



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.43
Enero - junio 2025
Reia4327 pp. 1-21

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Ivanova, Y.; Huertas Lugo, V. D. y
Pulgarín Herrera, M. F.
Incidencia del Cambio de Coberturas
Vegetales sobre la Capacidad de
Regulación Hídrica en la Cuenca del
Río Cuja, Colombia

Revista EIA, 22(43), Reia4327 pp. 1-21
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1793>

✉ *Autor de correspondencia:*

Huertas Lugo, V. D.
Ingeniería Civil
Correo electrónico:
est.valery.huertas@unimilitar.edu.co

Recibido: 17-06-2024
Aceptado: 10-12-2024
Disponible online: 01-01-2025

Incidencia del Cambio de Coberturas Vegetales sobre la Capacidad de Regulación Hídrica en la Cuenca del Río Cuja, Colombia

YULIA IVANOVA¹

✉ VALERY DAYANNA HUERTAS LUGO¹

MARÍA FERNANDA PULGARÍN HERRERA¹

1. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Resumen

El desarrollo de las actividades socio-económicas representan un reto para garantizar la funcionalidad ecosistémica de cuencas hidrográficas nacionales porque la mayoría de éstas se fundamentan en la disponibilidad y variabilidad del recurso hídrico. La transformación del paisaje asociada a los factores antrópicos afecta de manera a veces desconocida el régimen hídrico. Por este motivo, en el presente estudio, a través de los análisis estadísticos hidrológicos y de teledetección de las coberturas vegetales, se analizó la incidencia del cambio de las coberturas vegetales y de precipitaciones sobre la capacidad de regulación del régimen hídrico de la cuenca del río Cuja, departamento de Cundinamarca, Colombia. Los resultados obtenidos arrojaron que la cuenca per se no tiene una buena capacidad de regulación hídrica, producto de suelos arcillosos con predominancia de terrenos erosionados y pastizales. El análisis multitemporal de las imágenes satelitales demostró que en las últimas décadas se han ampliado las coberturas antrópicas asociadas a áreas urbanas y cultivos, y se han desplazado las coberturas de pastos por suelos degradados. No obstante, las dinámicas de coberturas vegetales en la cuenca no logran incidir sobre el servicio de regulación hídrica con el nivel de significancia de 0,05. Adicionalmente, los proyectos de pago por servicios ambientales de tipo conservacionista en la cuenca representan el 0,45 % del área total de la cuenca, y su efecto sobre el servicio de regulación no es apreciable. Los resultados obtenidos no indican ausencia de una correlación, sino su insignificancia hasta el momento. Considerando la importancia de la integridad

de cuencas hidrográficas y rol de coberturas vegetales en este aspecto, se resalta la importancia de monitoreo de coberturas vegetales conjunto con el incremento de los proyectos de pago por servicios ambientales de tipo restauración.

Palabras clave: Régimen hídrico; Coberturas de la tierra; Teledetección; Pluviosidad; Análisis de regresión; Conservación de coberturas; Pagos por Servicios Ambientales; Servicio de Provisión Hídrica; Índice de Regulación Hídrica; Correlaciones múltiples.

Impact of Land Cover Change on Water Regulation Capacity in the Cuja River Basin, Colombia

Abstract

The development of socio-economic activities represents a challenge to guarantee the ecosystemic functionality of national watersheds because most of them are based on the availability and variability of water resources. The transformation of the landscape associated with anthropic factors affects the water regime in a way that is sometimes unknown. For this reason, in the present study, through statistical hydrological and remote sensing analyses of vegetation cover, the incidence of changes in vegetation cover and precipitation on the regulation capacity of the water regime of the Cuja river basin, department of Cundinamarca, Colombia, was analyzed. The results obtained showed that the watershed per se does not have a good water regulation capacity, due to clay soils with a predominance of eroded soils and pastures. The multitemporal analysis of satellite images showed that in recent decades, anthropic land cover associated with urban areas and crops has expanded, and pasture cover has been displaced by degraded soils. However, the dynamics of vegetation cover in the watershed do not have an impact on the water regulation service at the 0.05 significance level. In addition, the projects of payment for environmental services of a conservationist type in the basin represent 0.45% of the total area of the basin, and their effect on the regulation service is not appreciable. The results obtained do not indicate the absence of a correlation, but rather its insignificance so far. Considering the importance of watershed integrity and the role of vegetation cover in this aspect, the importance of monitoring vegetation cover together with the increase of payment projects for environmental services of the restoration type is highlighted.

Keywords: Water regime; Land cover; Remote sensing; Rainfall; Regression analysis; Land cover conservation; Payments for Environmental Services; Water Provision Service; Water Regulation Index; Multiple Correlations.

1. Introduction

En las últimas cinco décadas, los seres humanos han transformado los ecosistemas de manera más rápida y extensa que en cualquier otro momento de la historia humana, debido a las demandas crecientes de alimento (Mekonnen & Gerbens-Leenes, 2020), agua dulce (Borretti & Rosa, 2019), madera (Cazcarro, et al., 2022), fibra y combustible (IEA, 2020). En la mayoría de los casos, estas demandas antrópicas involucran la modificación de paisaje que, según algunas estadísticas, han ocasionado que aproximadamente 60 % de los servicios ecosistémicos actualmente se usen de manera no sostenible (Anon., 2016). Según (ONU, 2005), los servicios ecosistémicos son los beneficios obtenidos de la naturaleza para el funcionamiento de la sociedad y los ecosistemas, además, se clasifican en cuatro tipos, que son: servicio de abastecimiento o provisión, regulación, apoyo y cultural.

Es ampliamente reconocido que Colombia es uno de los países más megadiversos del mundo debido a la gran variedad de servicios ecosistémicos que contiene en su territorio (MINCIENCIAS, 2016). Sin embargo, la mayoría de los ecosistemas del país han disminuido su capacidad de prestar estos servicios ya que han sido transformados, afectados o degradados por la minería, los cultivos ilícitos, las especies invasoras, el uso inadecuado del suelo para las actividades agropecuarias, entre otros (MADS, 2023). Aunque estas actividades generan cambios en el paisaje y modifican la estructura, composición o función del ecosistema, han afectado negativamente al servicio de regulación hídrica (SRH) que, a su vez, impacta la frecuencia y magnitud de las inundaciones, los deslizamientos de tierra, la estabilidad de las vías y otros fenómenos extremos (PNUD, 2014).

Existen varios estudios internacionales (Le Maitre, et al., 2014), (Twisa, et al., 2020) y nacionales (Torres-Bejarano, et al., 2022) (FAO,

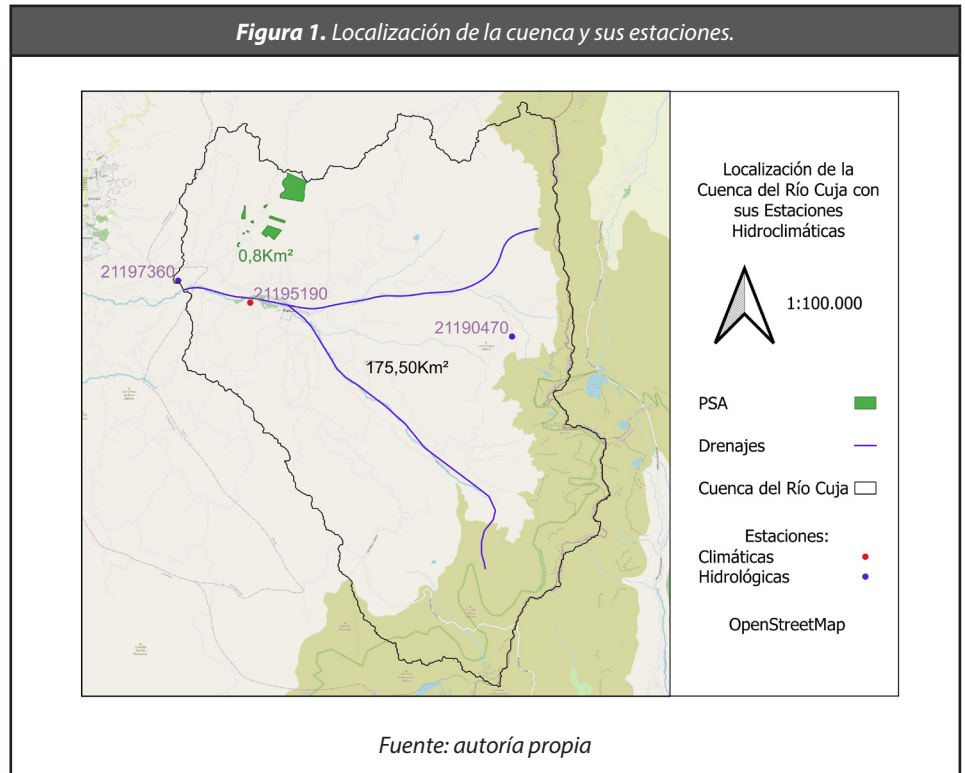
2014) que confirman que la conservación de las coberturas vegetales naturales es fundamental para la funcionalidad ecosistémica de las cuencas hidrográficas. No obstante, el efecto del cambio climático y las actividades antrópicas fuerzan su modificación, afectando la capacidad regulativa de las cuencas hidrográficas.

Para preservar y/o restaurar las coberturas de la tierra el Gobierno de Colombia estableció el Decreto 1007 del 2018 que estipula los lineamientos para el desarrollo de los proyectos Pagos por Servicios Ambientales (PSA), éstos consisten en incentivos en dinero o en especie para los propietarios, poseedores u ocupantes de áreas o ecosistemas por las acciones de cuidado de la cobertura vegetal nativa.

En el presente estudio se analizó el efecto del cambio de las coberturas de la tierra sobre el servicio de regulación hídrica (SRH) de la cuenca del río Cuja localizada en el municipio de Pasca, Cundinamarca (Colombia). Fundamental para la población de Pasca por el desarrollo de las actividades agropecuarias y, para la población de Arbeláez por su captación de agua potable (Gutiérrez, 2018).

2. Materiales y Métodos

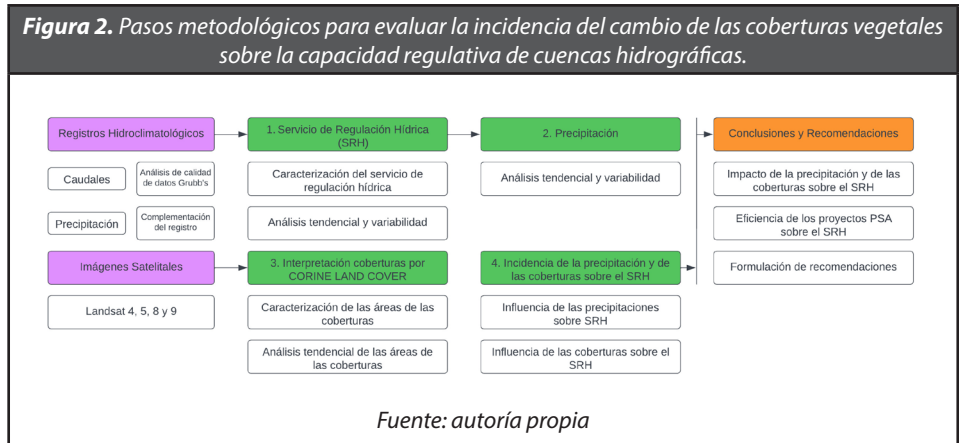
La cuenca del río Cuja está localizada en el municipio de Pasca, perteneciente al departamento de Cundinamarca, Colombia. Presenta una extensión de unas 17.550 hectáreas, de las cuales 80,33 hectáreas son de proyectos PSA de conservación. Limita en el norte con la subcuenca del río Panches, al sur con la subcuenca del **río Negro, al oriente con la cuenca del río Blanco y al occidente con el departamento del Tolima. Así mismo, su altitud varía entre los 654 msnm hasta los 3.425 msnm**, con temperaturas de 22,3 °C a 8 °C y una media de 15,5 °C. Su régimen de lluvias presenta dos temporadas de lluvias y estiaje, con un promedio anual de precipitaciones cercano a los 965,50 mm (Betancourt & Ortiz, 2019). En la Figura 1, se presenta la localización de la cuenca del río de Cuja con sus respectivas estaciones hidrometeorológicas usadas en el estudio.



En la cuenca del río Cuja se desarrollan varios proyectos de pago por servicios ambientales de provisión y regulación hídrica del tipo conservación en aras de proteger la funcionalidad hidrológica de la cuenca a través de la preservación de las coberturas vegetales. Los proyectos fueron aprobados en el año 2020 y tienen una extensión de 80,33 hectáreas y representan el 0,45% de la extensión total de la cuenca (Masbosques, 2020). En la Figura 1 con el contorno verde se presenta la localización de los proyectos PSA.

Para evaluar la incidencia de los cambios en las coberturas vegetales sobre el SRH en la cuenca del río Cuja, se llevó a cabo la metodología que se presenta en la Figura 2. El modelo supone que el SRH es producto de tres variables: características del suelo (Corrêa, et al., 2021) **régimen pluviométrico** (Sales & Parrot, 2024) y coberturas vegetales (Chen, et al., 2023). Se ha demostrado que las características del suelo como profundidad, permeabilidad y conductividad hidráulica influyen al SRH pero se pueden considerar constantes a través de tiempo. Por este motivo, para los propósitos del estudio, no se tendrán en cuenta y los cambios detectados en el

servicio de regulación hídrica se atribuirán al régimen pluviométrico y cambio de las coberturas vegetales.



El primer paso metodológico, resaltado en color morado, consistió en la consecución de los insumos que son los registros hidroclimáticos y las imágenes satelitales. Los registros de caudales medios diarios se obtuvieron de la estación hidrológica 2119736, perteneciente a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), para el período desde el año 1999 hasta el año 2022. Previamente, los datos dudosos fueron identificados por el método *Water Resources Council* (Fuentes & Suazo, 2016) y, posteriormente eliminados. Los registros de precipitación acumulada mensual se obtuvieron de las estaciones climáticas: 2119047 y 2119514, pertenecientes a la CAR; y la 2119519 que hace parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Aunque inicialmente la serie temporal de cada estación era distinta, por medio de la complementación de sus series entre sí, se lograron obtener registros continuos desde el año 1997 hasta el año 2021. Cabe aclarar, que la complementación se realizó a través de análisis de regresión con un nivel de significancia de 0,05 (Peña & Larrahondo Méndez, 2019). Otro de los insumos fueron las imágenes satelitales Landsat que se consiguieron de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (García, 2019) y permitieron la caracterización de las coberturas vegetales en la cuenca.

El segundo paso metodológico, resaltado en verde, comprendió cuatro etapas. La primera etapa consistió en evaluar el SRH de la cuenca del río Cuja a través del Índice de regulación hídrica (IRH) con los datos de la estación hidrométrica. Este índice, según el (IDEAM, 2023), tiene como objetivo facilitar la medición de la cantidad de humedad que las cuencas pueden retener. De manera que, el IRH se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$IRH = V_p / V_t \quad (1)$$

Dónde:

IRH- Índice de Retención y Regulación Hídrica.

V_p- Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales mensuales.

V_t- Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales mensuales.

De modo que, la interpretación de la capacidad de regulación hídrica a través del índice se realiza de la siguiente manera: Valores mayores a 0,85 capacidad muy alta, entre 0,85 y 0,75 capacidad alta, entre 0,65 y 0,75 capacidad media, entre 0,65 y 0,50 capacidad baja y menores a 0,50 muy baja (Riaño & García, 2016). Cabe resaltar que, este índice se calculó para los mismos años de la disponibilidad de las imágenes satelitales.

En el siguiente paso se realizó el análisis de variación temporal del IRH, por medio de los parámetros t-Student (Castro & Carvajal, 2010) y Fisher (Christensen, 2005) se examinó su evolución tendencial y cambio de variabilidad para concluir si ha existido algún cambio estadísticamente significativo durante los años de estudio.

La segunda etapa consistió en realizar el análisis de variabilidad interanual de precipitaciones. Este análisis se hizo para caracterizar el régimen pluviométrico e identificar si su posible afectación; producto del cambio climático global, influye al servicio de regulación

hídrica (Zhang, et al., 2023). En el estudio se maneja la hipótesis que el SRH es afectado por el **régimen pluviométrico**, por este motivo, su régimen se puede reflejar en la variabilidad del IRH. Este análisis se construyó usando los parámetros t-Student y Fisher con el nivel de significancia de 0,05.

La tercera etapa fue la interpretación de las coberturas vegetales presentes en la cuenca. Esta evaluación se fundamentó en la hipótesis de que la regulación hídrica de la cuenca está influenciada por las coberturas vegetales y en que las coberturas boscosas pertenecientes a los PSA tienen un impacto positivo sobre el IRH. En este proceso, se emplearon imágenes satelitales Landsat y, se clasificaron las coberturas de la Tierra a través de la metodología *Corine Land Cover* adaptada por el IDEAM (Castellanos, 2010). Cabe aclarar que antes de emplear las imágenes satelitales se les realizó un tratamiento inicial para la corrección atmosférica y el mejoramiento de la resolución espacial. La clasificación supervisada se llevó a cabo con la herramienta "*Semi- Automatic Clasificación Plugin*" del software QGIS (Congedo, 2016) con todos los filtros y técnicas de edición asociadas (Brown, et al., 2018). Como resultado de esta etapa, se calcularon las áreas de cada cobertura de la cuenca hidrográfica, correspondientes al periodo de estudio acorde a la temporalidad de los registros hidrológicos y climáticos. Se consideró que las imágenes satelitales consultadas eran representativas para todo el año calendario. En el apartado de los resultados se presenta la información sobre las imágenes usadas en el estudio.

Los resultados de teledetección permitieron construir el análisis tendencial de las áreas de las coberturas a través de la prueba Mann-Kendall con el nivel de significancia de 0,05 (Benites, 2022) para concluir si las coberturas vegetales en la cuenca presentan una expansión o contracción estadísticamente significativas que podrían incidir sobre el SRH. Como resultado de la prueba de Mann-Kendall se obtuvo el valor del estadístico Z que indica la significancia de la tendencia, si el valor es menor que $-1,96$, la tendencia es negativa significativa, y si es superior a $1,96$ es significancia positiva (Azam, et al., 2018), mientras que los valores intermedios indican tendencia estadísticamente no significativa.

Finalmente, en la cuarta etapa, se analizó en qué medida el

SRH es producto del **régimen pluviométrico y del cambio de las coberturas de la tierra. Para eso se construyó** el análisis correlativo lineal simple y múltiple entre variable dependiente (IRH) e independientes (precipitaciones y las áreas de las coberturas vegetales). La significancia estadística se evaluó utilizando el parámetro Fisher, con un intervalo de confianza del 95%.

Los resultados obtenidos permitieron concluir si en la cuenca del río Cuja se presenta un cambio significativo de pluviosidad, posiblemente asociado al efecto del cambio climático global, y de las coberturas de la tierra (tanto por el desarrollo de los proyectos PSA como asociado a otros factores del desarrollo socio – económico del territorio) y si éstos tienen incidencia sobre el servicio de regulación. Los resultados posibilitaron caracterizar el servicio de regulación hídrica en la cuenca, generar conclusiones asociadas al manejo de las coberturas vegetales en la cuenca para conservar su funcionalidad hidrológica y proponer perspectivas de futuros trabajos asociados al tema.

3. Resultados y Discusión

Como se había mencionado en el marco metodológico, el primer paso es la consecución de los insumos de carácter hidroclimatológico y geoespacial. A continuación, en las tablas 1 y 2 se presentan los datos correspondientes.

Tabla 1. Estaciones hidroclimatológicas usadas en el estudio.

| Nombre | Código | Estación | Parámetro | Registro |
|------------------|---------|-------------|-----------------|--------------|
| Juan XXIII | 2119736 | Hidrológica | Caudal | 1999 al 2022 |
| Hda La Mesa | 2119047 | Climática | Precipitaciones | 1997 al 2021 |
| Univ. Fusagasuga | 2119514 | Climática | Precipitaciones | 1997 al 2021 |
| Pasca - Aut | 2119519 | Climática | Precipitaciones | 1997 al 2021 |

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 2. Información sobre las imágenes satelitales usadas en el estudio.

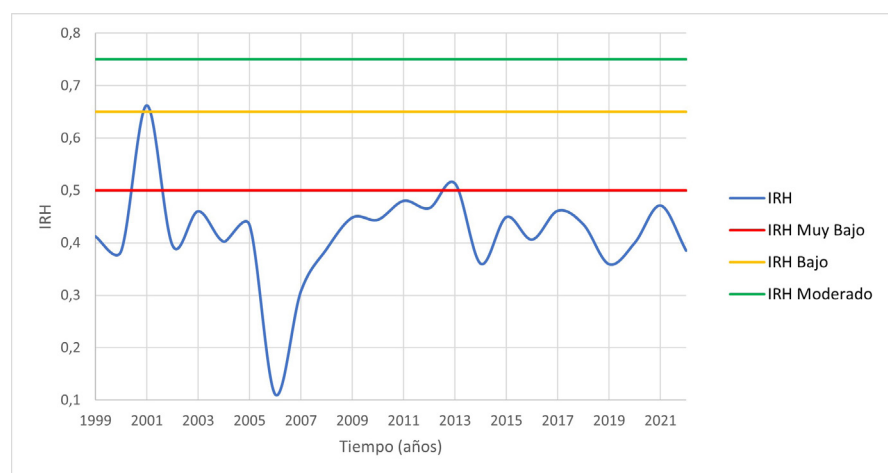
| Tipo Imagen | Fecha |
|-------------|------------|
| Landsat 4 | 22/03/1988 |
| Landsat 5 | 30/08/1997 |
| Landsat 7 | 16/11/1999 |
| Landsat 5 | 22/01/2010 |
| Landsat 8 | 4/01/2015 |
| Landsat 9 | 31/01/2022 |

Fuente: *Elaboración propia.*

No fue posible conseguir un mayor número de imágenes satelitales dado que la cuenca se encuentra en la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), lo que provoca una alta nubosidad sobre las imágenes en la mayoría del tiempo. Se evidenció que las imágenes obtenidas corresponden a los primeros y últimos meses de los años mencionados cuando la zona ZCIT se encuentra fuera del altiplano cundiboyacense, por lo que, puede ser más eficiente realizar monitoreos de coberturas vegetales en esta temporada.

Se caracterizó el IRH para el periodo de estudio comprendido entre los años 1999 hasta el 2021. La representación de variación temporal del índice se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Variación temporal del IRH de la cuenca del río Cuja a la altura de la estación Juan XXIII.



Fuente: *Elaboración propia.*

En la Figura 3 las líneas horizontales representan límites en la caracterización de la capacidad regulativa de cuencas hidrográficas (García & Riaño, 2015) de la siguiente manera: la línea verde indica la capacidad de regulación moderada, la línea naranja – baja y la línea roja – muy baja. La línea azul en la misma gráfica corresponde al índice de regulación obtenido para la cuenca del río Cuja desde el año 1999 hasta el año 2022. Como se puede apreciar de la figura anterior, casi en todos los años de registro el IRH se encuentra en la categoría “muy bajo”, esto se le atribuye al suelo de la cuenca que evolucionó a partir de un depósito coluvial cubierto con ceniza volcánica, es decir, como es muy bien drenado (IGAC, 2020) no tiene la capacidad de retener el agua (Patiño, et al., 2021). Adicionalmente, como la mayor parte de la cobertura vegetal en la cuenca pertenece a la tierra desnuda asociada al páramo Sumapaz y a pastos, como se muestra en la Figura 4, la cuenca tampoco tiene una buena capacidad de regular la escorrentía superficial. Los únicos años donde la capacidad regulativa de la cuenca superó la caracterización “muy baja” fueron los años 2001 y 2013, posiblemente asociados a una mayor oferta hídrica y ligados a años hidrológicos húmedos.

Con el fin de evaluar estadísticamente la variabilidad temporal tanto del IRH como de las series de precipitaciones, se aplicaron las pruebas Fisher y t-Student, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de variabilidad del IRH y series de precipitaciones a través de las pruebas Fisher y t-Student.

| Parámetro | Fisher | | | | t-Student | | | |
|------------------|---------|-------------|------------|--|-----------|------------|------------|--|
| | Valor P | Varianza | | Conclusión | Valor P | Media | | Conclusión |
| | | Variable 1 | Variable 2 | | | Variable 1 | Variable 2 | |
| IRH | 0,003 | 0,016 | 0,003 | Cambio significativo en la variabilidad. Disminución | 0,478 | 0,404 | 0,432 | No presenta tendencia significativa |
| Estación 2119047 | 0,060 | 2.373,577 | 61.464,225 | No hay cambio significativo en la variabilidad | 0,441 | 951,341 | 939,115 | No presenta tendencia significativa |
| Estación 2119514 | 0,162 | 121.912,255 | 67.394,962 | No hay cambio significativo en la variabilidad | 0,002 | 760,713 | 1154,531 | Presenta tendencia significativa. Positiva |
| Estación 2119519 | 0,029 | 11.457,023 | 37.509,826 | Cambio significativo en la variabilidad. Aumento | 0,375 | 722,525 | 702,442 | No presenta tendencia significativa |

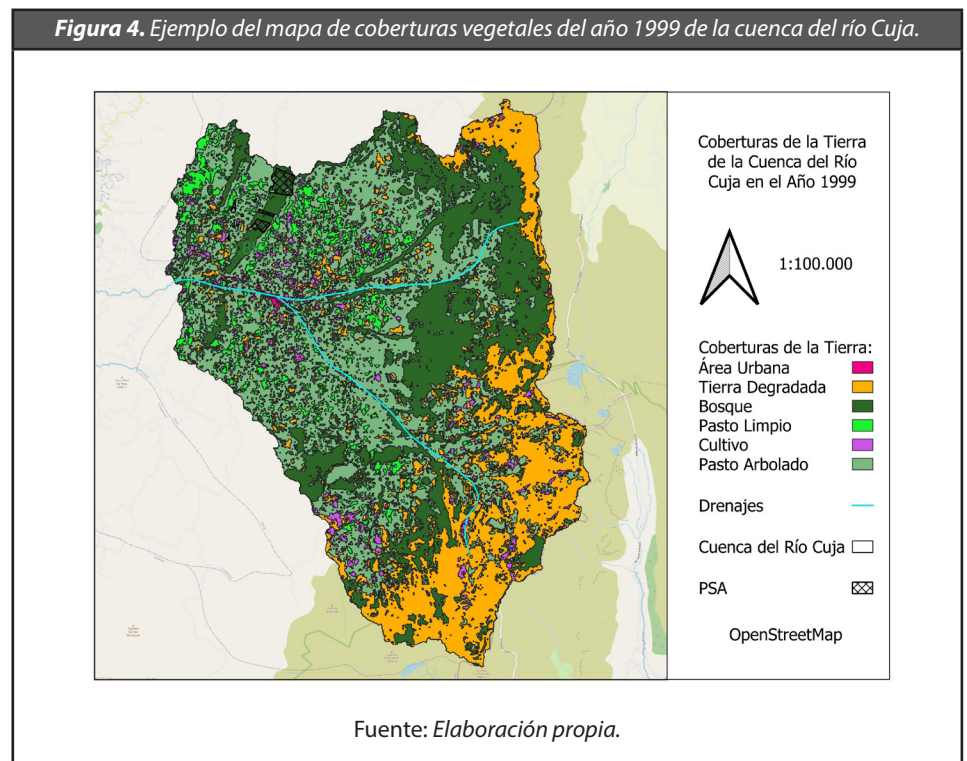
Fuente: *Elaboración propia.*

Como se presenta en la tabla anterior, la prueba de Fisher mostró que el SRH presentó una disminución en su variabilidad, lo que indica que, en los últimos años, aunque los valores del IRH se mantienen bajos, su comportamiento se ha vuelto más estable. Con relación a la prueba de t-Student la serie de SRH no manifiesta ningún tipo de tendencia estadísticamente significativo. Todo lo mencionado anteriormente se concluye que en el periodo de estudio se ha disminuido la variabilidad en la capacidad de regulación hídrica sin presentar algún tipo de tendencia hacia su incremento o disminución.

Por otro lado, la misma tabla señala que las dos estaciones de precipitación que han presentado cambios en su comportamiento temporal se identifican con los códigos 2119514 y 2119519. Aunque una de las tres estaciones climáticas (2119519) presenta una tendencia hacia el incremento de sus valores promedios, las otras dos estaciones analizadas no presentan ningún tipo de tendencia. Así mismo, la estación con el código 2119514 confirmó un incremento en la variabilidad de valores totales anuales de precipitación, mientras que otras estaciones no siguieron el mismo comportamiento, indicando que en el territorio no existe un patrón claro hacia la

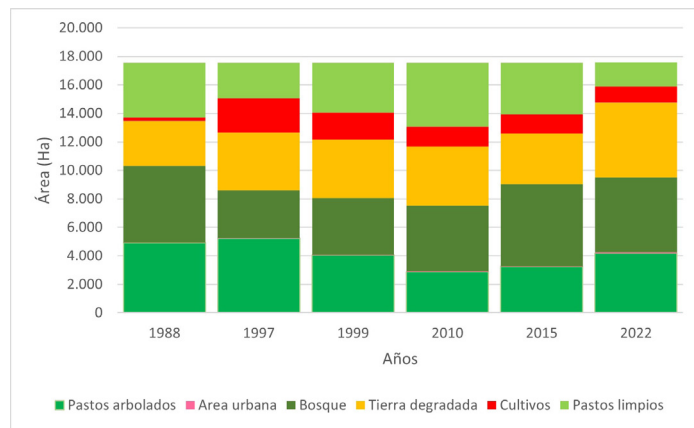
disminución o incremento de las precipitaciones y de su variabilidad temporal.

En la tercera etapa, se hizo la clasificación supervisada de las coberturas vegetales donde se identificaron seis coberturas que son: área urbana, cultivos, tierra degradada, pastos limpios, pastos arbolados y bosque. Con éstas, se construyeron los mapas de las coberturas vegetales para cada una de las imágenes satelitales. En la Figura 4 se presenta como ejemplo el mapa de coberturas correspondiente al año 1999.



Con base a los análisis de teledetección se calcularon las áreas correspondientes a cada una de las coberturas que se puede apreciar de manera grafica en la figura 5.

Figura 5. Áreas de las coberturas vegetales en la cuenca del río Cuja. (Autoría propia)



Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las coberturas vegetales se evaluó a través de la prueba de Mann Kendall, cuyos resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis de tendencias de las coberturas de la cuenca a través del test de Mann-Kendall.

| Cobertura | Mann Kendall | |
|------------------|--------------|-------------------------------------|
| | Valor Z | Conclusión |
| Área urbana | 4,10 | Tendencia significativa positiva |
| Cultivo | -1,17 | Tendencia negativa no significativa |
| Tierra degradada | 2,93 | Tendencia significativa positiva |
| Bosque | 1,76 | Tendencia positiva no significativa |
| Pastos limpios | -0,59 | Tendencia negativa no significativa |
| Pastos arbolados | -1,17 | Tendencia negativa no significativa |

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver de la tabla anterior, las coberturas del área urbana y de la tierra degradada presentan tendencia estadísticamente significativa hacia su expansión, mientras que la cobertura boscosa, aunque presenta un incremento en su área,

aún no es estadísticamente significativa. Las coberturas de pastos tienden a disminuir su área, lo que indica que son desplazados por el crecimiento de las coberturas de la tierra desnuda y zona urbana.

En la última etapa, al haber reconocido las dinámicas de cambio de las coberturas de la cuenca, se procedió a la construcción de la correlación entre el IRH y las áreas de las coberturas de la tierra con el fin de identificar si el cambio de ciertas coberturas vegetales de la cuenca afecta al SRH. De igual forma, al caracterizar el régimen pluviométrico, se elaboró la correlación entre el IRH y las precipitaciones totales anuales de las estaciones para evaluar si esta variable presenta algún impacto sobre el SRH. Los resultados de las correlaciones se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de correlación del IRH con respecto a las series de precipitación y las áreas de las coberturas de la tierra.

| IRH vs Parámetro | | | | |
|------------------|-----------------------------|-----------|-----------|------------------------------|
| Parámetro | Coefficiente de Correlación | P - Value | Pendiente | Conclusión |
| PM 2119047 | 0,11 | 0,62 | -0,00005 | Correlación no significativa |
| CP 2119514 | 0,14 | 0,53 | 0,00004 | Correlación no significativa |
| 2119519 | 0,10 | 0,67 | -0,00006 | Correlación no significativa |
| Área urbana | 0,67 | 0,33 | -0,00157 | Correlación no significativa |
| Cultivo | 0,16 | 0,84 | 0,00001 | Correlación no significativa |
| Tierra degradada | 0,89 | 0,11 | -0,00004 | Correlación no significativa |
| Bosque | 0,19 | 0,81 | 0,00001 | Correlación no significativa |
| Pastos | 0,94 | 0,34 | -0,00003 | Correlación no significativa |

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 5, se rechaza la hipótesis inicial de que el régimen pluviométrico influye sobre el SRH, debido a que la correlación presenta valores de P mayores a 0.05. A pesar de que entre el SRH y las áreas de las coberturas no hay ninguna correlación significativa, se puede determinar lo siguiente: 1 - La expansión de

cobertura del páramo asociada a tierra desnuda incide de manera negativa sobre el servicio de provisión hídrica, aunque, con el nivel de significancia 0.05, ésta aún no es relevante. 2 - Aunque el área urbana haya presentado una expansión significativa, ésta no influye sobre la calidad del servicio de regulación hídrica. Eso se explica que el área urbana para el último periodo representa una porción no representativa del área total de la cuenca (0,34%). 3 - Teniendo en cuenta que en la cuenca la cobertura boscosa no ha experimentado una expansión estadísticamente significativa, su impacto tampoco es representativo sobre el SRH.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que en las últimas décadas en la cuenca del río Cuja el SRH no ha representado una tendencia estadísticamente significativa, mientras que su variabilidad ha disminuido. Buscando respuesta a este comportamiento y, evaluando si el SRH depende del régimen pluviométrico y/o del cambio de las coberturas vegetales asociadas tanto al desarrollo de los proyectos PSA como a otras dinámicas naturales y antrópicas de éstas, se encontró lo siguiente:

En la región del estudio no se observa un claro patrón de cambio en la pluviosidad, posiblemente asociado a la incidencia del cambio climático. Al correlacionar las series de IRH versus precipitaciones, no se encontró una relación estadísticamente significativa para confirmar la hipótesis de que el régimen hídrico depende de esta variable climática.

En el estudio se manejó la hipótesis que el SRH depende del cambio de las coberturas vegetales en la cuenca. Se encontró que en la cuenca se presenta un cambio estadísticamente significativo de las coberturas urbanas y de la tierra degradada, asociada al páramo de Sumapaz. Estas dos coberturas reemplazan las coberturas de pastos en la parte media de la cuenca. No obstante, dichos cambios no alcanzan a impactar el SRH de manera estadísticamente significativa con el intervalo de confianza del 95%. Este resultado no indica ausencia de dicha correlación, sino que esta no se puede

confirmar con el nivel de significancia dado. Así mismo, los proyectos PSA existentes en la cuenca representan el 0.45% del área de la cuenca, porcentaje que se puede considerar como no significativo para poder incidir de manera contundente sobre el servicio de regulación hídrica. Además, los proyectos PSA existentes son de tipo conservacionista que consisten no en recuperar las coberturas naturales, sino conservar las existentes. Por este motivo, cualquier cambio en la variabilidad del servicio de regulación hídrica no estaría asociado al desarrollo de los proyectos PSA de tipo conservación.

No obstante, no se puede desmeritar su importancia integral para otros servicios ecosistémicos de la cuenca como: aprovisionamiento – insumo de materia prima para diferentes actividades socioeconómicas; cultural – valor estético y conservación de paisaje; apoyo – formación del suelo, soporte del ciclo de nutrientes y fotosíntesis; regulación – regulación del clima local, regulación de los procesos erosivos, polinización, moderación de los eventos extremos (Camacho & Ruiz, 2012).

Adicionalmente, se recomienda incentivar una mayor implementación de los proyectos PSA, pero de origen restauración, que consisten en cambiar las coberturas vegetales intervenidas por las naturales que, se espera, logren impactar de manera significativa la capacidad regulativa de la cuenca.

Así también, se hace indispensable garantizar la conservación de la cobertura boscosa no asociada a los proyectos PSA y que está presente actualmente en la cuenca hidrográfica, porque su presencia en conjunto con los parches de los proyectos PSA garantizan la regulación hídrica que tiene actualmente la cuenca del río Cuja. Su deforestación y/o aprovechamiento forestal podrían afectar de manera negativa el SRH y descompensar el efecto positivo de los proyectos PSA de restauración y de conservación (Díaz, et al., 2019).

Lo mencionado anteriormente abre una discusión con relación a la necesidad de monitoreo multitemporal de las coberturas vegetales en las cuencas hidrográficas, que son estratégicas desde el punto de vista de la preservación de los servicios ecosistémicos, porque no solo los proyectos PSA inciden sobre la funcionalidad hidrológica de las cuencas sino, también, la totalidad de todas las coberturas (Aithal

& Ramachandra, 2016). En el contexto nacional esta recomendación, aplicada a la disponibilidad de las imágenes satelitales de acceso libre, se limita por la incidencia de la ZCIT sobre la calidad de éstas a través de una alta nubosidad. Por este motivo, se debe considerar la viabilidad del uso de las imágenes satelitales comerciales para acceder a un mayor abanico de temporalidad.

Agradecimientos

Los investigadores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por la posibilidad de desarrollar la investigación bajo el código INV-ING-3790.

Bibliografía

- Aithal, B. & Ramachandra, T., 2016. Visualization of Urban Growth Pattern in Chennai Using Geoinformatics and Spatial Metrics. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 44(4), pp. DOI:10.1007/s12524-015-0482-0.
- Anon., 2016. *infocampo*. [En línea]
Available at: <https://www.infocampo.com.ar/el-60-de-los-servicios-ecosistemicos-estan-siendo-degradados/>
- Azam, M. y otros, 2018. Spatial and Temporal Trend Analysis of Precipitation and Drought in South Korea. p. DOI: 10.3390/w10060765.
- Benites, L., 2022. *Prueba de tendencia de Mann Kendall: definición, ejecución de la prueba*. [En línea]
Available at: <https://statologos.com/prueba-de-tendencia-de-mann-kendall/>
- Betancourt, M. A. & Ortiz, E. N., 2019. *Diagnostico ambiental de las fuentes hídricas del rio el bosque y quebrada el quinal en la vereda boca de monte del municipio de pasca cundinamarca, tesis (Pregrado de Ingenieria), Colombia, Universidad de Cundinamarca*. [En línea]
Available at: <http://hdl.handle.net/20.500.12558/2007>
- Borretti, A. & Rosa, L., 2019. Reassessing the projections of the World Water Development Report. *Nature*, pp. 1-5, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>.

- Brown, L., Hoe, M. & Reed, P., 2018. *Verificación Independiente de las Reducciones de Emisiones de Colombia para 2015 elegibles para pagos basados en resultados del Programa REDD Early Movers (REM)*. [En línea] Available at: https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2019/12/1.a.-SCS_REM_Colombia_2016_InformedeVerificacion_vFINAL.pdf
- Camacho, V. & Ruiz, L., 2012. Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Biociencias*, p. Vol.1 Núm. 4. <https://doi.org/10.15741/revbio.01.04.02>.
- Castellanos, H. O., 2010. *Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. escala 1:100.000.* [En línea] Available at: https://www.researchgate.net/publication/303960063_LEYENDA_NACIONAL_DE_COBERTURAS_DE_LA_TIERRA_METODOLOGIA_CORINE_LAND_COVER_ADAPTADA_PARA_COLOMBIA_ESCALA_1100000
- Castro, L. & Carvajal, Y., 2010. Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas.. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, pp. (9), 15-25..
- Cazcarro, I., Schyns, J. F., Arto, I. & Sanz, J., 2022. Nation's water footprint and virtual water trade of wood products. *Advances in Water Resources*, p. Article number: 104188.
- Chen, J. y otros, 2023. Co-regulation of water and energy in the spatial heterogeneity of drought resistance and resilience. *Environmental Research Letters*, 2023, Nº 11, p. 114007, pp. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acfcc>.
- Christensen, R., 2005. Testing Fisher, Neyman, Pearson, and Bayes. *The American Statistician*, pp. Vol.59 (4), p.353-353. DOI: 10.1198/000313005X72171.
- Congedo, L., 2016. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.0.1.1. p. DOI:10.13140/RG.2.2.29474.02242/1.
- Corrêa, C. J., Tonello, K. C. & Nnadi, E., 2021. Urban Gardens and Soil Compaction: a Land Use Alternative for Runoff Decrease.. pp. vol. 8, no. 3, pp. 1213-1230 <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00521-3>.
- Díaz, T., Cubides, P. & Arce, M. I., 2019. *Vulnerabilidad de la oferta de servicios ecosistémicos*. [En línea] Available at: <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2019/cap2/201/>
- FAO, 2014. *Strategic Institutional Alliance to Finance land -use reconversion, Las Ceibas river, Colombia*. [En línea] Available at: <https://www.fao.org/platforms/water-scarcity/Knowledge/knowledge-products/detail/strategic-institutional-alliance-to-finance-land-use-reconversion-las-ceibas-river-colombia/en>
- Fuentes, K. F. & Suazo, A., 2016. *Distribución de las precipitaciones máximas en la región de los ríos, tesis (Pregrado en Ingeniería), Chile, Universidad del Bio-Bio*. [En línea] Available at: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/2192>

- García, A., 2019. *Guía de proceso de descarga de imágenes de satélites Landsat, MODIS y Sentinel.* [En línea]
Available at: <http://hdl.handle.net/2117/183370>
- García, J. S. & Riaño, M. C., 2015. Evaluación del componente de riesgo hídrico en el era de la cuenca gacheta y las subcuencas blanco-Sumapaz y blanco-calera, pertenecientes a la cuenca del Río Blanco, jurisdicción CAR.
- Gutiérrez, M. F., 2018. *Modelo de gobernanza y gestión del agua en la cuenca del río Cuja.* [En línea]
Available at: <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/963>
- IEA, 2020. *Global water consumption in the energy sector by fuel type in the sustainable development scenario, 2016 - 2030.* [En línea]
Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-water-consumption-in-the-energy-sector-by-fuel-type-in-the-sustainable-development-scenario-2016-2030>
- IGAC, 2020. *GOV.* [En línea]
Available at: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Le Maitre, D. C., Kotzee, I. M. & O'Farrel, P., 2014. Impacts of land - cover change on the water flow regulation ecosystem service: Invasive alien plants, fire and their policy implications. *Land Use Policy*, pp. 171 - 181: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.07.007>.
- MADS, 2023. *Restauración ecológica.* [En línea]
Available at: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/gestion-en-biodiversidad/restauracion-ecologica>
- Masbosques, 2020. *Masbosques.* [En línea]
Available at: <https://masbosques.org/project/acuerdos-de-voluntades-colectivos-para-la-preservacion-del-agua/>
- Mekonnen, M. M. & Gerbens-Leenes, W., 2020. The water footprint of global food production. *Water*, pp. 1-12, DOI: 10.3390/w12102696.
- MINCIENCIAS, 2016. *GOV.* [En línea]
Available at: https://minciencias.gov.co/sala_de_prensa/colombia-el-segundo-pais-mas-biodiverso-del-mundo#:~:text=Colombia%20por%20ser%20un%20pa%C3%ADs,forma%20sostenible%20sus%20recursos%20naturales.
- ONU, 2005. *Evaluación de los ecosistemas del Milenio.* [En línea]
Available at: <https://www.millenniumassessment.org/es/About.html>
- Patiño, S. y otros, 2021. Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *Catena, Volume 202, article id. 105227*, p. DOI:10.1016/j.catena.2021.105227.

- Peña, J. & Larrahondo Méndez, E. A., 2019. *Comparación de métodos de estimación de datos faltantes en series de precipitación diaria en el Valle del Cauca, tesis (Pregrado en ingeniería), Colombia, Universidad del Valle.* [En línea] Available at: <https://hdl.handle.net/10893/14419>
- PNUD, 2014. *PNUD Colombia.* [En línea] Available at: <https://www.undp.org/es/colombia/publicaciones/v-informacional-de-biodiversidad-de-colombia-ante-el-convenio-de-biodiversidad-biologica>
- Riaño, M. C. & García, J. S., 2016. *Evaluación del componente de riesgo hídrico en él era de la cuenca gacheta y las subcuencas blanco-Sumapaz y blanco-calera, pertenecientes a la cuenca del Río Blanco, jurisdicción CAR, tesis (Pregrado en Ingeniería), Colombia.* [En línea] Available at: <http://hdl.handle.net/11349/13788>
- Sales, L. & Parrot, L., 2024. The owls are coming: positive effects of climate change in Northern ecosystems depend on grassland protection. p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167944>.
- Torres-Bejarano, F., Torregroza-Espinoza, A. C., Martínez-Mera, E. & González-Márquez, L. C., 2022. Impact of land cover changes on water quality: an application to the Guájaro reservoir, Colombia. *International Journal of Environmental Science*, pp. 3577 - 3590, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04535-8>.
- Twisa, S., Mwabumba, M., Kurian, M. & Buchroithner, M. F., 2020. Impact of land - use/land - cover change on drinking water ecosystem services in Wami river basin, Tanzania. *Resources*, pp. 1 - 18; doi:10.3390/resources9040037.
- Zhang, M. y otros, 2023. Contributions of climate change and human activities to grassland degradation and improvement from 2001 to 2020 in Zhaosu County, China.. *Journal of environmental management*, p. 348 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119465>.