto se estima según las recomendaciones de la FAO dependiendo del ancho de la superficie arbustal que se puede calcular a través de las herramientas de teledetección.
- Superficie arbórea (bosque ripario y bosque abierto): los valores del coeficiente de cultivo llegan a ser hasta 2.5 ETP de referencia.
- Pastos y cultivos: para esta cobertura se considera el valor promedio mensual entre el coeficiente de referencia de pasto (igual a uno) y el valor del cultivo de papa, dependiente de su estado de crecimiento.
- Vegetación de páramo o herbazal: el coeficiente de cultivo es igual a uno, equivalente al valor de cultivo de referencia.

A continuación, se construyen los mapas mensuales de la evapotranspiración real para año de registro siguiendo la metodología mencionada anteriormente [26]. Terminando la construcción del balance hídrico, se obtienen doce mapas de isoyetas, evapotranspiración real y escorrentía superficial para cada año de análisis. Los valores mensuales de escorrentía superficial se traspasan a m³/s conociendo el área de la cuenca, así, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y \\ A \end{array} \right\} \rightarrow Q_{oferta\ hídrica} \quad (3)$$

El valor del agua disponible en la cuenca se calcula restando del valor de la oferta hídrica el valor de la demanda del agua por los cultivos. La necesidad de riego presenta un balance entre precipitación efectiva y demanda hídrica de cultivo. Este parámetro se obtiene mes a mes a través de la construcción del balance hídrico – climático. La demanda de agua del cultivo se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$D_a = 10 \sum_{d=1}^{lp} \frac{(k_c \times ETP) - \frac{(P \times K_s)}{100}}{k_r} \times A = \Delta \quad (4)$$

Donde:

D_a - Demanda de agua del cultivo (m³/ha)

10 - Es el factor que aplica para convertir a m³/ha

k_c - Coeficiente de cultivos

lp - Duración del periodo de crecimiento

- ETP** - Evapotranspiración de referencia (pasto) potencial (mm)
- P** - Precipitación (mm)
- k_e** - Coeficiente de escorrentía
- k_r** - Coeficiente de eficiencia de riego. Por parte del IDEAM se recomienda tener el coeficiente de eficiencia promedio del 65% [26].
- A** - Área sembrada (ha)

Al conocer el área de cultivos y la demanda mensual de cultivo en m³/ha, este valor se traspasa a mm para ser comparado con el valor de precipitación efectiva. Cuando la demanda hídrica de cultivo es menor que la precipitación efectiva, no se necesitan actividades de riego y esta se satisface por medio de lluvia, mientras que, cuando la demanda hídrica de cultivo es mayor que la precipitación efectiva, se necesita el riego cuyo valor será la diferencia entre el valor de la demanda hídrica de cultivo y el de la precipitación efectiva del mes. De esa manera, se caracterizarán las necesidades de riego mensual y anual para los años de estudio.

Finalmente, se calcula el valor anual del agua disponible:

$$Q_{\text{disponibilidad hídrica}} = Q_{\text{oferta hídrica}} - D_a \quad (5)$$

En el estudio se maneja la hipótesis que los servicios de provisión y regulación hídrica dependen del régimen pluviométrico y de las coberturas vegetales. La disponibilidad de aguas lluvias influye directamente a la disponibilidad hídrica y, se cree, que el volumen de la oferta hídrica en la cuenca define su capacidad de regulación porque cuencas hidrográficas con mayor disponibilidad del agua tienden a ser más estables en su régimen hídrico que cuencas con oferta hídrica limitada y/o intermitente. Este supuesto se confirmará en el desarrollo del estudio. Así mismo, diferentes tipos de coberturas de la tierra tienen su propio poder evaporante que es uno de los principales componentes salientes del balance hídrico. Por este motivo, el cambio en las coberturas vegetales incide sobre los servicios de provisión y regulación hídrica y la evaluación de este impacto se describirá en los siguientes pasos de la metodología.

II.IV: Como se había mencionado anteriormente, en el estudio se asume que el servicio de provisión hídrica depende del régimen de precipitaciones y del cambio de las coberturas vegetales que afectan valores de evapotranspiración. Por eso, el siguiente paso consiste en la construcción de regresión entre los valores de disponibilidad hídrica versus precipitaciones y versus áreas de las coberturas vegetales que han experimentado un cambio. El valor del coeficiente de correlación indica en qué grado la disponibilidad hídrica (servicio de provisión hídrica) depende de las dos variables condicionantes. La significancia estadística de las regresiones construidas se revisa a través del estadístico t [29].

II.V: Finalmente, se procede a evaluar si el servicio de regulación hídrica se ve afectado en las últimas décadas por las variables mencionadas anteriormente. Para realizar dicha evaluación es necesario definir que es servicio de regulación hídrica. Por este se puede definir la capacidad natural para regular la escorrentía superficial por los componentes de la cuenca hidrográfica que influyen en la retención de sus aguas como las coberturas de la tierra, las conexiones con las aguas subterráneas, el régimen pluviométrico y las características del suelo que tienen incidencia directa en la infiltración [30]. La integración de todos estos efectos sobre la capacidad de regulación hídrica se puede evaluar a través del Índice de Regulación Hídrica (IRH) [31]. El IRH se calcula a través de las curvas de duración de caudales, obtenidos para cada año de estudio en el proceso de construcción de los balances hidro-climáticos mensuales. Su valor numérico indica la capacidad de regulación de escorrentía superficial por la cuenca hidrográfica [32].

Posterior al cálculo del IRH, sus valores se correlacionan con los valores de precipitación media anual en la cuenca y las áreas de las coberturas de la tierra cuyo cambio se ha demostrado estadísticamente. Es con el fin de evaluar que tanto la capacidad de regulación hídrica depende del régimen pluviométrico y del cambio de las coberturas vegetales. El valor del coeficiente de correlación indica en qué grado estas variables se relacionan.

Tercera etapa: finalmente, en la última etapa se analizan resultados y se formulan conclusiones y recomendaciones con relación a las siguientes interrogantes:

- Si se evidencia el efecto del cambio climático global sobre el régimen de las variables climatológicas.
- Si en las últimas décadas se ha observado un cambio en los servicios de provisión y regulación hídrica.
- Se llegase a demostrar un cambio en los servicios de provisión y regulación hídrica, se analizará si este esté asociado al régimen pluviométrico y/o al cambio de las coberturas vegetales en la cuenca hidrográfica.
- Con base en los resultados obtenidos se formulan recomendaciones del manejo de coberturas de la tierra del páramo para preservar y/o restaurar los servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica.

Resultados

I: En la primera etapa se descargaron registros de precipitaciones totales mensuales y de temperaturas medias mensuales de las estaciones, cuya información se presenta en la Tabla 1 y en la Figura 1. Los registros de precipitaciones se complementaron con registros continuos de otras estaciones con el cumplimiento de la significancia estadística de correlación.

TABLA 1. ESTACIONES DE PRECIPITACIONES CONSULTADAS EN EL ESTUDIO

| Estaciones registradoras de precipitaciones | | | Estaciones registradoras de temperaturas | | |
|---|--------------|---------------------|--|--------------------|---------------------|
| Código | Nombre | Periodo de registro | Código | Nombre | Periodo de registro |
| 2401017 | Guachetá | 1969 - 2020 | 2401515 | Carrizal | 1951 - 2018 |
| 3507022 | Jenesano | 1969 - 2020 | 2120540 | Checua - Nemocón | 1961 - 2018 |
| 2401080 | Las Minas | 1969 - 2020 | 2401519 | Novilleros | 1966 - 2019 |
| 3507002 | Ventaquemada | 1969 - 2020 | 2120557 | La Primavera | 1966 - 2019 |
| 2401522 | Villa Carmen | 1969 - 2020 | 2401531 | San Miguel de Sema | 1991 - 2019 |
| 2401038 | El Puente | 1969 - 2020 | 2401513 | Simijaca | 1985 - 2019 |
| 2401039 | El Triángulo | 1969 - 2020 | | | |

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se descargaron las imágenes satelitales de libre acceso para, posteriormente, a través de estos caracterizar las coberturas de la tierra. La información sobre las fechas de las imágenes descargadas y su sensor se presenta en la Tabla 2.

TABLA 2. FECHAS Y TIPOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES CONSULTADAS EN EL ESTUDIO

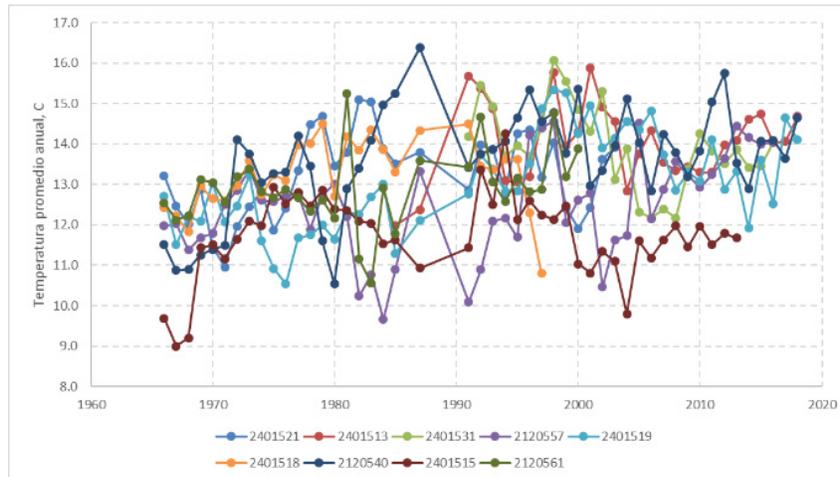
| N | Sensor | Fecha | N | Sensor | Fecha |
|---|-----------|------------|---|-----------|------------|
| 1 | Landsat 4 | 15/11/1987 | 5 | Landsat 5 | 10/04/2010 |
| 2 | Landsat 5 | 02/09/1992 | 6 | Sentinel | 10/01/2016 |
| 3 | Landsat 5 | 10/04/1998 | 7 | Sentinel | 30/12/2018 |
| 4 | Landsat 7 | 06/03/2002 | | | |

Fuente: elaboración propia.

II. El siguiente paso consiste en los resultados obtenidos en el desarrollo metodológico.

II.I: Para evaluar la evolución de las temperaturas medias, se construyeron las gráficas de variación de temperaturas medias y se construyó su tendencia [22]. A continuación, se presentan los resultados de este análisis de manera gráfica.

Figura 4. Variación anual de temperatura promedio de las estaciones aledañas a la cuenca del río Teatinos.



Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se presenta el resumen estadístico de la significancia de la tendencia lineal para las series de temperaturas medias anuales.

TABLA 3. RESUMEN DE LA SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA DE LA TENDENCIA LINEAL EN LAS SERIES DE TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES

| Código de estación | Valor t empírico | Valor t crítico | Resultado |
|--------------------|------------------|-----------------|---|
| 2401521 | 0.13 | 2.12 | Tendencia estadísticamente significativa |
| 2401513 | 0.21 | 2.14 | Tendencia estadísticamente significativa |
| 2401531 | 0.00 | 2.18 | Tendencia estadísticamente significativa |
| 2120557 | 0.00 | 2.07 | Tendencia estadísticamente significativa |
| 2401519 | 0.00 | 2.07 | Tendencia estadísticamente significativa |
| 2120561 | 0.25 | 2.14 | Tendencia estadísticamente no significativa |
| 2401518 | 0.02 | 2.13 | Tendencia estadísticamente significativa |
| 2120540 | 0.00 | 2.05 | Tendencia estadísticamente significativa |
| 2401515 | 0.47 | 2.08 | Tendencia estadísticamente no significativa |

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver de la Figura 4 y lo que afirman los resultados de la prueba t con el nivel de significancia del 5%, el 66 % de las estaciones analizadas confirman una tendencia estadísticamente significativa hacia el crecimiento de temperaturas medias anuales, mientras que el 33 % de estas no notan una patrón de crecimiento de esta variable climática. Los resultados obtenidos están coherentes con los estudios de manifestación del cambio climático en Colombia que confirman este crecimiento en los valores de temperaturas medias [33].

II.II: el siguiente paso en la obtención de los resultados se relaciona con la caracterización de las coberturas de la tierra hasta el tercer grado según la metodología [24]. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

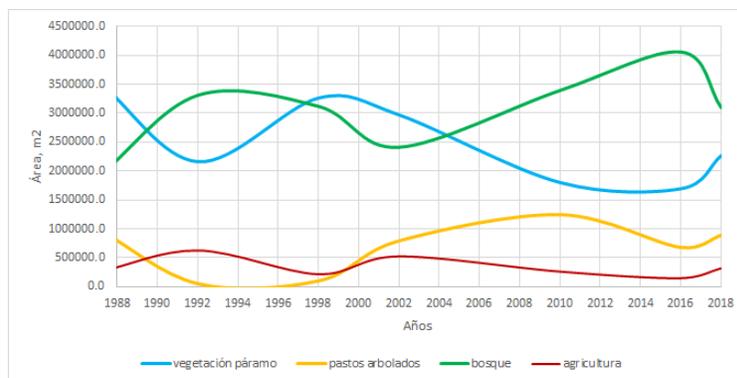
TABLA 4. VALORES DE LAS ÁREAS DE COBERTURAS DE LA TIERRA EN LA CUENCA DEL RÍO TEATINOS EN EL PERIODO DE 1987 A 2018 (KM²)

| Cobertura de la tierra | años | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1987 | 1992 | 1998 | 2002 | 2010 | 2016 | 2018 |
| Pastos arbolados | 1.01 | 0.05 | 0.10 | 0.79 | 1.25 | 0.81 | 0.89 |
| Pastos cultivivos | 0.07 | 0.62 | 0.16 | 0.38 | 0.21 | 0.14 | 0.19 |
| Bosque ripario | 1.45 | 2.93 | 2.15 | 2.06 | 2.18 | 3.47 | 2.63 |
| Bosque abierto | 0.42 | 0.38 | 0.96 | 0.35 | 1.21 | 0.58 | 0.46 |
| Vegetación paramo | 3.58 | 2.16 | 3.26 | 2.97 | 1.79 | 1.69 | 1.58 |
| Tubérculos | 0.17 | 0.02 | 0.05 | 0.15 | 0.05 | 0.00 | 0.12 |

Fuente: elaboración propia.

De manera gráfica los resultados se presentan en la Figura 5. En esta las coberturas de bosque abierto y bosque ripario se agruparon bajo la misma categoría de bosque para una mejor visualización de los resultados.

Figura 5. Evolución de las áreas de coberturas de la tierra en la cuenca del río Teatinos.



Fuente: elaboración propia.

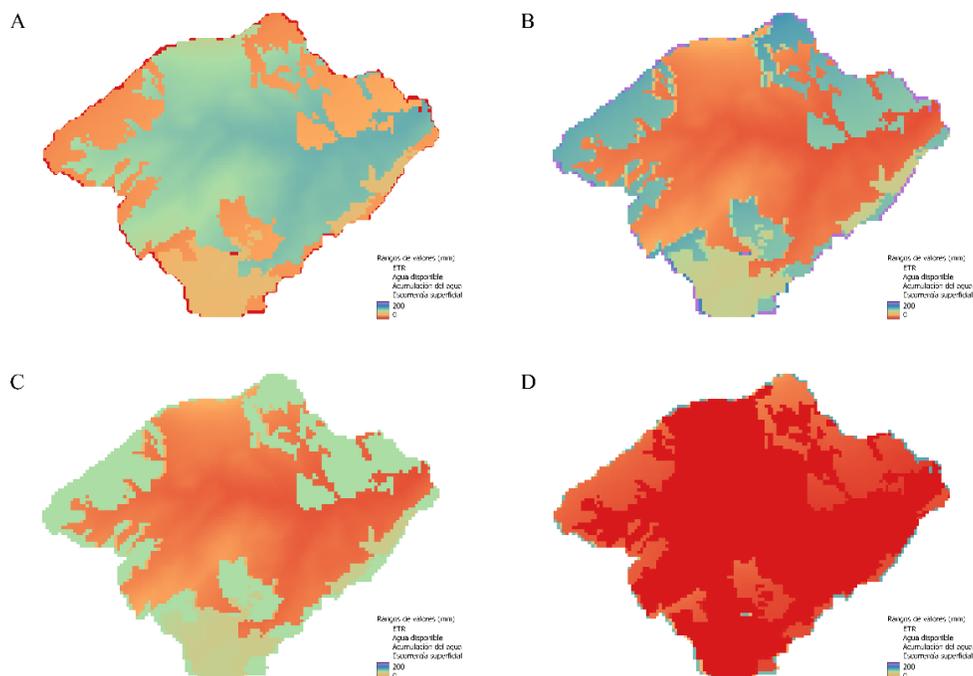
Como se puede ver de la Tabla 4 y Figura 5, en las últimas dos décadas se observa un incremento hacia las coberturas boscosas conjunto con un decrecimiento de las coberturas del páramo, mientras que las coberturas asociadas a las actividades humanas como pastos y cultivos y tubérculos, aunque presentan algunas fluctuaciones, no indican una tendencia hacia un cambio estadísticamente significativo.

II.III: el tercer paso en el desarrollo metodológico consiste en la construcción del balance hídrico climático que contiene la elaboración de los mensuales de isoyetas, isotermas, evapotranspiración potencial, agua

disponible mensual, cantidad de almacenamiento, cambio de almacenamiento y, finalmente, el mapa de evapotranspiración mensual para cada año de los años de análisis. En la Figura 6 se presentan los ejemplos de los mapas.

Figura 6. Ejemplo de los mapas climáticos (año 2016, mes de abril)

A – Mapa de Evapotranspiración real, (mm); B – Mapa de agua disponible, (mm), C – Mapa de acumulación del agua, (mm); D – Mapa de escorrentía superficial, (mm).



Posteriormente, los mapas mensuales se convirtieron a los mapas anuales de ETR, isoyetas y de escorrentía superficial para cada año de registro. Con base en la construcción del balance hídrico – climático se obtuvieron los siguientes valores de sus componentes (Tabla 5).

TABLA 5. VALORES ANUALES DE PRECIPITACIÓN TOTAL, EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO TEATINOS

| Año | P, mm | ETR, mm | Y neta, mm |
|------|---------|---------|------------|
| 1987 | 751.25 | 630.81 | 120.44 |
| 1992 | 805.04 | 475.97 | 329.07 |
| 1998 | 897.6 | 579.45 | 318.15 |
| 2002 | 736.64 | 680.48 | 56.16 |
| 2010 | 1013.38 | 702.21 | 311.17 |
| 2016 | 898.1 | 784.9 | 113.2 |
| 2018 | 905.60 | 730.03 | 175.57 |

Fuente: elaboración propia.

II.IV: La construcción del balance hídrico – climático posibilitó la estimación de la oferta hídrica en la cuenca del río Teatinos. Como se puede ver de la Tabla 5, se observan los incrementos tanto en la parte entrante del balance hídrico (precipitación), como en la parte saliente (evapotranspiración real) de este. Al

conjugar las tendencias de estas dos variables climáticas, el efecto del incremento de evapotranspiración real se compensa por el incremento de pluviosidad, dejando estadísticamente no significativo el efecto sobre la disponibilidad hídrica. Esto indica que en las últimas décadas en la cuenca del río Teatinos no se observó un cambio en el servicio de provisión hídrica.

Se procedió a analizar más a fondo las razones de cambio de evapotranspiración real y precipitación.

Normalmente, los valores de evapotranspiración real dependen directamente del régimen de temperaturas. Los análisis de correlación construidos confirman que en un 78 % la variación de evapotranspiración está asociada al comportamiento de temperaturas medias en la cuenca. Esto indica que el efecto del cambio climático global en la cuenca se manifiesta en el régimen de evapotranspiración real.

En el estudio se maneja la hipótesis que el incremento de la evapotranspiración real en la cuenca depende tanto de temperaturas, como de las coberturas vegetales, porque cada una de estas tiene diferente patrón evaporante. Para confirmarlo, los valores de evapotranspiración real se correlacionaron juntamente con las series de temperaturas medias y las áreas de la cobertura boscosa y la del páramo. Como resultado se obtuvo que la ETR en un 89 % depende de las variaciones de estas tres variables, confirmando el supuesto que el crecimiento de la ETR está asociado al crecimiento de temperaturas medias en la cuenca, incremento de la cobertura boscosa y disminución de la cobertura del páramo.

Posteriormente, se procedió a analizar una posible causa del crecimiento de las precipitaciones totales anuales en la cuenca. Al suponer que este crecimiento se debe a la evolución de las coberturas vegetales en el páramo, se construyeron correlaciones estadísticas entre la variable climática versus áreas de las coberturas, donde se encontró que en un 68 % este cambio se encuentra asociado a la expansión de la cobertura boscosa.

Aunque las áreas de los cultivos en las últimas décadas no han tenido una expansión, sigue presente el desarrollo agrícola en la cuenca. Por eso, se calculó la demanda de riego cuyos valores se contrastaron con los valores de disponibilidad hídrica. Para algunos años con disponibilidad hidrológica limitada, las demandas hídricas de cultivos se igualan a la oferta o la supera ligeramente. Esto indica que, aunque en los últimos años no se ha notado una expansión del área de cultivos, la demanda hídrica de estos puede comprometer la oferta del agua en la cuenca. Estos resultados se pueden considerar como aproximados y deben estar contrastados con el censo de los usuarios del agua y los volúmenes del agua concesionada. En el caso de no existir censos, estos deben ser levantados para conocer los valores precisos y actualizados de las demandas hídricas en la cuenca porque estas pueden comprometer el servicio ecosistémico de provisión hídrica tanto para la ciudad de Tunja como para la conservación del ecosistema del páramo. De hecho, algunos estudios existentes indican que en algunas cuencas hidrográficas del páramo Rabanal demandas hídricas compiten con la oferta [34].

II.V: finalmente, en la última etapa de la metodología se pretende evaluar el servicio de provisión hídrica de la cuenca y evaluar si este ha presentado algún tipo de cambio en el periodo de análisis. Como se había mencionado anteriormente, el servicio de regulación hídrica se evalúa a través del índice IRH, cuyos valores se presentan en la Tabla 6.

TABLA 6. VALORACIÓN DEL SERVICIO DE REGULACIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO TEATINOS SEGÚN LOS VALORES DEL IRH

| N | Año | Valor del IRH | Capacidad de regulación |
|---|------|---------------|-------------------------|
| 1 | 1987 | 0.13 | Muy baja |
| 2 | 1992 | 0.14 | |
| 3 | 1998 | 0.20 | |
| 4 | 2002 | 0.24 | |
| 5 | 2010 | 0.13 | |
| 6 | 2016 | 0.13 | |

Fuente: elaboración propia.

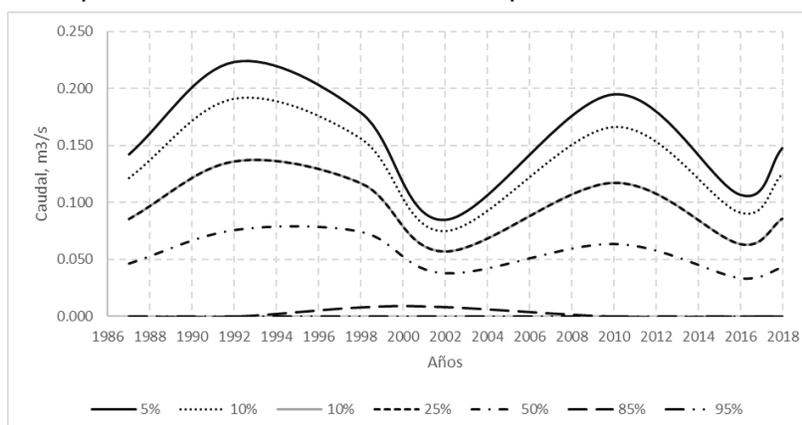
Como se puede ver de los valores del IRH [35], por tener en todos los casos el valor inferior a 0.5, la capacidad de regulación hídrica de la cuenca se caracteriza como muy baja. Este hecho se debe a las características de los suelos y a las coberturas vegetales presentes en la cuenca. Los suelos en la cuenca son superficiales con rocas en superficies y con pendientes pronunciadas que en conjunto no contribuyen a la regulación y retención de escorrentía superficial. Y aunque en la cuenca aproximadamente el 50 % del área se encuentra ocupada por la cobertura de bosque abierto y bosque de galería, su función de regular la escorrentía superficial no hace un aporte notorio al servicio de regulación hídrica.

Desde las curvas de duración de caudales, construidas para los 6 años de análisis, se calcularon los valores de los caudales en la cuenca para diferentes percentiles con el fin de analizar cómo estos han cambiado a través de tiempo. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 7 y la Tabla 7.

TABLA 7. VALORES DE LOS CAUDALES MEDIOS PARA DIFERENTES PERCENTILES DE LOS AÑOS DEL ESTUDIO PARA LA CUENCA DEL RÍO TEATINOS

| Año | Percentil | | | | | | | |
|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 25 | 50 | 75 | 85 | 90 | 95 |
| 1987 | 0.142 | 0.121 | 0.086 | 0.046 | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1992 | 0.223 | 0.191 | 0.136 | 0.076 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1998 | 0.179 | 0.156 | 0.117 | 0.074 | 0.031 | 0.008 | 0.000 | 0.000 |
| 2002 | 0.085 | 0.075 | 0.057 | 0.038 | 0.019 | 0.008 | 0.002 | 0.000 |
| 2010 | 0.195 | 0.166 | 0.117 | 0.064 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2016 | 0.107 | 0.091 | 0.064 | 0.034 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2018 | 0.148 | 0.125 | 0.086 | 0.043 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Figura 7. Variación temporal de los caudales de los diferentes percentiles de la cuenca del río Teatinos



Como se evidencia de la Tabla 7, casi en todos los años analizados los caudales correspondientes a los percentiles 85, 90 y 95 tienen valor de cero. Este hecho indica que, en las épocas de estiaje, la oferta hídrica en la cuenca puede igualarse a cero. Vale la pena resaltar que este resultado debe estar corroborado con medición de caudales en campo en los meses de baja pluviosidad.

Como se puede ver de la Figura 7, a través de los años se presenta una variación de los caudales medios de los diferentes percentiles. No obstante, este comportamiento no tiene una tendencia hacia crecimiento o decrecimiento. No obstante, en cada año los caudales de diferentes percentiles se incrementan o se disminuyen en la misma proporción, patrón, que está directamente relacionado con los niveles de pluviosidad. Esto indica que la capacidad de regulación hídrica está directamente relacionada con la disponibilidad de aguas lluvias. Para comprobar este hecho, los valores del IRH presentados en la Tabla 6 se correlacionaron con los valores de precipitación total anual de la Tabla 5. El coeficiente de correlación arrojó un valor de 0.43, lo que indica que en un 43 % la capacidad de regulación hídrica está asociada al régimen de precipitaciones y a mayor pluviosidad cuencas hidrográficas tienen una mejor capacidad de regular la escorrentía superficial. De lo último se concluye que, conservando los demás factores externos invariables, la capacidad de regulación hídrica es más alta en años hidrológicamente húmedos que en los secos.

Otro factor que influye sobre el servicio de regulación hídrica son las coberturas de la tierra [36]. Por este motivo, los valores del IRH se contrastaron contra los valores de precipitaciones y las áreas de los páramos que están presentado un proceso de contracción, obteniendo el valor del coeficiente de correlación igual a 0.6, donde existe relación directa entre el índice versus precipitación y las áreas de las coberturas de herbazal de páramo. Lo último indica que, en el escenario de la disminución del área de los páramos, la capacidad de regulación hídrica en la cuenca del río Teatinos disminuye. Este resultado demuestra que el desplazamiento de las coberturas nativas del páramo influye negativamente sobre la capacidad de regulación de escorrentía superficial.

Conclusiones

En la región del páramo Rabanal se observa un incremento de temperaturas medias anuales que, muy seguramente, está asociado a los efectos del cambio climático global.

Inicialmente, el crecimiento de las temperaturas se refleja en el desplazamiento de los pisos térmicos hacia altitudes más altas que induce el avance de las coberturas boscosas sobre las coberturas de páramo. El análisis estadístico a través del coeficiente de correlación afirma que en un 88 % la disminución de las coberturas del páramo se explica por la incidencia de la cobertura de bosque abierto y bosque ripario (de galería).

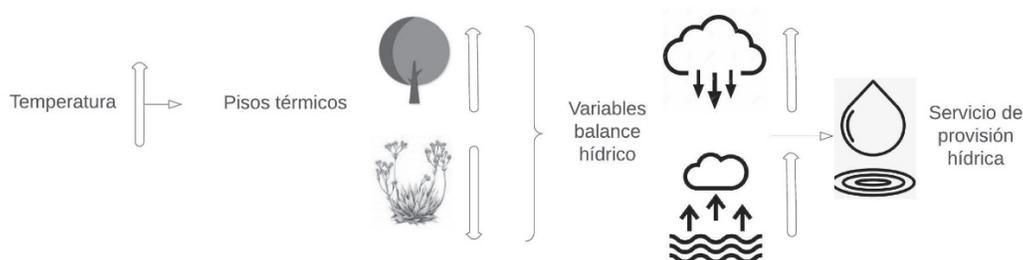
Con relación la hipótesis de expansión de la zona agrícola, la interpretación de las imágenes satelitales la refutó porque no se confirmó un incremento en las áreas de cultivos. No obstante, en algunos años con disponibilidad hídrica reducida las áreas existentes con cultivos de tubérculos (papa) demandan riego que es igual o superior de la disponibilidad hídrica media en la cuenca, vulnerando la prestación de servicios de provisión del agua para otras demandas hídricas antrópicas (suministro de agua para la ciudad de Tunja y demás poblaciones) y la provisión del agua para ecosistemas del páramo.

Los resultados obtenidos arrojaron que hasta la fecha no se presenta una afectación del servicio de provisión hídrica y, aunque existe una variabilidad de este a través de los años, no se ha logrado confirmar alguna tendencia hacia su crecimiento o disminución estadísticamente significativos. Aunque la oferta

hídrica en la cuenca permanece aparentemente estable, los demás componentes del balance hídrico como precipitación y evaporación presentan una tendencia creciente. El incremento de temperaturas, conjunto con la ampliación de la cobertura del bosque, motivan unas mayores tasas de evapotranspiración desde la cuenca del río Teatinos. Así mismo, se observa un crecimiento de precipitaciones totales anuales, posiblemente asociadas al cambio climático global. Por lo mencionado anteriormente, el crecimiento de las tasas entrante (precipitación) y saliente (evapotranspiración) del balance hídrico neutralizan el efecto del cambio de coberturas de la tierra sobre el servicio de provisión hídrica en la cuenca hidrográfica.

Este hecho indica sobre la complejidad del impacto del cambio de temperaturas, asociado al cambio climático, sobre diferentes componentes del balance hidrológico y sobre mecanismos de resiliencia para conservar oferta hídrica por cuencas hidrográficas [37, 38]. Aparentemente, el cambio de las coberturas de la tierra por el efecto del cambio climático se podría considerar como el mecanismo de resiliencia de la cuenca ante el cambio de las condiciones climáticas externas para conservar su funcionalidad en la prestación del servicio de provisión hídrica. Este fenómeno debe ser estudiado a mayor profundidad porque a través del manejo de coberturas vegetales en cuencas hidrográficas se podrían buscar estrategias de conservación del recurso hídrico. En la Figura 8, de manera gráfica se presenta lo mencionado anteriormente.

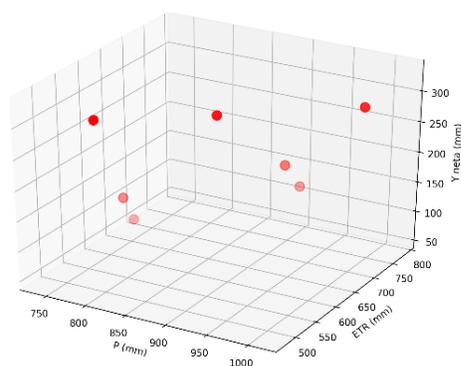
Figura 8. Esquema de la incidencia del cambio de temperaturas medias y coberturas de la tierra sobre los componentes del balance hídrico.



Fuente: elaboración propia.

En la siguiente figura se presenta la demostración gráfica de lo que el crecimiento de precipitación se compensa por el crecimiento de evapotranspiración, generando resiliencia en el proceso de escurrimiento superficial.

Figura 9. Interrelación entre precipitación, evapotranspiración real y escorrentía superficial en la cuenca del río Teatinos.



Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver de la Figura 9, los años cuando se presentan unas altas tasas de pluviosidad, se acompañan de los valores más altos de evapotranspiración y al contrario, dejando la variabilidad del recurso hídrico anual entre 100 a 250 mm.

De lo mencionado anteriormente se concluye que en la cuenca del río Teatinos no se observa una afectación del servicio de provisión hídrica, posiblemente asociado a los mecanismos de compensación o resiliencia ante el cambio climático y el desplazamiento de los pisos térmicos, reflejados en el avance de la cobertura boscosa y la contracción de las coberturas de páramo.

Con relación al servicio de provisión hídrica, se demostró que este depende directamente de la tasa de pluviosidad y del área de las coberturas de herbazal de páramo. Eso indica que en los años de alta pluviosidad la capacidad de regulación de escorrentía superficial incrementa.

La contracción de la cobertura del páramo, que se observa en las últimas décadas, afecta negativamente el servicio de regulación hídrica. No obstante, teniendo en cuenta que este también depende de la pluviosidad, en los años de alta humedad el servicio de regulación hídrica incrementa y en los años de baja humedad en conjunto con la disminución del herbazal de páramo este disminuye. Lo mencionado anteriormente indica que, aunque no se observa una tendencia hacia la disminución o el incremento en el servicio de regulación hídrica, existe una variabilidad temporal de este servicio que depende de los factores exógenos (precipitación y temperatura) y endógenos (coberturas de la tierra) de la cuenca.

Y aunque los factores exógenos corresponden a los fenómenos globales y no pueden ser controlados, se hace posible investigar sobre la restauración de las coberturas naturales de los páramos en la cuenca hidrográfica con el fin de conservar las condiciones naturales de los servicios de provisión y regulación hídrica. De todo lo mencionado anteriormente se concluye que no se ha demostrado un cambio en el servicio de provisión hídrica por el aparente mecanismo de resiliencia de la cuenca ante los motores forzantes y el servicio de regulación hídrica, aunque no presenta un cambio estadísticamente significativo, presenta una variabilidad temporal importante – producto del régimen pluviométrico y del cambio de las coberturas de la tierra (expansión de coberturas boscosas y contracción de coberturas de páramo).

El estudio presente se puede considerar como un acercamiento a la comprensión del efecto del cambio climático global y el del cambio de las coberturas naturales, asociado a este, sobre los servicios ecosistémicos de cuencas hidrográficas colombianas que son estratégicas desde el punto de vista socio-económico y de la conservación de integridad ecosistémica de los páramos.

En el país existe una tangible necesidad de instrumentar las cuencas hidrográficas con el fin de disponer de información medida y confiable sobre la disponibilidad y variabilidad del recurso hídrico [39]. Así mismo, es importante tener censos actualizados sobre tipos y volúmenes de demandas hídricas para gestión sostenible de los usos del agua en cuencas hidrográficas [40].

Así mismo, se deben estudiar mecanismos de resiliencia de cuencas hidrográficas para conservar su oferta hídrica como respuesta a las señales de cambio climático global y otras presiones de carácter antrópico con el fin de establecer límites de intervención humana y garantizar gestión sostenible del recurso hídrico [41, 42, 43].

Se recomienda comprobar la metodología sobre otras cuencas hidrográficas del país con una mejor disponibilidad de información hidroclimatológica, de imágenes satelitales y demandas hídricas con el fin de comprobar su exactitud en cuencas instrumentadas.

Referencias bibliográficas

1. T. Petrenko, K. Korznikov, D. Kislov y N. Belyaeva, «Modeling of cold - temperature tree *Pinus koraiensis* (Pinaceae) distribution in the Asia - Pacific region: Climate change impact,» *Forest Ecosystems*, p. article number 100015, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100015>
2. U. Jiménez, L. Peña y J. López, «Non-stationary analysis for road drainage design under land - use and climate change scenarios,» *Heliyon*, p. Article number e08942, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08942>
3. K. Rasouli, J. Pomeroy y P. Whitfield, «The sensitivity of snow hydrology to changes in air temperature and precipitation in three North American headwater basins,» *Journal of Hydrology*, p. Article number 127460, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127460>
4. C. Xie, X. Zhang, L. Zhuang, R. Zhu y J. Guo, «Analysis of surface temperature variation of lakes in China using MODIS land surface temperature data,» *Scientific Reports*, p. Article number 2415, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06363-9>
5. M. Mugwanya, M. Dawood, F. Kimera y H. Sewilam, «Anthropogenic temperature fluctuations and their effect on aquaculture: A comprehensive review,» *Aquaculture and Fisheries*, pp. 223 - 243, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.12.005>
6. B. Su, C. Xiao, Y. Huang, T. Dou y X. Wang, «Estimated changes in different forms of precipitation (snow, sleet, and rain) across China: 1961 - 2016,» *Atmospheric Research*, p. Article number 106078, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106078>
7. F. Zhao, S. Ma, Y. Wu, L. Qiu, W. Wang, Y. Lian, J. Chen y B. Sivakumar, «The role of climate change and vegetation greenness on evaporation variation in the Wellow River Basin, China,» *Agricultural and Forest Meteorology*, p. Article number 108842, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108842>
8. S. Ajjur y S. Al-Ghamdi, «Towards sustainable energy, water and food security in Qatar under climate change and anthropogenic stresses,» *Energy Reports*, pp. 514-518, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.099>
9. J. Yao, Y. Chen, X. Guan, Y. Zhao, J. Chen y W. Mao, «recent climate and hydrological changes in a mountain - basin system in Xinjiang, China,» *Earth - Science Reviews*, p. Article number 103957, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103957>
10. K. Vazquez y R. Muneeppeerakul, «Resilience of a Complex Watershed under Water Variability: A Modeling Study,» *Sustainability (Switzerland)*, p. Article number 1948, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14041948>
11. P. Sklenář, K. Romoleroux, P. Muriel, R. Jaramillo, A. Bernardi, M. Diazgranados y P. Moret, «Distribution changes in páramo plants from the equatorial high Andes in response to increasing temperature and humidity variation since 1880,» *Alpine Botany*, pp. 201 - 212, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00035-021-00270-x>
12. F. Zolfagharpour, B. Saghafian y M. Delavar, «Hydrological alteration and biodiversity change along the river network caused by anthropogenic activities and climate variability,» *Ecological Processes*, p. Article number 19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-022-00362-4>
13. C. A. Ruiz-Agudelo, S. L. Hurtado-Bustos, Y. P. Carrillo-Cortes y C. A. Parrado-Moreno, «Lo que sabemos y no sabemos sobre los sistemas agroforestales tropicales y la provisión de múltiples servicios ecosistémicos. Una revisión,» *Ecosistemas*, pp. 26-35, 2019. DOI: 10.7818/ECOS.1697

14. IAvH, «Biodiversidad colombiana: números a tener en cuenta,» 11 Septiembre 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1087-biodiversidad-colombiana-numero-tener-en-cuenta>.
15. C. Esse, R. Santander-Massa, F. Encina-Montoya, P. De los Ríos, D. Fonseca y P. Saaveda, «Multicriteria spatial analysis applied to identifying ecosystem services in mixed - use river catchment areas in south central Chile,» *Forest Ecosystems*, pp. 1-13, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0183-1>
16. M. Rodríguez- Morales, D. Acevedo-Novoa, D. Machado, M. Ablan, W. Dugarte y F. Dávila, «Ecohydrology of the Venezuelan páramo: water balance of a high Andean watershed,» *Plant Ecology & Diversity*, pp. 573-591, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/17550874.2019.1673494>
17. Corpoboyacá, «PMA Rabanal,» Corpoboyacá, Tunja, 2008.
18. M. Guerrero-Pedraza y M. Herrera-Mejía, «Evaluación del estado actual de la calidad hídrica y la percepción de la comunidad en el área de influencia de dos quebradas que nacen en el páramo Rabanal, en los Municipios de Villapinzón (Cundinamarca) y Ventaquemada (Boyacá,» *Revista de Tecnología*, pp. 77-86, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18270/rt.v14i2.1871>
19. D. Useche de la Vega y S. M. Márquez-Girón, «Diagnóstico socio - ambiental de la producción agrícola en el páramo de Ranabal (Colombia) como base para su reconversión agroecológica,» *Ciencia y Agricultura*, pp. 27-37, 2015.
20. J. D. Buitrago-Betancourt, «Minería, comercio internacional e impactos ambientales en el páramo El Rabanal de Samacá, Boyacá,» *Intrópica*, 15(1), 2020. DOI: <https://doi.org/10.21676/23897864.3426>
21. P. V. Guevara-García, L. C. Tamayo-Bacarela, D. V. Carrera-Villacrés, A. L. Balarezo-Aguilar, C. A. Narváez-Rivera y D. R. Morocho-López, «Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media,» *Idesia*, pp. 79-88, 2016.
22. A. Ramírez González, *Manual de estadística aplicado a las ciencias de la educación*, Bogotá D.C.: Javegraf, 2007.
23. Ó. Mesa, V. Urrea y A. Ochoa, «Trends of hydroclimatic intensity in Colombia,» *Climate*, p. Article number 120, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli9070120>
24. IDEAM, *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, Escala 1: 100: 000*, Bogotá D.C.: IDEAM, 2010.
25. SIAC, 23 Abril 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>.
26. IDEAM, «Estudio Nacional del Agua,» IDEAM, Bogotá D.C., 2010.
27. FAO, «Evapotranspiración de cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos N56,» FAO, 1990.
28. CAR, Corpoboyacá, Corpochivor y IAvH, «Estudio sobre el estado actual del macizo del páramo de Rabanal,» IAvH, Tunja, 2008.
29. L. M. Castro y Y. Carvajal-Escobar, «Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas,» *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, pp. 15-25, 2010.
30. Y. Ivanova y L. Marín Arévalo, «Estudio de afectación del servicio ecosistémico de regulación hídrica por actividades de agricultura en la cuenca del río Gacheneca I, páramo Rabanal,» *Gestión y Ambiente*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.88051>.

31. H. G. Rivera, E. A. Domínguez Calle, R. Vanegas Sarmiento y IDEAM, «Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: estudio nacional del agua, resumen para tomadores de decisión,» IDEAM, Bogotá D.C., 2008.
32. ORARBO, «Índice de retención y regulación hídrica - IRH,» 27 Abril 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.orarbo.gov.co/es/indicadores?id=1308&v=l>.
33. E. Morales-Acuña, J. Linero-Cueto y F. Canales, «Assessment of precipitation variability and trends based on satellite estimations for a heterogeneuos Colombian region,» Hydrology, p. article number 128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8030128>
34. CAR, «Estudio sobre el estado actual del macizo del páramo Rabanal,» 2008. [En línea]. Disponible en: <https://fauna.corpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2016/04/Estudio-del-estado-actual-del-paramo-de-Rabanal.pdf>.
35. IDEAM, «Índice de Retención y Regulación Hídrica Mayo 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/ents/11769/646961/3.04+HM+%2Bndice+de+Retenci%C3%B3n+y+Regulaci%C3%B3n+H%C3%ADdrice.pdf/f0d464f9-9877-4163-b5f1-14f1a6700dd4#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20Retenci%C3%B3n%20y,duraci%C3%B3n%20de%20caudales%20medios%20diarios>.
36. M. Ziaul Hoque, I. Islam y M. Ahmed, «Spatio - temporal changes of land use land cover and ecosystem service values in coastal Bangladesh,» Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, pp. 173-180, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.01.008>
37. E. Kiedrzyńska, K. Belka, P. Jarosiewicz, M. Kiedrzyński y M. Zalewski, «The enhancement of valley water retentiveness in climate change conditions,» Science of the Total Environment, p. 149427, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149427>
38. P. Siqueira, P. Oliveira, D. Bressiani, A. Meira Neto y D. Rodrigues, «Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado Basin,» Journal of Hydrology: Regional Studies, p. 100931, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>
39. R. Padrón, B. Wilcox, P. Crespo y R. Céleri, «Rainfall in the andean páramo: New insights from high - resolution monitoring in southern Ecuador,» Journal of Hydrometeorology, pp. 985-996, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
40. R. Hao, G. Huang, L. Liu, J. Li y M. Zhai, «Sustainable conjunctive water management model for alleviating water shortage,» Journal of Environmental Management, p. Article number 114243, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114243>
41. J. Margeta, «Water abstraction management under climate change: Jadro spring Croatia,» Groundwater for Sustainable Development, p. 100717, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100717>
42. C. Pardo, E. Suescún, H. Jojoa, R. Zambrano, y W. Ortega, "Modelo de referencia para la adopción e implementación de Scrum en la industria de software", Investigación e Innovación en Ingenierías, vol. 8, n.º 3, pp. 14-28, 2020. <https://doi.org/10.17081/invinno.8.3.4700>
43. A. Pamidimukkala, S. Kermanshachi y N. Adepu, «Resilience in water infrastructures: A review of challenges and adoption strategies,» Sustainability (Switzerland), p. 12986, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132312986>