# METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO Y LOS EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL RECURSO HÍDRICO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA

ANDRÉS FELIPE FORERO RÍOS

**Director:**
Robin Alexis Olaya M.Sc.

Universidad del Valle – Sede Meléndez
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali, Valle del Cauca
2024

# METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO Y LOS EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL RECURSO HÍDRICO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA

ANDRÉS FELIPE FORERO RÍOS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Topográfico

DIRECTOR:
M. Sc. Robin Alexis Olaya

Universidad del Valle – Sede Meléndez
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali, Valle del Cauca
2024

## PÁGINA DE ACEPTACIÓN

**Nota de Aceptación**

_____

_____

_____

_____

**Jurado 1**

_____

**Jurado 2**

**Santiago de Cali, diciembre de 2024.**

## Agradecimientos

Agradezco a Dios, por siempre darme la oportunidad y los contextos para forjar resiliencia y carácter frente a las dificultades y ser mejor en cada ámbito de mi vida, pudiendo así culminar exitosamente este proyecto. Gracias a mi familia por aportar su granito de arena a lo largo de mi carrera y brindarme siempre su apoyo a pesar de las adversidades. Gracias a mi pareja Maria Paula por apoyarme en todo siempre, su compañía fue indispensable en cada momento de mi vida y mi carrera.

Gracias a mi director Robin Alexis Olaya por su apoyo, comprensión y paciencia para la realización de este proyecto, sobre todo en los momentos difíciles. Gracias al laboratorio de Geoposicionamiento, Instrumentación y Metrología Geomática por brindarme el espacio y los equipos para la realización del proyecto. Gracias a Paola Gómez, a los docentes Jorge Gallego, Jorge Vélez, Diego Romero y Francisco Hernández por las retroalimentaciones y consejos que contribuyeron a realizar de la mejor manera este proyecto.

Gracias a la Universidad del Valle por darme la oportunidad de ser un profesional y dar un paso importante en mi vida.

**Tabla de Contenido**


Resumen 6
Introducción 6
1. Planteamiento del problema 8
2. Objetivos 10
    2.1 Objetivo General 10
    2.2 Objetivos Específicos 10
3. Justificación 11
4. Marcos 12
    4.1 Marco Referencial 12
    4.2 Marco Conceptual 13
    4.3 Marco Teórico 14
5. Metodología 21
    5.1 Descripción del área de estudio: 21
    5.2 Identificación y recopilación de variables 23
        5.2.1 Solicitud de datos al IDEAM: 24
        5.2.2 Cálculo de la Evapotranspiración Potencial: 25
        5.2.3. Cálculo de la Evapotranspiración Real 26
        5.2.4. Cálculo del Índice de Aridez 27
    5.3 Evaluación de indicadores del Estudio Nacional del Agua: 29
    5.4 Análisis multitemporal: 29
        5.4.1 Test de Mann - Kendall: 29
        5.4.2 Interpolación de las variables 31
        5.4.3 Ajuste altitudinal: 35
        5.4.4. Interpolación indicadores Estudio Nacional del Agua 39
5.5. Creación del Geovisor 40
6. Resultados y Análisis 42
    6.1 Datos y variables 42
    6.2 Matriz de correlación de Pearson 44
    6.3 Prueba de Mann-Kendall 47
    6.4 Indicadores hídricos del ENA 55
    6.5 Geovisor 60
7. Discusión. 60
8. Conclusiones 62
Bibliografía 64

## Lista de figuras

Figura 1: Curva de duración de caudales (CDC). Fuente: ENA (2022) 20
Figura 2: Ubicación geográfica de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia 26
Figura 3: Flujograma de metodología. Fuente: elaboración propia 27
Figura 4: Fórmula aplicada de relleno de datos U.S National Weather Service. Fuente: elaboración propia 28
Figura 5: Cálculo de la Evapotranspiración Potencial. Fuente: elaboración propia 29
Figura 6: Cálculo de la Evapotranspiración Real. Fuente: elaboración propia 29
Figura 7: Cálculo del Índice de Aridez estación Venta de Cajibío. Fuente: elaboración propia 30
Figura 8: Flujo de trabajo ModelBuilder. Fuente: elaboración propia 32
Figura 9: Tabla iteradora de ModelBuilder: Fuente: elaboración propia 32
Figura 10: Make XY Event Lyer ModelBuilder. Fuente: elaboración propia 33
Figura 11: Interpolación IDW ModelBuilder. Fuente: elaboración propia 34
Figura 12: Resultado de ModelBuilder. Fuente: elaboración propia 35
Figura 13: Factor de escala. Fuente: elaboración propia 36
Figura 14: Raster Calculator. Fuente: elaboración propia 37
Figura 15: Tabla iteradora del código de ajuste altitudinal. Fuente: elaboración propia 38
Figura 16: Resultados del código. Fuente: elaboración propia 39
Figura 17: Feature Vertices To Points. Fuente: elaboración propia 39
Figura 18: Compartir capa a la web en ArcGIS Online. Fuente: elaboración propia 41
Figura 19: Lista de capas ArcGIS Online. Fuente: elaboración propia 42
Figura 20: Adición de capas MapViewer. Fuente: elaboración propia 42
Figura 21: Creación de aplicación. Fuente: elaboración propia 43
Figura 22: Configuración. Fuente: elaboración propia 44
Figura 23: Estaciones de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha). Fuente: elaboración propia 46
Figura 24: Matriz de Correlación de Pearson 2018. Fuente: elaboración propia 48
Figura 25: Matriz de Correlación de Pearson 2022. Fuente: elaboración propia 49
Figura 26: Matriz de cambios entre 2018-2022. Fuente: elaboración propia 50
Figura 27: Gráfico de tendencias estación Buenos Aires. Fuente: elaboración propia 52
Figura 28: Gráfico de tendencias estación Polindara. Fuente: elaboración propia 52
Figura 29: Gráfico de tendencias estación Catalina La. Fuente: elaboración propia 53
Figura 30: Gráfico de tendencias estación Villa Rica. Fuente: elaboración propia 54
Figura 31: Gráfico de tendencia anual estación Villa Rica. Fuente: elaboración propia 54
Figura 32: Gráfico de tendencias estación Ingenio Bengala. Fuente: elaboración propia 56
Figura 33: Gráfico de tendencia anual estación Ingenio Bengala. Fuente: elaboración propia 56

Figura 34: Gráfico de tendencia anual estación Cajibío. Fuente: elaboración propia 58
Figura 35: Gráfico de tendencia anual estación Barragán. Fuente: elaboración propia 58
Figura 36: Gráfico del Índice de Aridez en la cuenca alta del Río Cauca. Fuente: elaboración propia 60
Figura 37: Geovisor Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 65

## Lista de tablas

Tabla 1: Rangos Índice del Uso de Agua (IUA). Fuente: ENA 2022 19
Tabla 2: Rangos Índice de Agua No Retornada a la Cuenca (IARC). Fuente: ENA 2022 20
Tabla 3: Rangos Índice de Eficiencia en el Uso del Agua. Fuente: ENA 2022 20
Tabla 4: Rangos Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua. Fuente: ENA 2022 21
Tabla 5: Rango Índices de Aridez. Fuente: ENA 2022 29
Tabla 6: Indicadores hídricos y variables meteorológicas. Fuente: elaboración propia 43
Tabla 7: Subzonas hidrográficas. Fuente: propia 45
Tabla 8: Variables de estaciones hidroclimatológicas. Fuente: elaboración propia 45
Tabla 9: Tendencias decrecientes de precipitación. Fuente: elaboración propia 49
Tabla 10: Tendencias crecientes de precipitación. Fuente: elaboración propia 51
Tabla 11: Tendencias estación Mondom. Fuente: elaboración propia 53
Tabla 12: Tendencias estación Ingenio Bengala. Fuente: elaboración propia 53
Tabla 13: Tendencia de temperatura promedio. Fuente: elaboración propia 55
Tabla 14: Tendencias posibles por variable. Fuente: elaboración propia 57
Tabla 15: Resultados Índice de Aridez. Fuente: elaboración propia 58
Tabla 16: Resultados Indicadores Hídricos. Fuente: elaboración propia 60
Tabla 17: Resultados Indicadores Hídricos. Fuente: elaboración propia 62
Tabla 18: Funcionalidades del geovisor. Fuente: elaboración propia 64

## Índice de ecuaciones

Índice de Aridez 16
Evapotranspiración Potencial 17
Evapotranspiración Real 17
Relleno de datos US National Weather Service 18
Índice de Retención y Regulación Hídrica 18

Coeficiente de Correlación de Pearson 22
Prueba de Mann-Kendall 22
Interpolación Espacial 23
Ajuste Altitudinal 35

**Lista de Anexos**

Anexo 1: Estaciones de temperatura. Fuente: IDEAM 83
Anexo 2: Estaciones de precipitación. Fuente: IDEAM 88
Anexo 3: Código de ajuste altitudinal. Fuente: elaboración propia 89
Anexo 4: Código de prueba de Mann-Kendall. Fuente: elaboración propia 90
Anexo 5: Código de prueba de Mann-Kendall. Fuente: elaboración propia 91
Anexo 6: Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998). Fuente: SÁNCHEZ, F. J. (2022).- Hidrología Superficial y Subterránea. 2ª ed. Kindle Direct Publishing., 440 pp. 92
Anexo 7: Índice de Aridez 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 93
Anexo 8: Precipitación Total Mensual 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 94
Anexo 9: Temperatura Máxima Media Mensual 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 95
Anexo 10: Temperatura Mínima Media Mensual 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 95
Anexo 11: Temperatura Mínima Media Mensual 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 96
Anexo 12: Índice de Regulación y Retención Hídrica 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 97
Anexo 13: Índice de Vulnerabilidad Hídrica 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 98
Anexo 14: Índice de Uso del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 98
Anexo 15: Índice de Uso del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 99
Anexo 16: Índice de Uso de Eficiencia del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 99
Anexo 17: Índice de Alteración Potencial del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 100
Anexo 18: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP1-2.6 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 100
Anexo 19: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP2-4.5 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 101
Anexo 20: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP3-7.0 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 101
Anexo 21: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP5-8.5 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 102

Anexo 22: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP1-2.6 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 103
Anexo 23: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP2-4.5 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 104
Anexo 24: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP3-7.0 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 104
Anexo 25: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP5-8.5 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia 105

## Resumen

La cuenca alta del Río Cauca es una de las regiones hidrográficas más importantes de Colombia la cuál tiene una ubicación de alta trascendencia por su rol de cuenca abastecedora para uso doméstico, agrícola e industrial. Por otro lado, está altamente influenciada por la variabilidad climática en términos de temperatura y precipitación. Sin embargo, los comportamientos de estas variables no han sido analizados en los años recientes y su relación con indicadores hídricos no ha sido evaluada, limitando el conocimiento del estado actual de la cuenca. Esta falta de conocimiento genera dificultades al momento de tomar decisiones relacionadas con la gestión del recurso hídrico en la cuenca alta del Río Cauca.

Este trabajo tiene como objetivo analizar los impactos de la variabilidad climática en la vulnerabilidad y sensibilidad del recurso hídrico y su influencia espacial. Para ello, se implementó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall y el coeficiente de correlación de Pearson integrando variables climáticas como la precipitación y la temperatura, índices hidrometeorológicos e indicadores hídricos como el Índice de Aridez, Índice de Regulación y Retención Hídrica, Índice del Uso del Agua, Índice de Agua no Retornada a la Cuenca, Índice de Eficiencia en el Uso del Agua, Índice de Vulnerabilidad Hídrica, e Índice de Alteración Potencial del Agua. Entre los resultados, se identificó que el estado de la cuenca es estable, pues no se encontró un comportamiento uniforme en las tendencias de precipitación y temperatura en la distribución de las estaciones, además, los indicadores del Estudio Nacional del Agua (ENA) muestran resultados moderados a lo largo de las subzonas hidrográficas presentes en la cuenca. Sin embargo, es importante integrar más dimensiones como la salud, las condiciones socioeconómicas y socioculturales para tener una perspectiva completa sobre la vulnerabilidad de la variabilidad climática en el recurso hídrico. Por último, estos resultados se espacializaron y se integraron en un geovisor en ArcGIS Online para visualizarlos y analizarlos de manera interactiva.

Este proyecto aporta conocimiento práctico sobre la vulnerabilidad y la sensibilidad en el recurso hídrico de la cuenca alta del río Cauca, proporcionando herramientas y métodos que pueden contribuir en la toma de decisiones en la planificación y gestión del agua.

Palabras clave: Variabilidad climática, IA, Pearson, Mann-Kendall, ArcGIS Online

## Introducción

El cambio climático y la variabilidad climática representan uno de los mayores desafíos que deberá enfrentar la humanidad durante este siglo, influyendo así en numerosos aspectos del entorno natural y la vida cotidiana (Carvajal, 2011), (Guzmán, et al. 2024). Este problema es de primera importancia ya que perjudica el desarrollo económico, social, y ambiental, y se manifiesta con distintos efectos a lo largo del territorio (Rodas Guizado, 2022). Uno de los efectos según el Sexto Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, es el incremento de la temperatura que ha sido provocado por el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera producto de actividad antrópica, cambios del uso del suelo y altas intensidades de las prácticas agropecuarias. Si las acciones necesarias para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero no se extienden a escala regional y global, y además no se constituyen las medidas e inversiones correspondientes para la adaptación a las nuevas condiciones climáticas, los efectos de este fenómeno podrían intensificarse en el futuro (Magrin et al., 2007).

Los impactos del cambio climático varían según la región, la capacidad de adaptación y el nivel de vulnerabilidad en cada país (Marín del Río, 2020). Sin embargo, esta variabilidad no depende exclusivamente de factores climáticos, sino también de las trayectorias de desarrollo social, demográfico, económico y tecnológico que las sociedades puedan seguir en las próximas décadas. Por tal razón, surgen las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) como escenarios integradores que permiten representar futuros alternativos del mundo sin intervención climática explícita, pero con diferentes niveles de desafío para la mitigación y la adaptación, (Escoto et al., 2017). Estas trayectorias permiten explorar, por ejemplo, un futuro sostenible con bajo crecimiento poblacional y alta cooperación global (SSP1), o uno fragmentado y desigual con crecimiento poblacional alto y escasa capacidad de respuesta institucional (SSP3 o SSP4). De esta manera, es importante que se comprenda que los efectos del cambio climático deben verse no solo desde la perspectiva climática, sino también de la estructura de la sociedad humana en el futuro.

En los estudios de los recursos hídricos, la incorporación de los SSP ha demostrado ser determinante para dimensionar adecuadamente la exposición y vulnerabilidad futura. Por ejemplo, se ha estimado que, bajo un mismo escenario climático (RCP8.5), la cantidad de personas expuestas a estrés hídrico en 2050 puede oscilar entre 920 y 3,400 millones dependiendo del SSP considerado, siendo estas diferencias atribuibles a la estructura poblacional y patrones de desarrollo (Arnell & Lloyd-Hughes, 2013). En regiones con alta vulnerabilidad, como América Latina, estas diferencias podrían incrementarse notablemente, lo que refuerza la

importancia de incorporar escenarios socioeconómicos en la evaluación del impacto climático sobre los recursos hídricos y además, fomentar proyectos y estrategias con el objetivo de mitigar los efectos de estos escenarios y aumentar la capacidad de adaptación (Gómez Martínez, 2025).

De acuerdo con Carvajal et al. (1988), el Valle del Cauca, debido a su proximidad al Océano Pacífico, es uno de los departamentos más afectados por la zona de influencia del fenómeno ENOS, lo que desencadena en alteraciones en los patrones de lluvias y temperaturas (Ayada, 2017). Esto se ve recalcado por la diversidad de pisos térmicos presentes en el departamento, que provoca una extensa variedad climática. Por otro lado, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016) presentó el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Departamento del Cauca, donde se concluyó que, en el departamento del Cauca, pese al gran número de afluentes existentes, el cambio climático se suma a un reto ya existente en torno a la disponibilidad de agua en las fuentes hídricas.

Para entender el comportamiento de los diferentes indicadores y variables relacionados con el cambio climático y la variabilidad climática, se emplean técnicas estadísticas y geoespaciales. La prueba no paramétrica para la detección de tendencias de Mann-Kendall ha sido ampliamente utilizada en la evaluación de la significancia de tendencias en series hidroclimáticas como series de calidad del agua, caudal, temperatura y precipitación (Cantor Gómez, 2011). Por su parte, el coeficiente de correlación de Pearson se ha usado para determinar correlaciones entre índices de precipitación e índices climáticos (Zhong et al., 2019). Estos indicadores, combinados con herramientas de interpolación espacial, facilitan la representación gráfica de los mismos, además de ser métodos fiables para estimar la información climática de lugares no observados a partir de mediciones cercanas (Berndt & Haberlandt, 2018).

Este trabajo desarrolla una metodología integral para analizar los impactos de la variabilidad climática en el recurso hídrico de la cuenca alta del río Cauca, utilizando un enfoque estadístico, espacial y visual. Se llevó a cabo un análisis de tendencias en variables hidroclimáticas como temperatura y precipitación, mediante la prueba de Mann-Kendall, y se evaluaron correlaciones entre índices relevantes a través del coeficiente de Pearson. Además, se realizaron interpolaciones geoespaciales para espacializar las variables y generar mapas detallados que muestran su distribución y variabilidad. Finalmente, se diseñó un geovisor interactivo, que permite la visualización y análisis dinámico de los resultados, facilitando la interpretación de los datos y su aplicación en la gestión del recurso hídrico ante los desafíos de la variabilidad climática.

## 1. Planteamiento del problema

Según la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC,1992), el cambio climático es un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera de la tierra y que se suma a la variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables. Desde la mitad del siglo XX, que es el punto de partida más probable de la época del Antropoceno, el funcionamiento de la atmósfera, los océanos, la superficie de la geosfera y el clima ya no es igual a como se venía caracterizando durante gran parte de los últimos 11.000 años. Esta época, caracterizada por incluir a las personas como factor crucial del cambio climático, asume que los aumentos en la emisión de gases de efecto invernadero, el calentamiento global, cambios en glaciares y pérdida de capas de hielo son producto de la actividad humana como la actividad económica, consumo de energía y uso de recursos (Cearreta, 2019).

Colombia es un país con abundantes recursos hídricos; recibe humedad del Caribe, el Atlántico, el Pacífico y la Amazonía, está cubierto de numerosos bosques y ríos, y se caracteriza por una altísima biodiversidad (Carvajal Escobar, Y., 2019). Sin embargo, Colombia es un país vulnerable de gran manera frente a los impactos que provienen de la variabilidad y el cambio climático; ha sido etiquetado como el tercer país con mayor población ubicada en zonas de riesgo, tanto climáticas como físicas, como deslizamientos de tierra, terremotos, inundaciones y ciclones (PICC,2018).

El impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos depende no solo de la contribución del ciclo hidrológico, limitado por el uso y cubierta del suelo, la temperatura y la estructura temporal de las precipitaciones, sino que es el sistema de recursos hidráulicos disponible y su gestión, un factor determinante de la suficiencia o escasez de teniendo en cuenta las necesidades globales de la humanidad (Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F., 2005). Los países en desarrollo como Colombia poseen una alta vulnerabilidad frente a desastres hidrometeorológicos debido al urbanismo no planificado en zonas peligrosas, a la sobreexplotación de los recursos naturales que alteran el régimen hidrológico y a la falta de conciencia pública sobre el riesgo de desastres (Sedano Cruz, RK., 2017).

De acuerdo a la Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático, los fenómenos de variabilidad climática interanual más conocidos son El Niño y La Niña. El Valle del Cauca es una de las zonas que se ha visto seriamente afectada por las variaciones del clima. Las altas temperaturas durante El Niño y las fuertes lluvias durante La Niña han afectado tanto a plantas y animales endémicos como a los humanos (Diario Occidente, 2019, 3 de septiembre). De acuerdo a Sedano Cruz, RK. (2017) son más de 600 eventos por año los que son fomentados por estos fenómenos naturales, los cuáles son favorecidos por la dinámica de la variabilidad climática y las condiciones de vulnerabilidad del país.

La cuenca alta del río Cauca se ha convertido en una preocupación en Colombia debido a su importante papel económico y ambiental como recurso natural, el abastecimiento de agua para uso doméstico y los sistemas industriales y de riego (Ávila et al., 2019). La variabilidad climática y los cambios proyectados en las características del ENOS en las últimas décadas, posiblemente debido al calentamiento global (Capotondi et al., 2014) podrían reducir la capacidad de las infraestructuras de control de inundaciones y aumentar los impactos negativos de las inundaciones y las sequías (Cerón et al., 2021).

Aunque actualmente hay bastante información y productos relacionados con la variabilidad climática por parte de entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, no hay una herramienta en esta zona que facilite el acceso a la información de la variabilidad climática de manera fácil, de parte de usuarios sin experiencia en estos temas y que sea interactivo. Esto reduce la probabilidad de que se elaboren planes de adaptación por parte de las entidades competentes para adaptarse y mitigar el impacto de este fenómeno (López & Rodríguez, 2017).

De acuerdo a las evidencias recogidas anteriormente, el recurso hídrico de la Cuenca Alta del Río Cauca se ve fuertemente afectado por la variabilidad climática. Por esta razón, surge la necesidad de preguntarse: ¿Qué metodología emplear para analizar el impacto de la variabilidad climática en el recurso hídrico de la cuenca alta del Río Cauca?

# 2. Objetivos

## 2.1 Objetivo General

Analizar los impactos y efectos de la variabilidad climática en la vulnerabilidad y sensibilidad de la distribución espacial del recurso hídrico para la cuenca alta del Río Cauca en el periodo 2017- 2022.

## 2.2 Objetivos Específicos

- Identificar y recopilar las variables y características ambientales asociadas al recurso hídrico y la variabilidad climática
- Evaluar de acuerdo a los indicadores hidrometeorológicos del ENA, los impactos y efectos de la variabilidad climática en el recurso hídrico.
- Realizar un análisis multitemporal de los efectos e impactos de la variabilidad climática en el recurso hídrico.
- Desarrollar un geovisor para la visualización de los datos hidrometeorológicos.

## 3. Justificación

La vulnerabilidad debe analizarse como una condición sistémica, multifactorial, multisectorial, multitemporal, multiescalar, y dinámica (Magaña, 2012). Una opción para acercarse a la evaluación de la vulnerabilidad es a través de índices ambientales (IA). Los IA son agregados de indicadores, que tienen como objetivo ser una herramienta para la planeación y la toma ágil de decisiones políticas por diversos actores (Vargas & Restrepo, 2018). Además, conocer la vulnerabilidad al impacto de variabilidad y cambio climático a nivel de microcuencas permitirá generar políticas específicas con impacto local (Vargas & Restrepo, 2018). Este estudio, permite acercarse a identificar un nivel de vulnerabilidad en la Cuenta Alta del Río Cauca mediante distintos indicadores y variables ambientales.

Este proyecto utiliza herramientas estadísticas y de visualización geoespacial para analizar la variabilidad climática en el recurso hídrico de la cuenca Alta del Río Cauca. La prueba de Mann-Kendall ha sido muy utilizada en estudios de análisis de tendencias de índices de precipitación (Ávila et al., 2019), y también en estudios de análisis de tendencias hidrológicas, demostrando que es una técnica eficaz para detectar cambios significativos en variables climáticas (Rawshan Ali & Abubaker, 2019), (Ekwueme & Agunwamba, 2021). Por otro lado, el coeficiente de correlación de Pearson contribuye a identificar relaciones significativas entre variables, en este caso, facilitando el entendimiento del comportamiento entre variables e indicadores ambientales. Pirnia et al. (2019) utilizó esta técnica para evaluar la relación entre las actividades humanas y la variabilidad climática en recursos hídricos.

La información geográfica juega un rol importante para el contexto del cambio climático, la variabilidad climática y la gestión del recurso hídrico, debido a que permite comprender las dinámicas a lo largo del territorio y sus interacciones (Erazo, 2019). Por lo tanto, a través de la generación de mapas y construcción de geovisores, se facilita la identificación de patrones climáticos, de tal manera que la toma de decisiones sean más efectivas en la gestión del recurso hídrico y a su vez compartir la información con la población que habita en la cuenca (Erazo, 2019). Dabybida et al., (2021) destaca la utilidad de las herramientas geoespaciales para la representación de tendencias temporales y espaciales, contribuyendo de manera positiva a la capacidad de toma de decisiones y de análisis. En este proyecto se implementa una herramienta de visualización de datos mediante la plataforma de ArcGIS Online, mejorando la capacidad de entendimiento de los datos y generando una mayor accesibilidad de la información meteorológica en la cuenca alta del Río Cauca.

# 4. Marcos

## 4.1 Marco Referencial

El cambio climático es un fenómeno global que ha modificado el ciclo hidrológico y los patrones climáticos, influyendo negativamente la disponibilidad de los recursos hídricos y su distribución. En México, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, realizó un estudio de las consecuencias del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos, en la sociedad, en la calidad del agua y en la agricultura. A su vez, determinaron que el impacto del cambio climático en los recursos hídricos depende de los cambios en el volumen y calidad del flujo de agua superficial y subterránea, de las descargas de agua de dichas corrientes, así como de las demandas y nivel de extracción para uso humano (Martínez & Patiño, 2010).

El cambio climático afecta directamente en varios factores, tales como la precipitación, la temperatura, y la evapotranspiración potencial. En este sentido, un estudio de Su et al. (2015) realizado en la cuenca del río Shiyang, en China, calculó el Índice de Aridez como la relación entre la evapotranspiración, obtenida por el método de Penman-Monteith y la precipitación. Este estudio tiene una relevancia directamente en su enfoque metodológico y en el uso del índice de aridez como indicador del vínculo que hay entre el balance hídrico y las condiciones climáticas.

Ivanova (2022) evalúa la afectación de los servicios ecosistémicos hídricos en la cuenca del río Teatinos dependiendo del impacto de cambio de coberturas de la tierra producto del cambio climático global mediante un estudio de tendencias de temperaturas y precipitaciones, identificación de coberturas y evaluando finalmente si el servicio de regulación hídrica se ve afectado por las variables mencionadas mediante el Índice de Regulación Hídrica (IRH), donde correlaciona sus valores con los valores de precipitación media anual en la cuenca.

Por otro lado, Teresa (2016) utiliza otros indicadores como el índice de vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento (IVH) y el índice del uso del agua (IUA) para analizar la vulnerabilidad en fuentes hídricas superficiales abastecedores de acueductos frente el cambio climático en la cuenca del Río Subia, donde determinó que la vulnerabilidad tiende a ser muy alta de acuerdo a la valoración obtenida en el IUA y el IVH, afectando así las consecuencias de la población colombiana ante una posible aceleración de un cambio climático.

Para la cuenca alta del Río Cauca se ha evaluado la variabilidad espacio-temporal de su hidroclimatología con datos hidrológicos mensuales de la estación La Balsa, información atmosférica y oceánica (Cerón et al, 2021). En una serie temporal de 1986 demostraron con la prueba de Pettitt que había una ruptura estadísticamente significativa que indica que los picos de caudal máximo después de ese periodo bajaron a la vez que los picos de caudal mínimo así que realizaron un test de

Mann-Kendall y el cálculo de magnitudes a partir del estimador pendiente de Sen para ambos periodos por separados, encontraron resultados no significativos.

Para la visualización de los datos, la metodología de Másmela & Medina (2023) proponen la implementación de un geovisor teniendo en cuenta la información oficial del IDEAM donde se integre y se centralice la información más importante del Volcán Nevado Santa Isabella, de tal manera que cualquier usuario pueda visualizar la información de manera interactiva y dinámica. Este geovisor se creó en ArcGIS Experience Builder donde se centraron en el diseño visual, la personalización y la interactividad avanzada. Por otro lado, se creó otra aplicación en ArcGIS Web AppBuilder para herramientas específicas de navegación y consulta de datos. Al integrar ambas aplicaciones, permitió crear un geovisor completo, interactivo y fácil de usar.

## 4.2 Marco Conceptual

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que puede identificarse (a través de pruebas estadísticas, por ejemplo) debido a cambios en la variabilidad de sus propiedades, y que se mantiene durante un tiempo prolongado, normalmente una década o más (IPCC, 2013). Durante este tiempo, el clima puede presentar ciclos o fluctuaciones de diversa duración por encima o debajo de sus valores normales; la secuencia de estas fluctuaciones se conoce como variabilidad climática (IDEAM, 2018). En los sistemas de agua dulce, los impactos del cambio climático se manifiestan mediante incrementos observados y proyectados en la temperatura, modificaciones en los patrones de precipitación y un incremento en el nivel del mar (García et al., 2012), por lo tanto, la vinculación entre el clima y el ciclo hidrológico es estrecho (Martínez & Patiño, 2012).

El ciclo hidrológico se define como la sucesión de fases por las que el agua entra en la atmósfera a la tierra y sale: evaporación del agua del suelo, el mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y evaporación (UNESCO, 2010). Sus componentes están relacionados en gran parte con la disponibilidad de agua y que participan en la ecuación del balance hídrico; estos son la precipitación, como variable de entrada; la evapotranspiración real y la escorrentía como variables de salida (Alarcón et al., 2012).

El balance hídrico se basa en la ley física de conservación de masas. La UNESCO (2010) la define como “Balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua”.

La temperatura se define como una medida de la energía promedio del movimiento molecular en una muestra de materia: la energía total generada por estos movimientos puede ser descrita como la energía térmica de la muestra. La energía térmica, y, por lo tanto, la temperatura, pueden variar según la interacción con diferentes tipos de energía como lo es la energía electromagnética (American Chemical Society, 2020a). Es una variable climatológica la cual tiene una variación significativa en función a la altitud y la precipitación (Rojas Chuyán, 2024).

La precipitación se define como la forma principal de transportar agua desde la atmósfera hasta la superficie de la tierra, se origina con la formación de las gotas de nubes (Vera & Camilloni, 2010, p.14). Según Bateman (2007) también se puede definir como cualquier forma húmeda que llega a la superficie terrestre, independientemente de la forma, pues puede ser lluvia, nieve, granizo, niebla o rocío.

Los visores geográficos son muy útiles para analizar la información relacionada con el cambio climático (Mosquera, 2017). Estas son herramientas que utilizan la geovisualización, la cual se centra en la visualización científica sobre la información geográfica para proporcionar métodos y herramientas para desarrollar soluciones, presentar datos geográficos y construir conocimientos (MacErren & Kraak, 2001).

## 4.3 Marco Teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos que sustentan el análisis realizado en este proyecto. A través de análisis de tendencias, métodos de correlación e interpolaciones, se constituyen las herramientas necesarias para adecuarlas a la Cuenca Alta del Río Cauca.

**Índice de aridez (IA):** Es un indicador que define cualitativamente las condiciones naturales de aridez, evaluando el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de un territorio. Reconoce áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial (Alarcón et al., 2019). A lo largo de la historia, el IA ha estado en constante evolución y, en Colombia, se adoptó una relación entre la ETP y ETR (IDEAM, 2010, 2015) con el fin de representar la dinámica de la superficie del suelo, como se expresa a continuación:

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP} \quad (1)$$

*Fuente: ENA 2022*

**Donde:**
**IA:** Índice de aridez (-)
**ETP:** Evapotranspiración potencial anual multianual de Hargreaves (mm)
**ETR:** Evapotranspiración real potencial anual multianual de Budyko (mm)
Se usó la fórmula de Hargreaves (1994) para la evapotranspiración potencial y la fórmula de Budyko (1974) para la evapotranspiración potencial.

**Evapotranspiración:** Es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración. La evaporación es el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor, mientras que la transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera. Toman agua del suelo a través de sus raíces, toman una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran (Sánchez, 2022).

**Evapotranspiración potencial (ETP):** fue definida por Thornthwaite en 1948 como la evapotranspiración que ocurriría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones favorables. Para este estudio, se aplicó la ecuación modificada de Hargreaves (1994) aplicada en el Estudio Nacional del Agua (2022) en la que se adecuaron las constantes para que se ajustaran mejor a las características del territorio nacional:

$$ETP = 0,00216(T_{prom} + 17,78)R_0(T_{max} - T_{min})^{0,47} \quad (2)$$

Donde:

ETP: evapotranspiración potencial (mm)

Tmin - media - máx: temperatura mínima, media, y máxima (°C)

$R_{0:}$ radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente (mm)

**Evapotranspiración real (ETR):** Es la que se produce realmente en las condiciones existentes en cada caso (Sánchez, 2022). Al igual que en la ETP, se aplicó la ecuación utilizada en el Estudio Nacional del Agua (2022), la cual es estimada con la ecuación de Budyko (1974), la cual transforma los valores potenciales a reales a partir de un balance hídrico anual (ENA, 2022).

$$ETR = \sqrt{(ETP * P * tanh\frac{P}{ETP})(1 - cosh\frac{ETP}{P} + sinh\frac{ETP}{P})} \quad (3)$$

**Donde:**
**P:** Precipitación anual multianual (mm)
**ETP:** Evapotranspiración Potencial anual multianual de Hargreaves (mm)
**ETR:** Evapotranspiración Real Potencial anual multianual de Budyko (mm)

**Método del U.S National Weather Service:**

Este proceso ha sido verificado tanto teórica como empíricamente y contempla que el dato faltante en una cierta estación A, puede ser estimado en base a los datos observados en las estaciones circundantes. El método puede ser aplicado para estimar valores diarios, mensuales o anuales faltantes (Aranda, 1984).

El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad W, igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina y la estación A. El dato $P_X$ será igual a:

$$P_i = \sum(P_i * W_i) / \sum W_i \quad (4)$$

*Fuente: Procesos del Ciclo Hidrológico (Aranda, 1984)*

en donde:

$P_i =$ precipitación observada para la fecha de la faltante, en las estaciones auxiliares circundantes (pueden ser como mínimo 2), en milímetros.

$W_i = \frac{1}{D_i^2}$, siendo $D_i$ la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en kilómetros. Este método utiliza los datos de estaciones meteorológicas cercanas para estimar los datos faltantes, por tanto, garantiza que las interpolaciones se basen en condiciones climáticas similares, a su vez, es accesible y fácil de implementar.

**Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH):** De acuerdo al Estudio Nacional del Agua - ENA (2022), el IRH evalúa la capacidad de la cuenca para mantener y regular un régimen de caudales, la cual está limitada por la interacción del sistema suelo-vegetación (características físicas y morfométricas de la cuenca). Su

definición se relaciona con la curva de duración de caudales medios diarios (CDC), que es la relación del porcentaje de tiempo durante el cual los caudales igualan o exceden un valor dado.

$$IRH = \frac{V_P}{Vt} \quad (5)$$

Donde:
IRH: Índice de Regulación Hídrica
$V_P$ : Volumen representado por el área que se encuentra bajo la línea de caudal medio en la CDC.
$V_{t:}$ : Volumen total equivalente al área bajo la CDC.

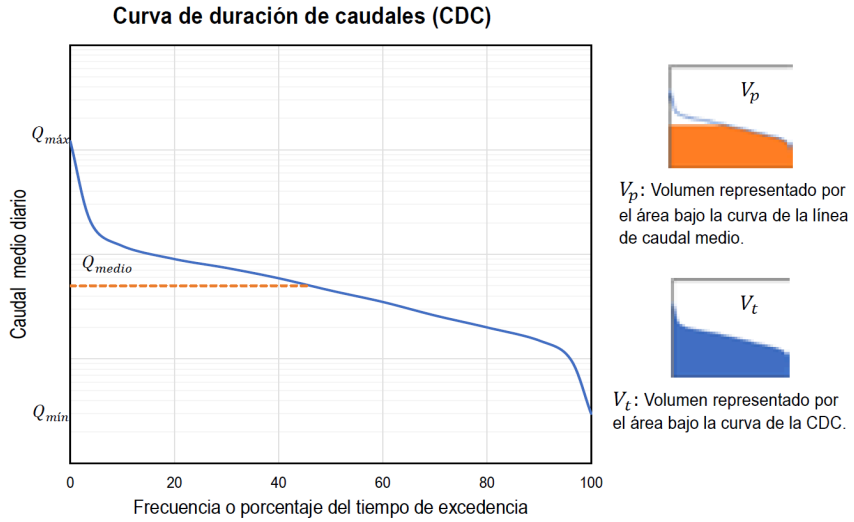



*Figura 1: Curva de duración de caudales (CDC). Fuente: ENA (2022)*

**Índice del Uso del Agua (IUA):** Este índice refleja la capacidad de la subzona hidrográfica para mantener los volúmenes de agua extraídos generados por las actividades antrópicas que se desarrollan en la misma, entendiendo por demanda hídrica el volumen extraído, sin importar si este volumen retorna total o parcialmente. Este indicador muestra la relación entre la demanda de agua (extracción total de agua) y la oferta hídrica disponible (oferta total menos caudal ambiental) (ENA, 2022). Se clasifica en 6 categorías:

| Rango IUA | Categoría |
|---|---|
| IUA < 1 | Muy bajo |
| 1 < IUA < 10 | Bajo |

| | |
|---|---|
| 10 < IUA < 20 | Moderado |
| 20 < IUA < 50 | Alto |
| 50 < IUA < 100 | Muy alto |
| IUA > 100 | Crítico |

*Tabla 1: Rangos de Agua (IUA). 2022*

*Índice del Uso Fuente: ENA*

**Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) :** Relaciona de forma cualitativa los resultados del índice del uso del agua (IUA) y el índice de retención y regulación hídrica (IRH), de forma que representa la fragilidad que tienen los sistemas hídricos superficiales de mantener la oferta de agua dadas sus condiciones de uso y regulación. Por lo tanto identifica la vulnerabilidad en el abastecimiento de agua que presentan los sectores usuarios del recurso (ENA, 2022)

**Índice de agua no retornada a la cuenca (IARC):** Refleja la capacidad de las subzonas hidrográficas para mantener los niveles los consumos de agua derivados de las actividades económicas que se desarrollan en ellas, considerando como consumo de agua el volumen extraído y que no retorna (ENA, 2022). Se clasifica en 6 categorías:

| Rango IARC | Categoría |
|---|---|
| IARC< 0,01 | Muy bajo |
| 0,01 < IARC < 0,1 | Bajo |
| 0,1 < IARC < 0,2 | Moderado |
| 0,2 < IARC < 0,5 | Alto |
| 0,5 < IARC < 1,0 | Muy alto |
| IARC > 1,0 | Crítico |

*Tabla 2: Rangos Índice de Agua No Retornada a la Cuenca (IARC). Fuente: ENA 2022*

**Índice de eficiencia en el uso del agua (IEUA) :** Es el valor numérico que evalúa la relación entre la huella hídrica azul multisectorial (volumen de agua extraído que no regresa a la cuenca) en una subzona hidrográfica durante un periodo de tiempo determinado a la demanda hídrica multisectorial (volumen de agua extraído) en la misma subzona hidrográfica para ese mismo periodo de tiempo (ENA, 2022). Se clasifica en 6 categorías:

| Rango IEUA | Categoría |
|---|---|
| IEUA < 0,01 | Muy bajo |
| 0,01 < IEUA < 0,1 | Bajo |
| 0,1 < IEUA < 0,2 | Moderado |
| 0,2 < IEUA < 0,5 | Alto |
| 0,5 < IEUA < 1,0 | Muy alto |

*Tabla 3: Rangos Índice de Eficiencia en el Uso del Agua. Fuente: ENA 2022*

**Índice de alteración potencial de calidad de agua (IACAL):** Permite evaluar las presiones por carga contaminante que se ejercen sobre los sistemas hídricos por vertimientos de aguas residuales de los sectores doméstico, industrial y beneficio del café (ENA, 2022). Numéricamente corresponde al promedio de las categorías de clasificación asignadas a los cocientes que surgen de la relación entre las cargas estimadas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (BDO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Fósforo Total (PT), Nitrógeno Total (NT) y la oferta hídrica superficial.

| Rangos | Categoría de clasificación | Clasificación de la presión |
|---|---|---|
| $1,0 \leq IACAL \leq 1,5$ | 1 | Baja |
| 1,5 IACAL $\leq 2,5$ | 2 | Moderada |
| $2,5 < IACAL \leq 3,5$ | 3 | Media Alta |
| $3,5 < IACAL < 4,5$ | 4 | Alta |
| $4,5 \leq IACAL \leq 5,0$ | 5 | Muy Alta |

*Tabla 4: Rangos Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua. Fuente: ENA 2022*

**Coeficiente de correlación de Pearson:** Esta prueba evalúa la relación estadística entre dos variables continuas. Si la asociación entre ellas no sigue un patrón lineal, el coeficiente obtenido no representa adecuadamente la correlación. Su rango varía entre -1 y +1, donde un valor de 0 indica la ausencia de relación entre las variables. Un coeficiente positivo sugiere una relación directa, mientras que un coeficiente negativo indica una relación inversa (Ortega, 2019). Su fórmula es la siguiente:

$$r_{xy} = \frac{\Sigma Z_x Z_y}{N} \quad (6)$$

Donde:
x: variable número uno
y: variable número dos
$Z_{x:}$: desviación estándar de la variable uno
$Z_Y$: desviación estándar de la variable dos
N: número de datos

**Test de Mann Kendall:** Es un test no-paramétrico (Kendall, 1975), sugerido para evaluar la tendencia en series de datos ambientales. Este test compara los valores que componen una misma serie temporal, en orden secuencial (Alencar & Silva, 2017). Su ecuación es la siguiente:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(x_j - x_k) \quad (7)$$

Donde:

$sgn(x) = \{+ 1 \, si \, x > 0\}$
$sgn(x) = \{0 \, si \, x = 0\}$
$sgn(x) = \{- 1 \, si \, x < 0\}$

$X_J$ representa los datos estimados de la secuencia de valores, n representa el tamaño de serie temporal. Reciben valor cero (0) si ($X_J$ - $X_k$) = 0; y [-1] si ($X_J$ - $X_k$) > 0, por fin, [1] si ($X_J$ - $X_k$) < 0. Supone que H0 sea verdadera, S debe presentar una distribución aproximadamente normal con media cero y varianza $Var\,(s) = [(n * (n - 1) * (2 * n + 5)]/18$. El resultado de S indica la posible existencia de tendencias, desde que el valor de S sea significativamente diferente de cero. Siendo S diferente de cero, la hipótesis nula H0 puede ser rechazada, y la hipótesis alternativa H1 sería aceptada (Mann, 1945). El valor estadístico del test es representado por Z, se expresa en la siguiente ecuación:

$Z = \frac{S-1}{\sqrt{Var(s)}} \, si \, S > 0$
$Z = 0 \quad si \, S = 0$
$Z = \frac{S+1}{\sqrt{Var(s)}} \, si \, S < 0$

El valor de Z, que es el parámetro de salida, es el evaluado para determinar la existencia de una tendencia. Si Z es positivo, hay aumento en la tendencia. Si el valor es negativo, hay disminución en la tendencia.

**Interpolación espacial:** Este procedimiento matemático se utiliza para estimar el valor de un atributo en un punto específico a partir de mediciones en ubicaciones cercanas (Vargas et al., 2011). En este caso, se emplea el método de Ponderación por Distancia Inversa (IDW), el cual asume que la correlación y similitud entre los puntos es proporcional a la distancia que los separa. Esta relación se modela como una función inversa de la distancia entre el punto de interés y sus vecinos (Saffari et al., 2009). Su expresión matemática es la siguiente:

$$Z_o = \frac{\sum_{i=1}^{N} Z_i * d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^{N} d_i^{-n}} \quad (8)$$

Donde:
$Z_o$ = El valor estimado de la variable zzz en el punto o.
$Z_i$ = El valor de la muestra en el punto i.
$d_i$ = La distancia desde el punto de muestra al punto estimado.
N = El número total de puntos de muestra utilizados para la estimación.
n = El coeficiente que determina cómo los pesos dependen de la distancia.

# 5. **Metodología**

## 5.1 Descripción del área de estudio:

El río Cauca nace en el Macizo Colombiano, específicamente en el cerro El Español, cerca del Páramo de Sotará, en el departamento del Cauca, a aproximadamente 3.200 m s. n. m. Su curso se extiende en dirección paralela a la Cordillera Occidental, con una longitud de 1.360 kilómetros, hasta desembocar en el río Magdalena, en el departamento de Bolívar, siendo su principal afluente. En su recorrido de sur a norte, atraviesa nueve departamentos: Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar (Plataforma Colaborativa 2 Cuenca Alta del Río Cauca, 2022).

En el departamento del Cauca, la cuenca alta del río Cauca se extiende desde el Macizo Colombiano hasta los límites con el Valle del Cauca, entre las cimas de las cordilleras Occidental y Central. Su altitud oscila entre los 4.700 m, en la cima del volcán Puracé, y los 950 m, en el valle aluvial del Cauca. Abarca aproximadamente 7.368 km², lo que equivale al 24,15 % del área total del departamento, e incluye 23 de sus 42 municipios, con la mayor concentración poblacional en Popayán, Puerto Tejada y Santander de Quilichao. En el departamento del Cauca, la cuenca alta del río Cauca se extiende desde el Macizo Colombiano hasta los límites con el Valle del Cauca, entre las cimas de las cordilleras Occidental y Central. Su altitud oscila entre los 4.700 m, en la cima del volcán Puracé, y los 950 m, en el valle aluvial del Cauca. Abarca aproximadamente 7.368 km², lo que equivale al 24,15 % del área total del departamento, e incluye 23 de sus 42 municipios, con la mayor concentración poblacional en Popayán, Puerto Tejada y Santander de Quilichao.

En la cuenca alta del río Cauca se han identificado 23 subzonas hidrográficas, las cuales abastecen de agua a al menos 55 cabeceras municipales y distritales, incluyendo ciudades capitales como Popayán y Cali (Plataforma Colaborativa 2 Cuenca Alta del Río Cauca, 2022).

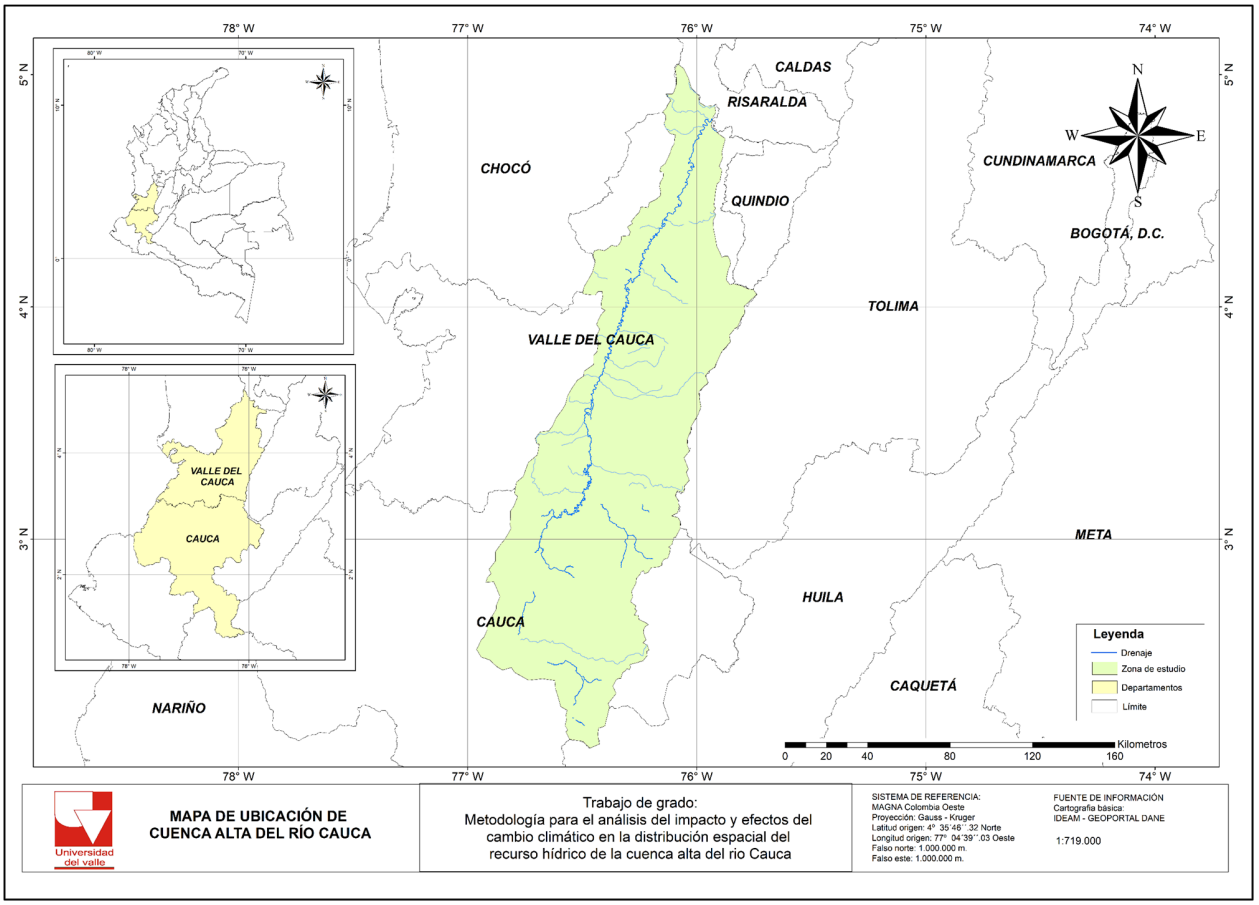



*Figura 2: Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia*

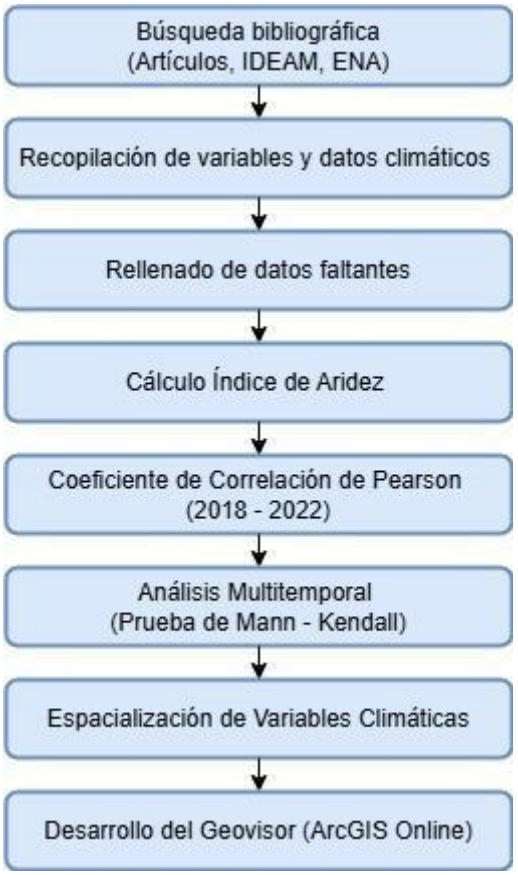



*Figura 3: Flujograma de metodología. Fuente: elaboración propia*

### 5.2 Identificación y recopilación de variables

Para identificar y recopilar las variables y características ambientales asociadas al recurso hídrico y la variabilidad climática, se recurrió al Instituto Nacional de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) que es la entidad pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, encargada de producir información hidrológica, meteorológica, y ambiental de calidad. Además, se consultó también en el Estudio Nacional del Agua (ENA), presentado por esta misma entidad, que cuenta con información actualizada sobre la oferta, la demanda, la calidad, el riesgo, las respuestas hidrológicas a la variabilidad climática, las aguas subterráneas y la huella hídrica (De Prensa, s/f). Además de los datos, se hizo una solicitud directamente al IDEAM sobre los datos disponibles de información climática tomada a partir de sus estaciones. Por otro lado, se consultaron artículos relacionados al fenómeno del cambio climático, la variabilidad climática y al recurso hídrico a nivel nacional y a nivel regional para identificar qué variables o indicadores se estudian en la región. Por último, los indicadores hídricos se encontraron en los anexos de indicadores hídricos del ENA 2018 y del ENA 2022, donde se encontraron 36 subzonas hidrográficas que están dentro de la zona de estudio y los shapefiles fueron descargados de Colombia en Mapas.

### 5.2.1 Solicitud de datos al IDEAM:

Esta fase consta de la obtención de los datos requeridos para el cálculo de la variable seleccionada, los cuales fueron facilitados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se hizo una depuración de datos de acuerdo a las variables que el IDEAM brindó, ya que proporcionaron diversas variables climatológicas. No obstante, fueron seleccionadas las siguientes: temperatura mínima diaria, temperatura máxima diaria, temperatura mínima media mensual, temperatura máxima media mensual y precipitación total mensual, que son las necesarias para los cálculos del índice de aridez, la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real. En total, se utilizaron 11 datos de estaciones para la temperatura y 66 estaciones para la precipitación total mensual.

La información brindada se examinó detenidamente y se identificaron vacíos temporales en los datos, es decir, registros con fechas ausentes. Estos valores faltantes en un registro de lluvias o temperatura es muy frecuente, puede ser ocasionado por errores del equipo de medición, por la persona encargada de las observaciones o por límite presupuestal. Debido a esta razón, se cuantificaron los datos faltantes por variable y se implementó la metodología del US National Weather Service para rellenar la información faltante.

El relleno de los datos faltantes se realizó en el software Excel, se realizó una tabla donde los datos faltantes fueron marcados con color azul y se aplicó la ecuación 4 . En la siguiente imagen se ve el ejemplo de un relleno de dato mensual de temperatura mínima media mensual en la estación Venta de Cajibío.

| AÑO | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ENE | 204,0 | 47,0 | 70,0 | 58,0 | 99,0 | 131,0 |
| FEB | 88,0 | 214,0 | 96,0 | 74,0 | 313,0 | 253,9 |
| MAR | 276,0 | 70,0 | 127,0 | 142,0 | 175,0 | 248,0 |
| ABR | 128,0 | 121,0 | 153,0 | 42,0 | 73,0 | 187,0 |
| MAY | 133,0 | 70,0 | 141,0 | 51,0 | 77,0 | 30,0 |
| JUN | 104,0 | 36,0 | 30,0 | 80,0 | 107,0 | 79,0 |
| JUL | 26,0 | 24,0 | 67,7 | 138,6 | 30,0 | 113,0 |
| AGO | 36,0 | 35,0 | 35,8 | 29,0 | 32,0 | 46,2 |
| SEP | =(Piendamo!B10/($V$4^2)+Totoro!B10/($V$5^2) | | | | | |
| OCT | +'Gabriel Lopez'!B10/($V$6^2)+'Toribio | | | | | |
| NOV | Alertas'!B10/($V$7^2))/(1/($V$4^2)+1/($V$5^ | | | | | |
| DIC | 2)+1/($V$6^2)+1/($V$7^2)) | | | | | |
| TOTAL | 1426,6 | 981,0 | 1006,4 | 1002,6 | 1504,0 | 1869,1 |

*Figura 4: Fórmula aplicada de relleno de datos U.S National Weather Service. Fuente: elaboración propia*

### 5.2.2 Cálculo de la Evapotranspiración Potencial:

Al completar el proceso de llenado de datos faltantes, se procede a calcular la Evapotranspiración Potencial modificada de Hargreaves, presentada en la ecuación 2 y la Evapotranspiración Real estimada con la ecuación de Budyko, presentada en la ecuación 3 . Aunque la evapotranspiración potencial se calcula a escala diaria y la evapotranspiración real se calcula a escala anual, ambas se llevaron a escala diaria para luego ser llevadas a escala mensual y finalmente a escala anual.

La fórmula de la Evapotranspiración Potencial es la siguiente:

$$ETP = 0,00216(T_{prom} + 17,78)R_0(T_{max} - T_{min})^{0,47}$$

La radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente (mm) se encuentra en varias tablas, todas en función de la latitud y el mes. En el anexo 6 se encuentra la tabla que se usó para definir el $R_0$ en cada estación, ya que cada una tiene una latitud y longitud diferente. La aplicación de la fórmula se realizó en el software Excel. En la figura 6 se muestra el cálculo para la Evapotranspiración Potencial para el 2 de enero en el año 2017 para la estación Venta de Cajibío.

| Evapotranspiración Potencial | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2017 | | | | | | | | | | | | | |
| N° Registro | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | TOTAL |
| 1 | 2,79 | 3,49 | 3,58 | 4,05 | 2,98 | 3,38 | 3,43 | 4,09 | 4,45 | 3,63 | 3,49 | 2,73 | |
| 2 | =0,00216*('TP_Cajibio'!B4+17,78)*14,4*('TMXD_Cajibio'!B4 -'TMD_Cajibio'!B4)^0,47 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3,68 | 3,59 | 3,70 | 3,81 | 3,30 | 3,85 | 3,50 | 4,13 | 4,15 | 3,14 | 3,41 | 3,28 | |
| 4 | 3,80 | 3,94 | 3,87 | 4,11 | 3,36 | 3,17 | 3,39 | 4,22 | 4,57 | 2,87 | 3,33 | 3,17 | |
| 5 | 2,99 | 4,57 | 3,70 | 3,79 | 3,38 | 3,63 | 3,70 | 4,24 | 3,78 | 2,71 | 3,52 | 3,46 | |

*Figura 5: Cálculo de la Evapotranspiración Potencial. Fuente: elaboración propia*

### 5.2.3. Cálculo de la Evapotranspiración Real

La evapotranspiración se calculó mediante la ecuación 3. Cada variable se llevó a escala diaria, para posteriormente ser llevada a escala mensual y escala anual. La aplicación de esta fórmula se realizó en el software Excel. En la figura 7 se muestra el cálculo para la Evapotranspiración Real para el 2 de enero en el año 2017 para la estación Venta de Cajibío.

| Evapotranspiración Real | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2017 | | | | | | | | | | | | | |
| N° Registro | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | TOTAL |
| 1 | 2,95 | 3,03 | 3,39 | 3,65 | 2,78 | 2,75 | 0,24 | 1,55 | 2,35 | 3,01 | 3,20 | 2,53 | |
| 2 | =RAIZ((B5*'P_Cajibio'!B4*TANH('P_Cajibio'!B4/B5))*(1-COSH(B5/'P_Cajibio'!B4)+SENOH(B5/'P_Cajibio'!B4))) | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3,28 | 3,10 | 3,50 | 3,46 | 3,06 | 3,00 | 0,24 | 1,56 | 2,30 | 2,70 | 3,14 | 2,98 | |
| 4 | 3,36 | 3,34 | 3,65 | 3,70 | 3,11 | 2,62 | 0,24 | 1,56 | 2,37 | 2,51 | 3,07 | 2,89 | |
| 5 | 2,73 | 3,72 | 3,50 | 3,45 | 3,13 | 2,89 | 0,24 | 1,56 | 2,22 | 2,39 | 3,23 | 3,13 | |

*Figura 6: Cálculo de la Evapotranspiración Real. Fuente: elaboración propia*

### 5.2.4. Cálculo del Índice de Aridez

Teniendo calculada la evapotranspiración potencial anual y la evapotranspiración real anual, se calcula el índice de aridez aplicando la ecuación 1 que corresponde a la propuesta en el Estudio Nacional del Agua (ENA) 2022:

El índice de aridez está evaluado de forma cualitativa y clasifica las regiones en siete categorías: desde altamente deficitario hasta altos excedentes de agua. La tabla 5 se presentan las categorías de este índice:

| Categoría | Rango |
|---|---|
| Altamente deficitario de agua | > 0,60 |
| Deficitario de agua | 0,50 - 0,59 |
| Moderado a deficitario de agua | 0,40 - 0,49 |
| Moderado | 0,30 - 0,39 |
| Moderado a excedentes de agua | 0,20 - 0,29 |
| Excedentes de agua 0,15 - 0,19 | 0,15 - 0,19 |
| Altos excedentes de agua | < 0,15 |

*Tabla 7: Rango Índices de Aridez. Fuente: ENA 2022*

En la figura 7 se muestra el cálculo del índice de aridez para la estación Venta de Cajibío realizada en el software Excel:

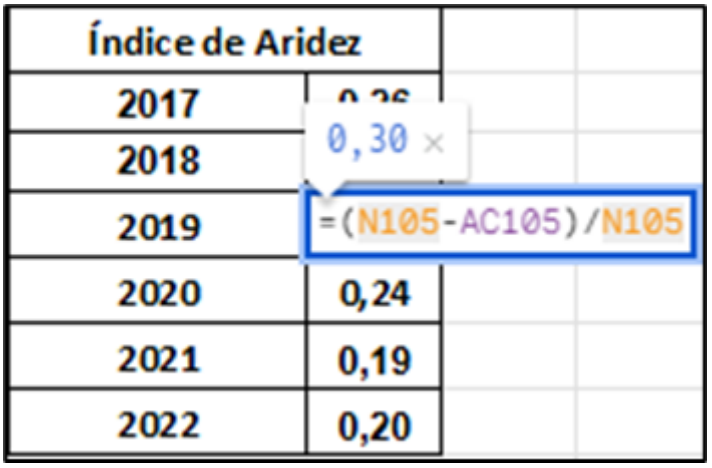



*Figura 7: Cálculo del Índice de Aridez estación Venta de Cajibío. Fuente: elaboración propia*

En este cálculo, la celda N105 representa la Evapotranspiración Potencial, y la celda AC105 representa la Evapotranspiración Real, este proceso se realizó en todas las estaciones.

### 5.3 Evaluación de indicadores del Estudio Nacional del Agua:

La relación entre las variables meteorológicas, los indicadores hidrometeorológicos y los indicadores hídricos fue evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson (ecuación 6) , este análisis permitió cuantificar la asociación lineal entre ellos. Los indicadores utilizados fueron los siguientes:

- Índice de Aridez (IA)
- Precipitación total anual
- Temperatura promedio anual
- Índice de Regulación Hídrica (IRH)
- Índice del Uso del Agua (IUA)
- Índice del Agua No Retornada a la Cuenca (IARC)
- Índice de Eficiencia en el Uso de Agua (IEUA)
- Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH)
- Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL)

El análisis se realizó para los años 2018 y 2022, ya que era la información disponible para los indicadores IRH, IUA, IARC, IEUA, IVH, e IACAL. Se generaron dos matrices de correlación y, adicionalmente, se calculó una matriz de cambios para identificar las variaciones en las relaciones entre los índices y las variables entre esos años. Para la organización, el procesamiento de datos y generación de la matriz se usó un código de Python donde se usaron cuatro librerías principales: *pandas* para manejar y analizar los datos estructurados en forma de tablas, *numpy* que maneja arreglos y realiza cálculos numéricos, y *seaborn* la cual está basada en

*matplotlib* para generar gráficas y en este caso se generó como un mapa de calor (*heatmap)* para facilitar la interpretación visual entre variables.

### 5.4 Análisis multitemporal:

#### 5.4.1 Test de Mann - Kendall:

Los datos utilizados corresponden a registros mensuales y datos anuales que fueron calculados a partir de los datos obtenidos desde el 2017 hasta el 2022. Para detectar la tendencia en las estaciones se implementó la prueba no paramétrica Mann-Kendall (ecuación 7) en las 11 estaciones de temperatura y en las 67 de precipitación. Se utilizó un código en Python donde se importaron librerías como *pymannkendall* para realizar la prueba, *numpy* para operaciones matemáticas y *pandas* para manejar y procesar las series temporales. El código generó el valor Z que es el estadístico de prueba, el valor P que es el valor asociado a la prueba, *trend* que muestra la dirección de la tendencia y el valor de la pendiente de Sen que determina la magnitud del cambio en la variable a lo largo del tiempo. Además, se generaron gráficas para visualizar las tendencias a lo largo del tiempo. En los anexos se adjuntó el código para su visualización.

Además, se realizó un análisis sobre el total de los datos para determinar cuántas tendencias hubo según el código. Se determinó la cantidad de datos posibles, la cantidad de tendencias respecto a esos datos, cuáles fueron crecientes, cuáles fueron decrecientes y los meses que más tuvieron tendencias.

#### 5.4.2 Interpolación de las variables

La interpolación se realizó para la temperatura promedio anual, temperatura mínima anual, temperatura máxima anual, temperatura promedio mensual, temperatura mínima mensual, temperatura máxima mensual, precipitación total mensual y precipitación total anual.

Debido a la alta cantidad de interpolaciones que se debían realizar, se recurrió a la herramienta Model Builder de ArcGIS para poder automatizar el proceso a partir de tablas de Excel. El método de interpolación elegido fue el de IDW debido a que se comporta mejor cuando hay un gran distanciamiento entre puntos y la intensidad de muestreo es poca (Villatoro et al., 2008). El flujo de trabajo fue el siguiente:

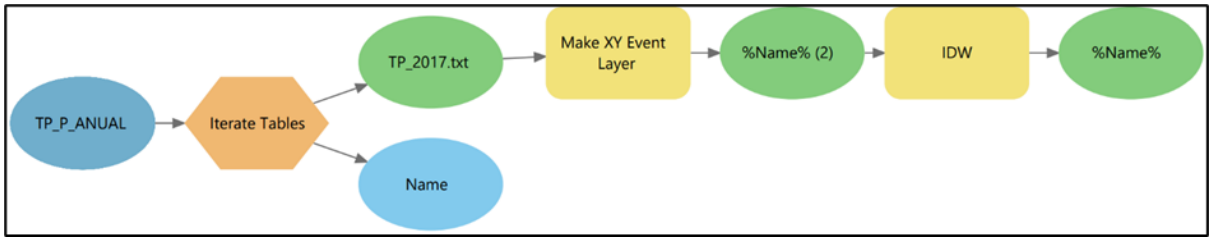


*Figura 8: Flujo de trabajo ModelBuilder. Fuente: elaboración propia*

1. Iterate tables: Esta herramienta itera a través de varias tablas. En cada iteración, toma una tabla de datos diferente y la procesa. En este caso, el archivo original es la tabla de excel que se presenta en la figura “x” y se exporta en formato txt para una mejor lectura de la herramienta.

| LON | LAT | CODIGO | ESTA_ | MUNIC_ | DEPTO | ELEV | TEMP_1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 321125,751 | 271227,079 | 26035030 | Aeropuerto Guillermo León Valencia | Popayán | Cauca | 1752 | 19,7 |
| 326361,125 | 285801,228 | 26025090 | Venta de Cajibio | Cajibío | Cauca | 1850 | 18,6 |
| 330320,54 | 295130,524 | 26025100 | Tunia | Piendamó | Cauca | 1822 | 19 |
| 342842,435 | 360752,386 | 26045010 | Ingenio Bengala | Puerto Tejada | Cauca | 983 | 24,3 |
| 327054,787 | 340052,183 | 26025110 | Lomitas | Santander de Quilichao | Cauca | 1009 | 24 |
| 364111,06 | 358829,661 | 26065020 | Miranda | Miranda | Cauca | 1133 | 23,8 |
| 380648,802 | 412352,673 | 26095080 | Tenerife | El Cerrito | Valle del Cauca | 2628 | 16,5 |
| 401423,878 | 445834,931 | 26105140 | Barragan | Tuluá | Valle del Cauca | 2902 | 11,3 |
| 385352,954 | 468612,629 | 26105150 | San Marcos | Bugalagrande | Valle del Cauca | 1011 | 22,6 |
| 370282,246 | 445349,09 | 26105230 | Mateguadua | Tuluá | Valle del Cauca | 1119 | 21,7 |
| 379653,349 | 478082,18 | 26105110 | Ingenio Riopaila | Zarzal | Valle del Cauca | 954 | 24,5 |

*Figura 9: Tabla iteradora de ModelBuilder: Fuente: elaboración propia*

2. Make XY Event Layer: Esta herramienta convierte la capa “TP_2017.txt” en una capa de eventos XY, quiere decir que crea puntos en el mapa usando las coordenadas X e Y que se encuentran en la tabla, las cuales están en coordenadas UTM. Los campos que utilizó esta herramienta para crear los puntos fueron “LON” y “LAT”. En la figura 11 se muestran los parámetros usados para ejecutar esta herramienta:

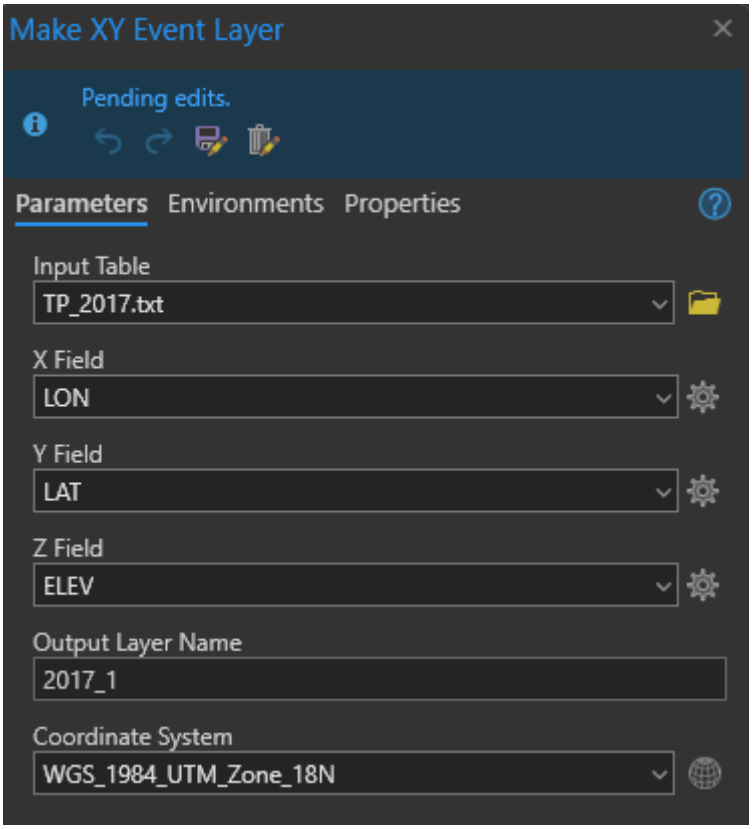



*Figura 10: Make XY Event Lyer ModelBuilder. Fuente: elaboración propia*

3. Interpolación IDW (Inverse Distance Weighted): Esta herramienta crea una superficie ráster que se basa en los puntos de la capa XY creada anteriormente. Este método de interpolación determina los valores de celda mediante una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra, que en este caso son las estaciones meteorológicas y sus datos de temperatura y precipitación. En la figura 12 se presentan los parámetros usados para la ejecución de esta herramienta:

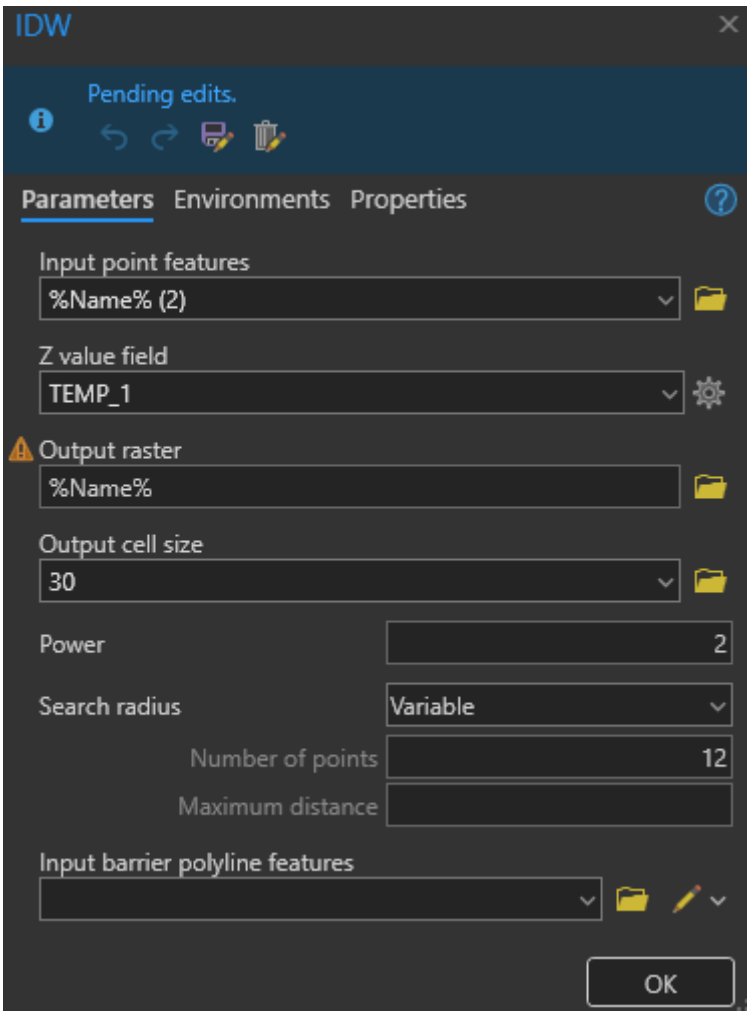



*Figura 11: Interpolación IDW ModelBuilder. Fuente: elaboración propia*

El tamaño de celda (output cell size) es de 30 metros debido a que, en la creación del ráster final de cada variable, se implementa un Modelo Digital de Elevación (DEM) cuya resolución es de 30 metros. El valor de la potencia (power) permite controlar la importancia de los puntos conocidos en los valores interpolados en función de su distancia al punto de salida. Entre más alto sea el número de potencia, se hace énfasis en los puntos más cercanos para que tengan mayor influencia. Por las pocas estaciones disponibles y además sin un patrón direccional, se dejó el valor por defecto que es 2, permitiendo que se reduzca la influencia de los puntos más alejados de manera progresiva pero sin que su influencia desaparezca y que la interpolación mantenga la suavidad y la fidelidad a los datos.

Por la misma razón, el radio de búsqueda fue variable para que no hubiera un tamaño fijo de área para encontrar estaciones vecinas sino que se ajustara de manera dinámica. Así, sin importar que tan lejos estén las estaciones, garantiza consistencia en la cantidad de datos usados.

Este proceso se repite para cada una de las variables, a excepción del IA, IRH, IUA, IARC, IEUA, IVH e IACAL, ya que son variables que al ser medidas de manera anual y el periodo de estudio es corto, no requerían una automatización para la interpolación. En la figura 13 se muestra a manera de ejemplo el resultado de una interpolación de temperatura mínima media mensual de enero del año 2022.

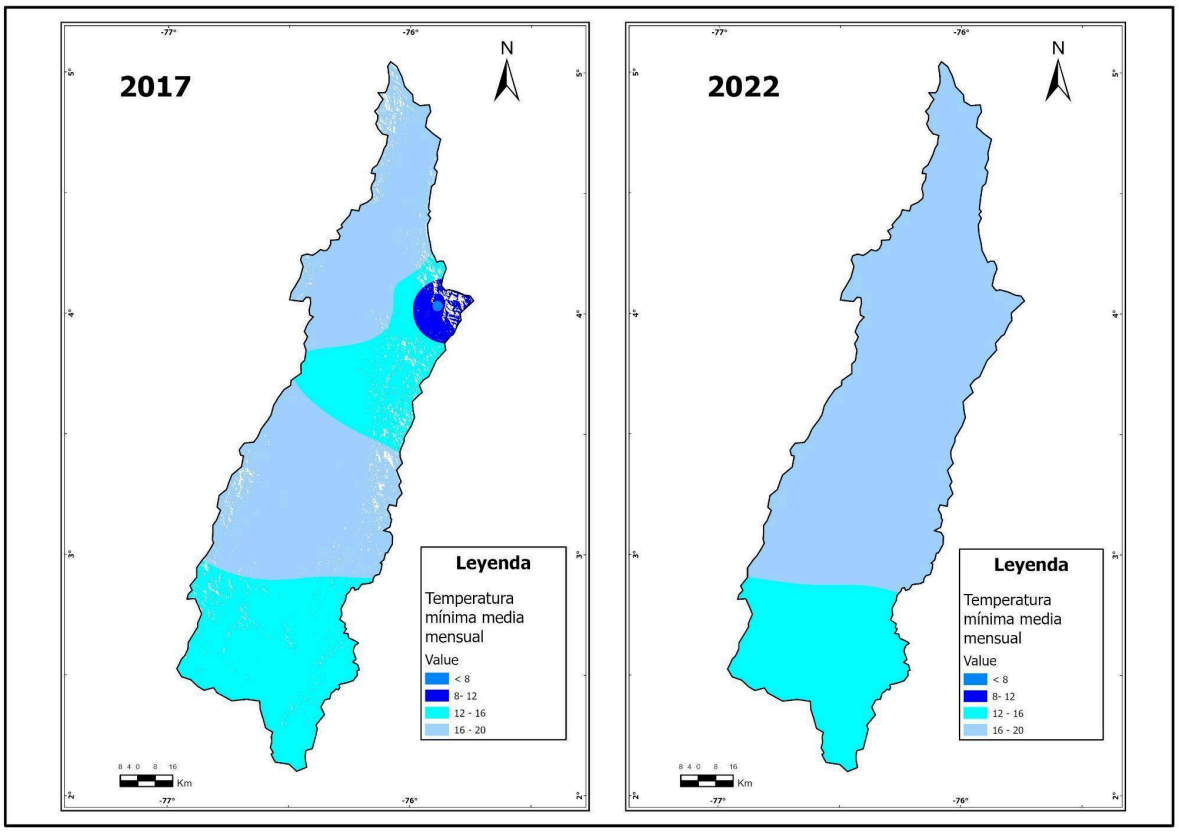



*Figura 12: Resultado de ModelBuilder. Fuente: elaboración propia*

### 5.4.3 Ajuste altitudinal:

El ráster generado por la interpolación IDW es la capa de entrada para el ráster final que se debe realizar.. La interpolación IDW refleja la distribución espacial de cada variable basada en los datos de las estaciones meteorológicas, pero no está siendo considerado el efecto de la altitud. Siguiendo un instructivo para la generación de mapas de temperatura por parte del IDEAM, primero se debe realizar el cálculo de la variable de incremento de gradiente altitudinal, para ello, se toma la elevación y la temperatura del mes a trabajar y se genera el gráfico de dispersión donde se debe ver la función de correlación que existe entre las dos variables y el factor de escala de “X” será la constante de incremento del gradiente. La figura 14 muestra el ejemplo del gráfico de dispersión de la temperatura promedio de enero del año 2017, donde su factor de escala es -0.0057.

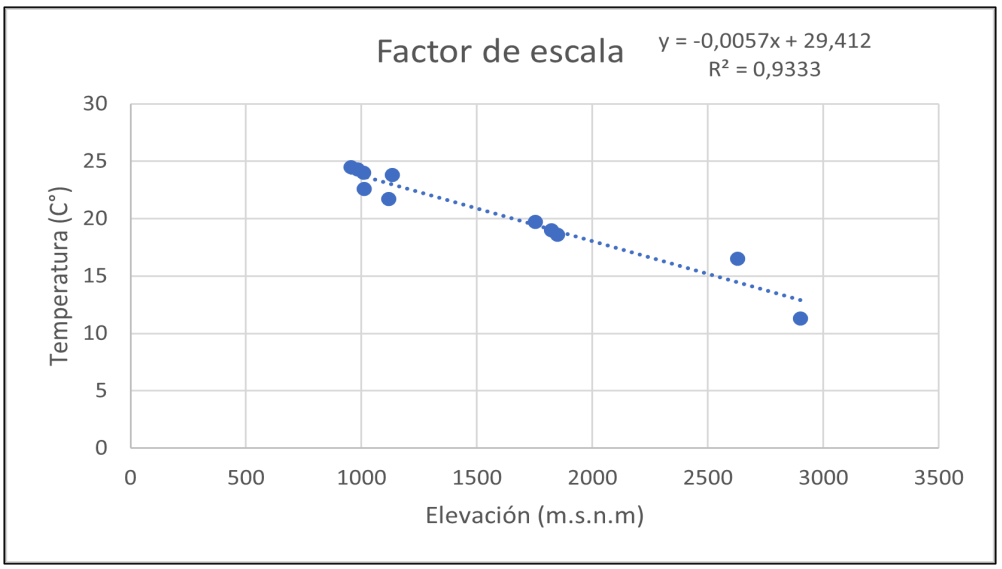



*Figura 13: Factor de escala. Fuente: elaboración propia*

Por la relación que hay entre la temperatura con el gradiente altitudinal, la relación de estas variables se rige por la siguiente función que lleva la temperatura a una altitud determinada, es decir, se va a ajustar la temperatura a la altitud del DEM. La función es la siguiente:

$$T(Det) = T(Prom) + (R(Z(Det) - Z(Est)) \quad (9)$$

*Fuente: IDEAM*

Donde:

$T(Prom)$ representa la temperatura del mes a estudiar.

$R$ es el factor de escala gradial.

$Z(Det)$ la altura a la cual se desea llevar los datos de temperatura.

$Z(Est)$ corresponde a la elevación de la estación, pero en este caso el valor será de 0 ya que ajustará el dato de temperatura a la altura del DEM.

El procedimiento se llevó a cabo en ArcGIS Pro en la Calculadora Ráster para el primer mapa, posteriormente se ejecutó un código en Python que automatizó el proceso debido al alto flujo de trabajo. Este proceso se llevó a cabo solamente para las diferentes temperaturas. En la figura 15 se muestra el proceso en la Calculadora Ráster:

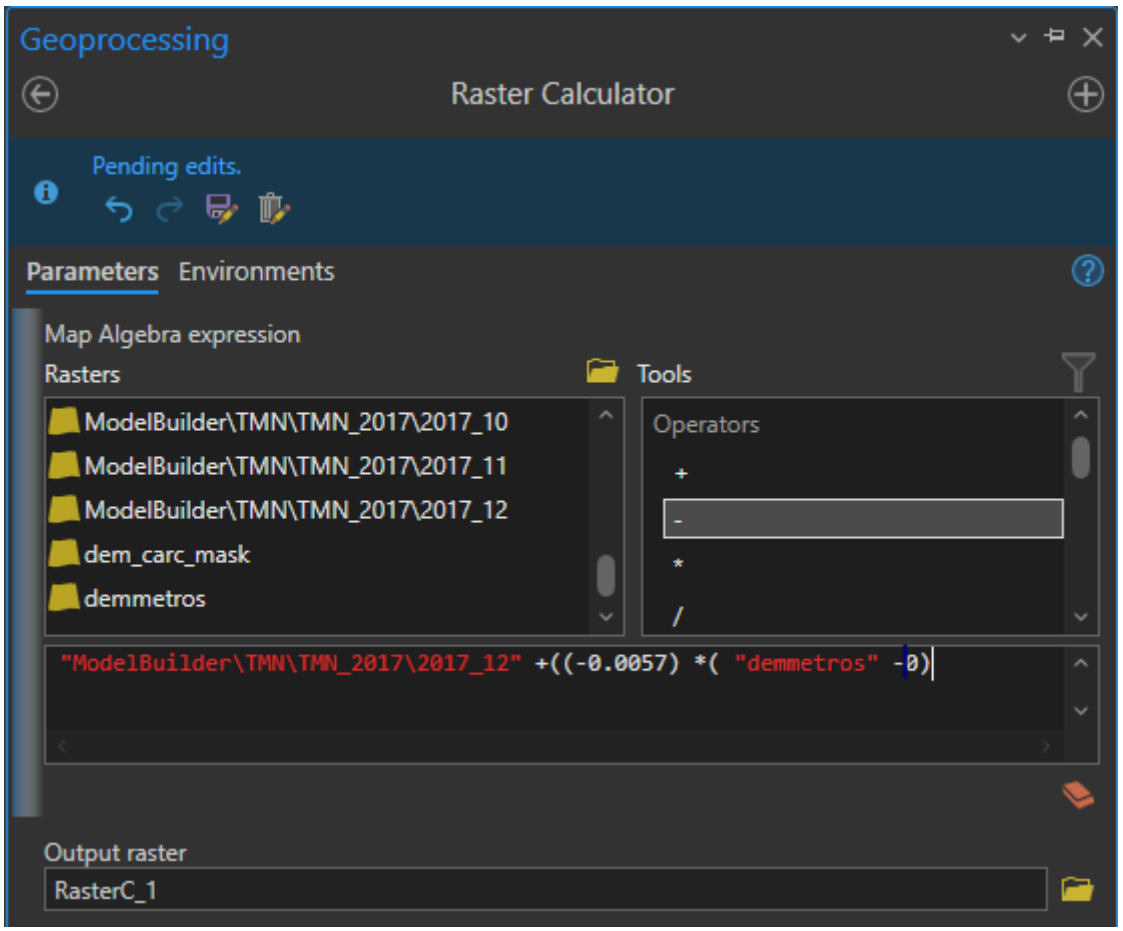



*Figura 14: Raster Calculator. Fuente: elaboración propia*

Donde:

“ModelBuilder\TMN\TMN_2017\2017_12” es el ráster que se generó por la interpolación IDW.

“-0.0057” es el factor de escala y “demmetros” es el modelo digital de elevación con resolución de 30 metros

El código lee una tabla de Excel (figura 15) que contiene el parámetro de la constante de incremento del gradiente, el año, el mes, y la variable. Posteriormente itera sobre cada fila para generar un ráster ajustado, crea las carpetas de salida, y usa la calculadora ráster para ajustar la temperatura con base en el DEM y guarda los resultados. En el anexo 3 se encuentra todo el código.

| | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **Año** | **Mes** | **Variable** | **Factor** |
| 2 | 2017 | 1 | TMN | -0,0042 |
| 3 | 2017 | 2 | TMN | -0,0041 |
| 4 | 2017 | 3 | TMN | -0,004 |
| 5 | 2017 | 4 | TMN | -0,0042 |
| 6 | 2017 | 5 | TMN | -0,0043 |
| 7 | 2017 | 6 | TMN | -0,0039 |
| 8 | 2017 | 7 | TMN | -0,0045 |
| 9 | 2017 | 8 | TMN | -0,0044 |
| 10 | 2017 | 9 | TMN | -0,0048 |
| 11 | 2017 | 10 | TMN | -0,0047 |
| 12 | 2017 | 11 | TMN | -0,0049 |
| 13 | 2017 | 12 | TMN | -0,0048 |

*Figura 15: Tabla iteradora del código de ajuste altitudinal. Fuente: elaboración propia*

Se implementó el paquete *ArcPy*, que se usa para realizar análisis de datos geográficos, conversión de datos, administración de datos y automatización de mapas con Python. Este paquete es el sucesor del módulo *arcgisscripting,* que fue una biblioteca de Python utilizada en versiones antiguas de ArcGIS. También se utilizó la librería *pandas* que es especializada en el manejo y análisis de estructuras de datos. Por último, se utilizó *os*, una biblioteca integrada de Python que proporciona una forma portátil de utilizar funciones dependientes del sistema operativo.

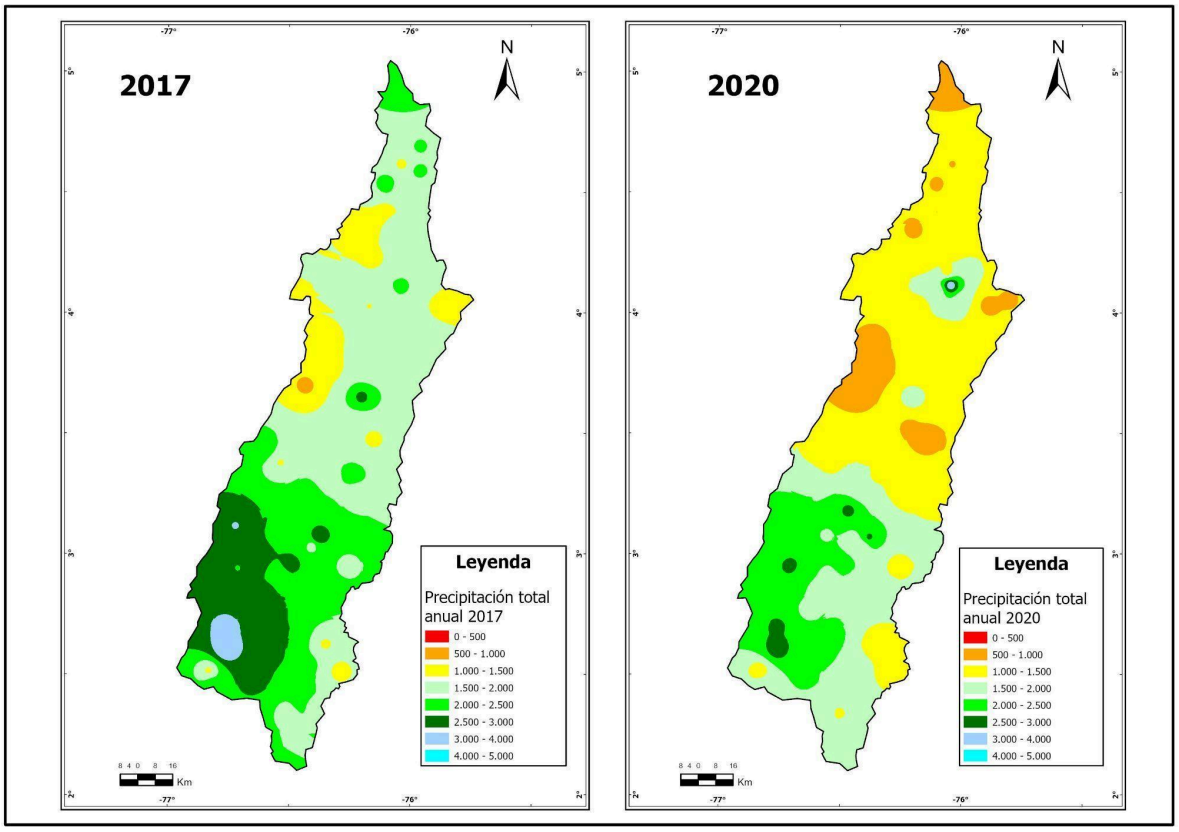



*Figura 16: Resultados del código. Fuente: elaboración propia*

### 5.4.4. Interpolación indicadores Estudio Nacional del Agua

**5.4.4.1 Generación de puntos:** Debido a que los datos de los indicadores del Estudio Nacional del Agua no están a partir de estaciones meteorológicas sino por los ríos de la zona hidrográfica Cauca, se utilizó un shapefile de ríos para la interpolación de estos indicadores. A partir del shapefile de ríos, se utilizó la herramienta de geoprocesamiento *Feature Vertices to Points* para generar una clase de entidad que contiene puntos generados a partir de vértices, se generó un tipo de punto *midpoint* para que en cada línea de cada rió, se genere un punto en la mitad.

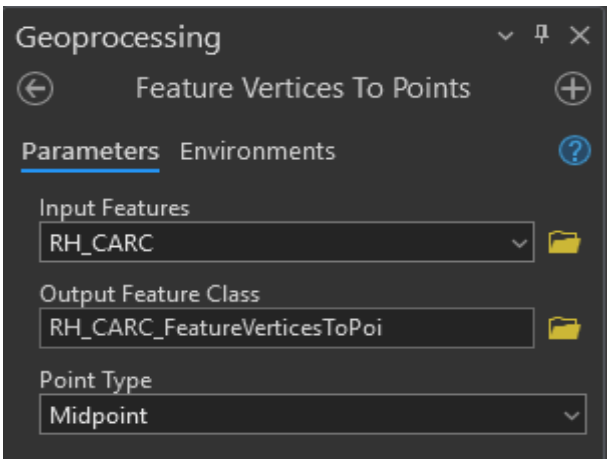



*Figura 17: Feature Vertices To Points. Fuente: elaboración propia*

Posteriormente, se generó la interpolación del Índice de Aridez (IA), Índice de Regulación Hídrica (IRH), Índice del Uso del Agua (IUA), Índice del Agua no Retornada a la Cuenca (IARC), Índice de Eficiencia en el Uso del Agua (IEUA), Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH), Índice de Alteración potencial de la Calidad del Agua (IACAL) mediante el método IDW para el año 2018 y 2022. Después, se aplicó la simbología de acuerdo a los estándares del IDEAM. Los resultados serán mostrados en el geovisor resultante.

### 5.5. Creación del Geovisor

Para la visualización de los mapas de cada variable, se utiliza la herramienta Instant Apps de ArcGIS Online. Esta herramienta es para crear una aplicación interactiva que permite visualizar los mapas generados previamente de temperatura mínima mensual, temperatura máxima mensual, temperatura promedio mensual, precipitación total mensual, temperatura mínima anual, temperatura máxima anual, temperatura promedio anual, y precipitación total anual.

Lo primero que se debe hacer es subir las capas a ArcGIS Online. En ArcGIS Pro, está la opción de subir la capa a la web mediante la opción “Share As Web Layer” donde se configura el tipo de capa, se le asigna un resumen, etiquetas, a quién se le dará acceso a la capa, el esquema de mosaico y el nivel de detalle a la que la capa será mostrada.

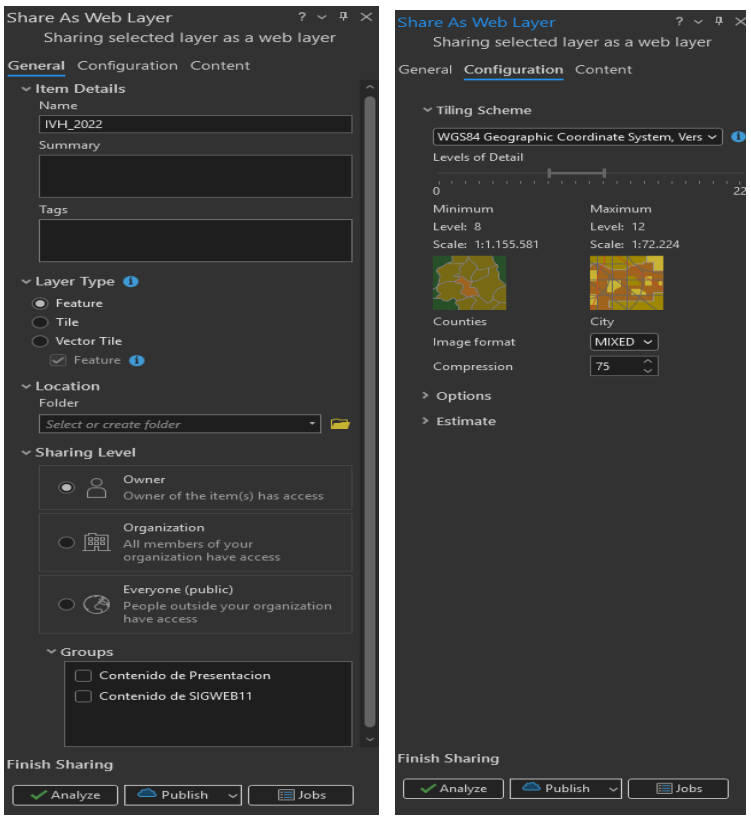



*Figura 18: Compartir capa a la web en ArcGIS Online. Fuente: elaboración propia*

Se subieron todas las capas necesarias a la web de ArcGIS Online, posteriormente se debe abrir el Map Viewer que es el visor de mapas de ArcGIS Online, esto con el fin de verificar que las capas quedaron subidas correctamente junto a todas las propiedades de la misma como la simbología y sus atributos. Primero se subió una capa y dentro del Map Viewer se subieron todas las demás dentro del mismo MapViewer, con el fin de tener el boceto listo para posteriormente crear la aplicación.

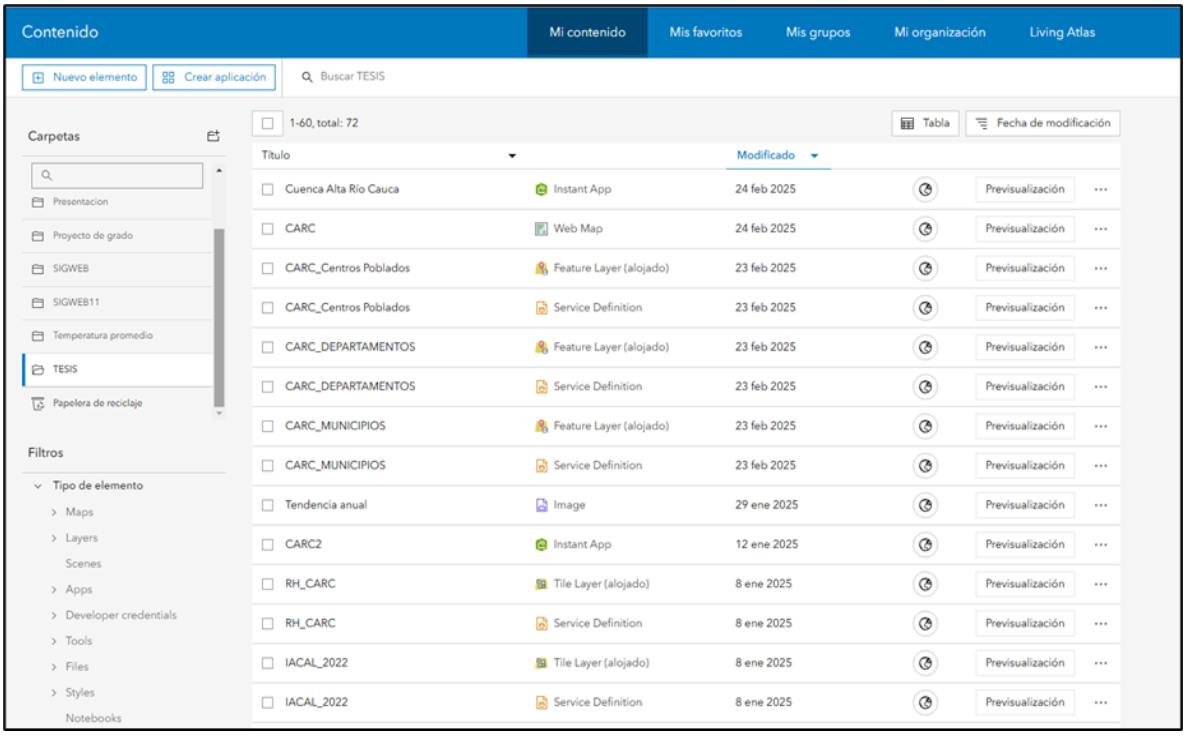



*Figura 19: Lista de capas ArcGIS Online. Fuente: elaboración propia*

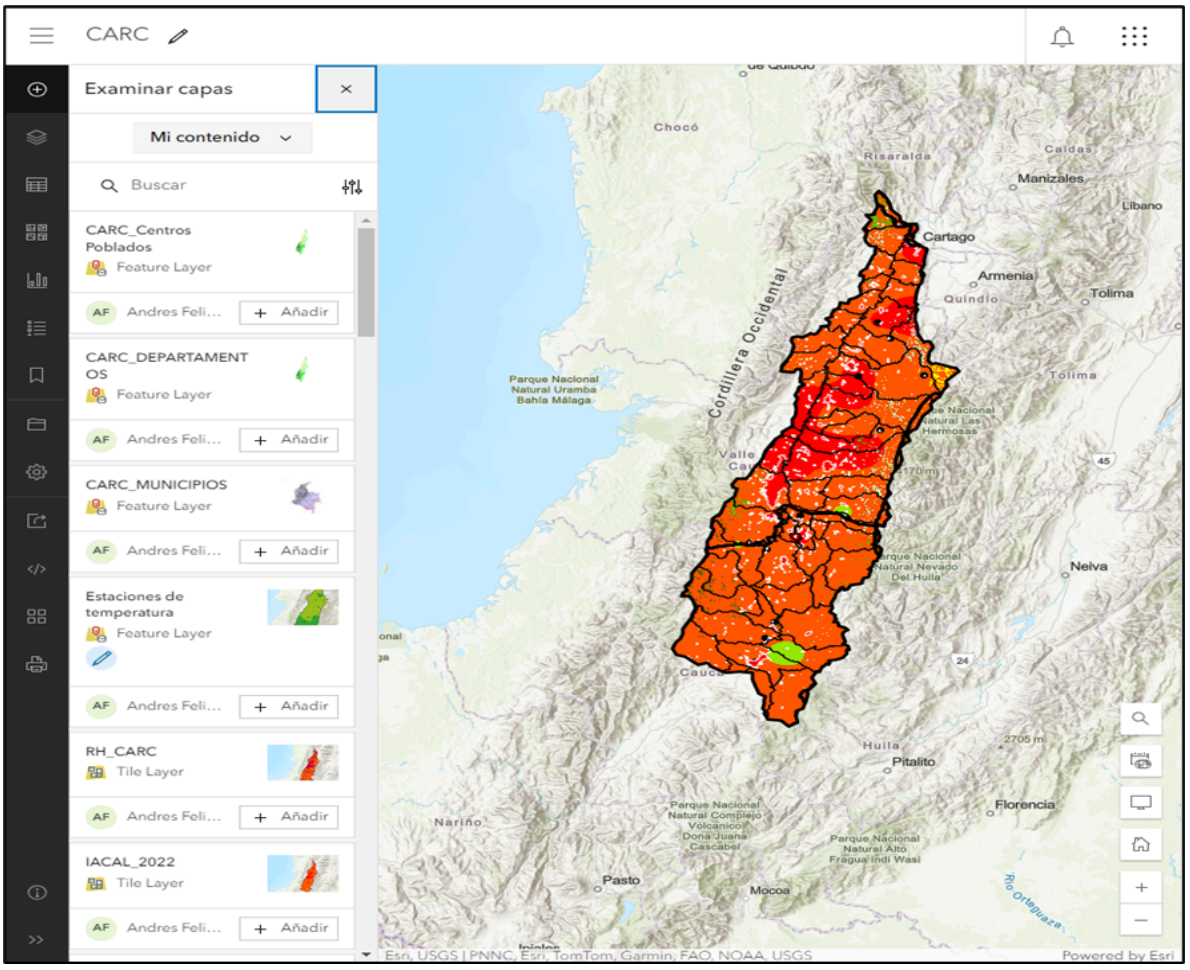



*Figura 20: Adición de capas MapViewer. Fuente: elaboración propia*

Una vez las capas están añadidas en el MapViewer, se procede a crear la aplicación. La opción está en el panel izquierdo del MapViewer ( ) y habilita diferentes opciones de aplicaciones dependiendo del objetivo de la misma. En este caso, se creó una aplicación instantánea llamada Instant Apps, la cuál sirve para compartir mapas y datos y el público pueda interactuar fácilmente con ellos.

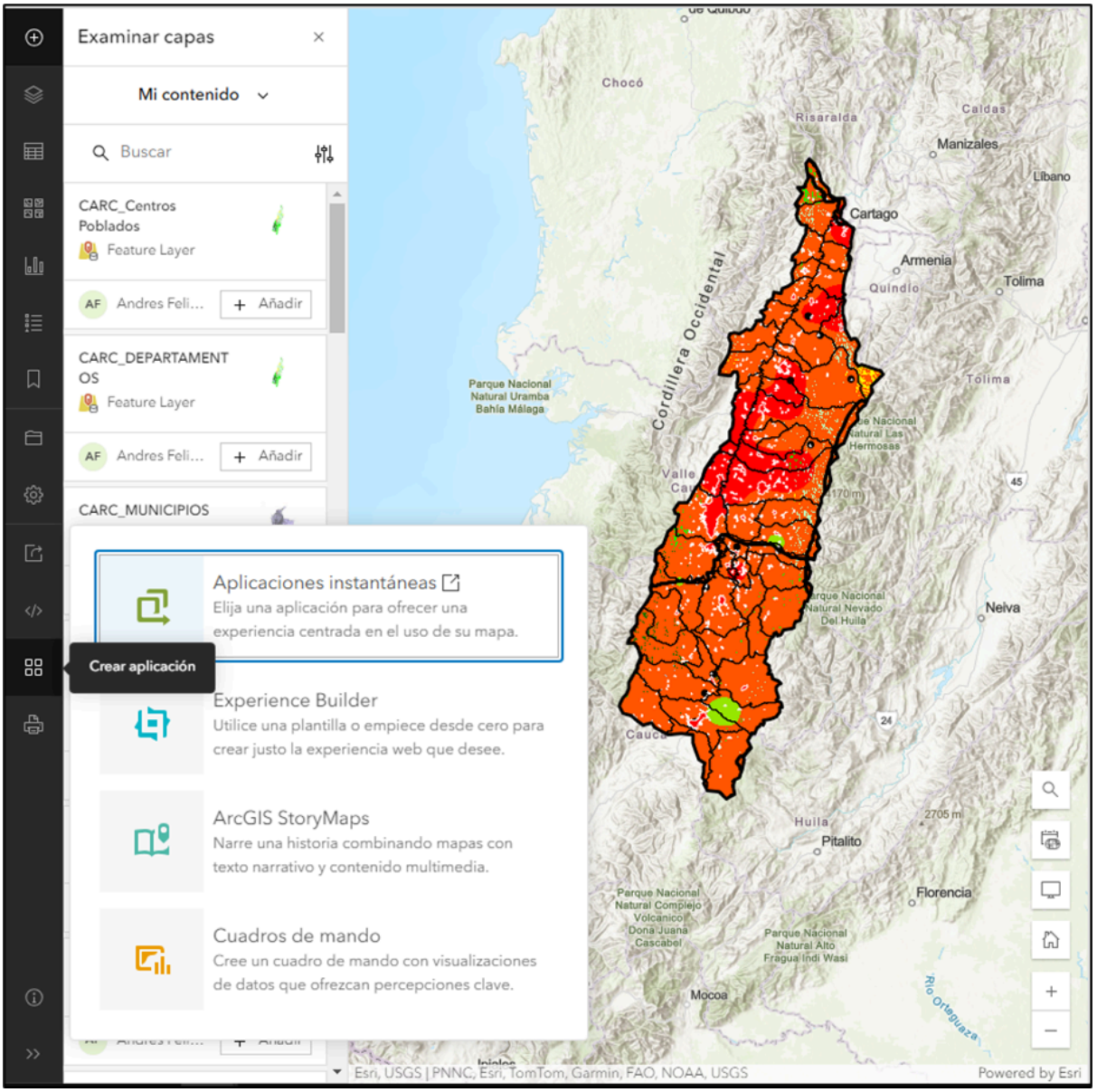



*Figura 21: Creación de aplicación. Fuente: elaboración propia*

Una vez creada la aplicación, se procede a configurar la aplicación. La configuración consiste en toda la personalización de la aplicación, su plantilla, su interactividad, las herramientas que se van a habilitar acorde al objetivo de la aplicación, el diseño y el orden de las capas.

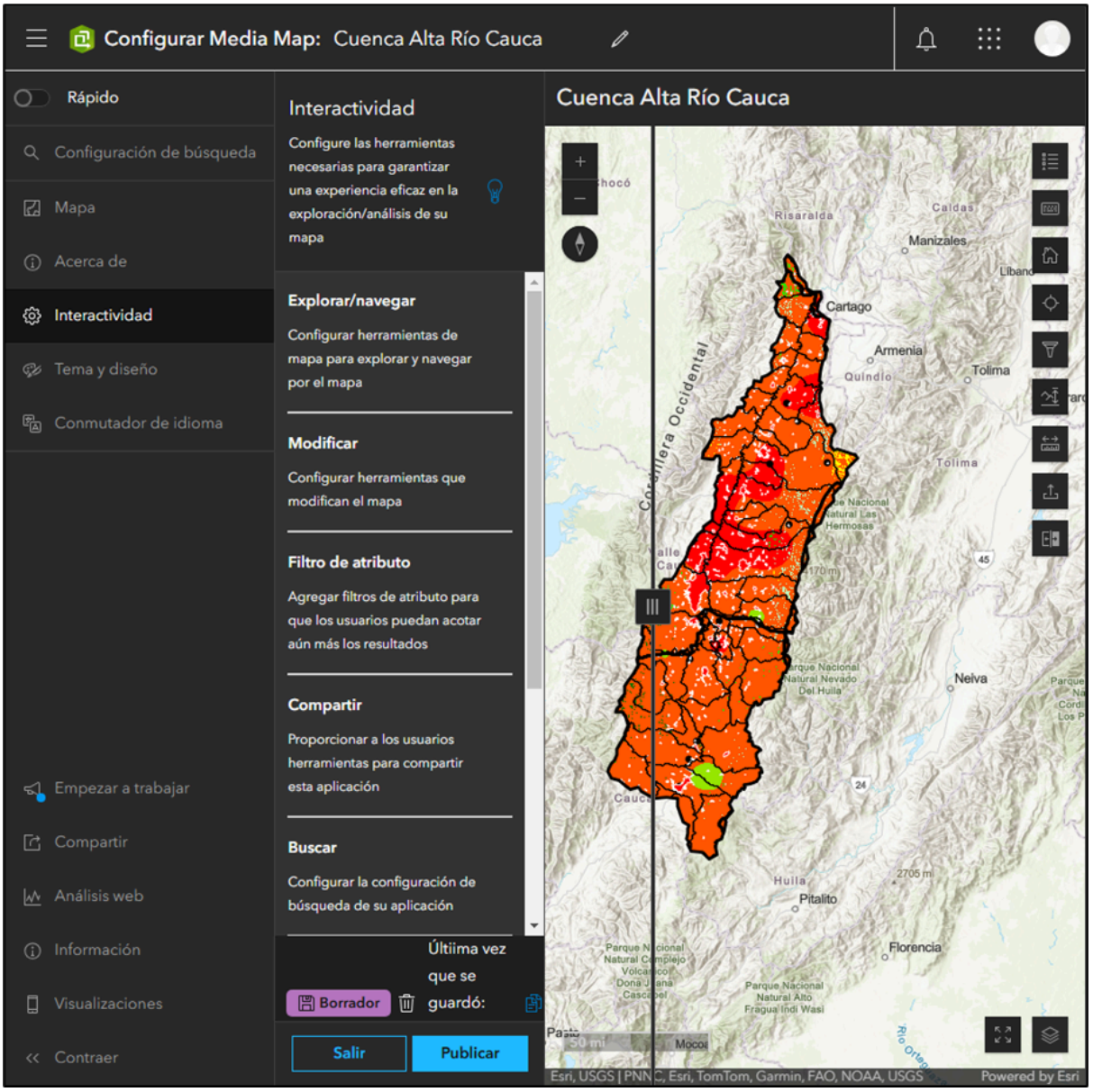



*Figura 22: Configuración. Fuente: elaboración propia*

## 6. Resultados y Análisis

### 6.1 Datos y variables

De acuerdo a la búsqueda bibliográfica realizada en entidades oficiales y artículos relacionados con el tema estudiado en este proyecto, las variables e indicadores meteorológicos relacionados a la variabilidad climática y el recurso hídrico son las siguientes:

| Categoría | Indicadores/Variables | Escala | Fuente |
|---|---|---|---|
| **Indicadores Hídricos e Hidrometeorológicos** | Índice de Aridez (IA) | Zona hidrográfica | elaboración propia |
| | Índice de Regulación y Retención Hídrica (IRH) | Subzona hidrográfica | ENA 2022 |
| | Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH) | Subzona hidrográfica | ENA 2022 |
| | Índice del Uso del Agua (IUA) | Subzona hidrográfica | ENA 2022 |
| | Índice del Agua no Retornada a la Cuenca (IARC) | Subzona hidrográfica | ENA 2022 |
| | Índice de Eficiencia en el Uso del Agua (IEUA) | Subzona hidrográfica | ENA 2022 |
| | Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL) | Subzona hidrográfica | ENA 2022 |
| **Variables meteorológicas** | Temperatura máxima diaria | Zona hidrográfica | IDEAM |
| | Temperatura mínima diaria | Zona hidrográfica | IDEAM |
| | Temperatura mínima media mensual | Zona hidrográfica | IDEAM |
| | Temperatura máxima media mensual | Zona hidrográfica | IDEAM |
| | Precipitación total mensual | Zona hidrográfica | IDEAM |

*Tabla 6: Indicadores hídricos y variables meteorológicas. Fuente: elaboración propia*

Para las variables meteorológicas, esta es la distribución de las estaciones meteorológicas usadas para las variables de temperatura y precipitación:

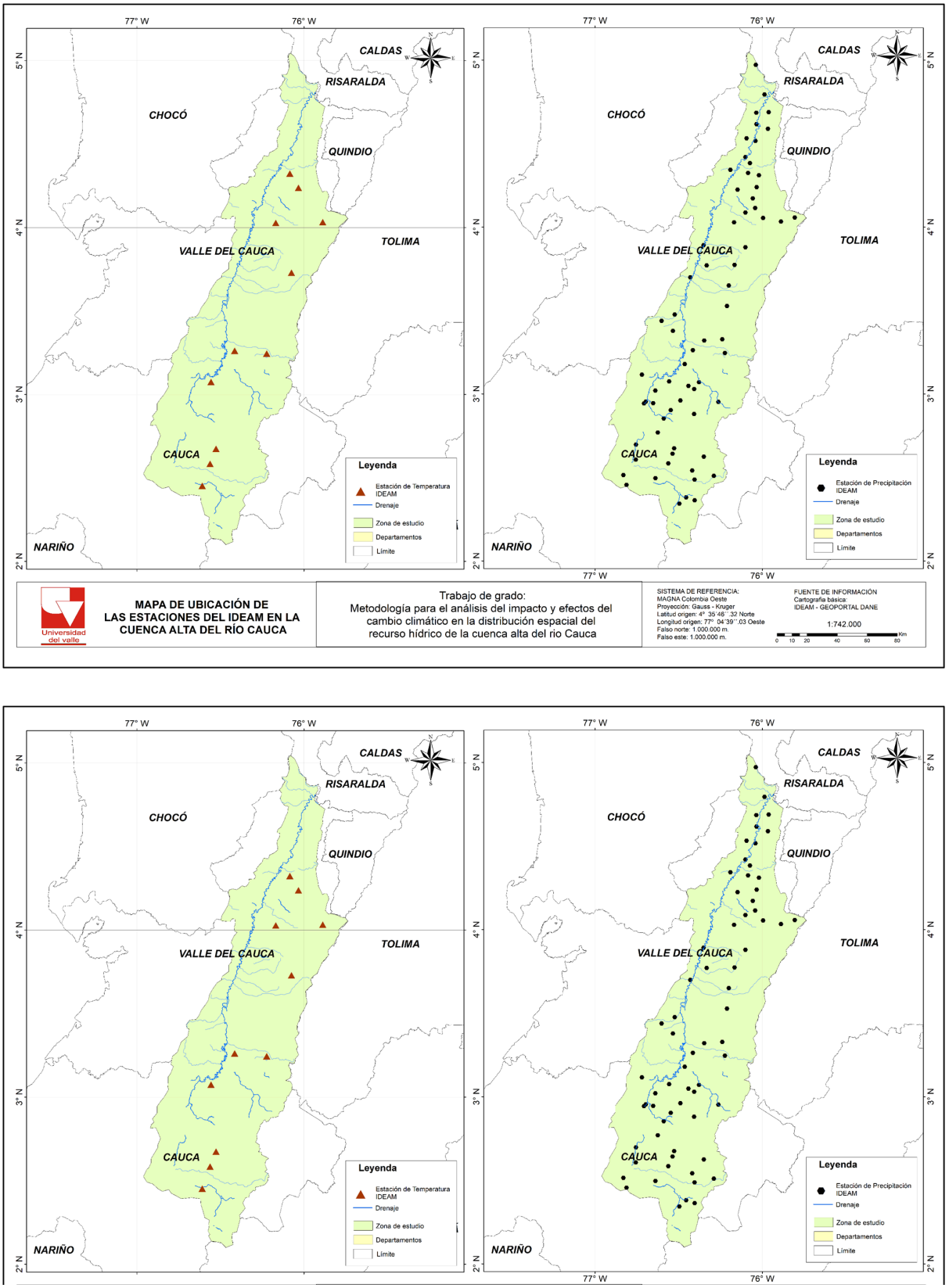



*Figura 23: Estaciones de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha). Fuente: elaboración propia*

En el anexo 1 está la lista de las estaciones meteorológicas para la temperatura y en el anexo 2 la lista de las estaciones meteorológicas usadas para la precipitación.

Los datos de los índices se encontraron en los anexos de cada ENA, la diferencia es que estos datos vienen divididos en áreas hidrográficas, zonas hidrográficas y subzonas hidrográficas. La Cuenca Alta del Río Cauca se encuentra en el área hidrográfica Magdalena - Cauca y en la Zona Hidrográfica Cauca, esta zona cuenta con 36 subzonas hidrográficas y por tanto, 36 datos de índices, sin embargo, se utilizaron 29 subzonas hidrográficas que coincidían con el shape de ríos dentro de la zona de estudio obtenida de Colombia en Mapas. Las subzonas hidrográficas utilizadas fueron las siguientes:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Río Bugalagrande | Río Cauca | Río Frío | Río Guachal | Río La Vieja | Río Ovejas | Río Paila | Río Palo |
| Río Timba | Río Yotoco | Río Claro | Quebrada Las Cañas | Río Amaime | Río Cali | Río Palacé | Río Tapias |
| Río Yumbo | Río Cerrito | Río Pescador | Río Chanco | Río Desbaratado | Río Vijes | Río Jamundí | Río Morales |
| Río Guadalajara | Río Guabas | Río Cañaveral | Río Catarina | Río Claro | | | |

*Tabla 7: Subzonas hidrográficas. Fuente: propia*

En cuánto a las variables extraídas del IDEAM, hubo gran cantidad de datos vacíos y fechas faltantes los cuales se rellenaron al 100%. Esta información faltante es normal que se presente debido a fallas de la estación, errores de operador o riesgos operacionales. Por cada variable, se realizó el conteo de datos faltantes donde la variable con mayor porcentaje de datos faltantes fue la temperatura máxima diaria (17.55%), seguido de la temperatura mínima media mensual. Por otro lado, la variable con datos más completos fue la precipitación total mensual, con un 4,65% de los datos faltantes.

| Variable | NE | PE | NA | TD | TDA | DA (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T. mínima diaria | 11 | 2017 - 2022 | 6 | 24101 | 3645 | 15,12 |
| T. máxima diaria | 11 | 2017 - 2022 | 6 | 24101 | 4230 | 17,55 |
| T. mínima media mensual | 11 | 2017 - 2022 | 6 | 792 | 133 | 16,79 |
| T. máxima media mensual | 11 | 2017 - 2022 | 6 | 792 | 107 | 13,51 |
| Precipitación total mensual | 66 | 2017 - 2022 | 6 | 4752 | 221 | 4,65 |

NE= número de estaciones; PE = periodo de estudio; NA = número de años; TD = total de datos de cada variable; TDA = total de datos ausentes; DA = datos ausentes

*Tabla 8: Variables de estaciones hidroclimatológicas. Fuente: elaboración propia*

### 6.2 Matriz de correlación de Pearson

Se generaron 3 matrices de correlación de Pearson. Una matriz para el año 2018, otra para el año 2022 y una matriz de cambios entre ambas matrices. La realización de estas matrices está dirigida a identificar las relaciones entre las variables meteorológicas y los indicadores hidrometeorológicos para evaluar su grado de asociación y como ha variado en el tiempo. Este ejercicio proporciona un fundamento estadístico para entender las dinámicas entre estas variables y ofrecer información para interpretar los efectos de estas relaciones y variables en el recurso hídrico de la cuenca alta del río Cauca.

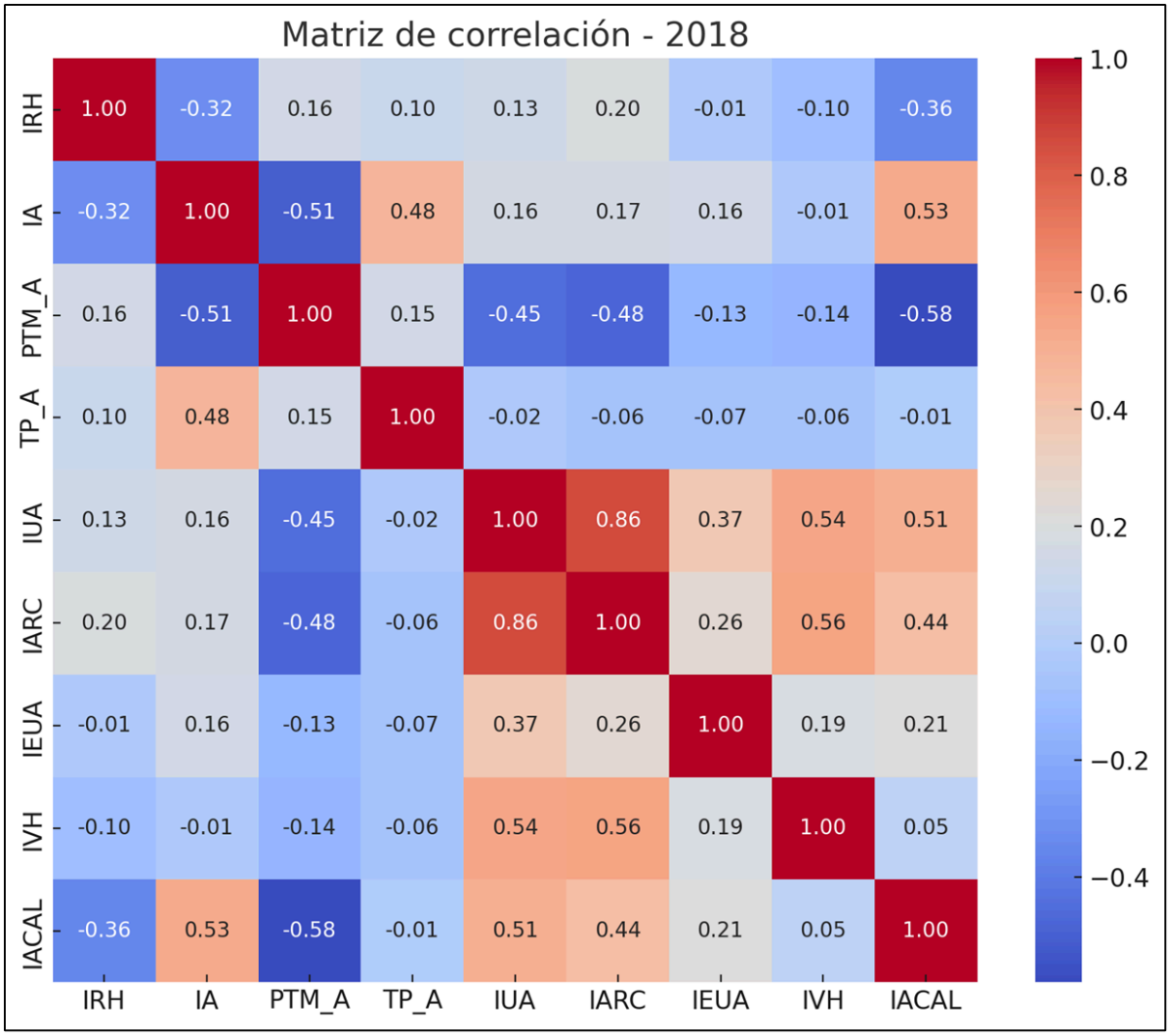



*Figura 24: Matriz de Correlación de Pearson 2018. Fuente: elaboración propia*

La relación positiva más significativa (+0.86) se presenta entre el Índice del Uso del Agua (IUA) y el Índice de Agua no Retornada a la Cuenca, esto indica que un mayor uso del recurso se asocia a un menor retorno de agua a los sistemas hídricos. Si se presenta un IUA alto, la disponibilidad de agua superficial para suplir los requerimientos hídricos para el funcionamiento de la sociedad está agotada, por tanto, no habrá suficiente disponibilidad hídrica.

Por otro lado, el Índice del Uso del Agua (IUA) presenta una relación positiva moderada (+0.54) con el Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH), esto quiere decir que un mayor uso del agua está relacionado con una mayor vulnerabilidad hídrica. Esto tiene sentido ya que el IVH relaciona el IUA con el IRH, de tal manera que representa la fragilidad que tienen los sistemas hídricos superficiales de mantener la oferta de agua dadas sus condiciones de uso y regulación. De esta manera, se identifica la vulnerabilidad en el abastecimiento de agua. A la vez, el IVH tiene una relación directa moderada con el IARC (+0.56). Esto podría suceder debido a que el IARC refleja la capacidad que tienen las subzonas hidrográficas para sostener los

consumos de agua generados por las actividades económicas, al no tener disponibilidad de agua, la vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento aumenta.

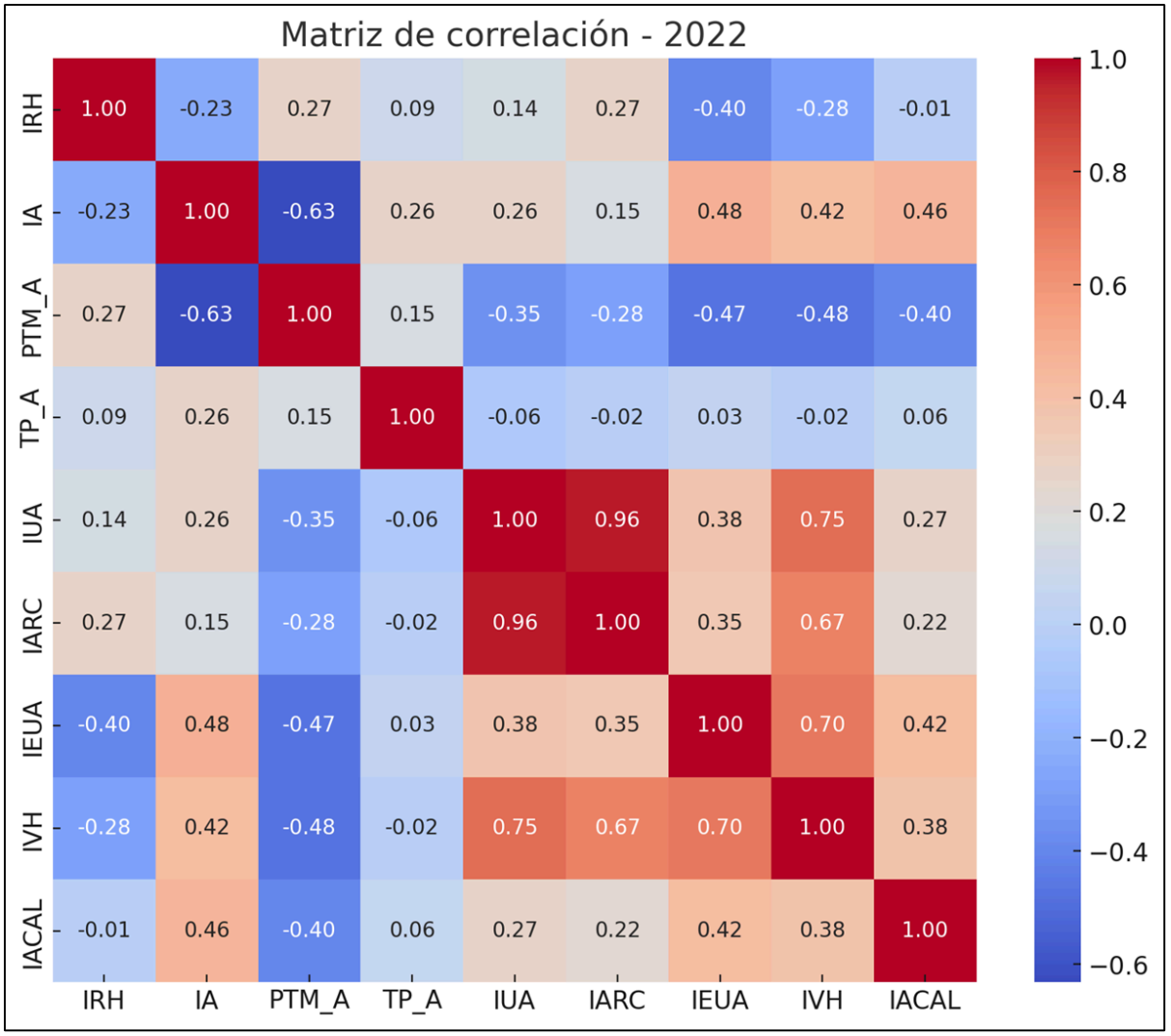



*Figura 25: Matriz de Correlación de Pearson 2022. Fuente: elaboración propia*

La relación positiva más significativa (+0.96) se presenta de nuevo entre el Índice del Uso del Agua (IUA) y el Índice de Agua no Retornada a la Cuenca (IARC) , esto reafirma que un mayor uso del recurso se asocia a un menor retorno de agua a los sistemas hídricos. Si se presenta un IUA alto, la disponibilidad de agua superficial para suplir los requerimientos hídricos para el funcionamiento de la sociedad está agotada, por tanto, no habrá suficiente disponibilidad hídrica.

La relación entre el IEUA y el IVH es de (+0.70) demuestra que es importante que al tener un mayor IEUA, hay menos agua que retorna a la cuenca, lo que traduce que se puede volver una zona más propensa al desabastecimiento, pero no es una

razón con mucho peso. De hecho, el IVH se relaciona con el Índice del Uso del Agua (más no con su uso eficiente) y con el IRH.
La relación entre la precipitación total anual (PTM_A) y en el Índice de Aridez (IA) es la esperada, debido a que entre mayor precipitación hay, mayor disponibilidad de agua en la zona y menos zonas áridas habrán, de tal manera que es lógico que tengan una relación negativa moderada (-0.63).

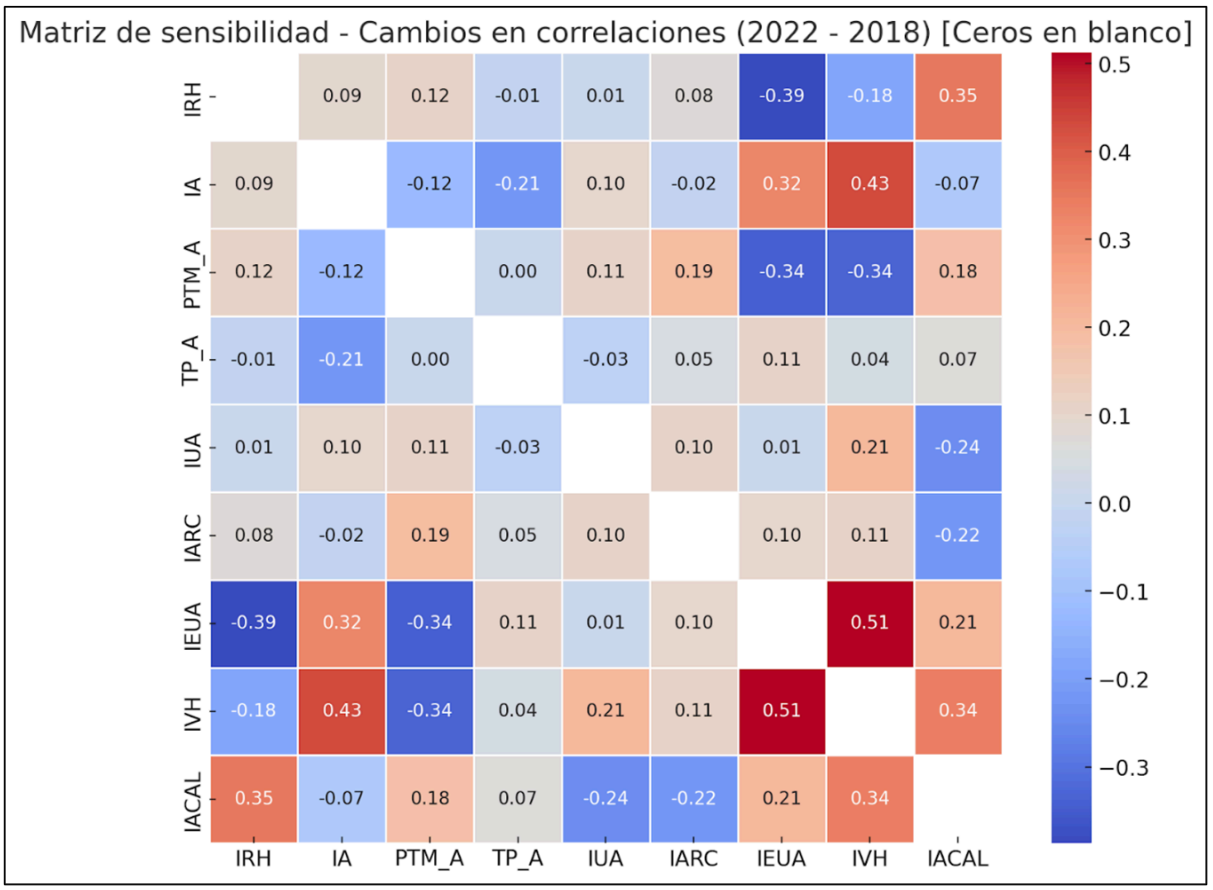



*Figura 26: Matriz de cambios entre 2018-2022. Fuente: elaboración propia*

La matriz de cambios demuestra el gran aumento que hubo entre el IEUA y el IVH (+0.51), reflejando que un importante uso eficiente del agua podría repercutir en una mayor vulnerabilidad de la zona al desabastecimiento debido a la escasez de agua que habría en la zona debido al no retorno. Por otro lado, el IA y el IVH también aumentaron su relación significativamente (+0.43), esto es lógico ya que entre más árida sea una zona, mayor desabastecimiento habrá. El IEUA y el IRH tuvieron una fuerte disminución en su relación (-0.39), indicando que hay más factores que inciden en su relación y que, por consiguiente, no pueden ser tenidos en cuenta solamente midiendo el valor total de su indicador.

### 6.3 Prueba de Mann-Kendall

Para la variable de precipitación, se consultaron 67 estaciones de las cuáles únicamente en 16 se observaron tendencias, es decir, el 24% del total de estaciones. Todas las estaciones presentaron tendencia en un solo mes a excepción de la estación Villa Rica que presentó 3 tendencias y Mondomo que presentó 2 tendencias. Un total de 19 tendencias se presentaron, representando un 2% del total de resultados teniendo en cuenta que, al haber 67 estaciones, hay un posible total de 871 resultados.

La tendencias decrecientes se presentaron en las siguientes estaciones:

| Estación | Buenos Aires | Polindara | Catalina La |
|---|---|---|---|
| Mes | Junio | Diciembre | Mayo |
| P- valor | 0.024 | 0.024 | 0.024 |
| Estadístico Z | -2.25 | -2-25 | -2.25 |
| Pendiente de Sen | -32.0 | -41.8 | -31.5 |

*Tabla 9: Tendencias decrecientes de precipitación. Fuente: elaboración propia*

Las 3 estaciones presentan una reducción a lo largo de los 5 años con un p - valor menor a 0.05 (0.024), indicando que la tendencia es significativa, lo quiere decir que es una tendencia real y no obtenida por variaciones aleatorias. El valor estadístico Z confirma que la tendencia es decreciente al tener un valor negativo. La pendiente de Sen indica la magnitud del cambio, representando que la estación Polindara presenta una mayor magnitud ya que en promedio, los valores disminuyen 41.8 unidades por año. La estación Catalina La presenta una disminución de 31.5 valores por año y la estación Buenos Aires una disminución de 32 valores por año.

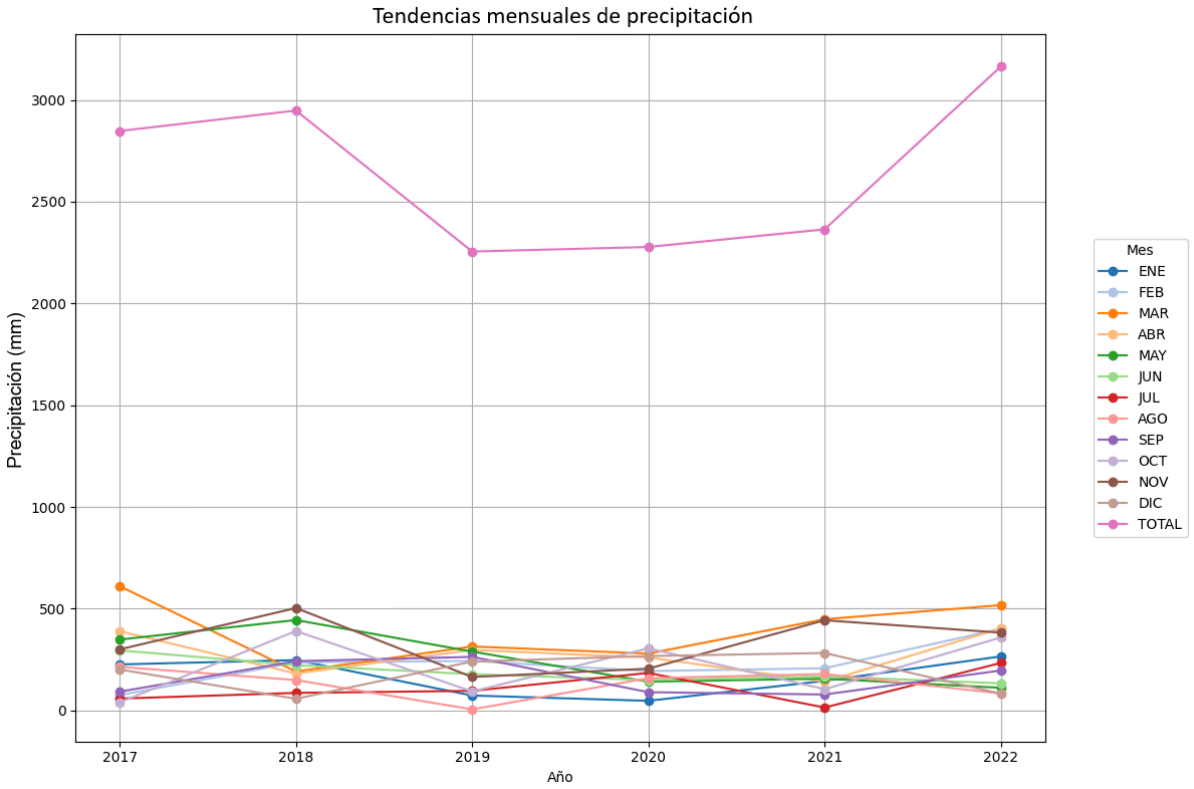



*Figura 27: Gráfico de tendencias estación Buenos Aires. Fuente: elaboración propia*

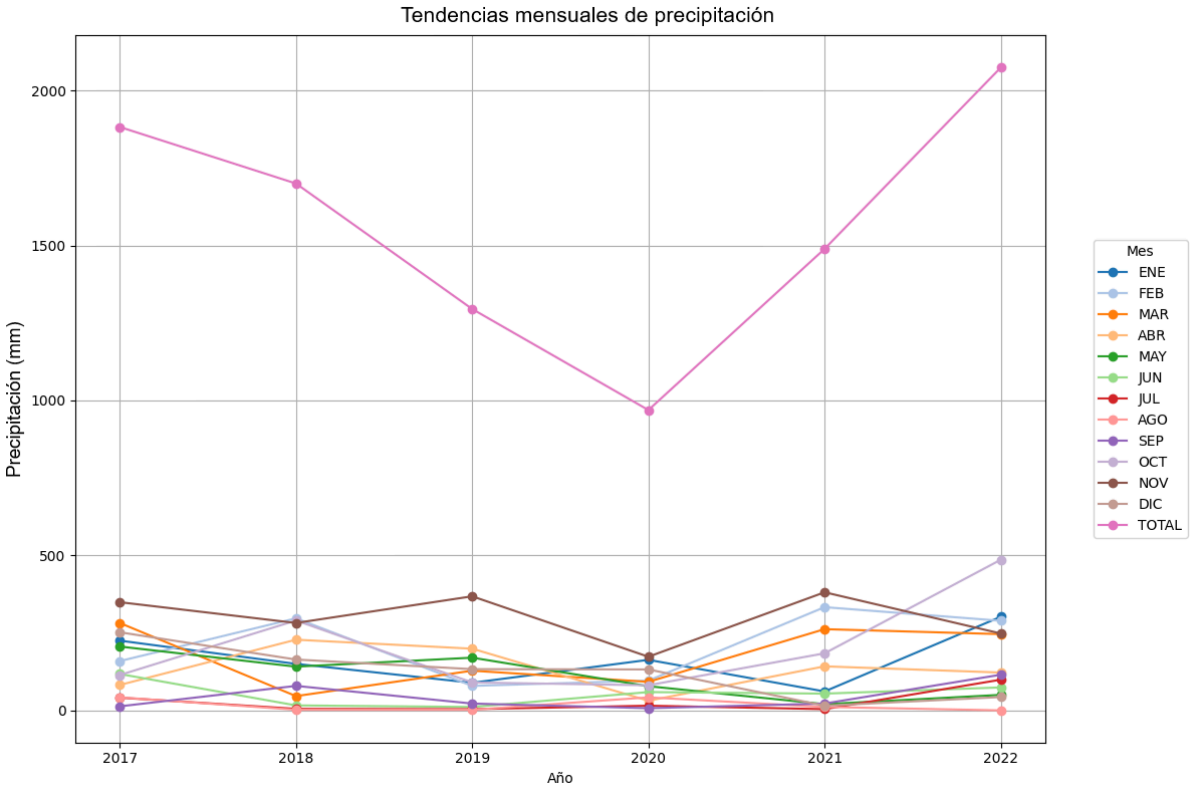



*Figura 28: Gráfico de tendencias estación Polindara. Fuente: elaboración propia*

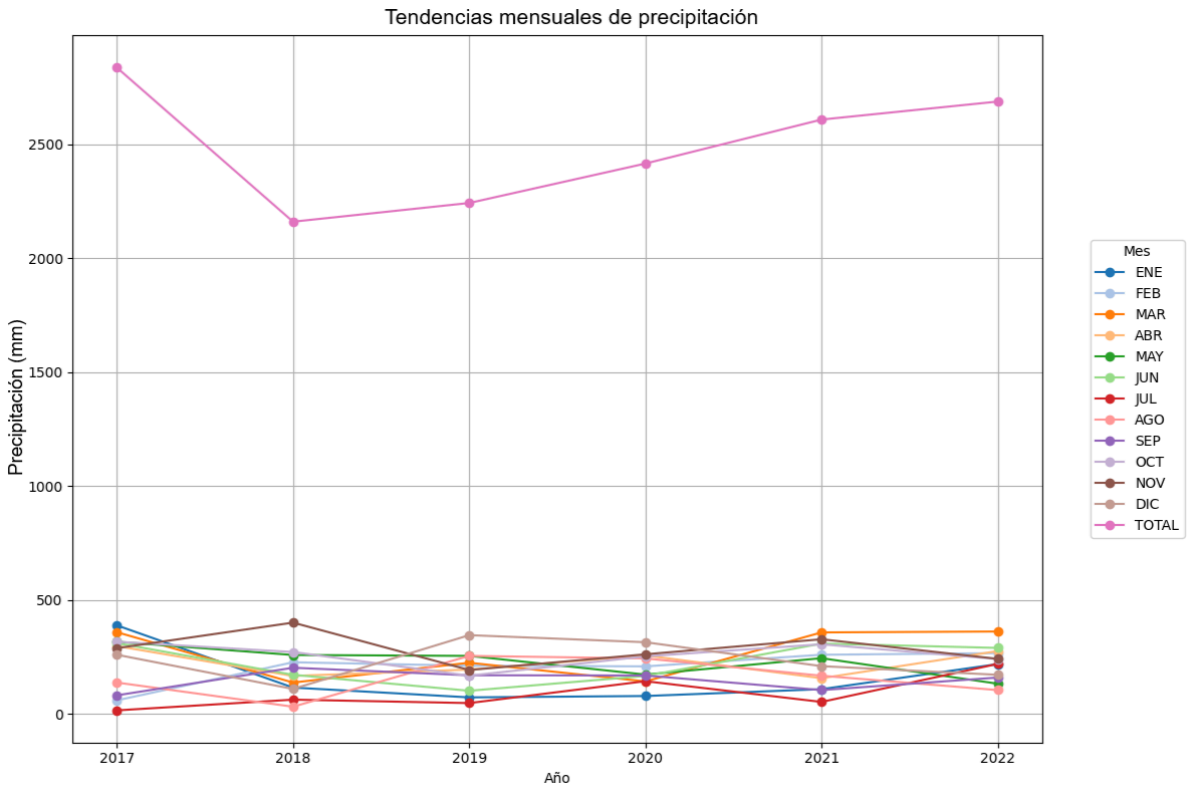



*Figura 29: Gráfico de tendencias estación Catalina La. Fuente: elaboración propia*

Un total de 15 tendencias crecientes se presentaron en 10 estaciones. La estación que mayor tendencias presentó fue Villa Rica con 3 tendencias (Febrero, Marzo y tendencia anual) , Mondomo con 2 tendencias (Abril y Octubre) y las estaciones Cali sede IDEAM, Caloto, Ingenio Bengala, Obando, Amparo El, Pardo, San Marcos, Coconuco, Puerto Frazadas y Salvajina presentan 1 sola tendencia.

| Estación | Villa Rica | | |
|---|---|---|---|
| Mes | Febrero | Marzo | Anual |
| P - valor | 0.008 | 0.02 | 0.008 |
| Estadístico Z | 2.63 | 2.25 | 2.63 |
| Pendiente de Sen | 57.5 | 33.33 | 46.0 |

*Tabla 10: Tendencias crecientes de precipitación. Fuente: elaboración propia*

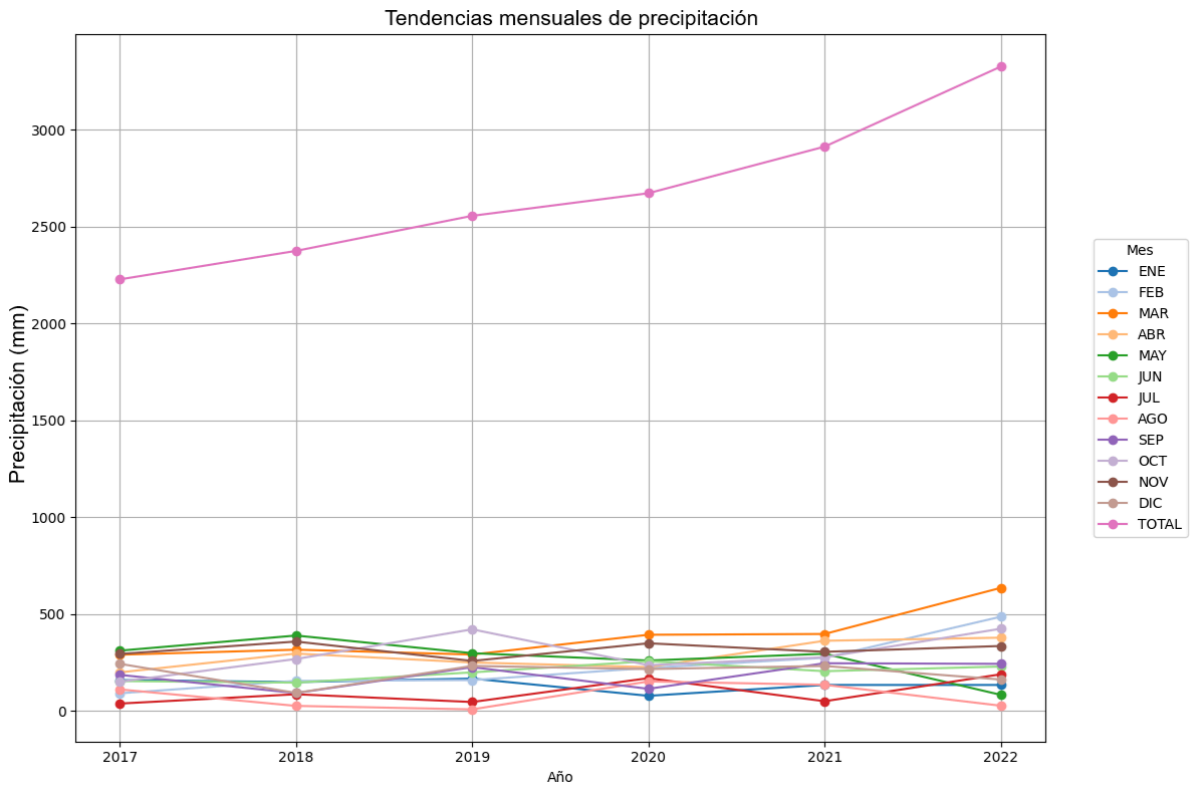



*Figura 30: Gráfico de tendencias estación Villa Rica. Fuente: elaboración propia*

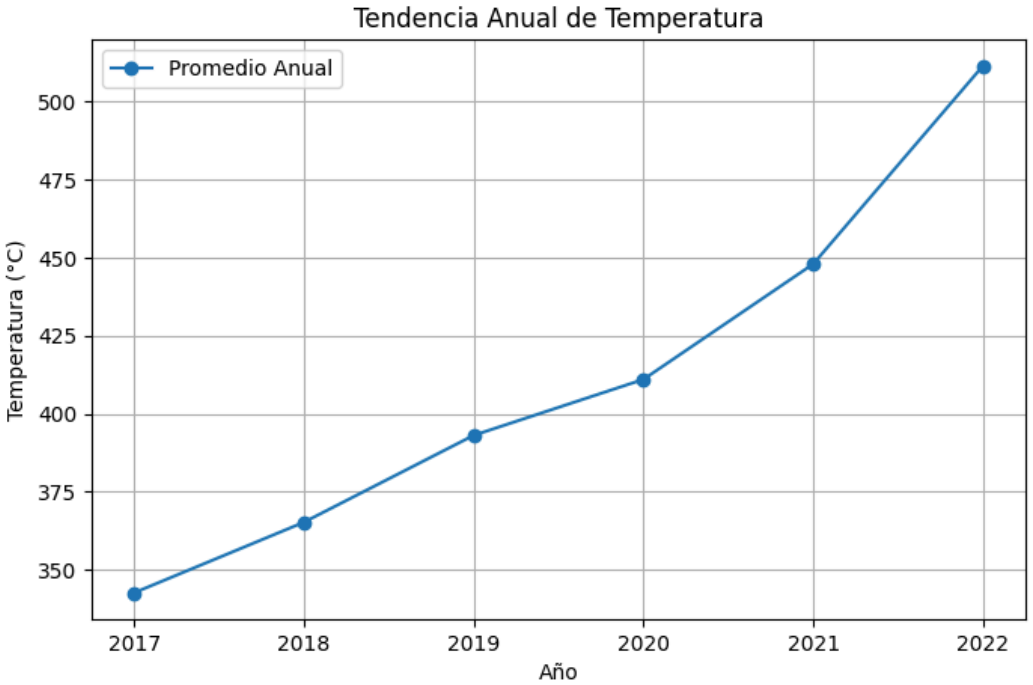



*Figura 31: Gráfico de tendencia anual estación Villa Rica. Fuente: elaboración propia*

| Estación | Mondomo | Mondomo |
|---|---|---|
| Mes | Abril | Octubre |
| P - valor | 0.02 | 0.008 |
| Estadístico Z | 2.25 | 2.63 |
| Pendiente de Sen | 33.3 | 44.6 |

*Tabla 11: Tendencias estación Mondom. Fuente: elaboración propia*

Febrero es el mes que mayor magnitud de cambio tiene en la estación de Villa Rica con un incremento de 57.5 unidades por año, seguido de la tendencia a lo largo de los 5 años y por último el mes de Marzo con 33.3 unidades por año. En la estación de Mondomo, Octubre fue el que mayor magnitud de cambio presenta con 44.6 unidades al año y le sigue Abril con 33.3 unidades al año.

Por otro lado, Febrero fue el mes que más tendencia presentó. Cali sede IDEAM, Caloto, Ingenio Bengala, Obando y Villa Rica arrojaron tendencia en febrero. El otro mes que más tendencia presentó fue Julio con 3 tendencias en las estaciones Amparo El, Pardo y San Marcos.

Para la temperatura promedio, 8 de 11 estaciones presentaron tendencias, es decir, el 72%. De un total de 15 tendencias, 14 fueron decrecientes y 1 fue creciente. La estación que mayor comportamiento mostró fue Ingenio Bengala, con un total de 5 tendencias decrecientes en Febrero, Abril, Junio, Octubre y una tendencia anual.

| Estación | Ingenio Bengala | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Mes | Febrero | Abril | Junio | Octubre | Anual |
| P - valor | 0.024 | 0.03 | 0.03 | 0.024 | 0.024 |
| Estadístico Z | -2.25 | -2.10 | -2.10 | -2.25 | -2.25 |
| Pendiente de Sen | -0.70 | -0.30 | -0.25 | -0.13 | -0.23 |

*Tabla 12: Tendencias estación Ingenio Bengala. Fuente: elaboración propia*

El mes de Febrero es el que presenta una mayor disminución de pendiente de Sen, quiere decir que en esa estación se disminuye -0.7°/año, seguido del mes de abril con una disminución de -0.3°/año y junio con una disminución de -0.25°/año.

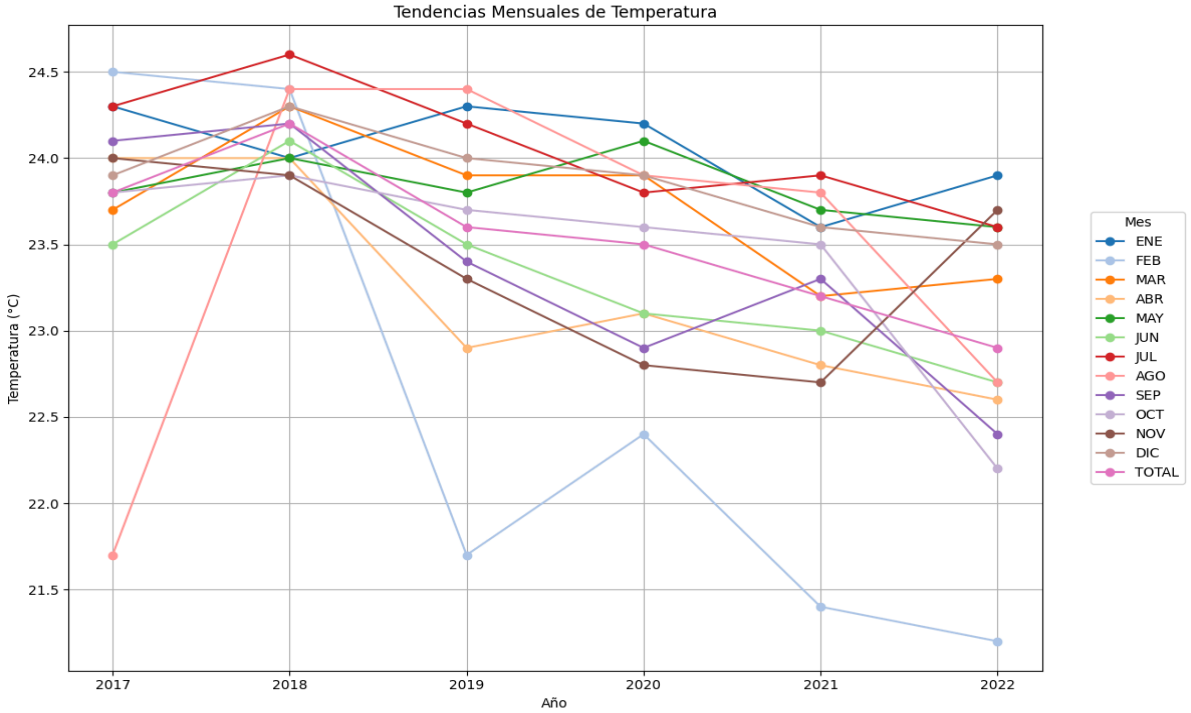



*Figura 32: Gráfico de tendencias estación Ingenio Bengala. Fuente: elaboración propia*

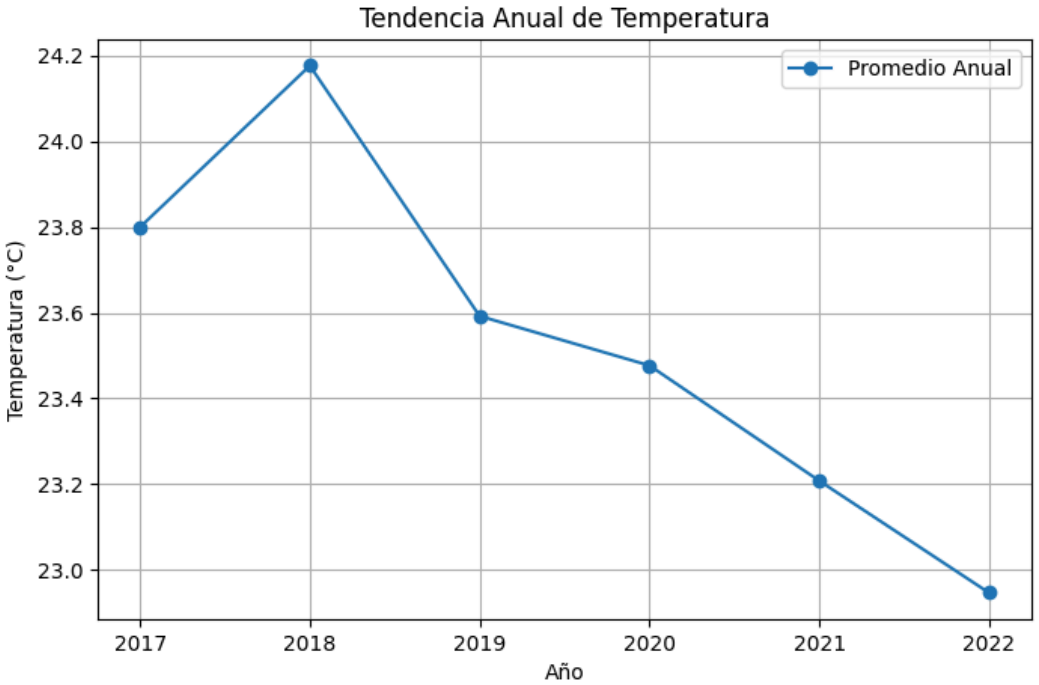



*Figura 33: Gráfico de tendencia anual estación Ingenio Bengala. Fuente: elaboración propia*

La estación Cajibío y Barragán también mostraron tendencias anuales, la tendencia de Cajibío fue decreciente y la de Barragán fue creciente. De acuerdo a la pendiente de Sen, en Cajibío se presenta una disminución de -0.08°/año y en Barragán un incremento de 0.4°/año.

| Estación | Cajibío | Barragán |
|---|---|---|
| P-valor | 0.02 | 0.02 |
| Estadístico Z | -2.25 | 2.25 |
| Pendiente de Sen | -0.08 | 0.40 |

*Tabla 13: Tendencia de temperatura promedio. Fuente: elaboración propia*

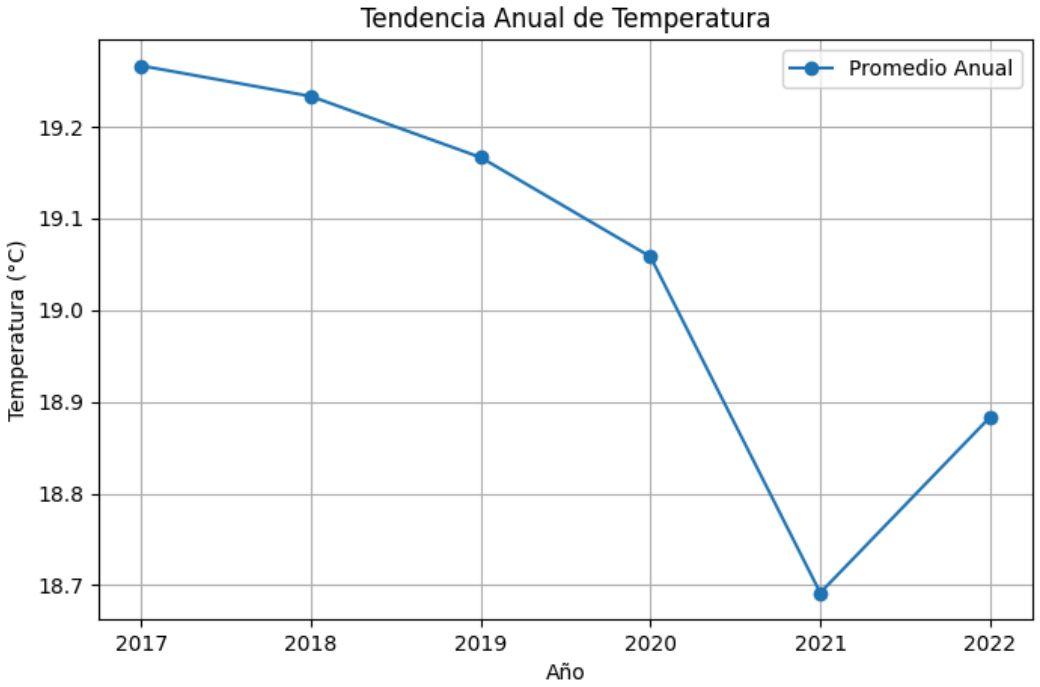



*Figura 34: Gráfico de tendencia anual estación Cajibío. Fuente: elaboración propia*

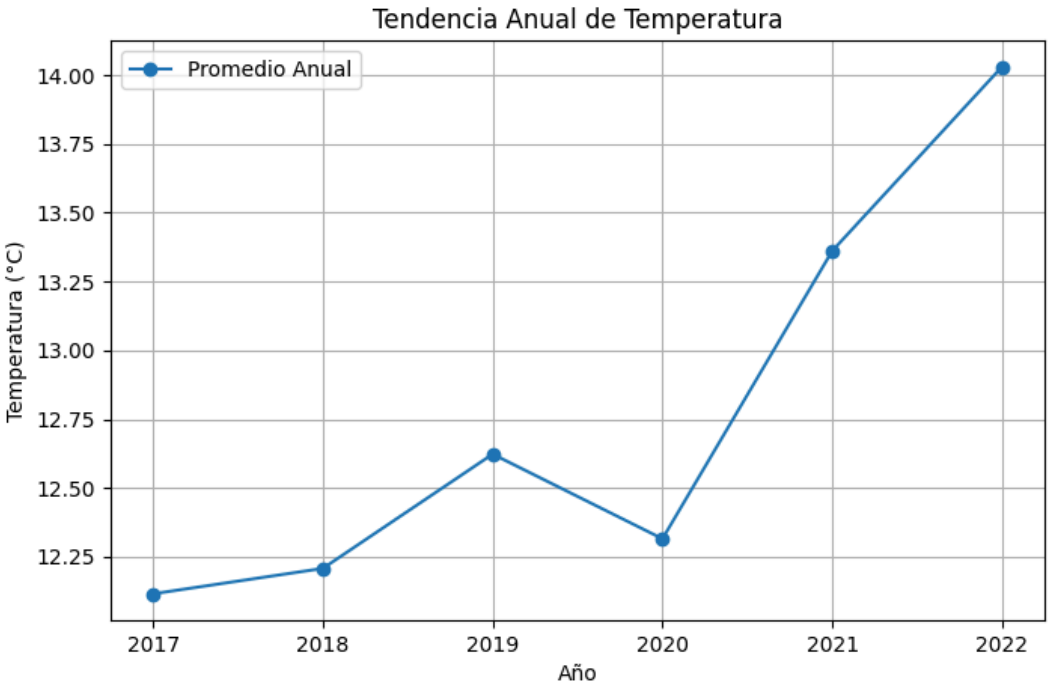



*Figura 35: Gráfico de tendencia anual estación Barragán. Fuente: elaboración propia*

La temperatura mínima presentó únicamente una tendencia decreciente en noviembre en la estación Cajibío con una disminución de -0.16°/año. Por otro lado,

la temperatura máxima presenta 9 tendencias de las cuáles 3 son crecientes y 6 son decrecientes, siendo Diciembre el mes que más tendencias mostró (2).

En términos generales, todas las variables presentaron un bajo porcentaje de tendencias. La temperatura promedio presentó un 10.4% de las tendencias totales que podrían presentarse, siendo la variable que más tendencias hubo. Por el contrario, la temperatura mínima únicamente presentó 1 tendencia siendo el 0.7% de las tendencias posibles totales.

| Variables | Posibles tendencias | Tendencias presentadas | Porcentaje de tendencias presentadas |
|---|---|---|---|
| Precipitación | 871 | 19 | 2.18% |
| Temperatura promedio | 143 | 15 | 10.4% |
| Temperatura máxima | 143 | 1 | 0.7% |
| Temperatura mínima | 143 | 9 | 6.2% |

*Tabla 14: Tendencias posibles por variable. Fuente: elaboración propia*

### 6.4 Indicadores hídricos del ENA

El promedio del índice de aridez a lo largo de los 6 años fue el siguiente:

| Año | Valor del índice de aridez | Categoría |
|---|---|---|
| 2017 | 0.33 | Moderado |
| 2018 | 0.36 | Moderado |
| 2019 | 0.38 | Moderado |
| 2020 | 0.36 | Moderado |
| 2021 | 0.36 | Moderado |
| 2022 | 0.25 | Moderado a excedentes de agua |

*Tabla 15: Resultados Índice de Aridez. Fuente: elaboración propia*

La Cuenca Alta del Río Cauca tiene un índice de aridez moderado desde el 2017 hasta el 2021 y en el 2022 muestra un valor más favorable (0.25) siendo una zona con un índice moderado a excedentes de agua, esto es una evolución favorable debido a que la zona cuenta con una gran riqueza hídrica Los valores mostrados son el promedio del valor de las 9 estaciones usadas para su cálculo: Cajibío, Tunia, Ingenio Bengala, Lomitas, Miranda, Barragán, San Marcos, Mateguadua e Ingenio Riopaila.

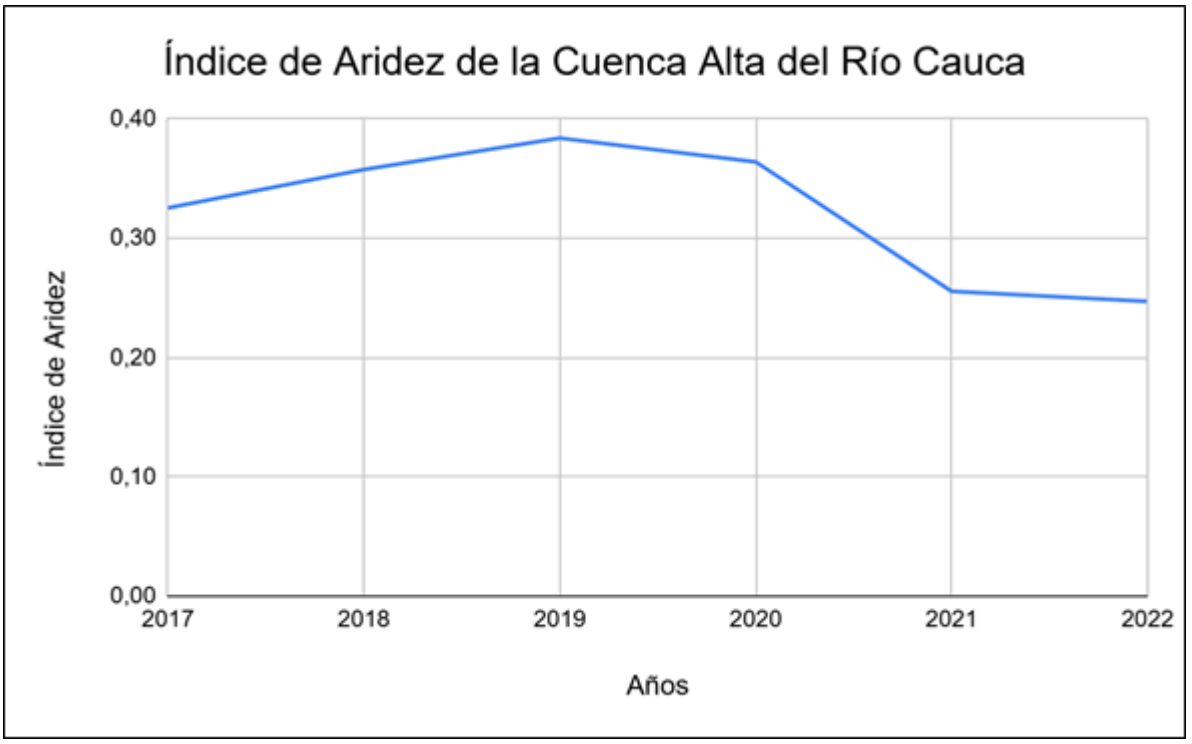



*Figura 36: Gráfico del Índice de Aridez en la cuenca alta del Río Cauca. Fuente: elaboración propia*

| | IRH | | IUA | | IARC | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Subzona hidrográfica | 2018 | 2022 | 2018 | 2022 | 2018 | 2022 |
| Río Bugalagrande | 0,74 | 0,74 | 16,59 | 20 | 0,09 | 0,1 |
| Río Cauca | 0,74 | 0,74 | 10,7 | 10 | 0,04 | 0,1 |
| Río Frío | 0,73 | 0,73 | 62,37 | 20 | 0,33 | 0,1 |
| Río Guachal | 0,68 | 0,68 | 56,29 | 80 | 0,18 | 0,3 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Río La Vieja | 0,71 | 0,71 | 17,15 | 10 | 0,05 | 0,1 |
| Río Ovejas | 0,74 | 0,74 | 10,27 | 10 | 0,04 | 0,1 |
| Río Paila | 0,73 | 0,73 | 34,36 | 40 | 0,18 | 0,2 |
| Río Palo | 0,.67 | 0,67 | 28,39 | 20 | 0,1 | 0,1 |
| Río Timba | 0,77 | 0,77 | 3,56 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |
| Río Yotoco | 0,73 | 0,73 | 137,46 | 60 | 0,49 | 0,3 |
| Río Claro | 0,71 | 0,71 | 10,29 | 10 | 0,05 | 0,05 |
| Quebrada Las Cañas | 0,68 | 0,68 | 25,43 | 30 | 0,1 | 0,2 |
| Río Amaime | 0,74 | 0,74 | 110,12 | 70 | 0,43 | 0,3 |
| Río Cali | 0,73 | 0,73 | 16,95 | 10 | 0,28 | 0,05 |
| Río Palacé | 0,77 | 0,77 | 13,09 | 10 | 0,07 | 0,07 |
| Río Tapias | 0,71 | 0,71 | 9,34 | 0,05 | 0,03 | 0,05 |
| Río Yumbo | 0,73 | 0,73 | 137,46 | 50 | 0,49 | 0,3 |
| Río Cerrito | 0,74 | 0,74 | 110,12 | 70 | 0,43 | 0,3 |
| Río Pescador | 0,54 | 0,54 | 12,22 | 10 | 0,04 | 0,04 |
| Río Chanco | 0,54 | 0,54 | 12,22 | 10 | 0,04 | 0,04 |
| Río Claro | 0,71 | 0,71 | 10,29 | 10 | 0,05 | 0,05 |
| Río Desbaratado | 0,74 | 0,74 | 42,85 | 90 | 0,27 | 0,5 |
| Río Vijes | 0,73 | 0,73 | 137,46 | 60 | 0,49 | 0,3 |
| Río Jamundí | 0,71 | 0,71 | 10,29 | 10 | 0,05 | 0,05 |
| Río Morales | 0,76 | 0,76 | 31,81 | 30 | 0,13 | 0,1 |
| Río Guadalajara | 0,74 | 0,74 | 55,58 | 40 | 0,21 | 0,2 |
| Río Guabas | 0,74 | 0,74 | 149,75 | 160 | 0,47 | 0,7 |
| Río Cañaveral | 0,54 | 0,54 | 12,22 | 10 | 0,04 | 0,04 |
| Río Catarina | 0,54 | 0,54 | 12,22 | 10 | 0,04 | 0,04 |

*Tabla 16: Resultados Indicadores Hídricos. Fuente: elaboración propia*

El IRH resultante para ambos años es de categoría moderada, únicamente 3 de 29 subzonas hidrográficas muestran un IRH bajo a puertas de ser moderado. Los cambios presentados en cada año no se atribuyen a cambios importantes en el almacenamiento de agua o de escorrentía, sino a cambios insignificantes en los decimales pero cambian la categoría de las subzonas hidrográficas. Sin embargo, en la zona de estudio no varía el IRH, manteniéndose como una zona con un IRH moderado.

El IUA en el año 2018 se muestra moderado en el 44.83% de las subzonas hidrográficas, el 17.24% es alto y el 6.9% es bajo. Por otro lado, el 10.34% es muy alto y el 20.69% es crítico. Esto se traduce en que el 69% de las subzonas hidrográficas al tener un IUA menor a 50, la presión es baja, de forma que los sistemas hídricos aún pueden satisfacer la demanda sin entrar en competencia con el caudal ambiental. Del 31% restante se puede decir que la demanda es mayor en comparación a la oferta hídrica disponible en los sistemas hídricos. Las causas podrían ser diversas tales como insuficiencia en la provisión de agua o problemas de caudal trayendo como consecuencia inmediata una toma de decisiones orientadas a la gestión integral del agua.  Sin embargo, para el 2022, la categoría “moderado” subió al 55.17%., la categoría “muy alto” subió al 20.69%, la categoría “alto” se mantuvo en 17.24% y el 6.90% es de categoría “muy bajo”. A lo largo de los 4 años, la cuenca mejoró en un 10% en un IUA por debajo de 50, teniendo una mayor capacidad de la cuenca en general para satisfacer la demanda hídrica.

El Índice de Agua No Retornada a la Cuenca (IARC) en la Cuenca Alta del Río Cauca muestra un  55.17% en categoría “bajo”, 10.34% en categoría “moderado”, y un 34.48% en categoría “alto”. Esto califica la cuenca en una zona que tiene la capacidad de sostener actividades económicas en función de la oferta hídrica superficial disponible ya que más de la mitad de las subzonas hidrográficas tienen un IARC favorable (65.51%). Sin embargo, no hay que dejar de lado que una tercera parte de la cuenca aún tiene una amenaza mayor en la que podría agotar su disponibilidad de agua para cubrir el consumo de agua requerido por actividades económicas que se desarrollan en la zona.

Para el año 2022, la categoría “bajo” disminuyó a un 24.14%, sin embargo, la categoría “muy bajo” se presenta en el 37.93% de la cuenca, mejorando el valor del índice en diferentes subzonas hidrográficas. La categoría “alto” se mantuvo en el 34.48%, mientras que solamente el 3.45% de las subzonas hidrográficas muestra una categoría de “muy alto”. Hubo una pequeña variación del porcentaje favorable (62.07%), sin embargo, no es significativa la variación que tuvo el índice (-3.44%), por lo que la cuenca se mantiene en la misma capacidad de sostener las actividades económicas en función de la oferta hídrica superficial disponible.

El Índice de Eficiencia en el Uso del Agua (IEUA) en el año 2018 muestra que en la cuenca alta del río Cauca, el 93% es un índice alto, lo que quiere decir que entre el 80% y el 50% del agua extraída está asociada a usos que posteriormente retornan a la cuenca y que es susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y pérdidas del sistema. El 3.45% es un índice moderado y otro 3.45% es un índice muy alto, donde el agua extraída fue efectivamente consumida, reduciendo así las pérdidas de agua. Para el año 2022, la categoría “alto” se redujo a un 72.41%, la categoría “moderado” aumentó a un 13.79% y la categoría “muy alto” aumentó a un 13.79%. Esto quiere decir que aumentó el número de subzonas hidrográficas que tienen más agua retornada a la cuenca, haciéndola más susceptible al reúso, la recirculación, y las pérdidas del sistema.

La cuenca alta del Río Cauca se muestra en un 62.07% vulnerable al desabastecimiento combinando sus categorías “alto” y “muy alto”, lo que traduce en un uso del agua alto (IUA) y una regulación muy baja (IRH), un 31.03% moderado y un 6.9% bajo. En el 2022, se presenta una mejora de este índice: la vulnerabilidad se redujo en un 17.24% combinando las categorías “alto” y “muy alto”, dando como resultado un 44.83% en la cuenca. La categoría “bajo” aumentó un 27.58%, lo que también se traduce en una mejora en la vulnerabilidad al desabastecimiento, ya que la regulación es alta (IRH) y el uso del agua es bajo (IUA).

Para el año 2018, un 86.21% de la cuenca alta del río Cauca presenta una presión alta por contaminación sumando las categorías “media alta” (6.90%), “alta” (41.38%), y “muy alta” (37.93%). En el 2022, la presión por contaminantes aumentó en su totalidad, debido a que ya no presenta categoría “moderada” y en su categoría “media alta” aumentó al 10.34% y la categoría alta aumentó al 51.72%. La cuenca alta del río Cauca se considera entonces una zona susceptible de contaminación.

| | IEUA | | IVH | | IACAL | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Subzona hidrográfica | 2018 | 2022 | 2018 | 2022 | 2018 | 2022 |
| Río Bugalagrande | 0,37 | 0,4 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Río Cauca | 0,35 | 0,34 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| Río Frío | 0,53 | 0,6 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Río Guachal | 0,3 | 0,4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Río La Vieja | 0,35 | 0,4 | 3 | 2 | 5 | 5 |
| Río Ovejas | 0,38 | 0,1 | 3 | 2 | 3 | 4 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Río Paila | 0,49 | 0,6 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Río Palo | 0,36 | 0,4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Río Timba | 0,48 | 0,1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Río Yotoco | 0,37 | 0,5 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Río Claro | 0,22 | 0,3 | 3 | 2 | 4 | 4 |
| Quebrada Las Cañas | 0,38 | 0,6 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Río Amaime | 0,43 | 0,5 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Río Cali | 0,19 | 0,1 | 3 | 2 | 2 | 4 |
| Río Palacé | 0,46 | 0,1 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| Río Tapias | 0,39 | 0,4 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| Río Yumbo | 0,37 | 0,5 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Río Cerrito | 0,43 | 0,5 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Río Pescador | 0,38 | 0,5 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| Río Chanco | 0,38 | 0,5 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| Río Claro | 0,22 | 0,3 | 3 | 2 | 4 | 4 |
| Río Desbaratado | 0,38 | 0,6 | 4 | 4 | 2 | 3 |
| Río Vijes | 0,49 | 0,5 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Río Jamundí | 0,22 | 0,3 | 3 | 2 | 4 | 4 |
| Río Morales | 0,4 | 0,5 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| Río Guadalajara | 0,47 | 0,5 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Río Guabas | 0,31 | 0,4 | 4 | 5 | 4 | 4 |
| Río Cañaveral | 0,38 | 0,5 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| Río Catarina | 0,38 | 0,5 | 4 | 3 | 4 | 4 |

*Tabla 17: Resultados Indicadores Hídricos. Fuente: elaboración propia*

### 6.5 Geovisor

Se desarrolló un geovisor interactivo en ArcGIS Online mediante Instant Apps, el cual permite la visualización y análisis espacial de las variables meteorológicas y los índices calculados en este estudio. La herramienta cuenta con funcionalidades como leyenda, lista de capas, filtros de atributos y ventanas emergentes, que facilitan la exploración de los datos. Por otro lado, ofrece opciones para exportar mapas a PDF, visualizar gráficos estadísticos y la herramienta *Swipe* para analizar mapas en épocas diferentes. El enlace para visitar el geovisor es el siguiente: https://uvgeomatica.maps.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=9044c909b2b94ad3b474fcd53d351190

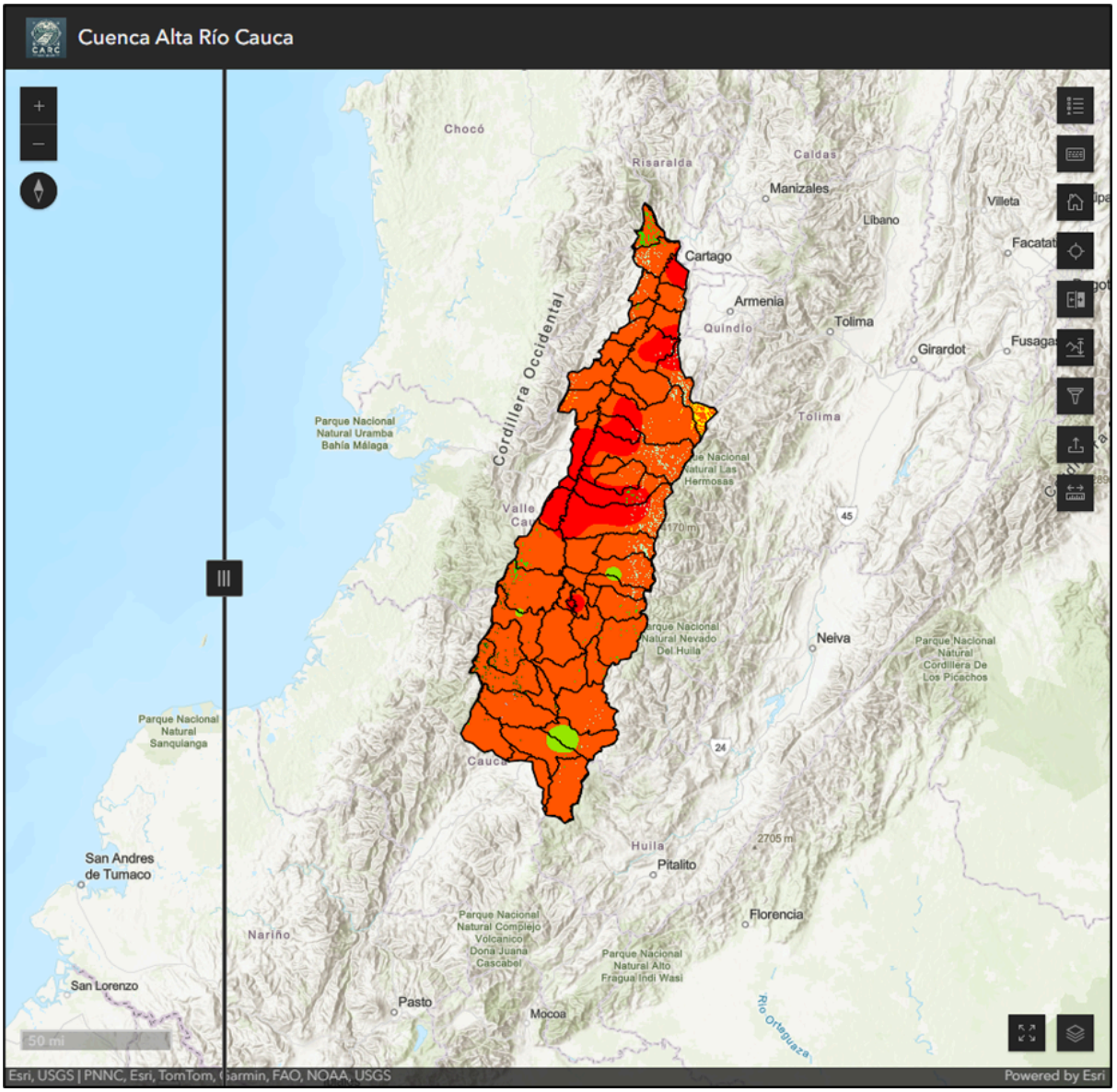



*Figura 37: Geovisor Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*

| ITEM | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
| Leyenda | Visualización de la simbología del mapa. |
| Accesos del teclado | Facilita la navegación mediante combinaciones de teclas. |
| Botón de inicio | Amplía y desplaza el mapa para regresar a su extensión predeterminada inicial |
| Ubicación | Muestra la posición del usuario en el mapa en tiempo real. |
| Filtro | Permite seleccionar y visualizar solo los datos que cumplen con ciertos criterios. |
| Perfil de elevación | Genere un gráfico de perfil de elevación a través de una entidad de línea de entrada que puede seleccionarse en la escena, o a partir del dibujo de una línea de uno o varios segmentos utilizando la herramienta. |
| Herramientas de medición | Herramientas para medir la distancia y el área |
| Exportar a PDF | Guarda y comparte mapas en formato PDF. |
| Swipe | Compara dos capas en el mapa visualizándolas simultáneamente. |
| Lista de capas | Muestra las capas disponibles en el visor, activarlas y desactivarlas. |
| Pantalla completa | Permite expandir el visor a toda la pantalla. |
| Visualización de gráficos | Presenta datos en formato gráfico, complementando la información espacial con la estadística. |
| Ventanas emergentes | Al hacer clic en el mapa o al pasar el ratón por encima de una zona, se muestra la información detallada permitiendo consultar datos. |

*Tabla 18: Funcionalidades del geovisor. Fuente: elaboración propia*

## 7. Discusión.

La matriz de correlación de Pearson permitió identificar relaciones significativas entre variables asociadas al recurso hídrico en la cuenca alta del Río Cauca en el año 2018 y 2022. En este análisis, el Índice de Aridez mostró una relación moderada-fuerte con la precipitación total anual, de tal manera que al haber mayor aridez, hay una menor precipitación. De acuerdo al IDEAM (2023), el índice de aridez puede asumirse como un déficit de precipitación, que determina zonas húmedas y zonas con condiciones de sequías. De igual manera, Tabari, H., & Aghajanloo, M.-B. (2013), halló que durante el periodo de estudio se encontró un aumento en la aridez a medida que disminuyeron las tendencias de precipitación y de evapotranspiración. Este resultado coincide con lo encontrado en esta investigación, ya que reafirma que la relación entre ambas variables es fuerte.

Determinar relaciones entre variables meteorológicas y recurso hídrico proporciona un fundamento sólido para poder interpretar las variables del recurso hídrico con las implicaciones del cambio climático en la disponibilidad y la distribución del agua. En este estudio, se utilizaron diversos indicadores hídricos y también hidroclimatológicos para comprender el comportamiento entre ellos. De la misma manera, Anyah et al., (2018) aplican la matriz de correlación de Pearson para establecer conexiones entre cinco índices globales de conexiones climáticas y el almacenamiento de agua terrestre donde también encontraron vínculos fuertes y lineales.

La prueba no-paramétrica de Mann-Kendall se usó para encontrar tendencias entre 2017 - 2022. Esta prueba es frecuentemente utilizada para caracterizar tendencias de variables meteorológicas. De acuerdo a la aplicación de esta prueba a todas las estaciones, no hay una distribución uniforme en ninguna variable estudiada, el comportamiento de estas tendencias se presentó de manera aleatoria ya que no hay ninguna predominancia en ningún mes ni en ningún año. Alencar da Silva Alves, K. M., & Silva Nóbrega, R. (2017) llegaron a la misma conclusión en cuánto a la distribución de tendencias en la cuenca hidrográfica del río Moxotó, sin embargo, es importante tener en cuenta que se utilizó una ventana de tiempo de 84 años, donde se puede ver con mayor seguridad una tendencia. Sin embargo, a través de la prueba de Mann-Kendall, fue posible evidenciar en ambos si existen o no existen tendencias dentro de una zona de estudio.

Para la cuenca alta y media del Río Cauca, Puertas et al., (2011) aplicaron la prueba de Mann - Kendall para 24 estaciones en un periodo de tiempo de 31 años (1975-2006) donde se encontraron tendencias significativas en la precipitación anual con rangos de variación desde -147.3 mm hasta +128.8 mm por decenio. En el periodo de tiempo evaluado en este proyecto, la variable de precipitación solo tuvo una tendencia anual creciente correspondiente a la estación de Villa Rica la cuál también tuvo una tendencia significativa al tener un p-valor del 0.008 y un aumento

de 46mm/año. Por ventana de tiempo estudiado y por cantidad de estaciones, este estudio no coincide con el de Puertas et al., (2011).

Aunque en este estudio no se identificaron tendencias significativas durante el periodo analizado, y la metodología no incluye proyecciones climáticas, es relevante incorporar una perspectiva del futuro de esta zona de estudio a partir de escenarios climáticos. De acuerdo a reportes del IDEAM (2024), en la cuenca alta del Río Cauca se proyecta un aumento progresivo de la temperatura media en todos los escenarios, siendo el escenario SSP5-8.5 el más agresivo con un aumento superior a los 5°C afectando la frecuencia de eventos extremos como olas de calor y también afectando los promedios anuales de temperatura. En cuánto a la precipitación media anual, sobretodo bajo los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 se prevén incrementos de entre 20% y 45% hacia finales de siglo, esperando de igual manera que hayan temporadas húmedas más intensas y secas más prolongadas, pues los incrementos previstos no significa necesariamente mayor disponibilidad hídrica. Por otro lado, según el World Bank Group (2023), que hace énfasis en las proyectados bajo el escenario SSP3-7.0, en la región andina habrá un aumento de frecuencia de temperaturas máximas superiores a los 25°C y de noches tropicales con mínimas por encima de 20°C, condicionando así los cultivos, la salud de las personas y el consumo de agua. En los anexos se encuentran los escenarios de temperatura y precipitación disponibles para la zona de estudio.

En el estudio de Romero (2023), se analizaron los cambios en la oferta de agua, producto a la entrada en operación de Hidrosogamoso, el fenómeno de El Niño y La Niña y escenarios de cambio climático bajo las trayectorias socioeconómicas SSP3-7.0, y SSP5-8.5. Los resultados de este estudio muestran que bajo estos dos escenarios, se estima una disminución de la precipitación entre 15% y 36% para finales de siglo. Sin embargo, la mayor reducción se espera bajo el escenario SSP5-8.5, afectando la oferta hídrica especialmente en temporada seca. Este estudio se demuestra la importancia de incluir estos escenarios para el diseño de planes de adaptación con miras al futuro y evaluar impactos sectoriales como la agroindustria, energía o abastecimiento urbano.

Se cumplió con la creación de un geovisor con el fin de publicar y visualizar las capas creadas para la cuenca alta del río Cauca, logrando el objetivo de visualizar e interactuar con los resultados obtenidos de las capas de cada variable y cada indicador hídrico. La plataforma de ArcGIS Online permitió crear de manera rápida e intuitiva, una aplicación que permite a cualquier usuario interactuar con los mapas creados y ver las posibles tendencias y comportamiento de la variabilidad climática a lo largo del tiempo en el recurso hídrico. De la misma manera, Másmela & Medina (2023) implementaron un geovisor web para la divulgación y monitoreo del volcán Nevado Santa Isabel mediante la plataforma de ArcGIS Online, utilizando ArcGIS Experience Builder y ArcGIS Web AppBuilder, por tanto, coinciden en que las herramientas de ArcGIS Online son de gran utilidad para la creación de geovisores

interactivos para todo tipo de usuario y poder conocer el comportamiento de un fenómeno en una zona determinada.

## 8. Conclusiones

Los indicadores hídricos, las variables meteorológicas y los indicadores hidrometeorológicos brindaron una información amplia sobre el comportamiento del recurso hídrico en la cuenca alta del Río Cauca y también su asociación a la variabilidad climática. La información recopilada fue gracias a las fuentes secundarias como los indicadores hídricos del Estudio Nacional del Agua (ENA) y las estaciones meteorológicas presentes en la zona de estudio. Las estaciones tuvieron bastantes datos vacíos que fue necesario llenarlos mediante la metodología de US National Weather Service y gracias a esta metodología se facilitó la interpolación de los datos para su posterior visualización, permitiendo así hacer un análisis más completo teniendo información limitada y en un proyecto de corto alcance.

El método de US National Weather Service es un método accesible y fácil para rellenar datos de estaciones meteorológicas y sirve para este tipo de proyectos, sin embargo es importante que haya estaciones más cerca para obtener datos más exactos, ya que se pueden presentar inconsistencia en algunas estaciones. El objetivo de este estudio fue analizar el impacto de la variabilidad climática, sin embargo, para un estudio de mayor alcance se deben considerar mayor rigurosidad para que los datos no presenten inconsistencias en todos sus datos faltantes. De la misma manera, se recomienda que las entidades que cuentan con estaciones que miden estas variables, las mantengan en buen estado y que se reduzcan al máximo los vacíos en sus datos.

Entre el 2018 y el 2022 se evidenció la importancia que tiene el IUA en la cuenca alta del río Cauca, ya que se asocia directamente al IVH y al IARC puesto que si aumenta el IUA, hay un menor retorno de agua al sistema hídrico y además, aumenta la posibilidad de desabastecimiento. Sin embargo, en cuánto al IVH, se notó una mejora en la vulnerabilidad hídrica. El índice de aridez y la precipitación confirmaron su relación directa en ambos años, mostrando que entre mayor precipitación hay, menos aridez se presenta en la zona. El IRH se mantuvo en una categoría moderada y el índice de aridez se mantuvo en una categoría moderada. El comportamiento de todos estos índices e indicadores podría dar a entender que la cuenca se encuentra en condiciones estables donde la variabilidad climática no muestra una repercusión significativa en los años estudiados. Sin embargo, la medición de cada indicador tiene restricciones y limitaciones, por lo que el valor del indicador no quiere decir ese sea el comportamiento en la realidad, así que la vulnerabilidad del recurso hídrico se debe relacionar también con características socioeconómicas, sostenibilidad ambiental, y muchas más dimensiones para determinar una vulnerabilidad en un plano más completo.

El test de Mann-Kendall se utilizó para encontrar tendencias en la temperatura y en la precipitación. Las tendencias observadas en ambas variables representan un porcentaje bajo del total de tendencias posibles: para la precipitación, fue un 2% de tendencias y para la temperatura fue un 10.4%. Por tanto, no hay distribución homogénea en toda la zona de estudio. Esta falta de homogeneidad en las tendencias en ambas variables refleja la complicación de los impactos de la variabilidad climática en la zona. Además resalta la necesidad y la importancia de hacer análisis específicos por estaciones, zonas y utilizar periodos más largos de estudio para comprender mejor el comportamiento del recurso hídrico a partir del cambio climático.

La herramienta Instant Apps de ArcGIS Online permitió visualizar, integrar y comparar de manera interactiva los datos hidrometeorológicos y variables de la variabilidad climática en la cuenca alta del río Cauca desde el año 2017 al año 2022, facilitando la exploración y el análisis temporal de los datos. Esto permite identificar patrones de distribución y posibles áreas críticas del recurso hídrico. Por otro lado, el diseño interactivo, la accesibilidad y la capacidad de actualización del geovisor representa una plataforma innovadora para el análisis y la gestión de datos hidrometeorológicos.

Mediante análisis estadísticos, índices y variables climáticas fue posible identificar los posibles efectos de la variabilidad climática en el recurso hídrico de la cuenca alta del río Cauca durante el periodo 2017 - 2022 y la vulnerabilidad al mismo. Los hallazgos presentados conforman una herramienta útil para la gestión del recurso hídrico y de qué manera abordar su adaptación frente a la variabilidad climática, además refuerza la importancia de los indicadores para evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico al cambio climático, sin embargo, se deben implementar más variables, dimensiones y periodos más largos de estudio para hallar mejores resultados.

## Bibliografía


- A. C. Sanabria-Suárez, C. Montenegro-Marín, M. F. Castro-Fernández, D. M. Díaz-Casallas, “Análisis multitemporal de los indicadores de calidad de agua en corrientes superficiales (ica) de la cuenca alta del Río Bogotá (Colombia)”, Ingeniería Solidaria, vol. 13, n.o 22, mayo de 2017, pp. 39-54. doi: http://dx.doi.org/10.16925/in.v13i22.1751

- Alarcón-Hincapié, J., Zafra-Mejía, C., & Echeverri-Prieto, L. (2019). Cambio climático y recursos hídricos en Colombia. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 22(2). https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368
- Anyah, R., Forootan, E., Awange, J., & Khaki, M. (2018). Understanding linkages between global climate indices and terrestrial water storage changes over Africa using GRACE products.. *The Science of the total environment*, 635, 1405-1416 . https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.159.
- Alencar da Silva Alves, K. M., & Silva Nóbrega, R. (2017). RAINFALL TENDENCIES AND SEASONAL RAINFALL CONCENTRATION IN RIO MOXOTÓ WATERSHED - PERNAMBUCO – BRAZIL. *Geographical Journal of Central America*, *1*(58), 295-313. https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.12
- Ali, R., & Abubaker, S. (2019). Trend analysis using mann-kendall, sen's slope estimator test and innovative trend analysis method in Yangtze river basin, china: review. .
- American Chemical Society. (2020a). Greenhouse gases - ACS. https://www.acs.org/content/acs/en/climatescience/greenhousegases/properties.html
- Aranda, D. F. C. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico*. UASLP. article/view/994/986
- Ayala Arboleda, I. (2017). Estudio de la hidrometeorología mensual de la cuenca alta del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca durante las fases extremas del fenómeno Enos. Universidad del Valle.

Ávila, Á., Guerrero, F. C., Escobar, Y. C., & Justino, F. (2019). Recent Precipitation Trends and Floods in the Colombian Andes. *Water*, *11*(2), 379. https://doi.org/10.3390/w11020379

- Bateman, A. (2007a). Hidrología aplicada. In Grupo de Investigacion en Transporte de Sedimentos.

- Berndt, C., & Haberlandt, U. (2018). Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany—Influence of temporal resolution and network density. *Journal of Hydrology. Regional Studies*, *15*, 184–202. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.002

- Betancourt Mesa, J. M. (2009). El mecanismo de Desarrollo Limpio: oportunidades de Desarrollo Sostenible para Países en Desarrollo en el Protocolo de Kioto. Caso Colombia como posible potencia continental ambiental.

- Cantor Gómez, D. (2011). *Evaluación y análisis espaciotemporal de tendencias de largo plazo en la hidroclimatología Colombiana*.

- Capotondi, A., Wittenberg, A. T., Newman, M., Di Lorenzo, E., Yu, J., Braconnot, P., Cole, J., Dewitte, B., Giese, B., Guilyardi, E., Jin, F., Karnauskas, K., Kirtman, B., Lee, T., Schneider, N., Xue, Y., & Yeh, S. (2014). Understanding ENSO diversity. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, *96*(6), 921-938. https://doi.org/10.1175/bams-d-13-00117.1

- Carvajal Escobar, Y. (2019). Efectos de la Variabilidad Climática (vc) y el Cambio Climático (cc) en los Recursos Hídricos de Colombia. *Entre Ciencia E Ingeniería*, *5*(9), 33 - 61. Recuperado a partir de https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/689

  Carvajal-Escobar, Y., Jiménez, H., Materon, H., 1998. Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca-Colombia. Bull. Insti. Fr. études Andin. 27.

- *Catálogos de Objetos Geográficos*. (2017b). IDESC. https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/145726/catalogos_objetos_geograficos_idesc/

- CDKN, (2012). ANÁLISIS INTERINSTITUCIONAL Y MULTISECTORIAL DE VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CAUCA IMPACTANDO POLÍTICAS DE ADAPTACIÓN.
- Cearreta, A. (2019). El cambio climático durante el Antropoceno. Euskonews, 739, 1–4.
- Cerón, W. L., Kayano, M. T., Ocampo-Marulanda, C., Canchala, T., Rivera, I. A., Avila-Diaz, A., Andreoli, R. V., & de Souza, I. P. (2021). Spatio-Temporal Variability of Hydroclimatology in the Upper Cauca River Basin in Southwestern Colombia: Pre- and Post-Salvajina Dam Perspective. *Atmosphere*, *12*(11), 1527. https://doi.org/10.3390/atmos12111527
- *Coeficiente de correlación*. (2021, septiembre 22). Jmp.com. https://www.jmp.com/es_co/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation/correlation-coefficient.html
- COMPARACIÓN DE LOS INTERPOLADORES IDW Y KRIGING EN LA VARIACIÓN ESPACIAL DE H, C, CICE P DEL SUELO1
- CVC - Secretaría de Ambiente, Agricultura y Pesca- CIAT, (2018). Plan Integral de Cambio Climático para el Valle del Cauca, 2018. CVC.
- Davybida, L., Worsa-Kozak, M., Górniak-Zimroz, J., & Michalak, A. (2021). Spatial and temporal trend analysis of meteorological, hydrological and hydrogeological data (by the example of the San river basin). *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021»*.
- de Prensa, S. (s/f). *Estudio Nacional del Agua revela datos claves para el uso del recurso hídrico en el país*. Gov.co. Recuperado el 5 de enero de 2025, de https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4223-estudio-nacional-del-agua-revela-datos-claves-para-el-uso-del-recurso-hidrico-en-el-pais

- Diario Occidente. (2019, 3 septiembre). *Cambio climático: factor clave para las extremas temperaturas en el Valle*. https://occidente.co/regionales/valle-del-cauca/cambio-climatico-factor-clave-para-las-extremas-temperaturas-en-el-valle/
- Domínguez, D., & Gómez, H. (2016). *IMPLEMENTACIÓN DE UN GEOVISOR DE MAPAS PARA LA VISUALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTO DE MASA E INUNDACIÓN , PRUEBA PILOTO DEL BARRIO TRECE DE NOVIEMBRE EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN. [Tesis de Pregrado inédita].* Universidad de Manizales.
- Efectos de la Variabilidad Climática (vc) y el Cambio Climático (cc) en los Recursos Hídricos de Colombia. (2011). *Entre Ciencia E Ingeniería*, *5*(9), 33-61. https://doi.org/10.31908/19098367.689
- Ekwueme, B., & Agunwamba, J. (2021). Trend Analysis and Variability of Air Temperature and Rainfall in Regional River Basins. *Civil Engineering Journal*, 7, 816-826. https://doi.org/10.28991/CEJ-2021-03091692.
- EL CAMBIO CLIMÁTICO Y FENÓMENO METEOROLÓGICO “EL NIÑO” CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – CVC Santiago de Cali. CVC, 2014. 30 p.: il.
- Erazo Navia, D. (2019). Webmapping usado para la gestión del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia. Entorno Geográfico, (18). DOI: 10.25100/eg.v0i18.8605.
- Escoto Castillo, A., Sánchez Peña, L., & Gachuz Delgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*, *32*(3), 669-693.

- García Vargas, J. M., Fuentes López, H. J., & Contreras Bravo, L. E. (2022). Diseño de un sistema de información geográfica web en el sector de los combustibles usando ArcGIS Online. *Boletâin Redipe*, *10*(13), 696–713. https://doi.org/10.36260/rbr.v10i13.1782
- García, M., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F., & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista De IngenieríA, 0*(36), 60-64. doi:10.16924/riua.v0i36.136
- García-Hidalgo, Y. (2017). ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO CON FINES DE RIEGO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO NARANJO, CUBA. *Revista Geográfica De América Central*, *1*(58), 315 - 330. https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.13
- Gomariz Castillo, F., Baraza Martínez, F., & et al. (2004). *Propuesta de un Sistema de Información Geográfica para su uso en la gestion de zonas costeras*. SIGTE IV Jornada de SIG libre, 1-13.
- GOMARIZ, F.; MORENO, J.; CANOVAS, F. y ALONSO, F (2009), *Implantación de un Sistema de Información Geográfica basado en software libre para el estudio de recursos hídricos y procesos hidrológicos.*
- Gómez Martínez, G. (2025). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos y calidad del agua en cuencas mediterráneas. Aplicación en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (España) (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- *Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth*

*Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422, doi:10.1017/9781009157896.004.*

- *Guzmán Guaraca, A., Morales León, V., Córdova Lliquin, J., & Suárez Cedillo, S. (2024). Impacto del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos. Polo del Conocimiento, 9(8), 2571-2589. doi:https://doi.org/10.23857/pc.v9i8.7840*
- IDEAM, 2011. Metodología para el Análisis de Vulnerabilidad y Análisis de Riesgos Asociados en la Cuenca alta del Río Cauca.
- IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010.
- IDEAM - UNAL, Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C., 2018.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2023). Hoja metodológica del Índice de Aridez (Versión 1,3). 26p
- Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F. (2005). Impactos sobre los recursos hídricos.
- IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA 7. IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS Alfredo Iglesias, Teodoro Estrela y Francesc Gallart Contribuyentes J. Andreu Alvarez, L. Hernández Barrios, M. A. Pérez Martín Revisores E. Custodio Gimena, F. Ayala Carcedo, V. Fabregat Ventura, O. Llorens García 3032

- IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América
- Jiménez, F; Velásquez, S; Faustino, J. 2004. Análisis integral de la vulnerabilidad a amenazas naturales en cuencas hidrográficas de América Central. In CATIE. VI Semana Científica, Resúmenes. Turrialba, CR, CATIE. p. 50-53.
- Lopez, A., & Rodriguez, K. (2017). GeoCC Mosquera: Geovisor para la divulgación de la información de Cambio Climático en el municipio de Mosquera.
- MacEachren, A. M & Kraak, Menno-Jan. (2001). Research Challenges in Geovisualization. Cartography and Geographic Information Science, volume (28), 3-12. Recuperado de http://www-tandfonline-com.ezproxy.unal.edu.co/doi/abs/10.1559/152304001782173970.
- Magaña, V., Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante el cambio climático, México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2012, 62 P
- MAGRIN, G.; GAY, C.; CRUZ, J.; GIMÉNEZ, A.; MORENO, G.; NAGY, C.; VILLAMIZAR, A. 2007. Latin America. Climate Change. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. 976p.
- Tabari, H., & Aghajanloo, M. (2013). Temporal pattern of aridity index in Iran with considering precipitation and evapotranspiration trends. *International Journal of Climatology*, 33. https://doi.org/10.1002/joc.3432.

- Marin Del Rio, G. A. (2020). Revisión del marco normativo y de política nacional y regional en Cambio Climático.
- Martínez Austria, P., & Patiño Gómez, C. (2010). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México: volumen III: atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.
- Martínez-Austria, Polioptro F., & Patiño-Gómez, Carlos. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, *3*(1), 5-20. Recuperado en 30 de diciembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001&lng=es&tlng=es.
- Másmela, A. P., & Medina, W. R. (2023). Implementación de un geovisor web para la divulgación y monitoreo del volcán Nevado Santa Isabel.
- Mecon Castillo, M. T. (2016). Análisis de la vulnerabilidad en fuentes hídricas superficiales abastecedoras de acueductos frente al cambio climático en la cuenca del río Subia en los municipios de Fusagasuga, Granada y Silvania.
- Mendoza A., A. y López, R. (2018).Bases de datos. Disponible en https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151632
- MENZEL, L.; BURGER, G. 2002. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (southern Elbe, Germany). J. Hydrol. 267(1-2):53-64. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00139-7
- MUZIK, I. 2002. A first-order analysis of the climate change effect on the flood frequencies in a sub-alpine watershed by means of a hydrological rainfall-runoff model. J. Hydrol. 267(1-2):65-73. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00140-3
- Ortega, C. (2019, mayo 28). *¿Qué es el coeficiente de correlación de Pearson?* QuestionPro.
- Alencar da Silva Alves, K. M., & Silva Nóbrega, R. (2017). RAINFALL TENDENCIES AND SEASONAL RAINFALL CONCENTRATION IN RIO MOXOTÓ WATERSHED - PERNAMBUCO – BRAZIL. *Geographical Journal of Central America*, *1*(58), 295-313. https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.12

- Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC). “Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” Suiza: IPCC, 2007, pp. 25-46.
- Quan, C., Han, S.-L., Utescher, T., Zhang, C., & Liu, Y. (2013). Validation of temperature–precipitation based aridity index: Paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 386,* 86-95.
- Pham, Tung & Huynh Van, Chuong & Tran, Phuong & Thi Minh Chau, Tran & Đức, Nguyễn. (2016). Impact of power value in IDW interpolation method on accuracy of the soil organic matter (SOM) mapping.
- Pirnia, A., Golshan, M., Darabi, H., Adamowski, J., & Rozbeh, S. (2019). Using the Mann–Kendall test and double mass curve method to explore stream flow changes in response to climate and human activities. *Journal of Water and Climate Change*, *10*(4), 725–742. https://doi.org/10.2166/wcc.2018.162
- Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Departamento de Cauca. UT CAEM-E3 (consultor). Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016.
- ·*Plataforma Colaborativa 2 Cuenca Alta del Río Cauca* -. (2022, agosto 18). Gov.co. https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico__trashed/plataformas-colaborativas/plataforma-colaborativa-2-cuenca-alta-del-rio-cauca/
- PNUMA, (2006). *El PNUMA en 2006.* Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2006.

- POMCA. (2017). FORMULACIÓN DEL POMCA DE LA CUENCA ALTO RIO CAUCA [Archivo PDF]
- *Qué son los Metadatos*. (2017). Geoidep. https://www.geoidep.gob.pe/catalogo-metadatos/que-son-los-metadatos
- Rodas Guizado, F. (2022). *Evaluación del cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina - Tacna*.
- Rojas Chuyán, W. (2024). *Impacto del cambio climático sobre el recurso hídrico en la cuenca Amojú, provincia de Jaén-Cajamarca, periodo 2030-2060* (Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca)
- Romero Coca, J. A. *Impacto del cambio climático sobre el balance hídrico en una zona de bosque húmedo tropical* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

- Saffari, Mahboub & Yasrebi, Jafar & Fathi, Hamed & Karimian, N. & Moazallahi, Masome & Gazni, Reza. (2009). Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil

- Chemical Parameters. Research Journal of Biological Sciences. 4. 93-102.
- SÁNCHEZ, F. J. (2022).- *Hidrología Superficial y Subterránea*. 2ª ed. Kindle Direct Publishing., 440 pp.
- Sedano Cruz, R. K. (2017). *Influencia de la variabilidad climática en la modelación estadística de extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca, Colombia* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Su, X., Singh, V.P., Niu, J. *et al.* Spatiotemporal trends of aridity index in Shiyang River basin of northwest China. *Stoch Environ Res Risk Assess* 29, 1571–1582 (2015). https://doi.org/10.1007/s00477-015-1082-9
- *un Sistema de Información Geográfica basado en software libre para el estudio de recursos hídricos y procesos hidrológicos*. III Jornadas de SIG libre, Gerona.
- UNESCO, ONU-Agua, 2020: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.
- UNFCC; Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; Naciones Unidas, Río de Janeiro, 1992.

- Valencia, M., A. Figueroa, D. Ruiz, J. Otero, J. Martínez, V. Ceballos y D. González. 2014. Metodológica para el análisis de vulnerabilidad en cuencas abastecedoras de agua ante la variabilidad climática
- VARGAS, A., SANTOS, A., CÁRDENAS, E., & OBREGÓN, N. (2011). ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN E INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LAS LLUVIAS EN BOGOTÁ, COLOMBIA. Dyna, 78(167), 151-159.
- Vargas-Franco, V., & Restrepo-Tarquino, I. (2018). Construcción de índice con inteligencia artificial para evaluar vulnerabilidad al cambio climático en microcuencas andinas tropicales. Caso de estudio en Colombia. Dyna, 85(204), 194–203. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67048
- Vera, C., & Camilloni, I. (2010). Ciencias Naturales. El ciclo del agua. E.Explora, 2–
- Zhong, F., Cheng, Q., & Ge, Y. (2019). Relationships between Spatial and Temporal Variations in Precipitation, Climatic Indices, and the Normalized Differential Vegetation Index in the Upper and Middle Reaches of the Heihe River Basin, Northwest China. *Water*. https://doi.org/10.3390/W11071394.

**Anexos**

| Código | Nombre | Altitud | Latitud | Longitud |
|---|---|---|---|---|
| 26105230 | Mateguadua | 1119 | 4° 1' 41.9" | 76° 10' 6.7" |
| 26025100 | Tunia | 1822 | 2° 40' 28.09" | 76° 31' 34.79" |
| 26065020 | Miranda | 1133 | 3° 14' 44.4" | 76° 13' 23" |
| 26045010 | Ingenio Bengala | 983 | 3° 15' 46.10" | 76° 24' 52.09" |
| 26105150 | San Marcos | 1011 | 4° 14' 20.1" | 76° 1' 59" |
| 26105110 | Ingenio Riopaila | 954 | 4° 19' 28.2" | 76° 5' 4.3" |
| 26025090 | Venta de Cajibio | 1850 | 2° 35' 5.1" | 76° 33' 42.6" |
| 26025110 | Lomitas | 1009 | 3° 4' 31.4" | 76° 33' 22.5" |
| 26035030 | Aeropuerto Guillermo León Valencia | 1752 | 2° 27' 10.4" | 76° 36' 31.5" |
| 26095080 | Tenerife | 2628 | 3° 43' 47.9" | 76° 4' 29.2" |
| 26105140 | Barragan | 2902 | 4° 1' 59.00" | 75° 53' 16.9" |

*Anexo 1: Estaciones de temperatura. Fuente: IDEAM*

| Código | Nombre | Altitud | Latitud | Longitud |
|---|---|---|---|---|
| 26055120 | Universidad del Valle - AUT | 996 | 3° 22' 40.8" | 76° 32' 2" |
| 26110120 | Villa Nueva | 1341 | 4° 58' 15.899" | 76° 2' 18.7" |
| 26080310 | Cali sede IDEAM | 983 | 3° 28' 33.499" | 76° 9' 8.29" |
| 26010030 | Puracé | 2652 | 2° 22' 51.1" | 76° 27' 17.2" |
| 26030050 | Tambo | 1742 | 2° 27' 21.499" | 76° 48' 39.99" |
| 26020180 | Sate | 1742 | 2° 29' 46.5" | 76° 38' 18.099" |
| 26020130 | Totoro | 2427 | 2° 32' 30.599" | 76° 25' 7.701" |
| 26080290 | Mediacanoa - Alertas | 962 | 3° 53' 27.2" | 76° 21' 2.998" |
| 26110160 | San Francisco | 974 | 4° 41' 5.5" | 76° 2' 8.59" |
| 26100830 | Palmasola | 940 | 4° 41' 18.3" | 75° 57' 42" |
| 26020230 | Rosario EL | 1767 | 2° 36' 20.016" | 76° 45' 21.898" |
| 26020020 | Silvia Pta Electric | 2446 | 2° 37' 28.801" | 76° 20' 56.9" |
| 26020030 | Piendamo | 1872 | 2° 38' 33.698" | 76° 32' 9.9" |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 26105230 | Mateguadua | 1119 | 4° 1' 41.9" | 76° 10' 6.7" |
| 26100350 | Puerto Frazadas | 1657 | 4° 3' 15.7" | 75° 59' 41.099" |
| 26100790 | Italia La | 2809 | 4° 3' 25.999" | 75° 48' 20.7" |
| 26025100 | Tunia | 1822 | 2° 40' 28.099" | 76° 31' 34.798" |
| 26030070 | Dinde | 1246 | 2° 41' 50.701" | 76° 45' 16.99" |
| 26020220 | Morales | 1692 | 2° 46' 9.901" | 76° 37' 27.098" |
| 26100700 | Pardo | 1314 | 4° 5' 14.1" | 76° 6' 2.901" |
| 26100770 | Ceilan | 1382 | 4° 6' 51.502" | 76° 2' 33.1" |
| 26065020 | Miranda | 1133 | 3° 14' 44.401" | 76° 13' 23.001" |
| 26045010 | Ingenio Bengala | 983 | 3° 15' 46.10" | 76° 24' 52.09" |
| 26100780 | Zarzal | 953 | 4° 22' 59.002" | 76° 4' 24.599" |
| 26105150 | San Marcos | 1011 | 4° 14' 20.1" | 76° 1' 59" |
| 26020120 | Caloto | 1136 | 3° 1' 48.299" | 76° 24' 24.001" |
| 26020470 | Japio | 1041 | 3° 2' 54.1" | 76° 26' 29.101" |
| 26100410 | Galicia | 1191 | 4° 10' 18.8" | 76° 3' 23" |
| 26040310 | Rio Palo | 1090 | 3° 4' 14.2" | 76° 22' 40.198" |
| 26100400 | Alcazar El | 17 | 4° 18' 36" | 76° 1' 11.99" |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 26105110 | Ingenio Riopaila | 954 | 4° 19' 28.2" | 76° 5' 4.3" |
| 26020390 | Ovejas Abajo Alert | 1546 | 2° 51' 13.799" | 76° 35' 18.99" |
| 26020250 | Mondomo | 1397 | 2° 54' 13.298" | 76° 32' 49.099" |
| 26050270 | Silencio El | 1156 | 3° 6' 56.3" | 76° 43' 9.901" |
| 26060030 | Villa Rica | 988 | 3° 10' 44.198" | 76° 27' 46.799" |
| 26030090 | Remolino | 1628 | 2° 30' 54" | 76° 49' 46.99" |
| 26020100 | Buenos Aires | 1228 | 3° 1' 12.698" | 76° 38' 20.698" |
| 26110040 | Bolivar | 972 | 4° 20' 34.598" | 76° 11' 25.598" |
| 26025090 | Venta de Cajibío | 1850 | 2° 35' 5.1" | 76° 33' 42.6" |
| 26025110 | Lomitas | 1009 | 3° 4' 31.4" | 76° 33' 22.5" |
| 26030150 | Salvajina La | 1171 | 2° 56' 35.999" | 76° 42' 24.998" |
| 26020160 | Catalina La | 1441 | 2° 56' 42.601" | 76° 39' 6.3" |
| 26020200 | Amparo El | 1197 | 2° 57' 40.201" | 76° 29' 21.098" |
| 26040260 | Toribio Alertas | 1774 | 2° 57' 8.5" | 76° 15' 43.999" |
| 26100070 | Lucerna Hacienda | 964 | 4° 13' 25.702" | 76° 8' 50.301" |
| 26090630 | Guacarí | 990 | 3° 46' 12.5" | 76° 19' 54.998" |
| 26090060 | Juntas Las | 1826 | 3° 46' 23.599" | 76° 9' 56.001" |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 26110230 | Isugu | 933 | 4° 25' 7.201" | 76° 6' 1.9" |
| 26040290 | Aguada La | 2093 | 2° 52' 49.901" | 76° 24' 26.999" |
| 26010020 | Coconuco | 2419 | 2° 20' 36.1" | 76° 29' 43.8" |
| 26050060 | Suarez | 1095 | 2° 57' 16.402" | 76° 41' 45.999" |
| 26020320 | Termales Pilimbala | 3482 | 2° 21' 47.099" | 76° 24' 14.601" |
| 26080070 | Vijes | 974 | 3° 41' 54.701" | 76° 25' 46.999" |
| 26110300 | Ceros | 940 | 4° 36' 59" | 76° 2' 3.998" |
| 26100300 | Obando | 986 | 4° 35' 19" | 75° 57' 56.998" |
| 26060020 | Cabuyal | 1003 | 3° 19' 12.799" | 76° 20' 47.799" |
| 26020460 | Polindara | 2507 | 2° 29' 15.299" | 76° 24' 16.801" |
| 26080280 | Pichinde | 1637 | 3° 26' 17.498" | 76° 36' 5.601" |
| 26090460 | Paraíso El | 1305 | 3° 38' 59.999" | 76° 11' 59.999" |
| 26100740 | San Pedro | 949 | 4° 30' 56.3" | 76° 2' 26.001" |
| 26110290 | Arboleda La | 959 | 4° 31' 53.8" | 76° 5' 36.9" |
| 26070170 | Esperanza Pradera | 1055 | 3° 31' 37.898" | 76° 12' 38.998" |
| 26070760 | Florida | 1059 | 3° 19' 40.001" | 76° 14' 20.9" |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 26100690 | Placer El | 2132 | 3° 52' 44.198" | 76° 6' 2.001" |
| 26105140 | Barragan | 2902 | 4° 1' 59.00" | 75° 53' 16.9" |
| 26110150 | Inmaculada La | 960 | 4° 47' 37.799" | 75° 59' 11.4" |
| 26025070 | Gabriel Lopez | 3071 | 2° 30' 35.1" | 76° 17' 20.601" |

*Anexo 2: Estaciones de precipitación. Fuente: IDEAM*

```python
import arcpy
import pandas as pd
import os

# Parámetros
input_excel = r"C:\Users\labor\Documents\Tesis\tabla_parametros_temperatura.xlsx"
output_folder_base = r"C:\forero\Rasters"   # Carpeta base de salida

# Leer datos de la tabla de Excel
df = pd.read_excel(input_excel)

# Iterar sobre los datos de la tabla
for index, row in df.iterrows():
    year = row['Año']
    month = row['Mes']
    variable = row['Variable']  # TMN, TMX o TP según la tabla
    factor = row['Factor']      # Ajuste altitudinal

    # Ruta al ráster IDW
    idw_raster = rf"ModelBuilder\{variable}\{variable}_{year}\{year}_{month}"

    # Crear carpeta de salida para el año si no existe
    output_folder = os.path.join(output_folder_base, variable, str(year))
    if not os.path.exists(output_folder):
        os.makedirs(output_folder)
        print(f"Carpeta creada: {output_folder}")

    # Ruta del ráster de salida
    output_raster = os.path.join(output_folder, f"{variable}_{year}_{month}.tif")

    # Cálculo en la calculadora ráster con demmetros fijo
    expression = f'"{idw_raster}" + ({factor} * ("demmetros" - 0))'

    # Ejecutar Raster Calculator
    arcpy.sa.RasterCalculator(expression).save(output_raster)
    print(f"Ráster generado: {output_raster}")

print("Proceso completado.")
```

*Anexo 3: Código de ajuste altitudinal. Fuente: elaboración propia*

ensayo.py > ...

```python
import pandas as pd
import pymannkendall as mk
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Crear la matriz de datos
matriz = {
    'Mes': ['ENE', 'FEB', 'MAR', 'ABR', 'MAY', 'JUN', 'JUL', 'AGO', 'SEP', 'OCT', 'NOV', 'DIC', 'TOTAL'],
    2017: [163.0, 53.0, 338.0, 222.0, 234.0, 170.0, 52.0, 58.0, 173.0, 149.0, 247.0, 250.0, 2109.0],
    2018: [100.0, 100.0, 220.0, 187.0, 280.0, 120.0, 127.0, 62.0, 131.0, 235.0, 280.0, 70.0, 1912.0],
    2019: [91.0, 172.0, 185.0, 317.3, 381.0, 77.0, 45.0, 10.0, 200.0, 168.5, 205.0, 290.0, 2141.8],
    2020: [70.0, 190.0, 86.0, 305.0, 110.0, 95.0, 119.0, 100.0, 138.0, 170.0, 215.0, 135.0, 1733.0],
    2021: [199.0, 252.0, 306.0, 205.0, 228.0, 170.0, 40.0, 155.0, 125.0, 215.0, 240.0, 160.0, 2295.0],
    2022: [65.0, 430.0, 230.0, 266.0, 187.0, 271.0, 94.0, 55.5, 109.3, 218.0, 227.2, 170.9, 2324.0]
}

# Cargar la matriz en un DataFrame
df_matriz = pd.DataFrame(matriz)

# Análisis mensual: Tendencia para cada mes en todos los años
pendientes_sen = []
print("Análisis Mensual:")
for _, row in df_matriz.iterrows():
    mes = row['Mes']
    valores = row[1:]  # Excluir la columna "Mes"
    resultado = mk.original_test(valores)
    pendientes_sen.append(resultado.slope)  # Guardar la pendiente de Sen para la gráfica
    print(f"\nMes: {mes}")
    print(f"Tendencia: {resultado.trend}")
    print(f"P-valor: {resultado.p}")
    print(f"Estadístico Z: {resultado.z}")
    print(f"Estimador de pendiente de Sen: {resultado.slope}")

# Calcular los promedios anuales
promedios_anuales = df_matriz.iloc[:, 1:].mean(axis=0).reset_index()
promedios_anuales.columns = ['Año', 'Promedio_Anual']

# Análisis anual: Tendencia en los promedios anuales
print("\nAnálisis Anual:")
resultados_anuales = mk.original_test(promedios_anuales['Promedio_Anual'])
print(f"Tendencia Anual: {resultados_anuales.trend}")
print(f"P-valor: {resultados_anuales.p}")
print(f"Estadístico Z: {resultados_anuales.z}")
print(f"Estimador de pendiente de Sen: {resultados_anuales.slope}")

# Graficar la tendencia anual
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(promedios_anuales['Año'], promedios_anuales['Promedio_Anual'], marker='o', label='Promedio Anual')
```

*Anexo 4: Código de prueba de Mann-Kendall. Fuente: elaboración propia*

```
plt.title('Tendencia Anual de Temperatura')
plt.xlabel('Año')
plt.ylabel('Temperatura (°C)')
plt.grid()
plt.legend()
plt.show()

# Graficar las tendencias mensuales
plt.figure(figsize=(12, 8))
colores = plt.cm.tab20.colors  # Colores distintos de la paleta tab20
for i, (_, row) in enumerate(df_matriz.iterrows()):
    mes = row['Mes']
    plt.plot(df_matriz.columns[1:], row[1:], marker='o', label=mes, color=colores[i % len(colores)])

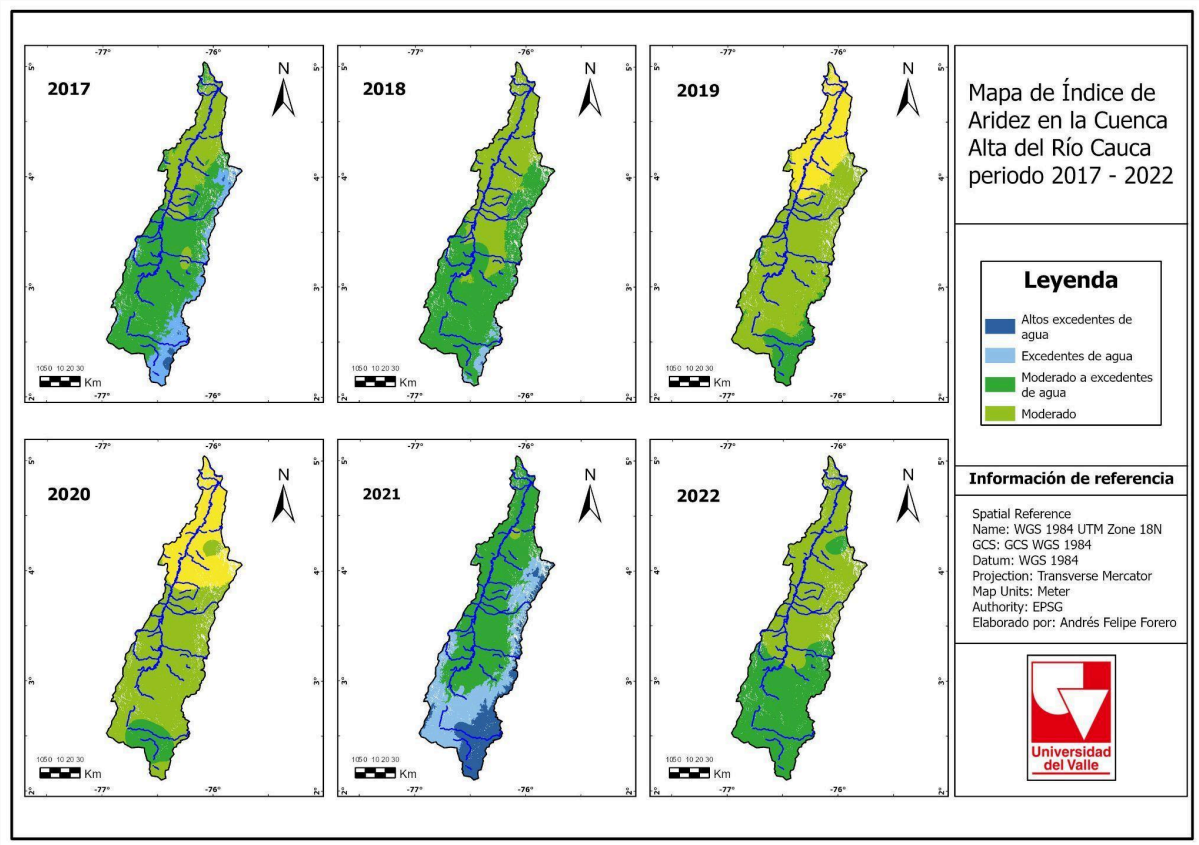
plt.title('Tendencias Mensuales de Temperatura')
plt.xlabel('Año')
plt.ylabel('Temperatura (°C)')
plt.grid()
plt.legend(title='Mes', bbox_to_anchor=(1.05, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
plt.tight_layout()
plt.show()

# Graficar las pendientes de Sen
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.bar(df_matriz['Mes'], pendientes_sen, color='skyblue')
plt.axhline(0, color='red', linestyle='--', label='Sin tendencia')
plt.title('Pendiente de Sen por Mes', fontsize=14)
plt.ylabel('Pendiente de Sen', fontsize=12)
plt.xlabel('Mes', fontsize=12)
plt.xticks(rotation=45)
plt.legend()
plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

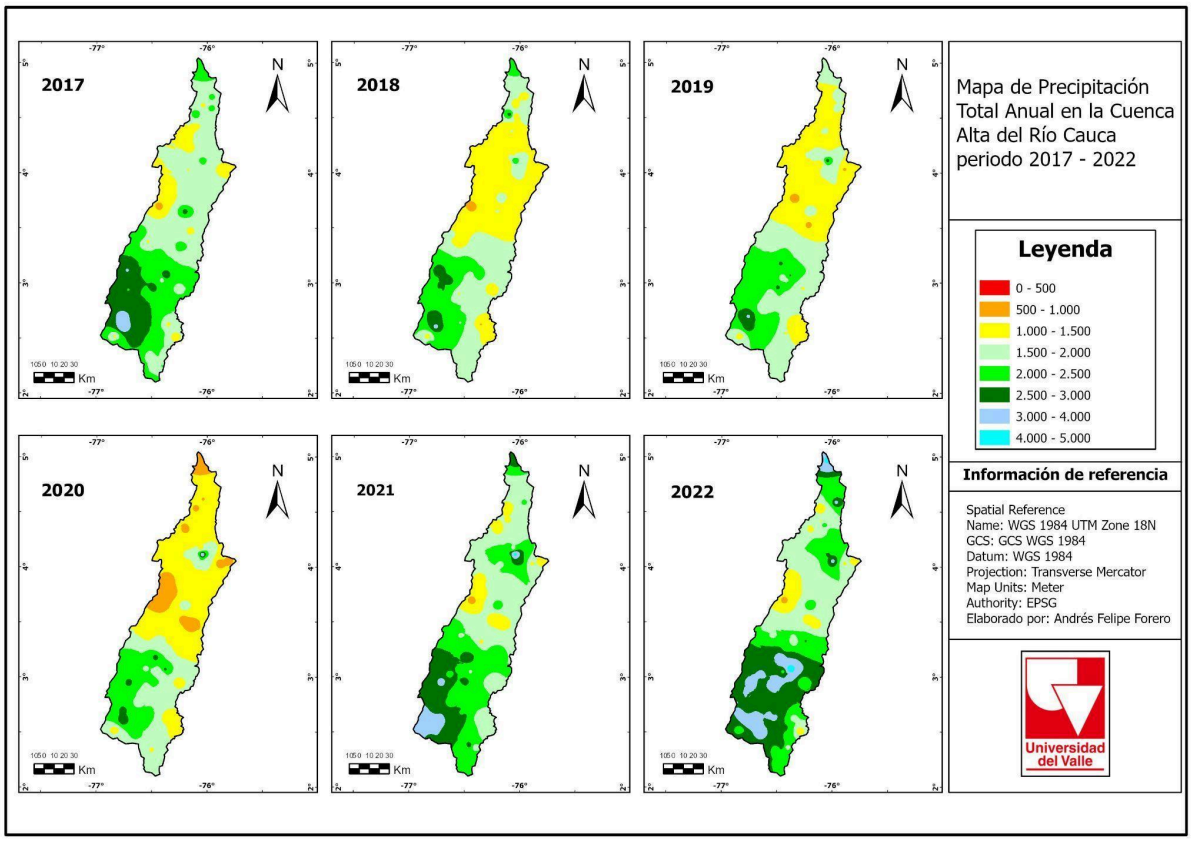
*Anexo 5: Código de prueba de Mann-Kendall. Fuente: elaboración propia*

| | HEMISFERIO NORTE | | | | | | | | | | | | HEMISFERIO SUR | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Latitud | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| 70 | 0.0 | 1.1 | 4.2 | 9.4 | 14.4 | 17.3 | 16.1 | 11.4 | 6.1 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 16.9 | 11.7 | 6.4 | 2.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 4.4 | 9.6 | 15.2 | 18.5 |
| 68 | 0.0 | 1.5 | 4.8 | 9.8 | 14.4 | 17.1 | 15.9 | 11.7 | 6.6 | 2.4 | 0.3 | 0.0 | 16.7 | 12.0 | 6.9 | 2.4 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 1.3 | 4.9 | 10.0 | 15.3 | 18.2 |
| 66 | 0.2 | 2.0 | 5.3 | 10.1 | 14.5 | 16.9 | 15.8 | 12.0 | 7.1 | 2.9 | 0.6 | 0.0 | 16.7 | 12.2 | 7.4 | 2.9 | 0.6 | 0.0 | 0.2 | 1.7 | 5.3 | 10.4 | 15.3 | 18.0 |
| 64 | 0.6 | 2.4 | 5.8 | 10.5 | 14.7 | 16.8 | 15.8 | 12.2 | 7.5 | 3.5 | 1.0 | 0.2 | 16.7 | 12.6 | 7.9 | 3.4 | 1.0 | 0.2 | 0.5 | 2.2 | 5.9 | 10.7 | 15.5 | 17.9 |
| 62 | 0.9 | 2.9 | 6.3 | 10.9 | 14.8 | 16.8 | 15.9 | 12.5 | 8.0 | 4.0 | 1.4 | 0.5 | 16.8 | 12.9 | 8.3 | 3.9 | 1.4 | 0.5 | 0.8 | 2.6 | 6.3 | 11.1 | 15.6 | 17.9 |
| 60 | 1.3 | 3.4 | 6.8 | 11.2 | 14.9 | 16.8 | 16.0 | 12.8 | 8.4 | 4.4 | 1.8 | 0.9 | 16.9 | 13.2 | 8.8 | 4.4 | 1.8 | 0.8 | 1.2 | 3.1 | 6.8 | 11.5 | 15.8 | 17.9 |
| 58 | 1.8 | 3.9 | 7.2 | 11.6 | 15.1 | 16.9 | 16.1 | 13.1 | 8.9 | 4.9 | 2.2 | 1.3 | 17.0 | 13.5 | 9.2 | 4.9 | 2.2 | 1.2 | 1.6 | 3.6 | 7.3 | 11.8 | 16.0 | 18.0 |
| 56 | 2.2 | 4.4 | 7.7 | 11.9 | 15.3 | 16.9 | 16.2 | 13.3 | 9.3 | 5.4 | 2.7 | 1.7 | 17.1 | 13.8 | 9.6 | 5.4 | 2.7 | 1.6 | 2.0 | 4.0 | 7.8 | 12.2 | 16.1 | 18.0 |
| 54 | 2.7 | 4.9 | 8.2 | 12.2 | 15.4 | 16.9 | 16.2 | 13.6 | 9.7 | 5.9 | 3.2 | 2.1 | 17.2 | 14.0 | 10.0 | 5.9 | 3.1 | 2.0 | 2.4 | 4.5 | 8.2 | 12.5 | 16.3 | 18.1 |
| 52 | 3.1 | 5.4 | 8.6 | 12.6 | 15.6 | 17.0 | 16.4 | 13.8 | 10.1 | 6.4 | 3.7 | 2.6 | 17.3 | 14.3 | 10.4 | 6.4 | 3.6 | 2.4 | 2.9 | 5.0 | 8.7 | 12.8 | 16.4 | 18.1 |
| 50 | 3.6 | 5.9 | 9.1 | 12.9 | 15.7 | 17.0 | 16.4 | 14.0 | 10.5 | 6.9 | 4.2 | 3.1 | 17.4 | 14.5 | 10.9 | 6.8 | 4.1 | 2.9 | 3.3 | 5.5 | 9.1 | 13.1 | 16.6 | 18.2 |
| 48 | 4.1 | 6.4 | 9.5 | 13.1 | 15.8 | 17.1 | 16.5 | 14.2 | 10.9 | 7.4 | 4.7 | 3.6 | 17.5 | 14.8 | 11.2 | 7.3 | 4.5 | 3.3 | 3.8 | 6.0 | 9.5 | 13.4 | 16.7 | 18.2 |
| 46 | 4.6 | 6.9 | 9.9 | 13.4 | 16.0 | 17.1 | 16.6 | 14.4 | 11.2 | 7.8 | 5.1 | 4.0 | 17.6 | 15.0 | 11.6 | 7.8 | 5.0 | 3.8 | 4.2 | 6.4 | 9.9 | 13.7 | 16.8 | 18.2 |
| 44 | 5.1 | 7.3 | 10.3 | 13.7 | 16.0 | 17.1 | 16.6 | 14.7 | 11.6 | 8.3 | 5.7 | 4.5 | 17.6 | 15.2 | 12.0 | 8.2 | 5.5 | 4.3 | 4.7 | 6.9 | 10.3 | 13.9 | 16.9 | 18.2 |
| 42 | 5.6 | 7.8 | 10.7 | 13.9 | 16.1 | 17.1 | 16.7 | 14.8 | 11.9 | 8.7 | 6.2 | 5.1 | 17.7 | 15.4 | 12.3 | 8.7 | 6.0 | 4.7 | 5.2 | 7.3 | 10.7 | 14.2 | 17.0 | 18.2 |
| 40 | 6.1 | 8.3 | 11.1 | 14.2 | 16.2 | 17.1 | 16.7 | 15.0 | 12.2 | 9.2 | 6.7 | 5.6 | 17.7 | 15.6 | 12.6 | 9.1 | 6.4 | 5.2 | 5.7 | 7.8 | 11.1 | 14.4 | 17.1 | 18.2 |
| 38 | 6.6 | 8.8 | 11.5 | 14.4 | 16.3 | 17.1 | 16.7 | 15.1 | 12.5 | 9.6 | 7.1 | 6.0 | 17.7 | 15.7 | 12.9 | 9.5 | 6.9 | 5.7 | 6.2 | 8.2 | 11.4 | 14.6 | 17.1 | 18.2 |
| 36 | 7.1 | 9.2 | 11.8 | 14.6 | 16.3 | 17.0 | 16.7 | 15.3 | 12.9 | 10.0 | 7.6 | 6.6 | 17.7 | 15.9 | 13.2 | 9.9 | 7.4 | 6.2 | 6.6 | 8.7 | 11.8 | 14.8 | 17.1 | 18.1 |
| 34 | 7.6 | 9.7 | 12.2 | 14.7 | 16.3 | 17.0 | 16.7 | 15.3 | 13.1 | 10.4 | 8.1 | 7.1 | 17.7 | 16.0 | 13.5 | 10.3 | 7.8 | 6.6 | 7.1 | 9.1 | 12.1 | 15.0 | 17.1 | 18.1 |
| 32 | 8.1 | 10.1 | 12.5 | 14.5 | 16.3 | 16.9 | 16.6 | 15.5 | 13.4 | 10.9 | 8.6 | 7.6 | 17.7 | 16.1 | 13.8 | 10.7 | 8.3 | 7.1 | 7.6 | 9.5 | 12.4 | 15.1 | 17.1 | 18.0 |
| 30 | 8.6 | 10.5 | 12.8 | 15.0 | 16.3 | 16.8 | 16.6 | 15.5 | 13.6 | 11.3 | 9.1 | 8.1 | 17.6 | 16.2 | 14.0 | 11.1 | 8.7 | 7.6 | 8.0 | 9.9 | 12.7 | 15.3 | 17.1 | 17.9 |
| 28 | 9.1 | 10.9 | 13.1 | 15.1 | 16.3 | 16.7 | 16.5 | 15.6 | 13.8 | 11.6 | 9.5 | 8.6 | 17.6 | 16.2 | 14.2 | 11.5 | 9.2 | 8.0 | 8.4 | 10.3 | 13.0 | 15.4 | 17.1 | 17.8 |
| 26 | 9.6 | 11.3 | 13.4 | 15.3 | 16.3 | 16.6 | 16.4 | 15.6 | 14.1 | 12.0 | 10.0 | 9.1 | 17.5 | 16.3 | 14.4 | 11.8 | 9.6 | 8.5 | 8.9 | 10.7 | 13.3 | 15.5 | 17.1 | 17.7 |
| 24 | 10.0 | 11.8 | 13.7 | 15.3 | 16.2 | 16.4 | 16.3 | 15.6 | 14.2 | 12.3 | 10.4 | 9.5 | 17.3 | 16.3 | 14.6 | 12.2 | 10.0 | 8.9 | 9.3 | 11.1 | 13.5 | 15.6 | 17.0 | 17.6 |
| 22 | 10.5 | 12.1 | 13.9 | 15.4 | 16.1 | 16.3 | 16.2 | 15.7 | 14.4 | 12.7 | 10.9 | 10.0 | 17.2 | 16.4 | 14.8 | 12.5 | 10.4 | 9.4 | 9.8 | 11.5 | 13.8 | 15.7 | 16.9 | 17.4 |
| 20 | 10.9 | 12.5 | 14.2 | 15.5 | 16.0 | 16.1 | 16.0 | 15.6 | 14.6 | 13.0 | 11.3 | 10.4 | 17.1 | 16.3 | 14.9 | 12.8 | 10.9 | 9.8 | 10.2 | 11.8 | 14.0 | 15.8 | 16.8 | 17.2 |
| 18 | 11.4 | 12.9 | 14.4 | 15.5 | 15.9 | 16.0 | 15.9 | 15.6 | 14.7 | 13.3 | 11.7 | 10.9 | 16.9 | 16.3 | 15.1 | 13.1 | 11.2 | 10.2 | 10.6 | 12.2 | 14.2 | 15.8 | 16.7 | 17.0 |
| 16 | 11.8 | 13.2 | 14.6 | 15.6 | 15.8 | 15.8 | 15.7 | 15.6 | 14.9 | 13.6 | 12.1 | 11.4 | 16.8 | 16.3 | 15.2 | 13.4 | 11.6 | 10.7 | 11.0 | 12.5 | 14.4 | 15.8 | 16.6 | 16.8 |
| 14 | 12.2 | 13.5 | 14.7 | 15.6 | 15.7 | 15.6 | 15.6 | 15.5 | 15.0 | 13.8 | 12.5 | 11.8 | 16.6 | 16.2 | 15.3 | 13.6 | 12.0 | 11.1 | 11.4 | 12.8 | 14.5 | 15.8 | 16.4 | 16.6 |
| 12 | 12.6 | 13.8 | 14.9 | 15.5 | 15.5 | 15.3 | 15.3 | 15.4 | 15.1 | 14.1 | 12.9 | 12.2 | 16.4 | 16.2 | 15.4 | 13.9 | 12.3 | 11.5 | 11.8 | 13.1 | 14.7 | 15.8 | 16.2 | 16.3 |
| 10 | 13.0 | 14.1 | 15.1 | 15.5 | 15.3 | 15.1 | 15.1 | 15.3 | 15.1 | 14.3 | 13.2 | 12.7 | 16.1 | 16.0 | 15.4 | 14.1 | 12.7 | 11.9 | 12.2 | 13.4 | 14.8 | 15.7 | 16.0 | 16.1 |
| 8 | 13.4 | 14.4 | 15.2 | 15.4 | 15.1 | 14.8 | 14.9 | 15.2 | 15.2 | 14.5 | 13.6 | 13.1 | 15.9 | 15.9 | 15.5 | 14.3 | 13.0 | 12.2 | 12.5 | 13.6 | 14.9 | 15.7 | 15.8 | 15.8 |
| 6 | 13.8 | 14.6 | 15.3 | 15.3 | 14.9 | 14.6 | 14.7 | 15.1 | 15.2 | 14.7 | 13.9 | 13.4 | 15.6 | 15.8 | 15.5 | 14.5 | 13.3 | 12.6 | 12.9 | 13.9 | 15.0 | 15.6 | 15.6 | 15.5 |
| 4 | 14.1 | 14.9 | 15.3 | 15.3 | 14.7 | 14.3 | 14.4 | 14.9 | 15.2 | 14.9 | 14.2 | 13.8 | 15.3 | 15.6 | 15.5 | 14.7 | 13.6 | 13.0 | 13.2 | 14.1 | 15.1 | 15.5 | 15.3 | 15.2 |
| 2 | 14.4 | 15.1 | 15.4 | 15.1 | 14.4 | 14.0 | 14.1 | 14.7 | 15.2 | 15.1 | 14.5 | 14.2 | 15.1 | 15.5 | 15.5 | 14.9 | 13.9 | 13.3 | 13.5 | 14.4 | 15.1 | 15.4 | 15.1 | 14.9 |
| 0 | 14.8 | 15.3 | 15.5 | 15.0 | 14.2 | 13.6 | 13.8 | 14.6 | 15.2 | 15.3 | 14.8 | 14.5 | 14.8 | 15.3 | 15.5 | 15.0 | 14.2 | 13.6 | 13.8 | 14.6 | 15.2 | 15.3 | 14.8 | 14.5 |

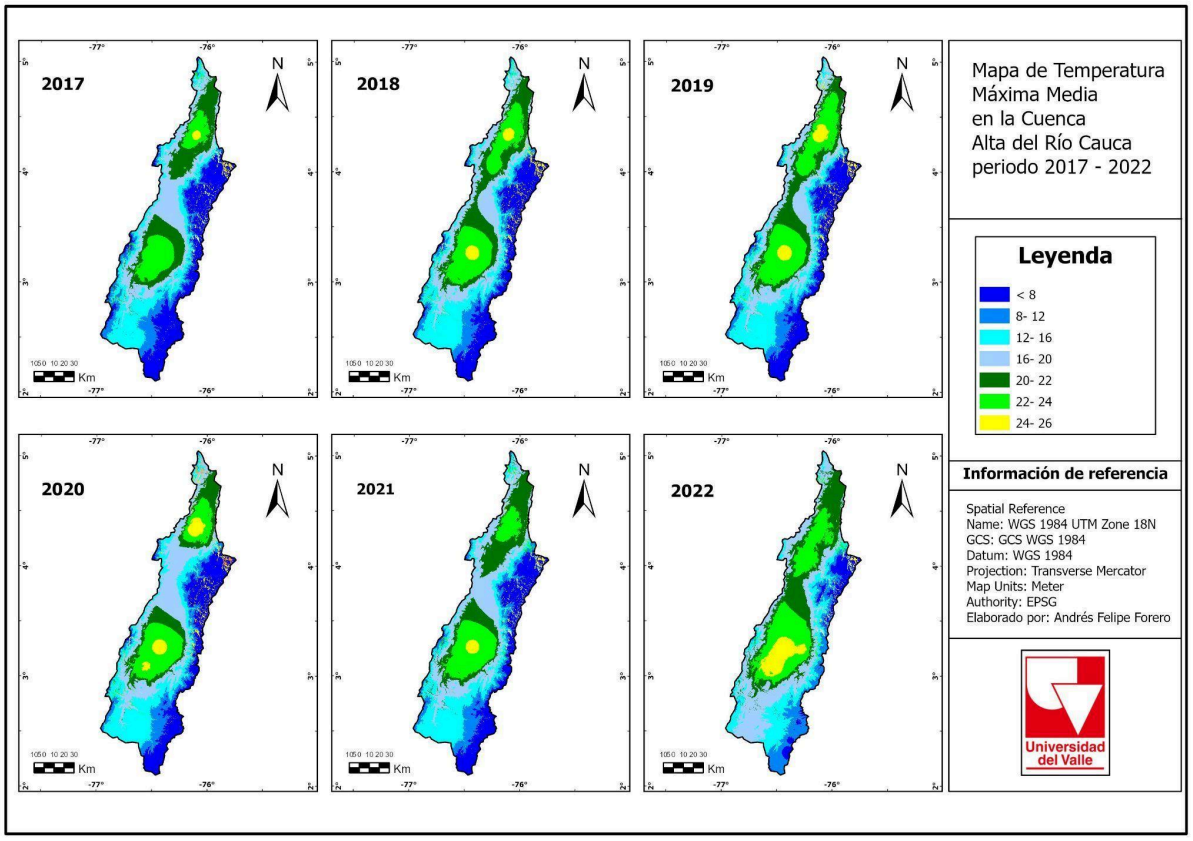
*Anexo 6: Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998). Fuente: SÁNCHEZ, F. J. (2022).- Hidrología Superficial y Subterránea. 2ª ed. Kindle Direct Publishing., 440 pp.*



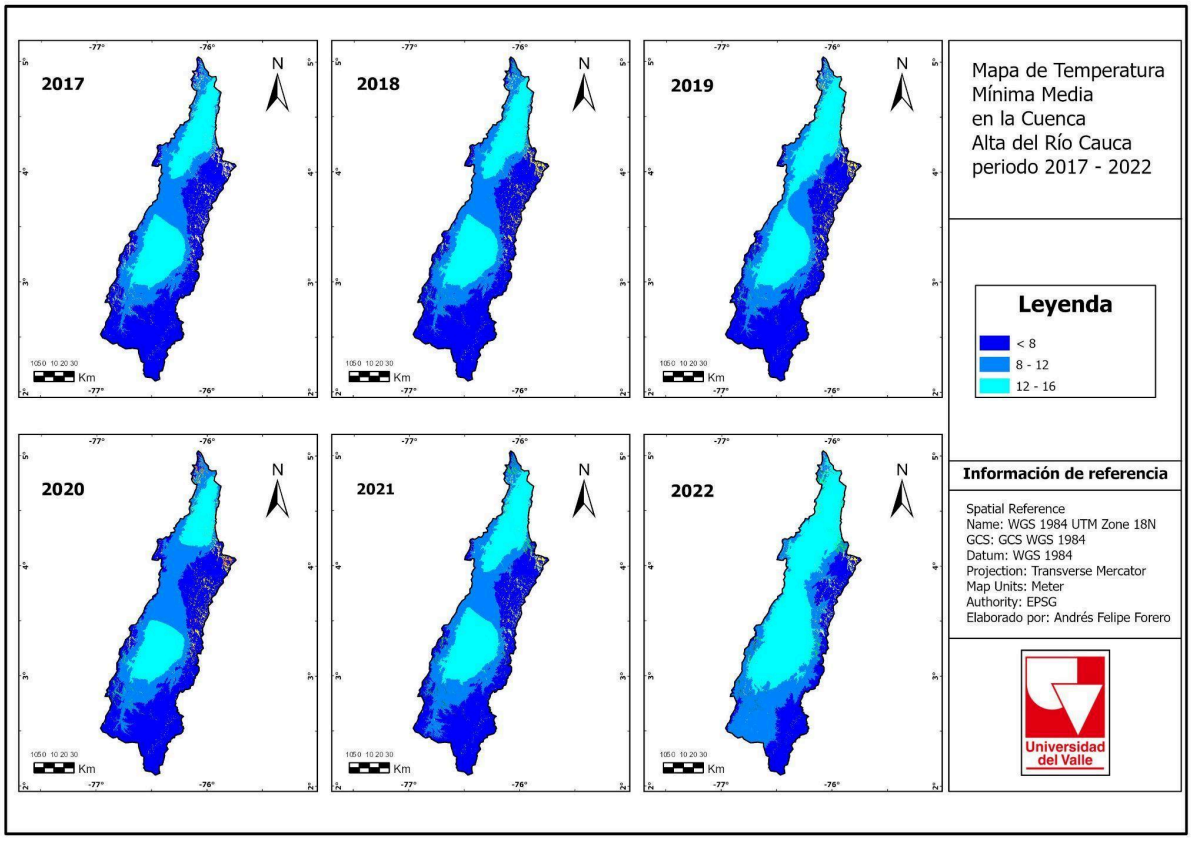

*Anexo 7: Índice de Aridez 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



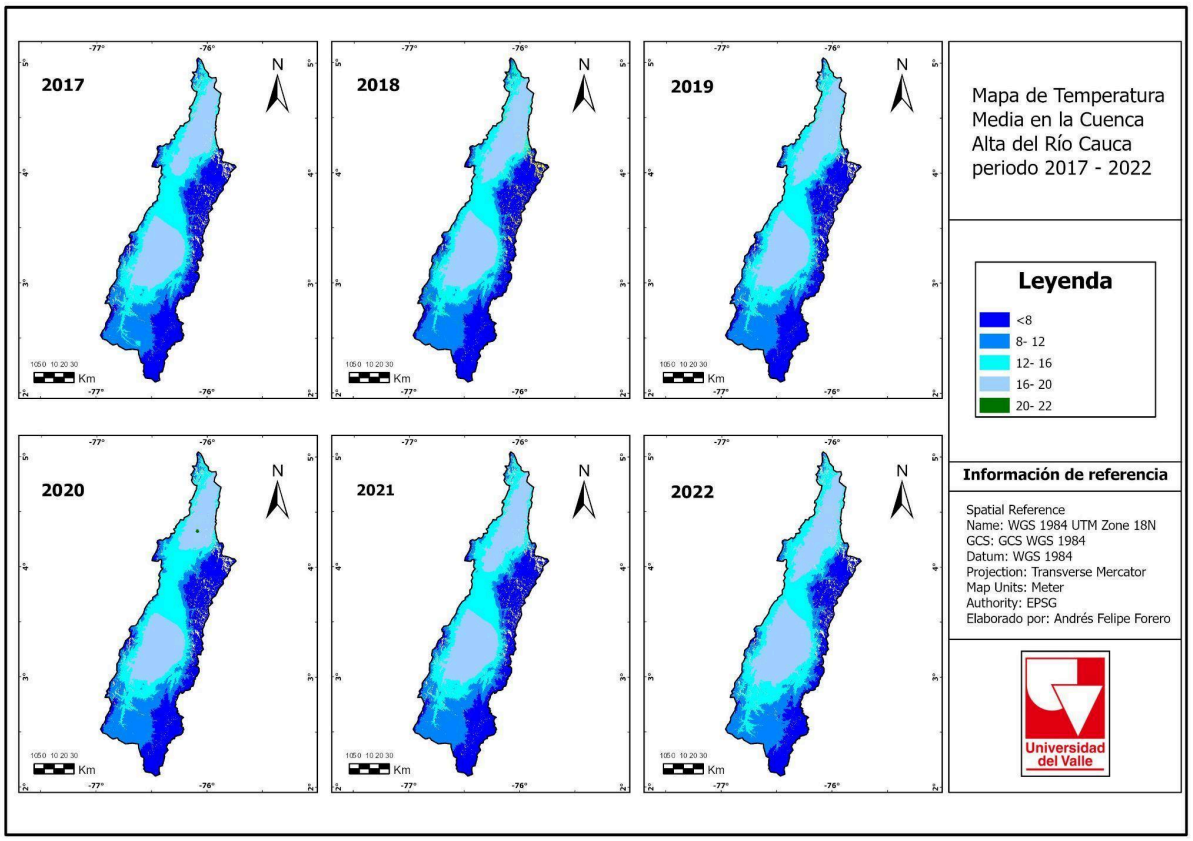

*Anexo 8: Precipitación Total Mensual 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



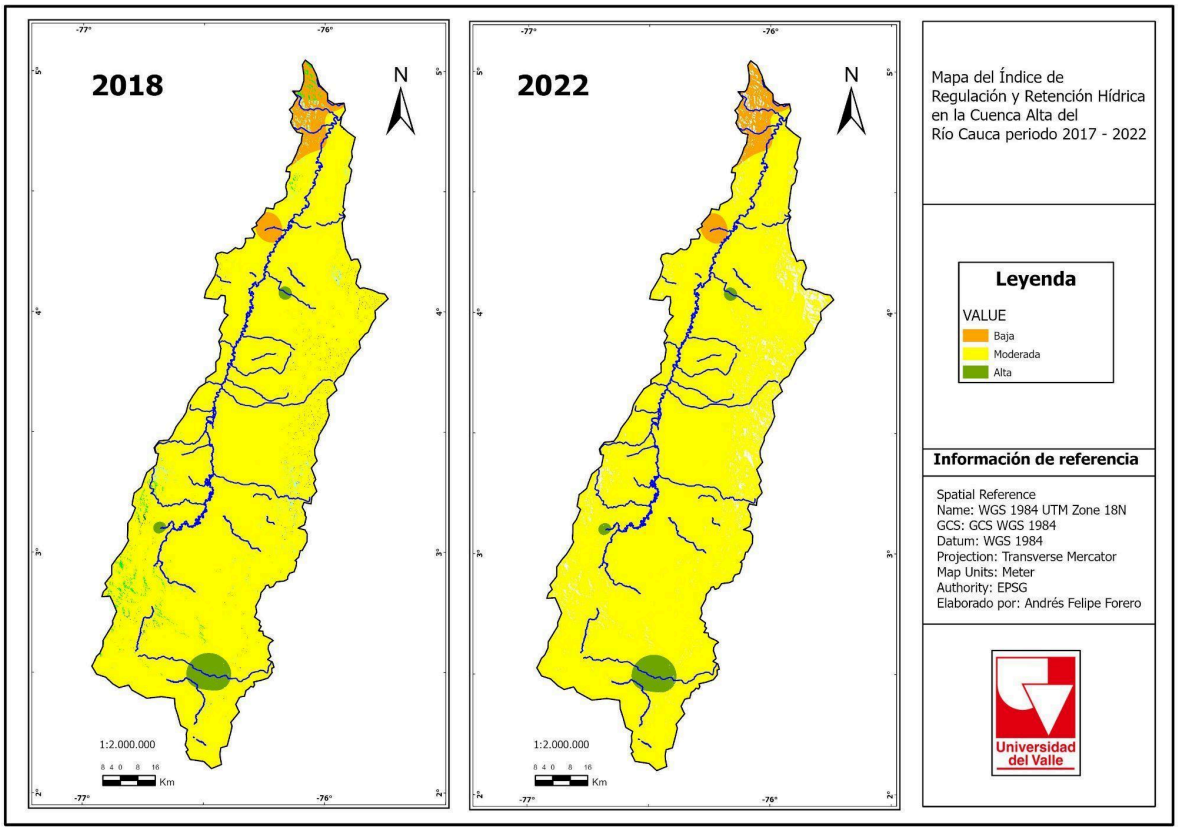
*Anexo 9: Temperatura Máxima Media Mensual  2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



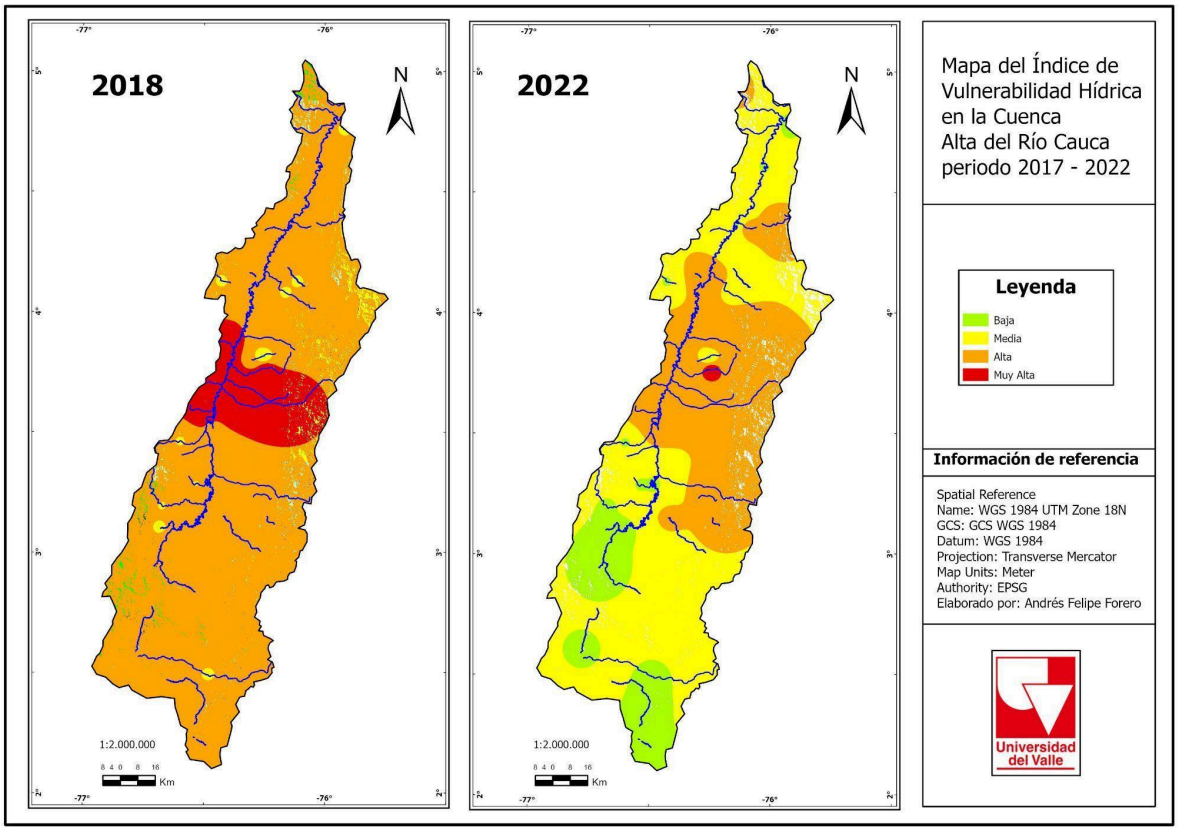

*Anexo 10: Temperatura Mínima Media Mensual  2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



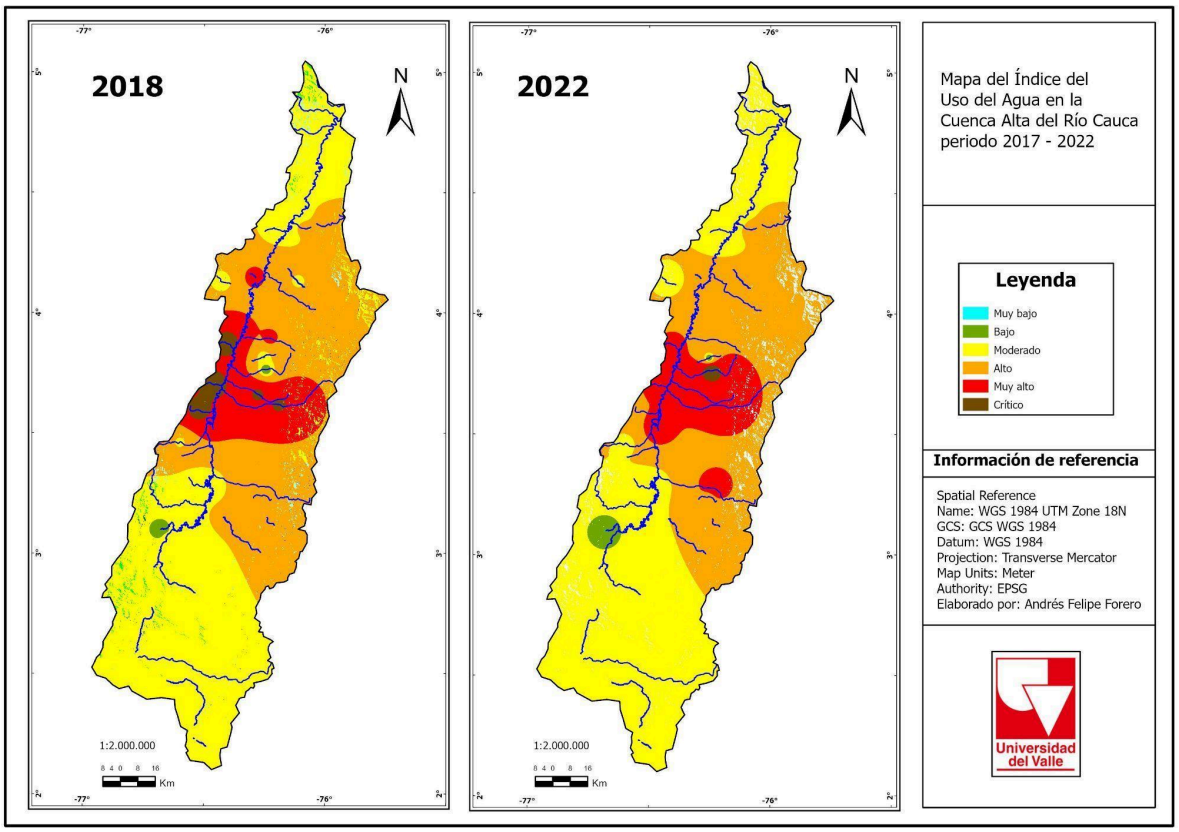

*Anexo 11: Temperatura Mínima Media Mensual 2017 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



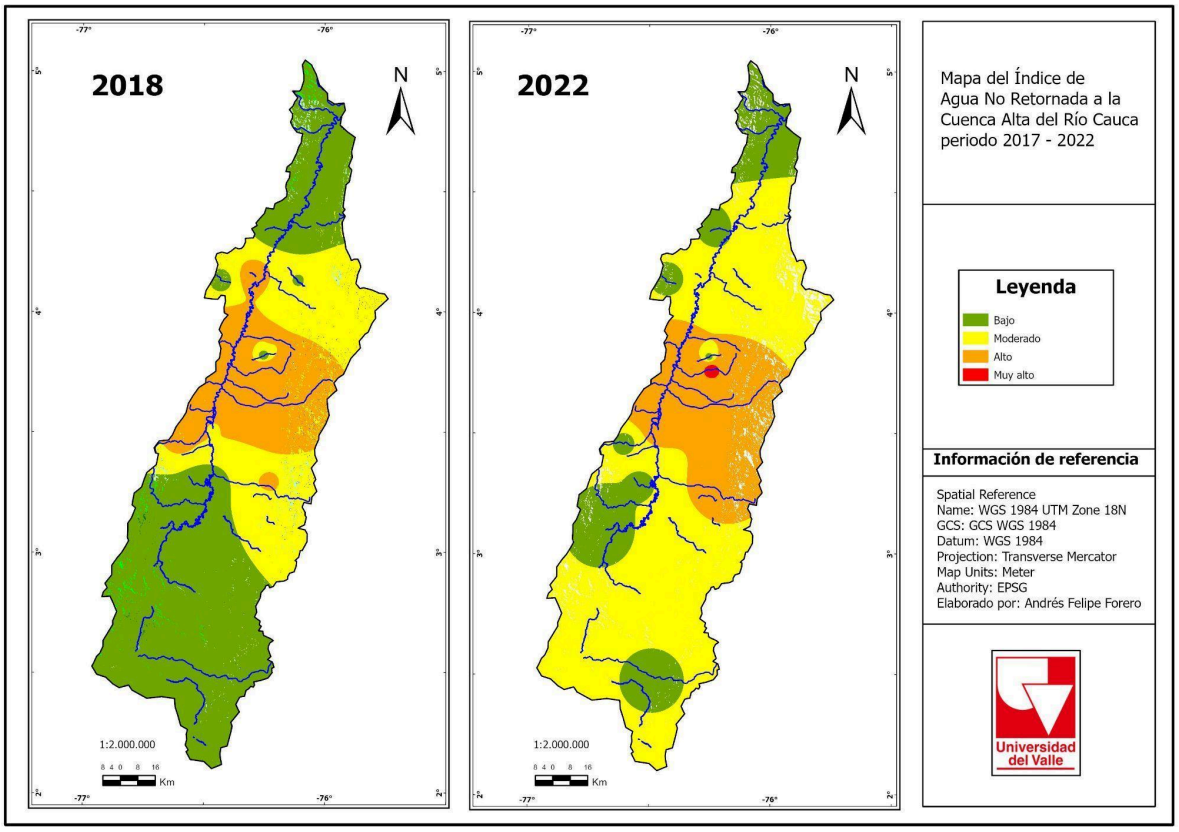

*Anexo 12: Índice de Regulación y Retención Hídrica 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



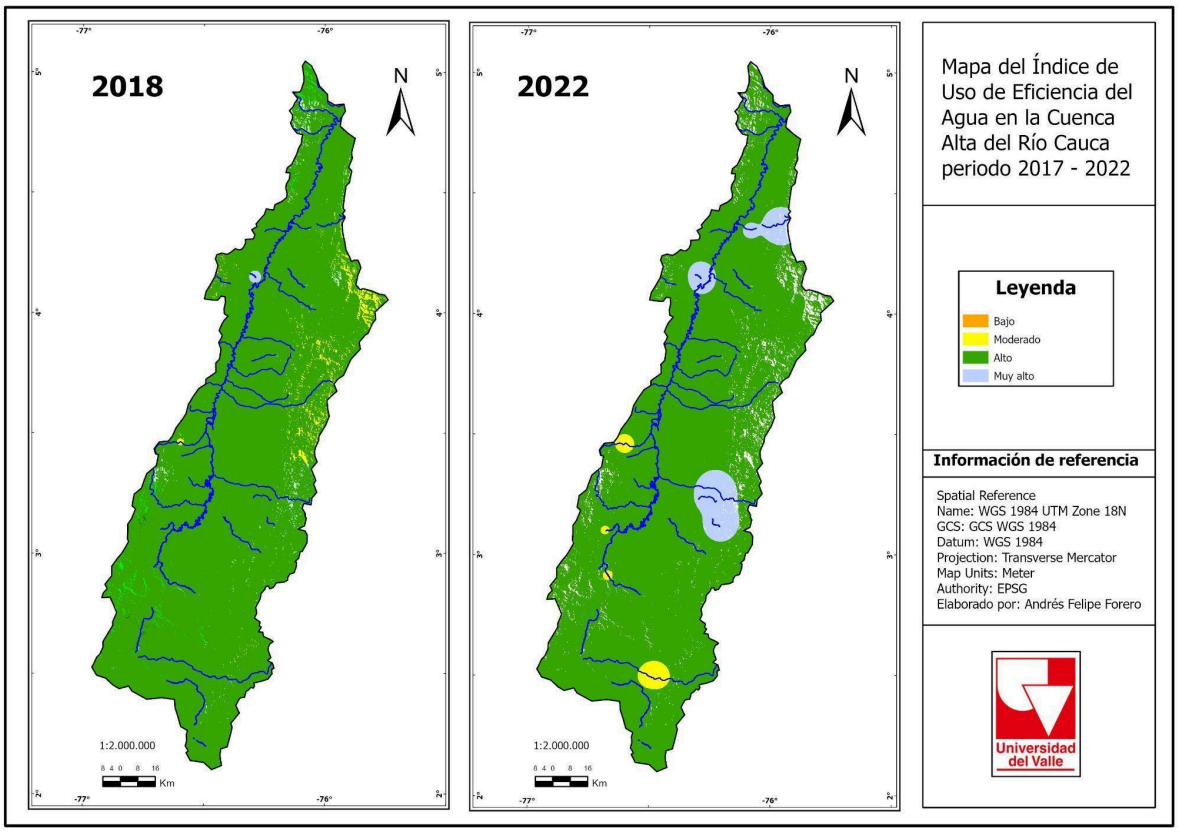

*Anexo 13: Índice de Vulnerabilidad Hídrica 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



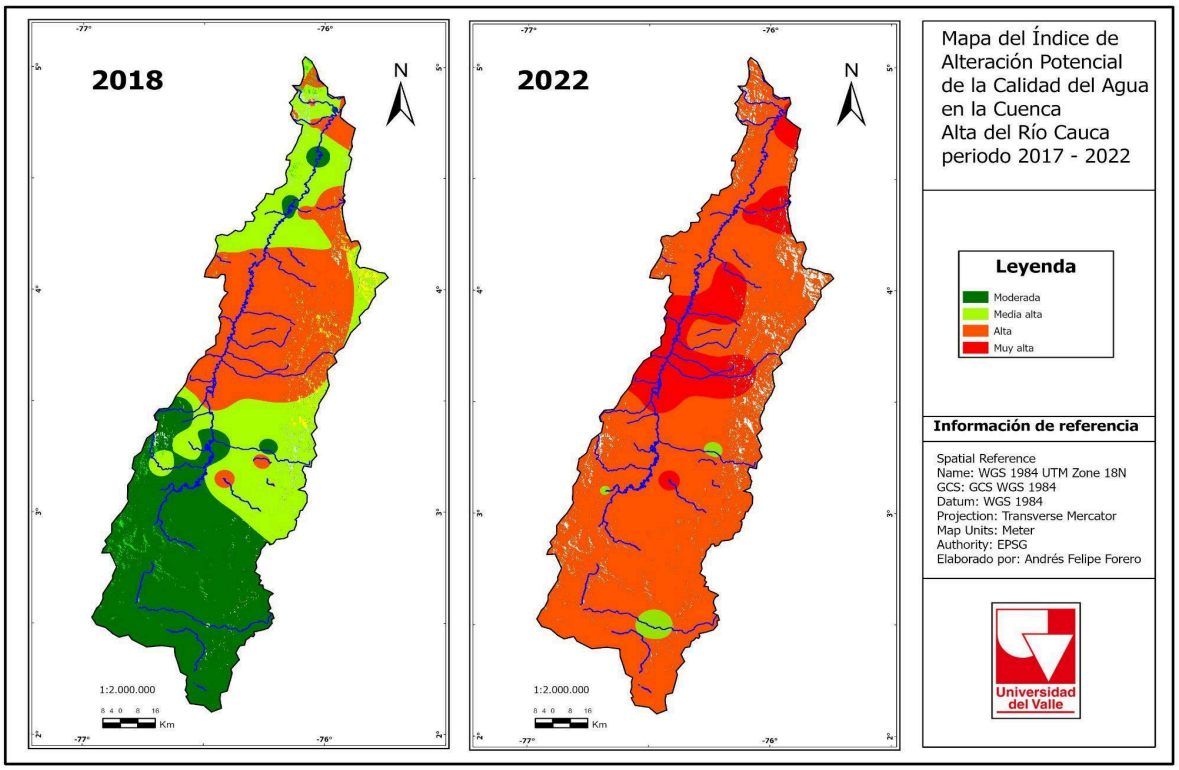

*Anexo 14: Índice de Uso del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



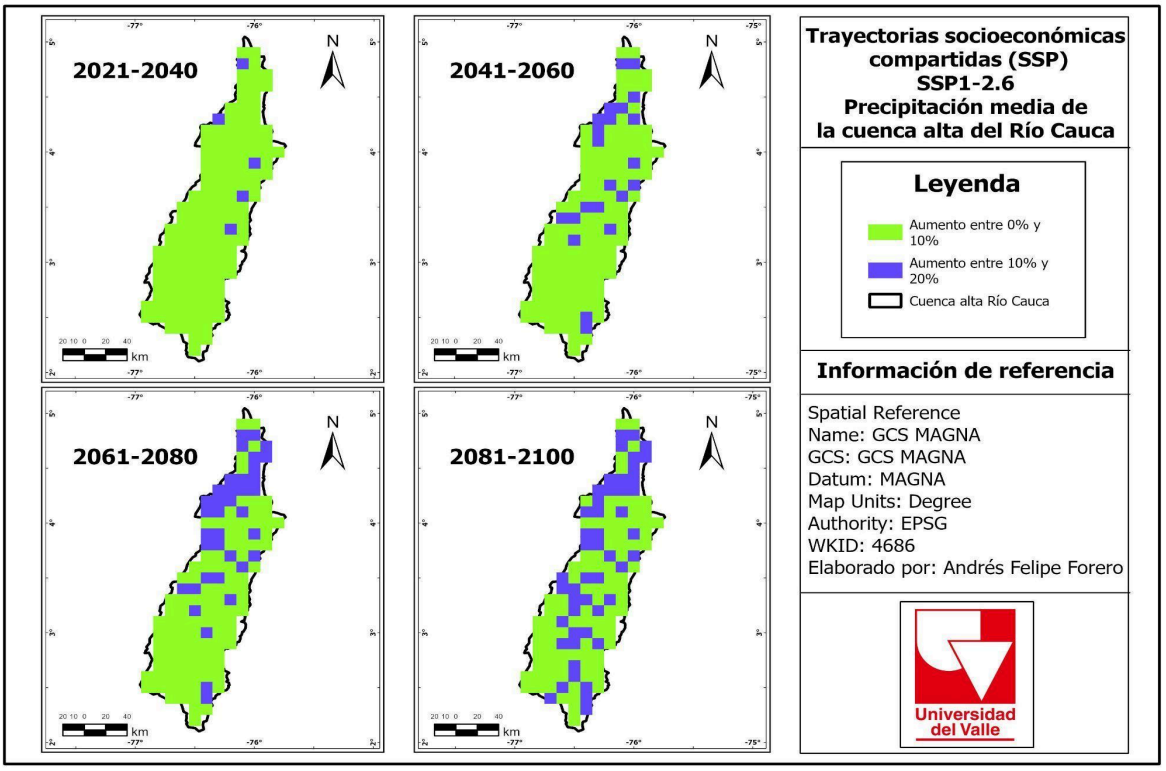

*Anexo 15: Índice de Uso del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



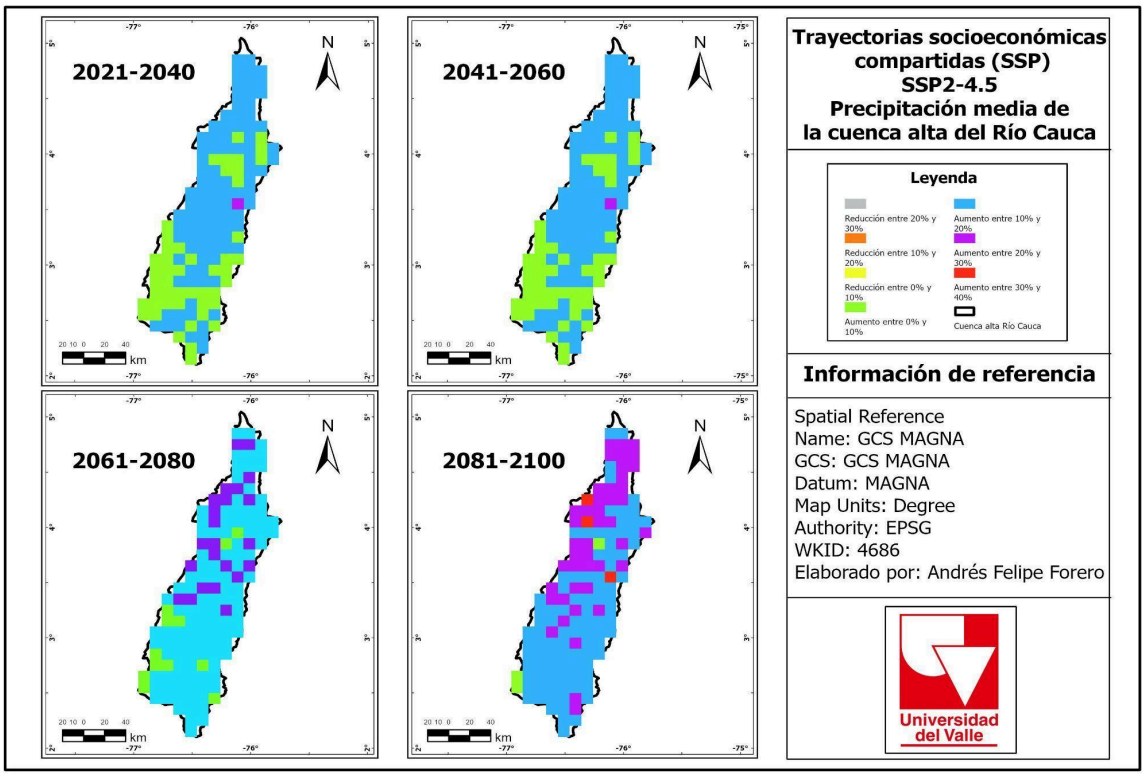

*Anexo 16: Índice de Uso de Eficiencia del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



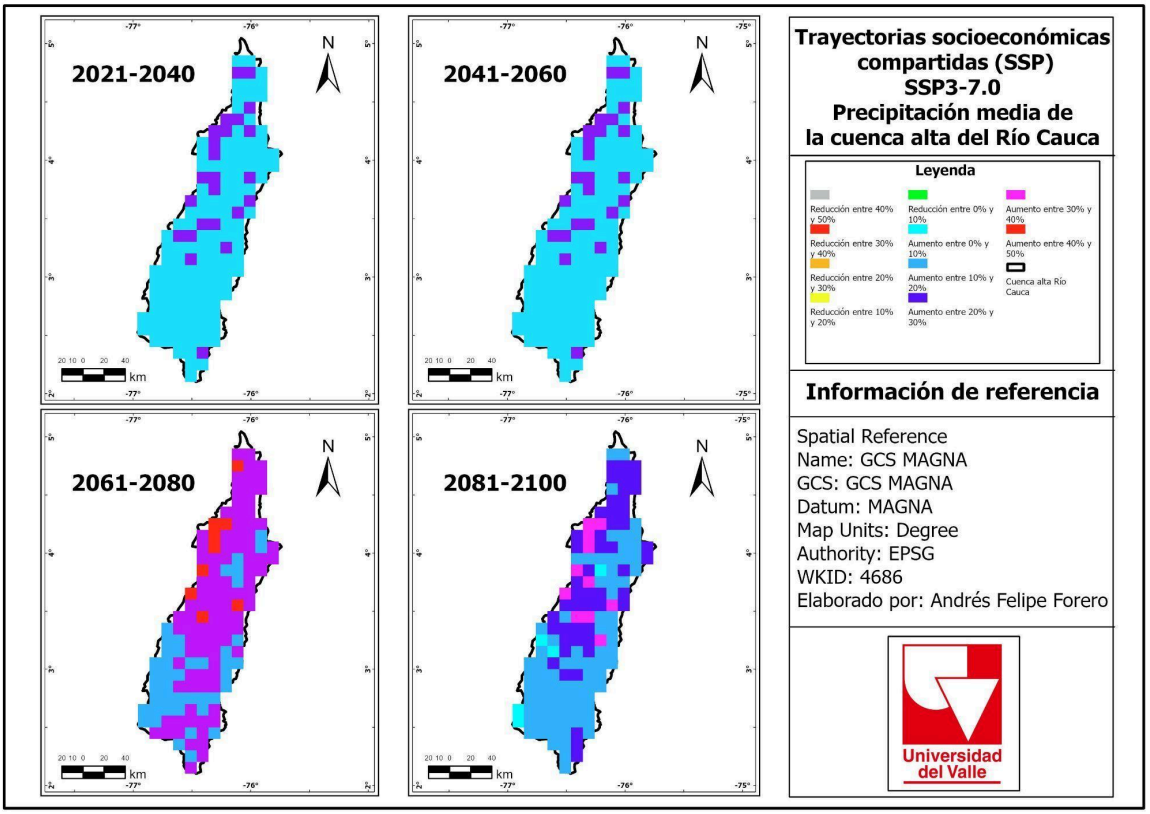

*Anexo 17: Índice de Alteración Potencial del Agua 2018 - 2022 Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



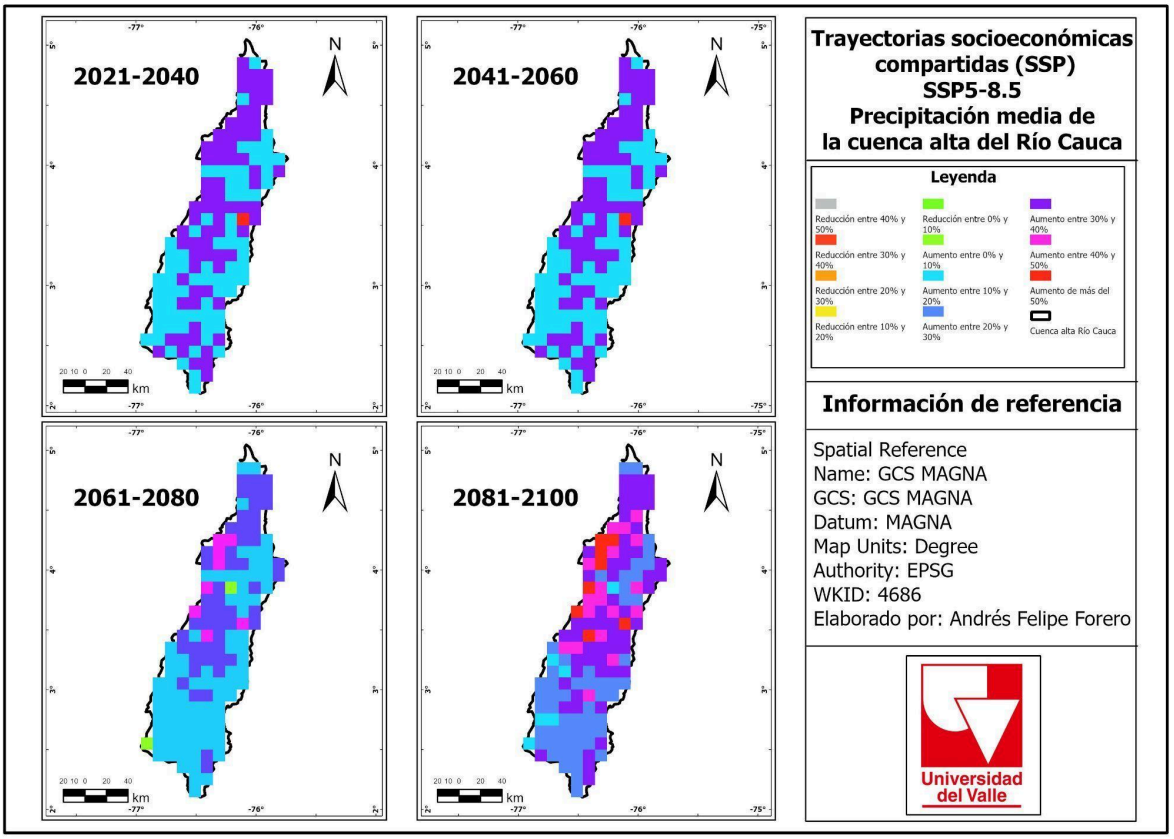

*Anexo 18: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP1-2.6 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



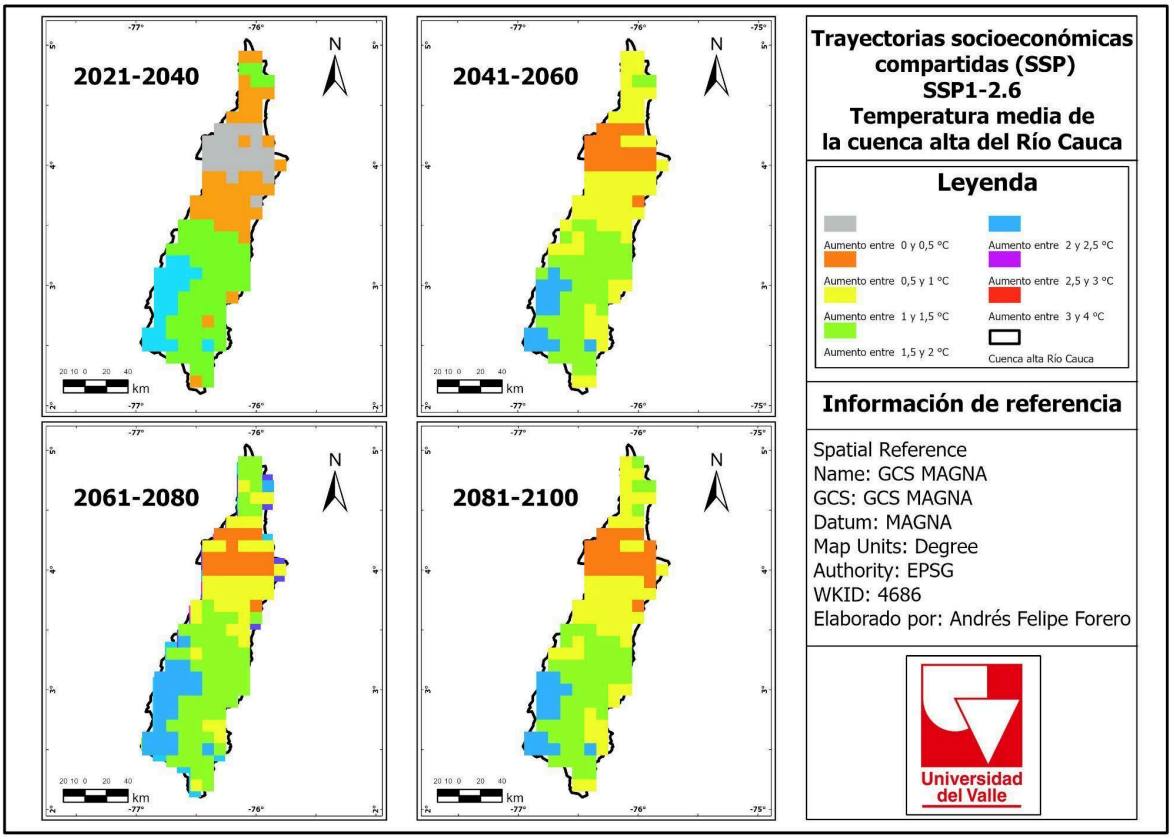

*Anexo 19: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP2-4.5 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



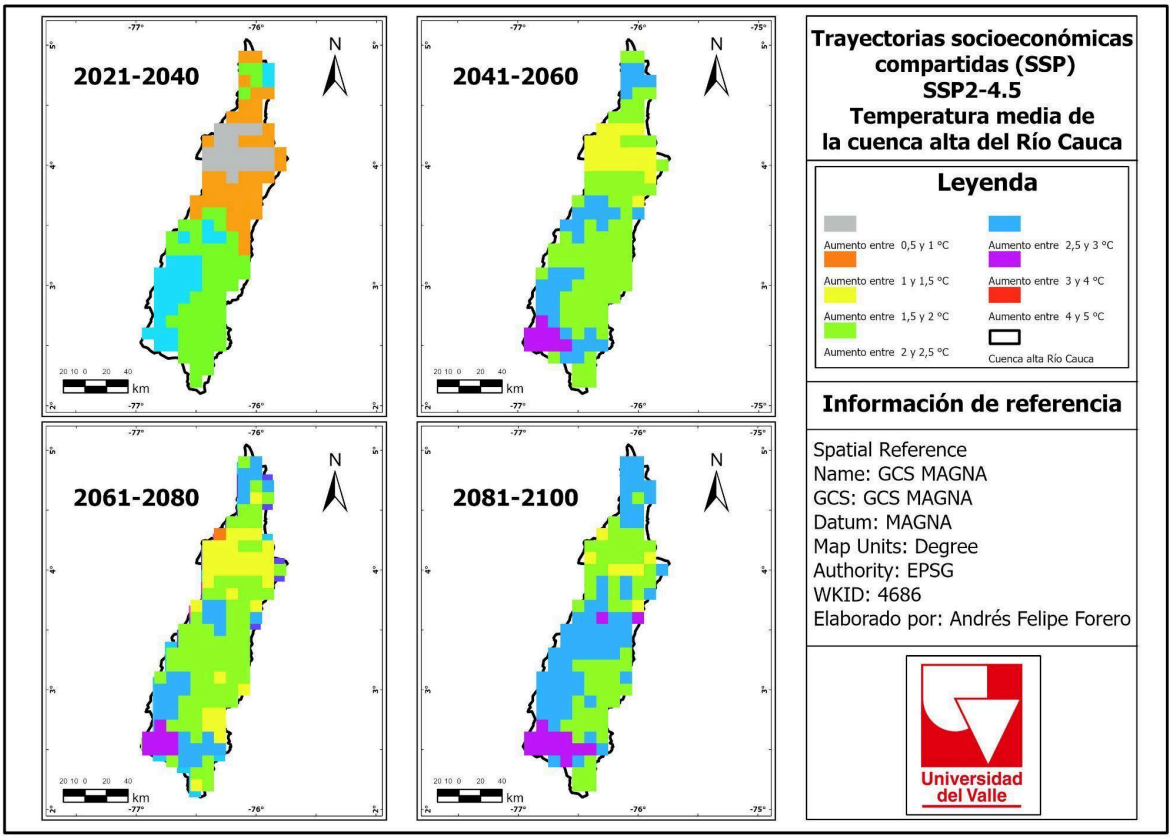

*Anexo 20: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP3-7.0 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



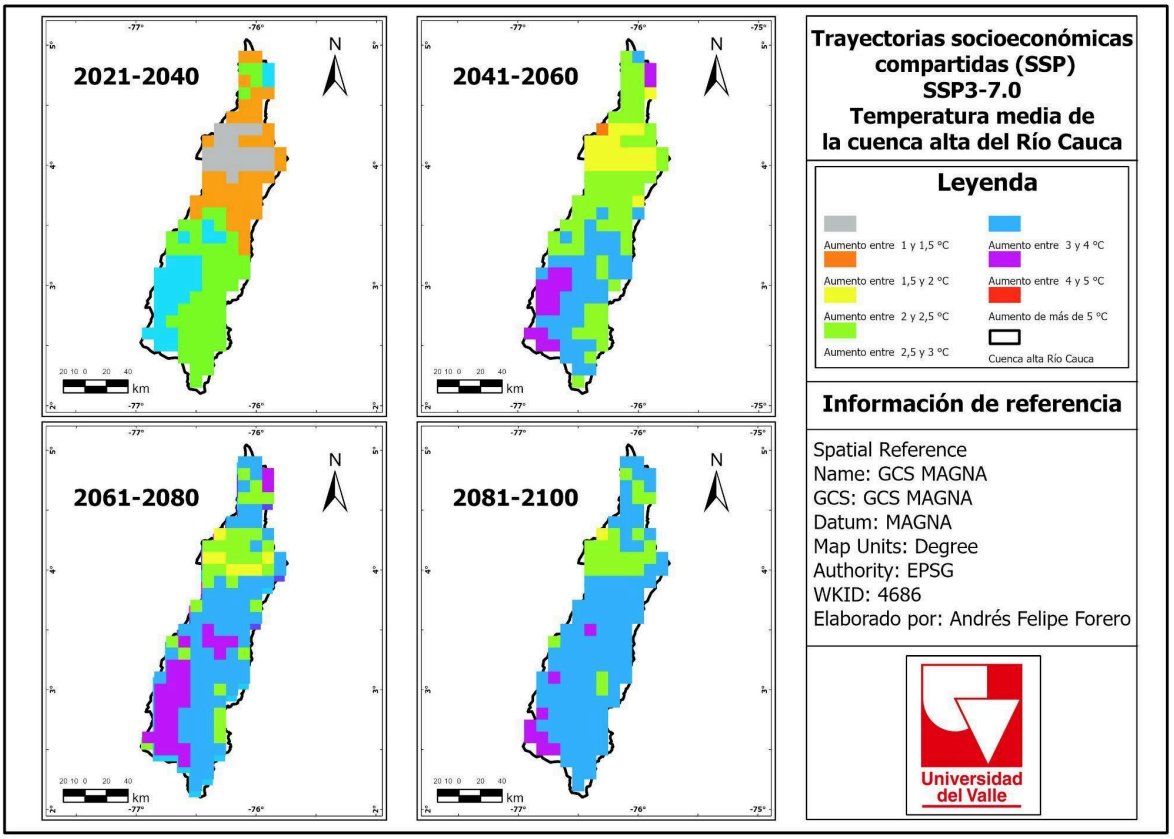

*Anexo 21: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP5-8.5 de precipitación en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



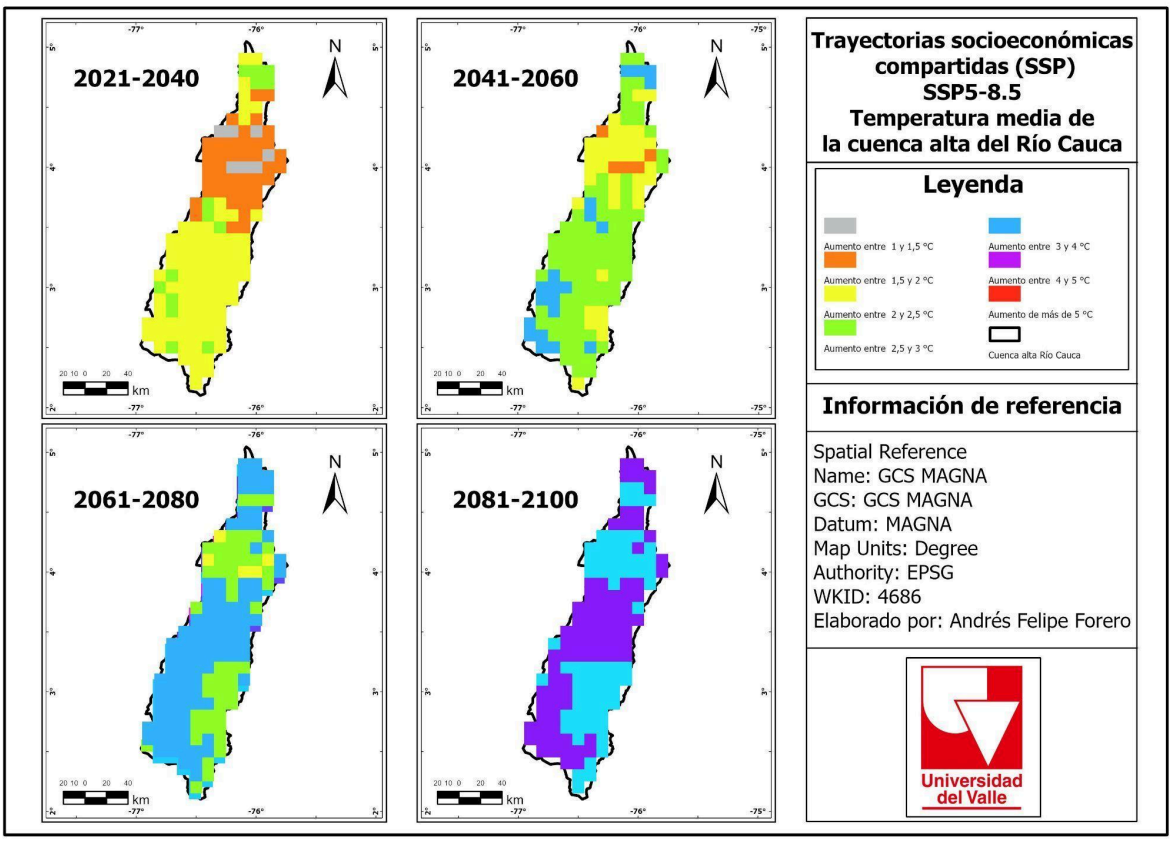

*Anexo 22: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP1-2.6 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*



*Anexo 23: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP2-4.5 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*




*Anexo 24: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP3-7.0 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*




*Anexo 25: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP5-8.5 de temperatura en la Cuenca Alta Río Cauca. Fuente: elaboración propia*