

**Evaluación de los índices de calidad del agua a partir de modelos de simulación
hídrica. Caso de estudio: tramo intersección río Jordán y la Vega hasta la PTAR Tunja**

**Laura Catalina Torres Piraquive
Yeison Alexander Niño Herrera**

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Tunja
2022**

**Evaluación de los índices de calidad del agua a partir de modelos de simulación
hídrica. Caso de estudio: tramo intersección río Jordán y la Vega hasta la PTAR Tunja**

**Laura Catalina Torres Piraquive
Yeison Alexander Niño Herrera**

**Trabajo de grado para optar al título de:
Ingenieros Ambientales**

**Director
Diego Camilo Guio Sandoval
Ingeniero Ambiental y Sanitario**

**Codirector
Jaime Díaz Gómez
Ingeniero Sanitario**

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Tunja
2022**

Nota de Aceptacion

Firma Presidente de Jurado

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Tunja, 16 de noviembre de 2022

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

Este proyecto de titulación va dedicado a nuestras familias que fueron el sustento en todo momento para la realización de esta investigación, que nos ha permitido continuar pese a todos los obstáculos que se presentaron en el trayecto de este proyecto. Además, por habernos dado la oportunidad de formarnos en esta prestigiosa universidad y haber sido nuestro apoyo durante todo este tiempo.

Agradecimientos

Manifestamos nuestra gratitud:

De manera especial le agradecemos al docente del programa de Ingeniería Sanitaria Sergio Torres por su apoyo y colaboración en la realización de este proyecto, por brindarnos su valioso conocimiento que nos permitió cumplir de manera satisfactoria este reto.

De igual manera a nuestros tutores de tesis, por habernos guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de nuestra carrera universitaria.

A la Universidad de Boyacá, por habernos brindado tantas oportunidades y enriquecernos en conocimiento.

A nuestros colegas, amigos y personas que gracias a su apoyo moral nos permitieron permanecer con empeño, dedicación y cariño, y a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito la meta propuesta. Gracias por darnos la libertad de desenvolverme como seres humanos.

Contenido

	Pág.
Introducción	20
Aplicación de modelos hidrológico, hidráulico y de calidad de agua para la evaluación de impactos de vertimientos en el tramo del río Jordán	21
Área de estudio	21
Recolección de datos.....	22
Estrategia metodológica.....	23
Realización del modelo hidrológico	23
Registro técnico de los asociados al área de estudio.....	23
Implementación del modelo hidráulico en HEC-RAS.....	24
Implementación del modelo de calidad de agua	24
Cálculo de los índices de calidad	25
Fuentes de información.....	25
Técnicas y herramientas para la recolección de información	25
Técnicas para la evaluación de resultados	26
Resultados modelo hidrológico.....	26
Insumos modelo	26
Modelamiento en HEC-HMS	36
Selección de métodos de modelado	36
Importar datos climáticos.....	40
Calibración del método preliminar	41
Resultados de la calibración y validación	51
Curva de duración de caudales	53
Resultados modelamiento hidráulico	54
Simulación hidráulica del sistema	54
Análisis de inundación.....	55
Cálculo de las Curvas de Gasto	58
Modelación de la calidad del agua.....	66
Escenarios de simulación	66

Condiciones de los vertimientos	66
Caracterización de la calidad de agua del cauce	70
Calibración	71
Comparación de los escenarios de simulación.....	73
Estimación del Índice de Calidad de Agua ICA WQI-IDEAM en las diferentes secciones del tramo intersección río Jordán y la Vega	85
Oxígeno disuelto (OD).....	85
Sólidos suspendidos totales (SST).....	86
Demanda química de oxígeno (DQO)	86
Conductividad eléctrica (C.E.).....	87
pH.....	87
Nitrógeno total/Fósforo total (NT/PT).....	87
Resultados Índice Calidad de Agua (ICA).....	87
Representación de los Índices de Calidad para Visualizar los Resultados Espacialmente.....	90
Conclusiones	92
Recomendaciones	93
Bibliografía	94
Anexos	101

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Estaciones determinadas. IDEAM 2022.	28
Tabla 2. Datos Simple Canopy modelo hidrológico.	37
Tabla 3. Datos Simple Surface modelo hidrológico.	37
Tabla 4. Datos Soil Moisture Accounting Loss modelo hidrológico.	38
Tabla 5. Datos CSC Unit Hydrograph modelo hidrológico.	39
Tabla 6. Datos Linear Reservoir modelo hidrológico.	39
Tabla 7. Datos Routing modelo hidrológico.	40
Tabla 8. Datos climatológicos importados HEC-DSSVue.	41
Tabla 9. Parámetros usados para la calibración y rango de valores por defecto.	42
Tabla 10. Parámetros del Soil Moisture Accounting calibrados.	47
Tabla 11. Parámetros de métodos de subcuencas ya calibrados.	47
Tabla 12. Parámetros de Muskingum Routing calibrados.	47
Tabla 13. Ajuste de criterio Nash-Sutcliffe 49	49
Tabla 14. Resultados obtenidos CDC. 54	54
Tabla 15. Resultados hidráulicos 58	58
Tabla 16. Escenarios de simulación 66	66
Tabla 17. Caracterización propuesta para el vertimiento. 70	70
Tabla 18. Caracterización de los puntos analizados 70	70
Tabla 19. Rangos de calibración para las constantes cinéticas del modelo QUAL-2K. 72	72
Tabla 20. Constantes cinéticas adecuadas al modelo. 72	72
Tabla 21. Resultados Índice de Calidad de Agua (ICA) por tramo. 88	88

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Precipitación media mensual multianual estación UPTC.	30
Figura 2. Precipitación diaria anual estación UPTC.....	31
Figura 3. Temperatura máxima mensual multianual estación UPTC.	32
Figura 4. Temperatura mínima mensual multianual estación UPTC.....	33
Figura 5. Temperatura máxima y mínima diaria anual estación UPTC.	33
Figura 6. Temperatura mínima y máxima mensual multianual estación UPTC.....	34
Figura 7. Evapotranspiración método Hargreaves-Samani estación UPTC.	35
Figura 8. Caudal estación LAS PILAS.	36
Figura 9. Determinación punto de cálculo.	41
Figura 10. Selección "Configuración de parámetros".....	43
Figura 11. Insertar rangos de valores de cada parámetro. Fuente: Cabrera-Balarezo, 2019	43
Figura 12. Selección pestaña "Resultados".....	44
Figura 13. Serie temporal aguas arriba del punto de cálculo seleccionado.	45
Figura 14. Serie temporal aguas arriba del punto de cálculo seleccionado.	45
Figura 15. Serie temporal aguas arriba del punto de cálculo seleccionado.	46
Figura 16. Resultados obtenidos caudal periodo 01/03/1992 al 01/08/1993 con media móvil 30.	48
Figura 17. Modelo obtenido periodo 01-marzo-1992 al 01-agosto-2021.....	52
Figura 18. Diagrama de cajas caudales obtenidos medios mensuales multianuales.....	52
Figura 19. Curva de duración de caudales obtenida, CDC.....	54
Figura 20. Topología empleada en la modelación hidráulica	55
Figura 21. Perfil de niveles del tramo cuenca alta rio Chicamocha.....	56
Figura 22. Sección 17522 aguas arriba coordenadas 5°34'12.86"N y 73°19'59.29	56
Figura 23. Sección 9180 punto medio del tramo coordenadas 5°34'40.58"N y 73°19'42.70"O ..	57
Figura 24. Sección 238 aguas abajo del tramo coordenadas 5°35'0.78"N y 73°19'16.55"O.....	57
Figura 25. Curva de gasto (Calado hidráulico sección 17552).....	59
Figura 26. Curva de gasto (sección 17552)	59
Figura 27. Curva de gasto (Calado hidráulico sección 16404).....	60

Figura 28. Curva de gasto (sección 16404)	60
Figura 29. Curva de gasto (Calado hidráulico sección 9180).....	61
Figura 30. Curva de gasto (sección 9180)	61
Figura 31. Curva de gasto (Calado hidráulico sección 3781).....	62
Figura 32. Curva de gasto (sección 3781)	62
Figura 33. Curva de gasto (Calado hidráulico sección 2909).....	63
Figura 34. Curva de gasto (sección 2909)	63
Figura 35. Curva de gasto (Calado hidráulico sección 819).....	64
Figura 36. Curva de gasto (sección 819)	64
Figura 37. Curva de gasto (Calado hidráulico sección 238).....	65
Figura 38. Curva de gasto (sección 238)	65
Figura 39. Foto del vertimiento olímpica coordenadas 5°33'21.68"N y 73°20'55.09"O.....	67
Figura 40. Foto del tributario quebrada la colorada coordenada 5°34'7.11"N y 73°20'3.59"O....	67
Figura 41. Foto del vertimiento viaducto coordenadas 5°34'40.58"N y 73°19'42.70"O	68
Figura 42. Foto del vertimiento bypass rectangular 5°34'44.15"N y 73°19'37.10"O.....	68
Figura 43. Foto del vertimiento bypass circular 5°34'55.41"N y 73°19'23.10"O.....	69
Figura 44. Foto del vertimiento de la PTAR 5°34'51.386"N y 73°19'14.183"O.....	69
Figura 45. Calibración del constituyente oxígeno disuelto para el escenario actual.	73
Figura 46. Variación espacial del oxígeno disuelto.....	74
Figura 47. Calibración del parámetro de Demanda Bioquímica de Oxígeno para el escenario actual.....	75
Figura 48. Demanda Química de Oxígeno en los diferentes escenarios.....	75
Figura 49. Calibración del constituyente Sólidos Suspendidos Totales para el escenario actual. 76	
Figura 50. Sólidos Suspendidos Totales en los diferentes escenarios.	77
Figura 51. Calibración del constituyente Nitrógeno Total para el escenario actual.	78
Figura 52. Nitrógeno Total para los diferentes escenarios.	78
Figura 53. Calibración del constituyente fósforo total.....	79
Figura 54. Fósforo para los diferentes escenarios.....	80
Figura 55. Calibración del pH en la corriente.....	81
Figura 56. pH para los diferentes escenarios.	81
Figura 57. Calibración de la Temperatura en la corriente.	82

Figura 58. Temperatura para los diferentes escenarios.....	83
Figura 59. Calibración de la conductividad en la corriente.	84
Figura 60. Conductividad para los diferentes escenarios.....	84
Figura 61. Resultados Índice de Calidad de Agua (ICA).	89
Figura 62. Clasificación de la calidad de agua según los valores que tome el ICA.	88
Figura 63. Índice de Calidad de Agua para los distintos escenarios.....	90

Lista de Anexos

	Pág.
Anexos A. Anteproyecto.....	102

Glosario

Calidad de agua: la cuenca alta del río Chicamocha es un sistema hídrico cuyos principales ríos son la Vega y Jordan. la calidad de un ambiente acuático se define como una lista de concentraciones, especificaciones y aspectos físicos de sustancias orgánicas e inorgánicas, además de la composición y estado de la biota acuática presente en el cuerpo de agua. Esta en general se refiere a cualquier propiedad física, química o biológica que altere la idoneidad del agua para algún propósito en particular como lo es, el consumo humano, la ganadería, el riego, entre otros y que afecte en mayor medida la supervivencia y el crecimiento de las plantas y animales presentes en los ecosistemas acuáticos. Para determinar el análisis y la evaluación de la calidad de agua es necesario monitorear no solo sus propiedades fisicoquímicas y biológicas sino también su hidrología (Sierra, 2011).

Índices de calidad del agua: un índice de calidad es un número adimensional que expresa la calidad del recurso hídrico por medio de la integración de varios parámetros de calidad de agua y atribuyendo un valor ponderado a cada uno de estos. El uso de índices de calidad de agua (ICA) es fundamental debido a que permite la representación de una gran cantidad de parámetros en un solo número, sin embargo, para que este índice represente la realidad del cuerpo de agua es necesaria la selección apropiada de los parámetros ambientales (Borges-García et al., 2019).

Índices fisicoquímicos para calidad del agua: para la determinación de los diferentes índices de calidad de agua es necesario el uso de una metodología que abarque varios parámetros, en su mayoría fisicoquímicos y en algunas ocasiones microbiológicos. Actualmente los indicadores abarcan hasta más de treinta parámetros los cuales se encuentran agrupados en categorías como lo son, por contaminación de materia orgánica, eutrofización, aspectos de salud, sustancias suspendidas y disueltas (Samboni-Ruiz et al., 2007).

Modelos de simulación hídrica: los modelos de calidad de agua son utilizados para simular la complejidad de la estructura y dinámica de cada sistema, sin embargo, esto genera la imposibilidad de adaptar dichos modelos ya desarrollados a otros estudios de casos para las cuales no fueron establecidos, debido a esto los modelos de calidad deben estructurarse de acuerdo a la

naturaleza del problema a abordar y de la información disponible para su desarrollo (Victoria-Almeida, 1996).

Modelos hidrológicos: Un modelo hidrológico es una forma de representar simplificada un sistema real por medio de una expresión analítica. Estos permiten predecir los flujos al interior de los sistemas hidrológicos, lo cual es de importancia para el control de inundaciones, cuando se combinan estos modelos con predicciones meteorológicas, se permite modelar el comportamiento del agua en el suelo, sin embargo para poder generar los resultados con un buen nivel de fiabilidad es necesario llevar a cabo la calibración y validación de este tipo de modelo hidrológicos (Loaiza & Valentijn, 2011).

Modelos hidráulicos: El desarrollo de modelos hidráulicos permite calcular los niveles de la superficie del agua bajo condiciones de flujo permanente y no permanente y gradualmente variado en un canal, sea natural o artificial, los modelos hidráulicos con utilizados para la solución de problemas relacionados a aspectos de estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración o tramos de ríos y transporte de sedimento (Caballos-Lopez, 2011).

Modelos de calidad: los modelos numéricos de calidad y transporte agua tienen la capacidad de reproducir los procesos hidráulicos, químicos y biológicos que ocurren en los cuerpos de agua por medio de la utilización de expresiones matemáticas, las cuales son aproximaciones de un sistema real, mediante estas es posible representar fenómenos de interés, estos modelos son herramientas valiosas y ampliamente utilizadas para evaluar el impacto de la implementación de diferentes estrategias o medidas de mejoramiento de calidad de agua, además que con este tipo de modelos es posible evaluar distintos escenarios de caudal, de cargas contaminantes, de oxigenación, entre otras para la recuperación de la calidad de agua bajo distintos ambientes (Giraldo et al., 2015).

Resumen

Evaluación de los índices de calidad del agua a partir de modelos de simulación hídrica. Caso de estudio: tramo intersección río Jordán y la Vega hasta la PTAR Tunja:

En el presente trabajo de investigación, se describe la aplicación de los modelos hidrológico, hidráulico y de calidad de agua para el caso de estudio del tramo intersección río Jordán y la Vega hasta la PTAR Tunja mediante la integración de diferentes softwares. Para estimar el índice ICA WQI-IDEAM en las diferentes secciones del tramo intersección río Jordán y la Vega se empleó información determinada con los diferentes modelos, los cuales permiten visualizar los resultados espacialmente mediante el sistema de información geográfica.

En este contexto, el presente trabajo evalúa la calidad del agua en el tramo del Río Jordán, comprendido desde su unión con el Río la Vega hasta la PTAR de Tunja, mediante la aplicación del índice ICA WQI-IDEAM y la Implementación de Modelos de Simulación Hídrica.

Dentro de esta investigación se presenta el procedimiento y resultados del cálculo de los caudales de creciente en el río Chicamocha. Se parte de información base de estaciones operadas por el IDEAM y de ese punto se extrapolan componentes esenciales para el desarrollo de esta actividad, estos componentes fueron tratados de acuerdo a procedimientos definidos, obteniendo los resultados necesarios para llevar a cabo la modelación hidrológica de la zona en estudio y de esta forma determinar los valores de caudales de crecientes los cuales permitieron realizar el análisis hidráulico correspondiente. La estimación y determinación de las condiciones hidrodinámicas del cauce, se realizó a partir de modelos matemáticos de flujo de agua en ríos, cuyo principal objetivo es estimar los valores de las variables más importantes que actúan en un cauce. La modelación del cuerpo de agua superficial permitió conocer la calidad del mismo, esto basado en monitoreos in-situ y análisis de laboratorio realizados a lo largo del cuerpo hídrico, generando así un modelo el cual fue la aproximación a la realidad y con éste se realizaron simulaciones las cuales representan experimentos virtuales de escenarios que varían las condiciones en puntos específicos del cuerpo de agua

De acuerdo a lo anterior, los resultados reflejan las malas condiciones de la fuente superficial objeto de estudio a consecuencia de los diferentes vertimientos hasta el efluente tratado por la PTAR donde las cargas disminuyen su concentración sin embargo el cálculo del índice de calidad de agua arrojó un porcentaje por debajo de la media reflejando las malas condiciones del cauce bajo todos los escenarios de caudal.

Palabras clave: Calidad del agua, modelación de calidad del agua, índice de calidad de agua.

Abstract

Evaluation of water quality indices from water simulation models. Case study: section between the intersection of the Jordan River and La Vega up to the Tunja WWTP:

In the present research work, the application of the hydrological, hydraulic and water quality models is described for the case study of the intersection section of the Jordán and La Vega rivers up to the Tunja WWTP through the integration of different softwares. To estimate the ICA WQI-IDEAM index in the different sections of the Jordán and La Vega intersection section, information determined with the different models was used, which allows visualizing the results spatially through the geographic information system.

In this context, the present work evaluates the water quality in the section of the Jordan River, from its union with the La Vega River to the Tunja WWTP, through the application of the ICA WQI-IDEAM index and the Implementation of Simulation Models. water.

Within this investigation, the procedure and results of the calculation of the flood flows in the Chicamocha River are presented. It is based on base information from stations operated by IDEAM and from that point essential components for the development of this activity are extrapolated, these components were treated according to defined procedures, obtaining the necessary results to carry out the hydrological modeling of the area. under study and in this way determine the values of flood flows which allowed the corresponding hydraulic analysis to be carried out. The estimation and determination of the hydrodynamic conditions of the channel, was carried out from mathematical models of water flow in rivers, whose main objective is to estimate the values of the most important variables that act in a channel. The modeling of the body of surface water allowed knowing its quality, this based on in-situ monitoring and laboratory analysis carried out throughout the body of water, thus generating a model which was the approximation to reality and with it, simulations which represent virtual experiments of scenarios that vary the conditions in specific points of the water body.

According to the above, the results reflect the poor conditions of the surface source under study as a result of the different discharges to the effluent treated by the WWTP where the loads decrease their concentration, however, the calculation of the water quality index showed a below-average percentage reflecting poor channel conditions under all flow scenarios.

Keywords: Water quality, water quality modeling, water quality index.

Introducción

Los ríos en las zonas urbanas, en su mayoría, suelen verse gravemente afectados debido a las descargas de aguas residuales domésticas sin previo tratamiento, puesto que estas contienen grandes aportes orgánicos que producen la desoxigenación del agua, muerte de organismos acuáticos, olores indeseables, disminución de la capacidad de autodepuración en los ríos, la eutrofización y una reducción grave de la calidad del agua.

La cuenca alta del río Chicamocha es un sistema hídrico cuyos principales ríos son la Vega y Jordan. El río La Vega confluye con el río Jordán en el casco urbano del municipio de Tunja y este último discurre hacia el nororiente del departamento de Boyacá. La presente evaluación está basada en la gestión integral del recurso hídrico, mediante la aplicación del índice ICA WQI-IDEAM y con base en la Implementación de modelos de Simulación Hídrica, a partir de un análisis de calidad de agua de la fuente de aguas superficiales localizada en el municipio de Tunja Boyacá, la cual sería receptora de vertimientos incluido el de la PTAR de Tunja.

De tal forma que, la presente investigación es desarrollada con el fin último de aportar una metodología de integración de modelos hídricos para evaluar la calidad del tramo del Río Jordán mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos como lo son el pH, coliformes totales y fecales, DBO, DQO, sólidos suspendidos totales, nitritos y nitratos. Para estimar el índice ICA WQI-IDEAM en las diferentes secciones del tramo objeto de estudio empleando la información determinada con los diferentes modelos. Finalmente, representar los índices de calidad obtenidos lo cual permitirá comprender la situación actual del cuerpo hídrico para la posterior toma de decisiones en cuanto a calidad se refiere, beneficiando así a comunidades aledañas que se abastecen del río para sus diferentes actividades.

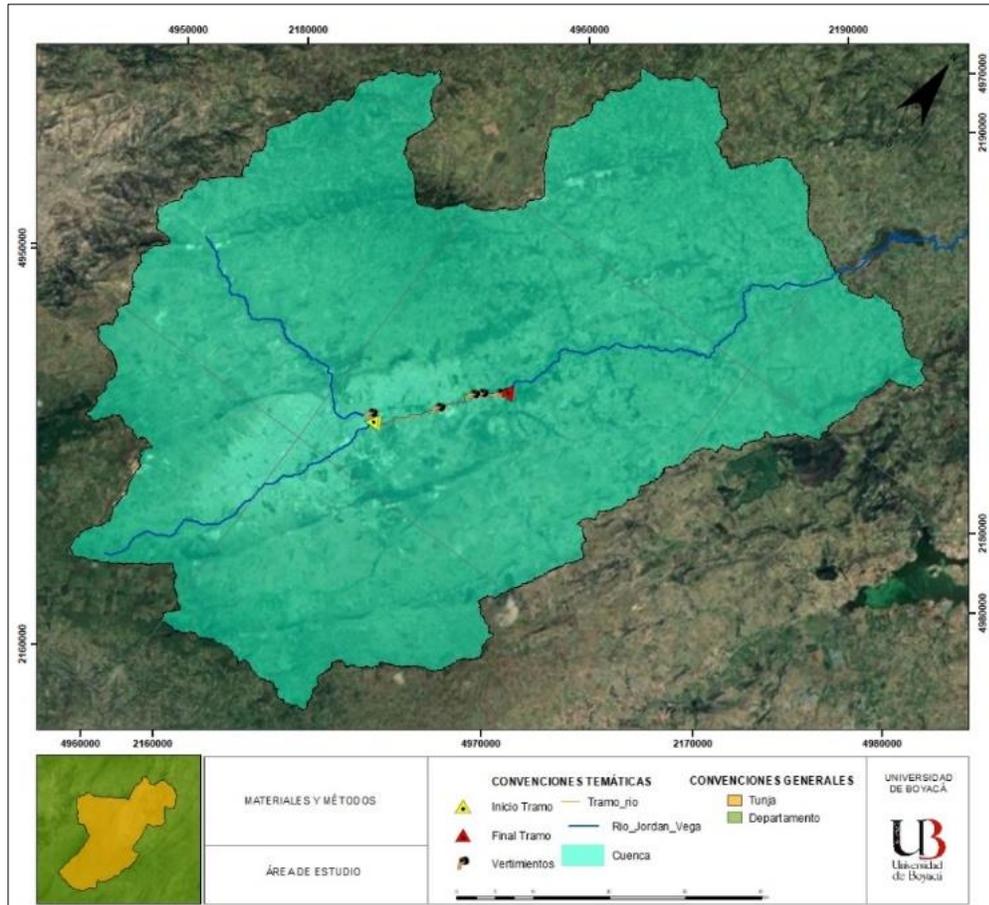
Para la valoración del recurso hídrico se tienen en cuenta diversas especificaciones que la normatividad establece; en este sentido, se desarrollan metodologías que se basan en la gestión tanto de riesgo, como de los impactos que se puedan generar sobre los recursos naturales y el medio ambiente vinculando a sistemas de tipo económico, cultural y social.

Aplicación de modelos hidrológico, hidráulico y de calidad de agua para la evaluación de impactos de vertimientos en el tramo del río Jordán

Área de estudio

El río Jordán se le denomina al nacimiento del río Chicamocha en la ciudad de Tunja, hace parte de la cuenca alta del río Chicamocha, atravesando la ciudad de Tunja de sur a norte. sus aguas irrigan a Oicata, y parte de sus aguas se deposita en la represa la playa de Tuta, Sotaquirá, Maguncia, Paipa, Duitama, Sogamoso y sigue hasta llegar a Soata, luego Málaga hasta llegar a Bucaramanga y convertirse en el río Sogamoso que termina irrigando sus aguas en el río Magdalena.

Para el tramo de estudio se tuvo en cuenta el tramo del Río Jordán desde su confluencia con el Río la Vega a una altitud de 2688 msnm hasta aguas debajo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Tunja a una altitud de 2634 msnm, el tramo comprende una longitud aproximada de 4.86 Km ubicado geográficamente desde $5^{\circ}33'19.16''$ N $73^{\circ}20'49.82''$ W hasta $5^{\circ}35'04.84''$ N $73^{\circ}19'18.84''$ W, el área de drenaje de la cuenca cuenta con un área de 302.15 Km². La zona de estudio cuenta con una precipitación media mensual multianual promedio de 67.5 mm y una temperatura promedio de 13.52°C.

Figura 1*Localización del área de estudio*

Fuente: autores, 2022

Recolección de datos

Los datos diarios hidrometeorológicos fueron recolectados para un periodo de treinta años, entre los años de 1992 y 2022, esta información fue suministrada por el banco de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presentes en la plataforma de descarga de Datos Hidrometeorológicos (DHIME). Cabe resaltar que los parámetros determinados para este periodo fueron para: precipitación y temperatura mínimas y máximas. Para el caso del caudal se recolectaron datos para un periodo del año 1992 al año 1996. La información geográfica se obtuvo a través de un modelo de elevación digital con paso de malla 12.5 por 12.5 obtenido a través de la base de datos de Alaska Satellite Facility, ASF del satélite ALOS PALSAR. Para la

información correspondiente a imágenes satelitales se obtuvieron por medio del portal de datos USGS Earth Explorer para los años 1992 y 2021.

Estrategia metodológica

El presente proyecto se enfoca fundamentalmente en la evaluación de la calidad del agua en el tramo del Río Jordán, comprendido desde su unión con el Río la Vega hasta la PTAR de Tunja, mediante la aplicación del índice: ICA UWQI- IDEAM.

Desde este punto de vista, es necesario seguir una serie de pasos previamente definidos, caracterizados por la división del estudio en seis fases consecutivas, definidas principalmente en función de los objetivos de la investigación. A continuación, se describirá en detalle cada una de las fases de la investigación:

Realización del modelo hidrológico

Para la elaboración de esta fase se realizará el modelo hidrológico de carácter continuo del área de estudio a partir de datos climatológicos satelitales y de uso y cobertura de suelo, a partir de esta información se calibrará y validará el modelo con base en información de caudales reportados por el IDEAM, teniendo en cuenta estos datos, se desarrollará una curva duración de caudales y se tendrá como resultado, caudales correspondientes a los percentiles Q_{50} , Q_{95} y $Q_{97.5}$ (Pinilla-Agudelo et al., 2014).

Registro técnico de los asociados al área de estudio

En esta fase se identificarán, registrarán y caracterizarán todos los vertimientos puntuales, tanto constantes como intermitentes distribuidos alrededor del cauce, dentro de estos, es importante tener en cuenta el caudal correspondiente a la Planta de Tratamiento de Agua Residual de Tunja. Para la determinación de esta información es de gran importancia realizar una serie de visitas a campo, debido a que allí se determinará el caudal y la velocidad en cada uno de los puntos de vertimiento para posteriormente establecer el coeficiente de Manning (Chow et al., 1994),

además se realizará la medición del caudal a inicios del tramo a estudiar que será denominado caudal de calibración (Q_c).

Implementación del modelo hidráulico en HEC-RAS

En esta fase de la investigación, se hará uso de la batimetría ya existente para realizar el seccionamiento del cauce con el fin de llevar a cabo el modelo hidráulico en la herramienta de HEC-RAS. Este modelo, tal y como es descrito en la investigación realizada por Fan, Ko, & Wang (2009), servirá para estimar la reaireación en los diferentes tramos del río, lo que permitirá desarrollar un modelo de calidad más ajustado a la realidad, teniendo en cuenta las características hidráulicas propias del cuerpo hídrico. Este modelo se realizará bajo diferentes condiciones de caudales (Q_{50} , $Q_{97.5}$ y Q_c) y se tendrán como resultados la altura de la lámina de agua y la velocidad, las cuales se agruparán para elaborar la curva de gasto que será constante bajo diferentes escenarios de caudal, pero variará para las diferentes secciones, además de obtenerse la constante de reaireación propia de cada sección y de cada condición de caudal.

Implementación del modelo de calidad de agua

Teniendo en cuenta los anteriores modelos elaborados y la caracterización llevada a cabo, se procederá a realizar el modelo de calidad con ayuda del modelo de calidad QUAL 2KW. Se evaluarán diversos parámetros como: Temperatura, Conductividad, DBO, Oxígeno, Nitrógeno, Fósforo, Alcalinidad y pH. Posteriormente, se realizará la calibración de este por medio de la utilización del caudal de calibración (Q_c). En este modelo se tendrá en cuenta los resultados obtenidos correspondientes al coeficiente de reaireación para cada una de las secciones y bajo los diferentes escenarios de caudal, también se hará uso de las curvas de gasto y de los análisis de calidad realizados a cada uno de los vertimientos. A partir del modelo de calidad, se simularán los distintos escenarios (Q_{base} , Q_{50} , $Q_{97.5}$) con base en los parámetros calibrados.

Cálculo de los índices de calidad

En esta última etapa, se utilizarán los datos obtenidos a partir del modelo de calidad, y se establecerán los valores de los índices en cada tramo y para cada uno de los escenarios de caudal, posteriormente, se representarán los resultados espacialmente mediante los sistemas de información geográfica representados por una gama de colores.

Fuentes de información

Para la realización de esta investigación se hará uso tanto de información preliminar como de información primaria, dentro de la información preliminar se encuentra la información climatológica satelital, de cobertura y usos de suelo, información limnimétrica de las estaciones presentes en la zona de estudio del IDEAM y el modelo de elevación digital con resolución de 12.5 x 12.5 m. Con respecto a la información primaria utilizada en el estudio, se realizarán una serie de visitas a campo para la determinación de ciertos insumos como lo son, la identificación de vertimientos tanto puntuales como intermitentes, tomas de muestras en cada uno de estos, información de caudal, vadeo para la determinación del Manning y tomas de muestras a lo largo del tramo.

Técnicas y herramientas para la recolección de información

Para poder recopilar la información preliminar, anteriormente mencionada, se hará uso de bases de datos y geodatabases, debido a que estas permiten el almacenamiento de varios tipos de datos geográficos y la correcta edición y almacenamiento de estos. Dentro de estas geodatabases se encontrarán las imágenes satelitales requeridas, el LIDAR, el modelo de elevación digital a utilizar y los archivos vectoriales.

Con respecto a la información de salida obtenida en cada uno de los modelos y la información de calidad recopilada en campo se almacenarán como archivos planos los cuales se consolidarán en una carpeta, así como la información teórica investigada para la realización del proyecto.

Técnicas para la evaluación de resultados

Con la finalidad de analizar la información obtenida y de ajustar los modelos realizados se utilizarán las pruebas de bondad de ajuste en el programa Python, con las cuales es posible evaluar que tan bien un modelo propuesto se ajusta o predice un conjunto de datos en particular, estas estadísticas de prueba calculan las desviaciones entre los datos observados y las predicciones del modelo (Mavridis et al., 2007). Las pruebas de bondad de ajuste que se utilizarán para el desarrollo del presente proyecto son, el coeficiente de determinación, el coeficiente de eficiencia (Nash y Sutcliffe, 1970) y el Índice de coincidencia (Willmott et al., 1985).

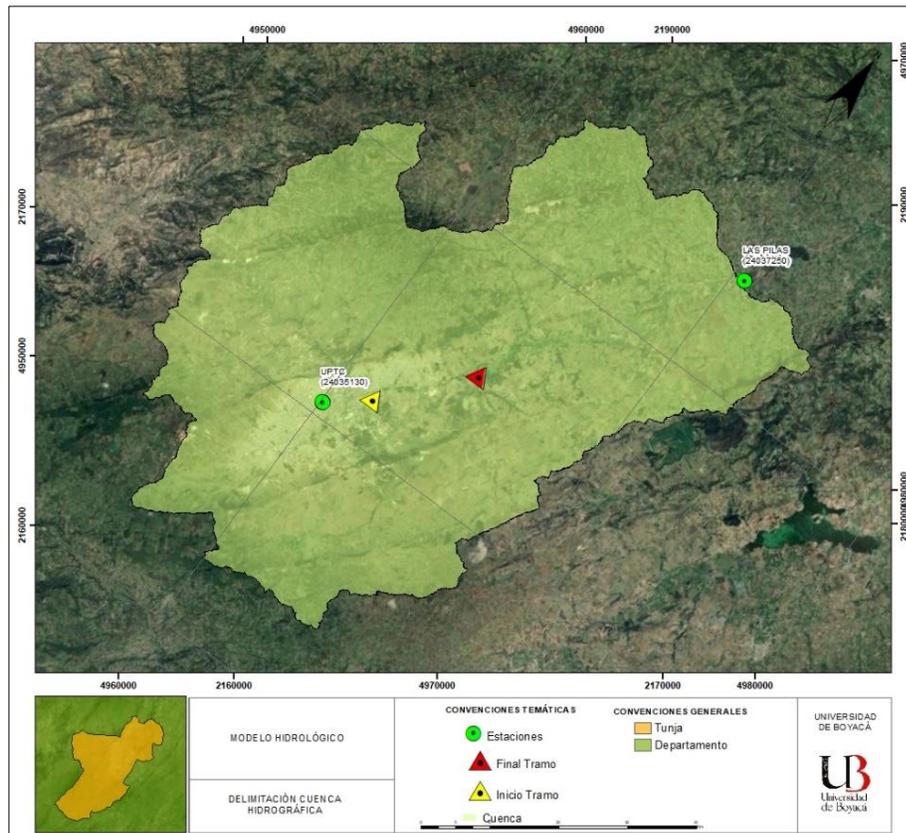
Resultados modelo hidrológico

Para poder dar inicio al proyecto inicialmente se debe realizar el modelado hidrológico de la zona de estudio, debido a que este permitirá obtener una serie de caudales diarios correctamente calibrados con la especificidad de nuestra zona de estudio, lo cuál permitirá elaborar y obtener como fin último la Curva de duración de caudales (CDC) con los caudales Q50, Q95 y Q97.5 que serán utilizados como insumos para la realización del modelamiento hidráulico.

Insumos modelo

Delimitación cuenca hidrográfica. Para la realización de la delimitación de la cuenca hidrográfica correspondiente a la zona de estudio se tuvo como insumos el modelo de elevación digital, (DEM) con paso de malla 12.5 por 12.5 obtenido a través de la base de datos de Alaska Satellite Facility, ASF del satélite ALOS PALSAR y como punto de desfogue o punto de drenaje se hizo uso de la estación del IDEM Las Pilas [24037250] esto debido a su cercanía en la zona de estudio.

Con estos insumos se realizó la delimitación de la cuenca por medio de la herramienta GIS del software HEC-HMS.

Figura 2*Delimitación cuenca hidrográfica*

Fuente: autores, 2022

Datos usos de suelo. Inicialmente para la determinación de uso y coberturas de suelo se realiza el descargue de imágenes satelitales por medio del portal de datos USGS Earth Explorer, por medio del cual nos permite descargar imágenes satélites, desde datos ópticos y de radar hasta imágenes de clima. Para el caso del presente proyecto se hizo uso de imágenes satelitales Landsat correspondientes a la zona de estudio.

Con estas imágenes satelitales como insumo se hizo la determinación de los usos y coberturas por medio de la herramienta de ArcGIS Iso Cluster Unsupervised Classification esto con la finalidad de determinar características físicas del suelo como lo son la textura, la porosidad y la conductividad hidráulica. El anterior procedimiento fue realizado con imágenes satelitales correspondientes al año 1992 y al año 2018 para la calibración del modelo más adelante.

Teniendo en cuenta lo anterior, cabe resaltar que la herramienta “Iso Cluster Unsupervised Classification” es una herramienta que combina las funcionalidades de las herramientas Cluster

ISO y Clasificación de máxima verosimilitud requiriendo como entrada una serie de bandas de raster, es decir una imagen satelital, ortofoto o archivo raster y generando como salida un raster clasificado según la cantidad de clases definidas.

Tiempo de concentración. El tiempo de concentración es otro de los parámetros que tenemos que establecer inicialmente y va ligado al parámetro Lag Time en el método SCS Unit Hydrograph. Para la determinación de este se hizo uso de la formulación numérica correspondiente al método de Kirpich en donde se emplean como insumo:s la longitud del cauce y la pendiente media de la cuenca, como se observa a continuación.

$$T_c (\text{min}) = 3.98 * \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Información climática. Con la finalidad de realizar la recopilación correspondiente a la información climática para el modelo hidrológico, inicialmente se hizo una determinación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas presentes en la zona de influencia de la cuenca hidrográfica y se determinaron las estaciones.

Tabla 1

Estaciones determinadas

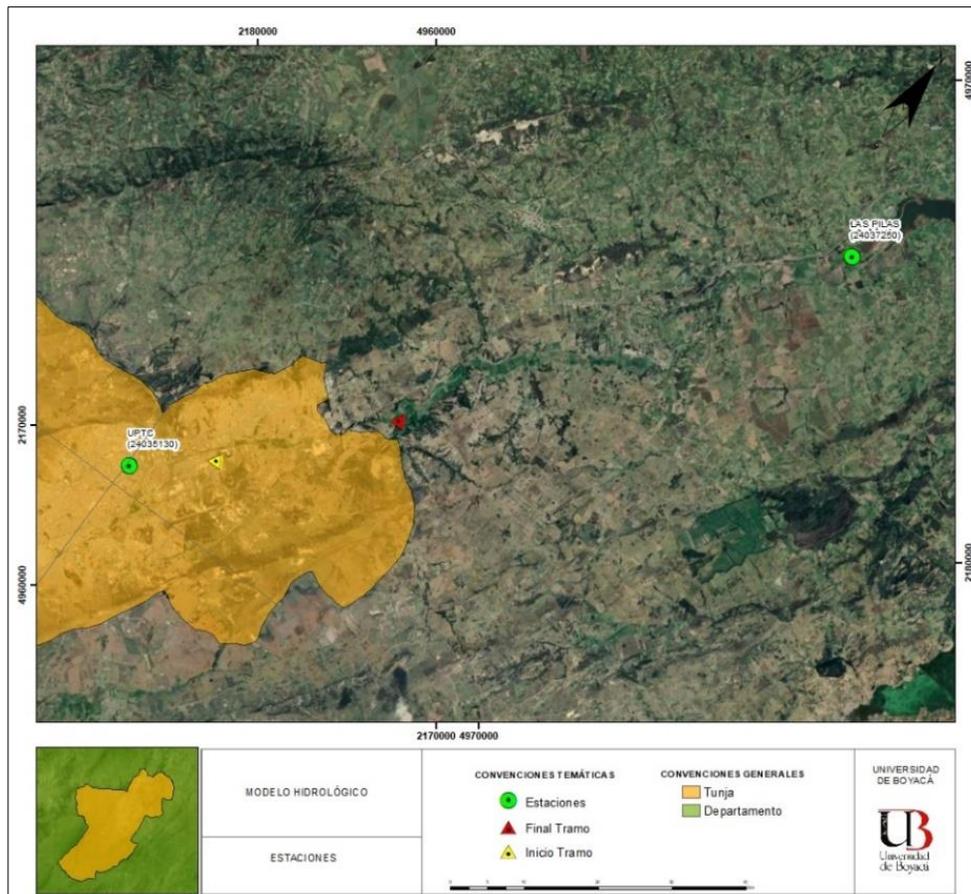
Estación	Descripción
UPTC	Código: 24035130
	Nombre: UPTC [24035130]
	Categoría: Climática principal
	Longitud: -73. 360813
	Latitud: 5.543078
	Altitud: 2690
	Departamento: Boyacá
	Municipio: Tunja
	Estado: Activa
	Fecha de Instalación: 2/15/1962
Fecha de Suspensión:	
LAS PILAS	Código: 24037250
	Nombre: LAS PILAS [24037250]
	Categoría: Limnimétrica
	Longitud: -73.266667
	Latitud: 5.666667

Altitud: 2500
 Departamento: Boyacá
 Municipio: Tuta
 Estado: Suspendida
 Fecha de Instalación: 10/15/1970
 Fecha de Suspensión:

Fuente: IDEAM 2022.

Figura 3

Estaciones a analizar en la zona de estudio



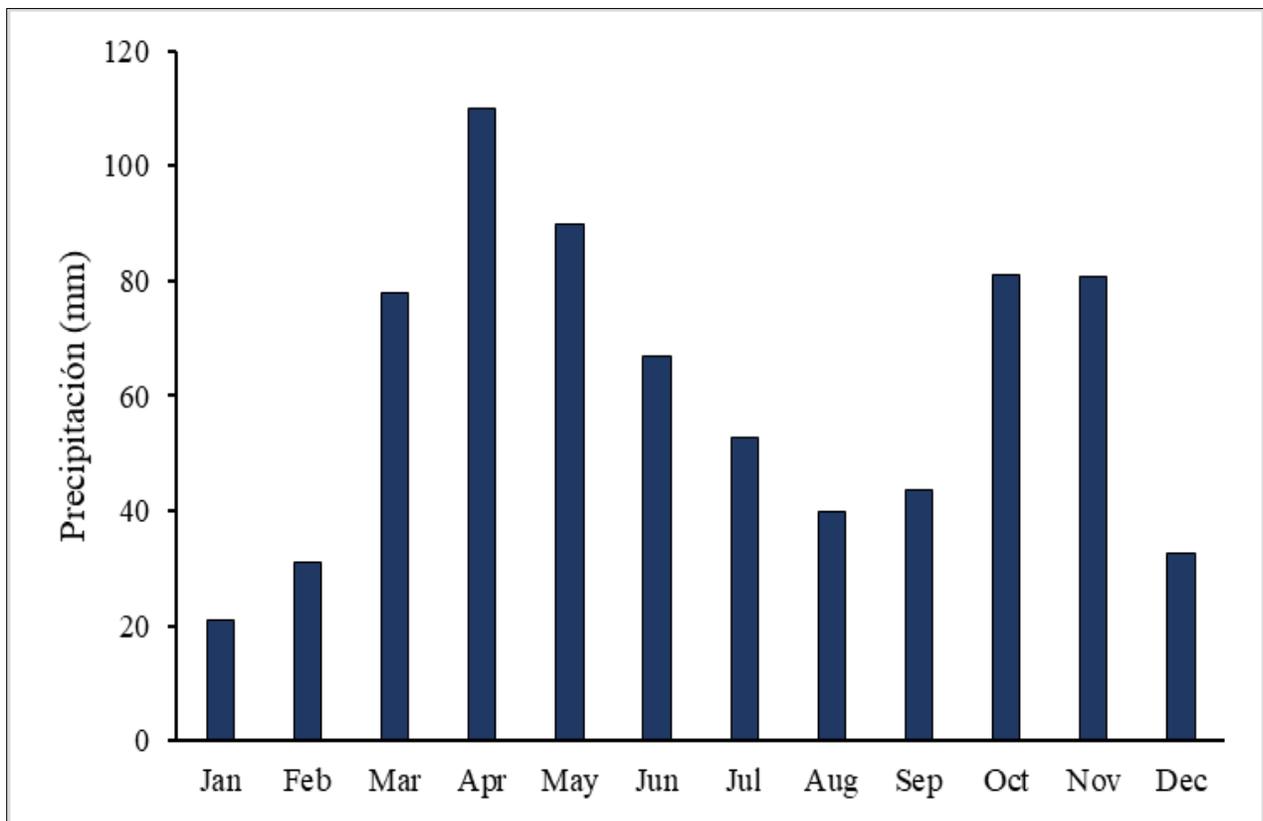
Fuente: autores, 2022

Precipitación. Para continuar con el proceso de recolecta de datos para el modelo hidrológico es fundamental el descargue de datos diarios de precipitación o día pluviométrico, para este paso se hizo uso de la base de datos del IDEAM, por medio del Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos, DHIME, y teniendo en cuenta la zona de estudio se utilizó la estación con mayor cercanía geográficamente, la estación UPTC [24035130],

para un periodo desde el año 1992 hasta el año 2022, más sin embargo al momento de descargar los valores se encontraron celdas vacías por lo que se hizo el descargue datos satelitales provenientes de la base de datos del proyecto POWER de la NASA, la cual proporciona a través su programa de investigación de Ciencias de la Tierra, por medio de sistemas satelitales, datos para el estudio del clima y procesos climáticos. Teniendo en cuenta estos dos conjuntos de datos se realizó el llenado de datos de celdas vacías con los datos satelitales.

Figura 4

Precipitación media mensual multianual estación UPTC

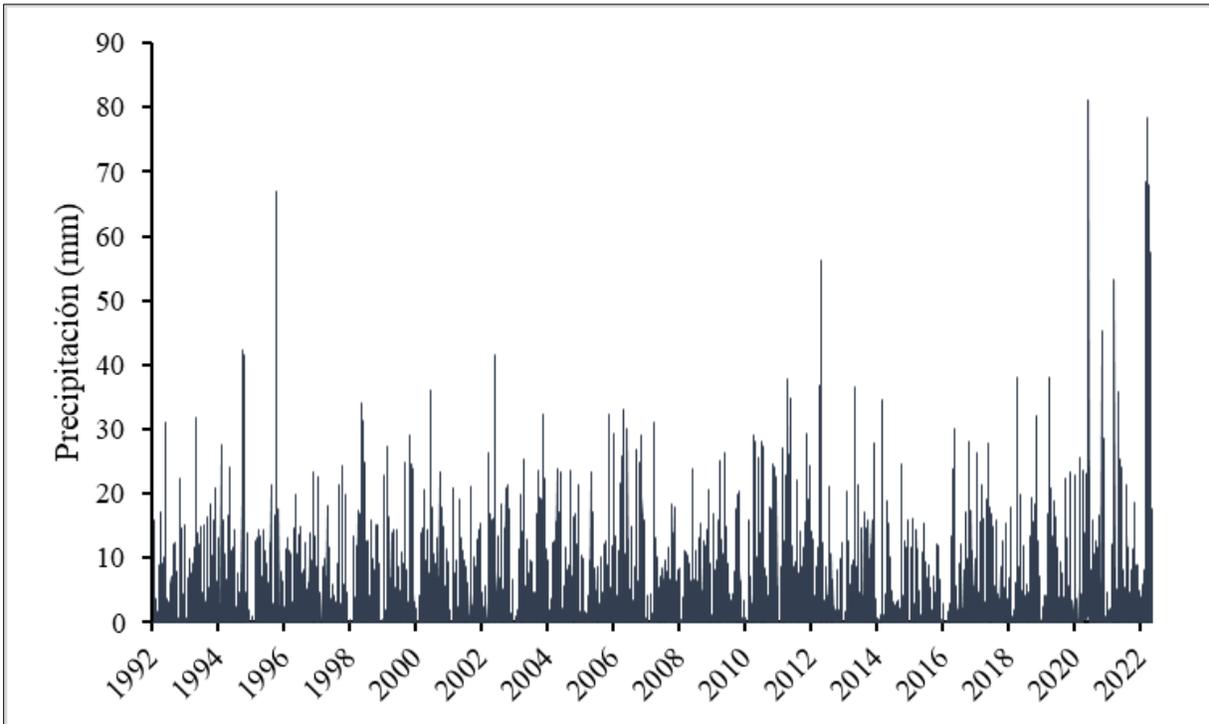


Fuente: autores, 2022

De la anterior gráfica se pudo determinar un claro régimen bimodal, un régimen *bimodal* se caracteriza por presentar dos temporadas lluviosas al año, la primera de las cuales ocurre entre marzo y mayo, y la segunda de octubre a noviembre, así como lo representado en la Figura, también se puede determinar una precipitación media mensual multianual promedio de 67.5 mm.

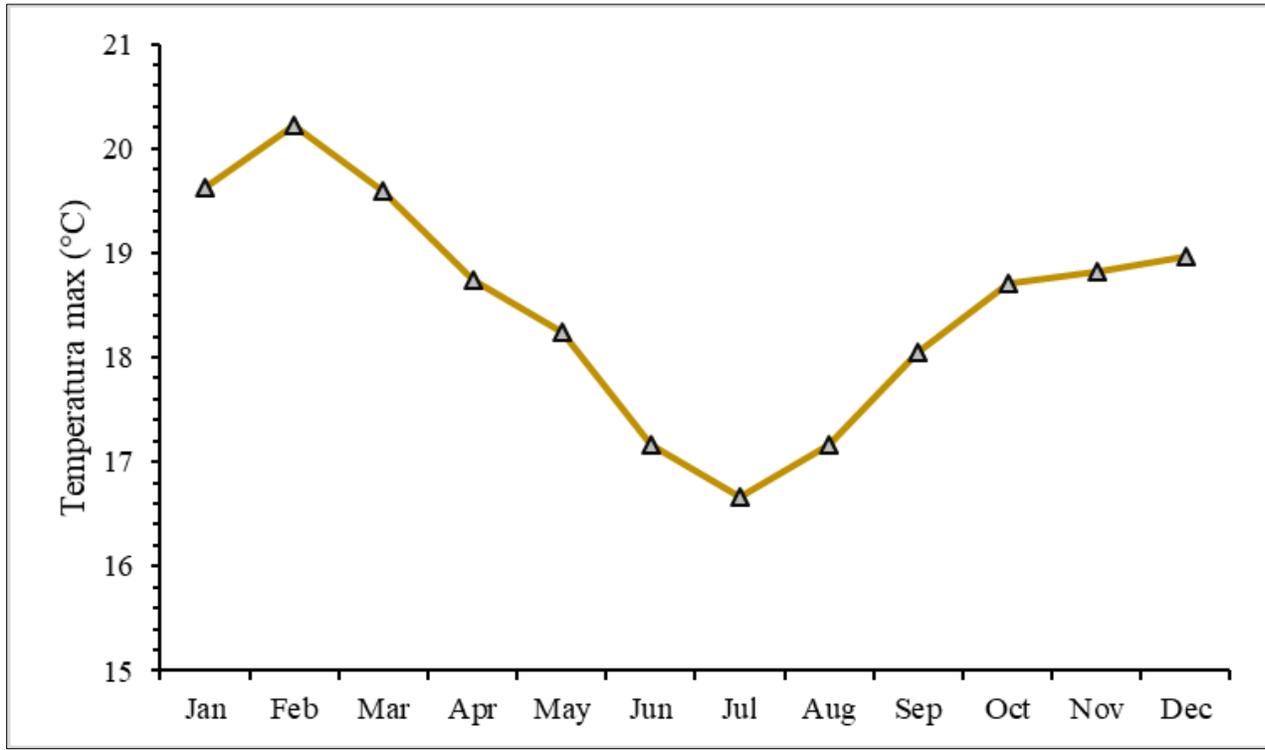
Figura 5

Precipitación diaria anual estación UPTC



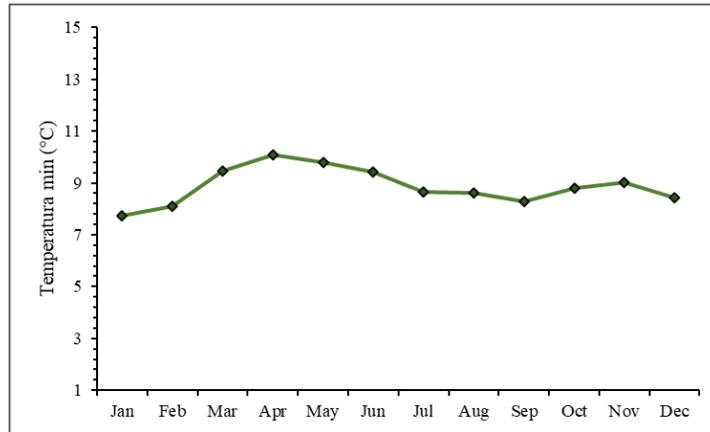
Fuente: autores, 2022

Temperatura. Para la determinación de estos datos se hizo igualmente uso de la base de datos IDEAM, DHIME igualmente provenientes de la estación UPTC [24035130], esto para temperatura máxima y temperatura mínima para un periodo de 1992 al 1998, al igual que con la precipitación se tuvo que hacer uso de datos de satelitales provenientes de la base de datos POWER de la NASA por la presencia de celdas vacías y de igual modo se realizó el respectivo llenado de datos.

Figura 6*Temperatura máxima mensual multianual estación UPTC*

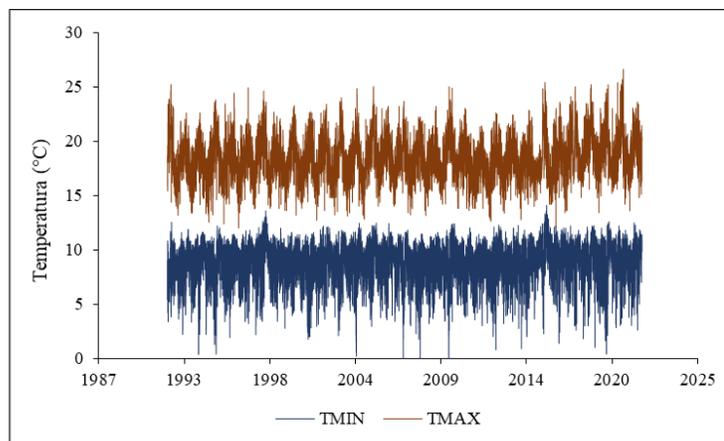
Fuente: autores, 2022

Como se puede observar en el gráfico anterior para un rango de tiempo entre el año 1992 y el año 1998 a una escala mensual multianual, los valores de temperatura máxima oscilan entre 16.5°C y 20.6°C, observando como valor más alto una temperatura máxima de 20.6°C presentada en el mes de febrero y el valor más bajo fue de 16.5°C presentada en el mes de julio, lo anterior destacando una diferencia entre la temperatura del mes más frío con el mes más cálido de 4.1°C y por último, con un valor promedio de temperatura máxima de 18.55°C en la zona de influencia del proyecto.

Figura 7*Temperatura mínima mensual multianual estación UPTC*

Fuente: autores, 2022.

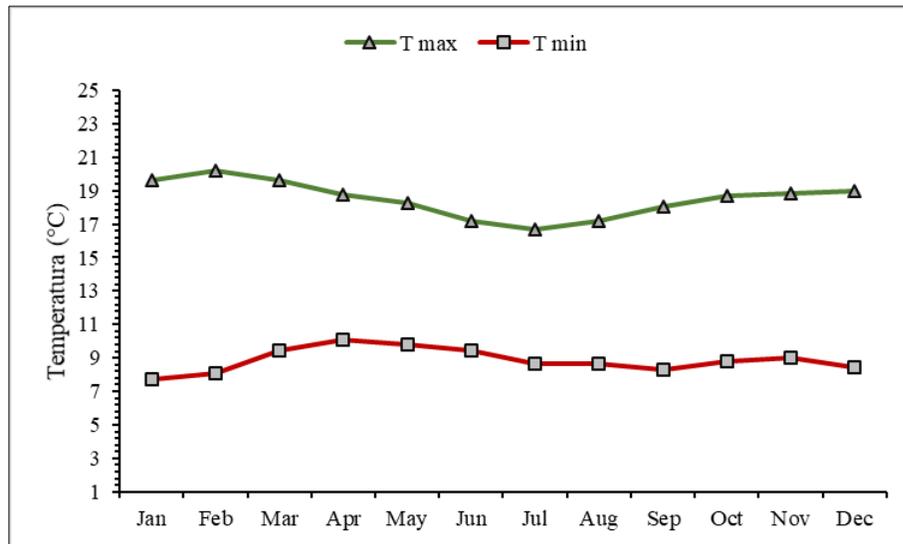
Como se puede observar en el gráfico anterior para un rango de tiempo entre el año 1992 y el año 1998 a una escala mensual multianual, los valores de temperatura mínima oscilan entre 7.6°C y 9.4°C, observando como valor más alto una temperatura máxima de 7.6°C presentada en el mes de enero y el valor más bajo fue de 9.4°C presentada en el mes de abril, lo anterior destacando una diferencia entre la temperatura del mes más frío con el mes más cálido de 1.8°C y por último, con un valor promedio de temperatura máxima de 8.5°C en la zona de influencia del proyecto.

Figura 8*Temperatura máxima y mínima diaria anual estación UPTC*

Fuente: autores, 2022.

Figura 9

Temperatura mínima y máxima mensual multianual estación UPTC



Fuente: autores, 2022.

Evapotranspiración. Para el cálculo de la evapotranspiración, se empleó el método de Hargreaves-Samani, el cual determina la Evapotranspiración Potencial con datos de entrada correspondientes a temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar. Este último parámetro se puede determinar por medio de la fórmula propuesta por Samani (2000) con datos correspondientes a la latitud, al coeficiente KT calculable a partir de la presión atmosférica (Guo, 2022). Esto se puede evidenciar en las siguientes fórmulas.

$$ET_0 = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) * R_s$$

ET_0 = Evapotranspiración potencial diaria, mm/día

T_{med} = Temperatura media, °C

R_s = Radiación solar incidente, mm/d

$$R_s = R_o * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

R_s : Radiación solar incidente, mm/d

R_o : Radiación solar extraterrestre, mm/d (Tabulada)

KT= Coeficiente

T_{\max} = Temperatura diaria máxima, °C

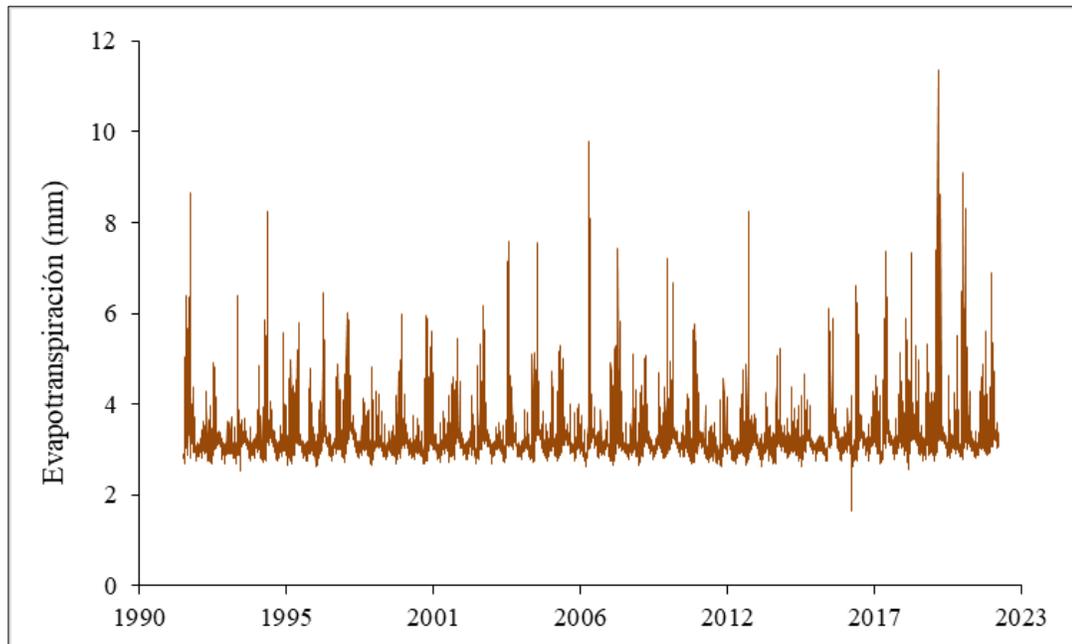
T_{\min} =Temperatura diaria mínima, °C

Para la determinación de la ET, en el presente proyecto se hizo uso del software R, el cual cuenta con un paquete para implementar múltiples formulaciones de evapotranspiración, en total 17 formulaciones, las cuales realizan cálculos directos bajo diferentes condiciones espaciales y climáticas; Entre estas formulaciones se encuentra Hargreaves-Samani (Hargreaves and Samani,1985).

Por medio de este paquete de R se pueden lograr objetivos como: Realizar comprobaciones básicas de cada variable de entrada en busca de datos faltantes, verificar las variables de entrada y realizar cálculos para completar las entradas de datos faltantes con los datos existentes, realizar cálculos utilizando la formulación elegida, mostrar un resumen que informe al usuario sobre la formulación utilizada y la cantidad de evapotranspiración calculada, graficar los resultados de la asociación entre la ET estimada y las diferentes variables climáticas (Guo et al., 2014).

Figura 10

Evapotranspiración método Hargreaves-Samani estación UPTC

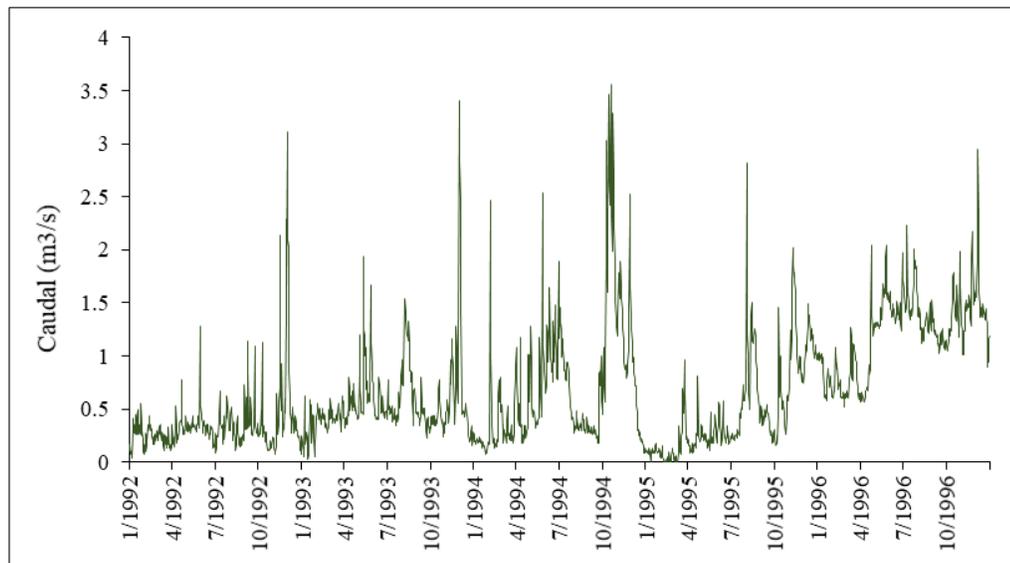


Fuente: autores, 2022.

Caudal. Con la finalidad de utilizar los caudales observados para realizar el proceso de calibración del modelo hidrológico, se hizo uso de los valores de caudal obtenidos en la Estación LAS PILAS [24037250] para el periodo entre el año 1992 y el año 1996.

Figura 11

Caudal estación Las Pilas



Fuente: autores, 2022.

Modelamiento en HEC-HMS

Selección de métodos de modelado

Canopy. El primer método a determinar es el del “Canopy” y hace referencia a la presencia de vegetación en el paisaje de la subcuenta. Las plantas interceptan la precipitación reduciendo la cantidad de precipitación que llega a la superficie del suelo. El agua interceptada se evapora entre tormentas y las plantas también son capaces de extraer el agua del suelo en un proceso llamado transpiración. La selección del método es opcional.

Teniendo en cuenta lo anterior, para el presente proyecto se hizo uso de un método denominado “Simple Canopy” es decir la representación simple del dosel de una planta. En la cual toda la precipitación se intercepta hasta que se llena la capacidad de almacenamiento del dosel.

Una vez que se llena el almacenamiento toda la precipitación adicional cae directamente al suelo si no se incluye la representación de la superficie. Los parámetros inmersos a este método son cantidad inicial y cantidad máxima de almacenamiento, el cual será un parámetro a calibrar.

Tabla 2

Datos Simple Canopy modelo hidrológico

Subbasin	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)	Crop Coefficient	Evotranspiration	Uptake Method
Cuenca	0	0.527	1	Only Dry Periods	None

Fuente: autores, 2022.

Surface. Este hace referencia a la representación de la superficie del suelo donde el agua puede acumularse en el almacenamiento de la depresión superficial. Este dependerá de la cobertura del suelo, cuando se habla de suelos pavimentados, el valor es cercano a cero, pero al hablarse de un campo agrícola el valor aumenta.

Para el caso del presente proyecto se hizo uso del método “Simple Surface” el cual es una representación simple de la superficie del suelo. Toda la precipitación o precipitación directa que llega a la superficie del suelo se captura en almacenamiento hasta que se llena la capacidad de almacenamiento de la superficie. El agua almacenada en la superficie se infiltra en el suelo siempre que esté presente en el almacenamiento. Los parámetros inmersos a este método son cantidad de agua inicial y la cantidad máxima los cuales son valores determinados con los usos de suelo.

Tabla 3

Datos Simple Surface modelo hidrológico

Subbasin	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)
Cuenca	0	4.35

Fuente: autores, 2022.

Loss. Este hace referencia a las pérdidas contenidas dentro de una subcuenca. Todos los métodos proporcionados por el software conservan la masa, es decir, la suma de la infiltración y

la precipitación que quedan en la superficie siempre será igual a la precipitación total entrante. Hace referencia al modelo más complejo y más importante desde el punto de vista hidrológico.

Para el presente caso se hizo uso del método “Soil Moisture Accounting Loss”, hace referencia a un método que se encarga de calcular la infiltración de agua desde la superficie; la retención del agua en las capas de suelo (soil), y en dos capas de subsuelo (acuíferos GW1 y GW2); además de los movimientos de agua entre estas capas y la generación de caudal a través de estas capas; ya sea aflorando a la superficie en escorrentía cuando hay un evento de gran magnitud como generando un caudal base en condiciones de normalidad.

En cuanto a los parámetros que tiene en cuenta este método, se tienen valores iniciales para los tres tanques (suelo y dos acuíferos), existe un parámetro de impermeabilidad que controla el porcentaje de área de la subcuenca considerado como impermeable, es decir genera escorrentía, y que será calculado más adelante teniendo en cuenta los usos de suelo por lo que no entra en un proceso de calibración.

El tanque correspondiente al suelo tiene como parámetros la infiltración máxima de agua procedente de la superficie, el almacenamiento máximo de la capa, el almacenamiento de tensión y la percolación del suelo los cuales son determinados por medio de los usos de suelo. Los tanques correspondientes a los acuíferos (GW1 y GW2) tienen como parámetros su almacenamiento, el agua que llega desde la capa del suelo (percolación de suelo), percolación de la capa GW1 a la capa GW2 y la percolación de la capa GW2 hacia la profundidad, considerada como agua perdida. Adicionalmente hay dos coeficientes en cada uno de los acuíferos que modelan el flujo de agua que generan en condiciones de saturación.

Tabla 4

Datos Soil Moisture Accounting Loss modelo hidrológico

Subbasin	Soil (%)	Groundwater 1 (%)	Groundwater 2 (%)	Maximum Infiltration (mm/h)	Impervius (%)	Soil Storage (mm)	Tension Storage (mm)	Soil Percolation (mm)
Cuenca	0	0	0	8.96	1	99.71	26.75	8.96

Groundwater 1 Storage (mm/h)	Groundwater 1 Percolation (mm/h)	GW1 Coefficient (h)	Groundwater 2 Storage (mm/h)	Groundwater 2 Percolation (mm/h)	GW2 Coefficient (h)

9.94 35 8.27 2 2.11 57

Fuente: autores, 2022.

Transformación. Este método se define cómo es la escorrentía generada en el tiempo, tomando como partida la precipitación neta no retenida en los numerales anteriores.

Para este caso se hizo uso del método “SCS Unit Hydrograph Transform” el cual define un hidrograma unitario curvilíneo al establecer primero el porcentaje de escorrentía unitaria que ocurre antes del flujo máximo. Este método nos pide un tipo de gráfico y como parámetro el LAG time, ligado al tiempo de concentración ya anteriormente calculado.

Tabla 5

Datos CSC Unit Hydrograph modelo hidrológico

Subbasin	Graph Type	Lag Time (min)
Cuenca	Standard (PRF 484)	478

Fuente: autores, 2022.

Baseflow. Sirve para calcular la suma de la escorrentía superficial con el flujo base y para calcular su evolución en el tiempo.

Para este caso se determinó el método “Linear Reservoir”, el cual utiliza un reservorio lineal para modelar la recesión del flujo base después de una tormenta. Es el único método de flujo base que conserva la masa dentro de la subcuenca. Se hizo uso de este por su afinidad para la simulación continua, al estar trabajando con series temporales de décadas de longitud. Este conlleva 6 parámetros, tres para cada tanque de acuífero (GW1 y GW2), cada uno con un flujo inicial, un coeficiente y un número de tanques para cada capa, parámetros que serán sujetos a calibración teniendo en cuenta información determinada de literatura.

Tabla 6

Datos Linear Reservoir modelo hidrológico

Subbasin	Number of Layers	Initial Type	GW 1 Flow Type	GW1 Initial (m3/s)	GW1 Initial (m3/s/Km2)	GW1 Fraction	GW1 Coefficient (h)	GW1 Reservoirs
Cuenca	2	Discharge	Baseflow	0.27		0	26	5

GW2 Flow Type	GW2 Initial (m3/s)	GW2 Initial (m3/s/Km2)	GW2 Fraction	GW2 Coefficient (h)	GW2 Reservoirs
Baseflow	0.16		0	10000	3

GW3 Flow Type	GW3 Initial (m3/s)	GW3 Initial (m3/s/Km2)	GW3 Fraction	GW3 Coefficient (h)	GW3 Reservoirs	GW3 Coefficient (h)	GW3 Reservoirs
-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: autores, 2022.

Routing. Este corresponde al mismo tránsito de hidrogramas. Calcula la evolución de un hidrograma según transcurre por un cauce. Se ha elegido Muskingum como método, ya que al tantear la opción de usar Muskingum-Cunge se determinó que algunos de sus parámetros eran difíciles de obtener. Muskingum tiene dos parámetros Muskingum K y Muskingum X que serán calibrados.

Tabla 7

Datos Routing modelo hidrológico

Reach	Initial Type	Initial Discharge (m3/s)	Muskingum K (h)	Muskingum X (h)	Number of Subreaches
Jordán	Discharge = Inflow		8.25	0.264	2

Fuente: autores, 2022.

Importar datos climáticos

Con la finalidad de importar los datos climatológicos correspondiente a las estaciones seleccionadas a un formato que pueda ser leído por el software HEC-HMS se realizó el ingreso manual de datos de Excel, con lo que se obtuvo una base de datos en formato DSS, la cual podrá ser empleada en cualquier software del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC).

Posterior a esto se exportó la información en formato DSS al software HEC-HMS como se observa a continuación.

Tabla 8*Datos climatológicos importados HEC-DSSVue*

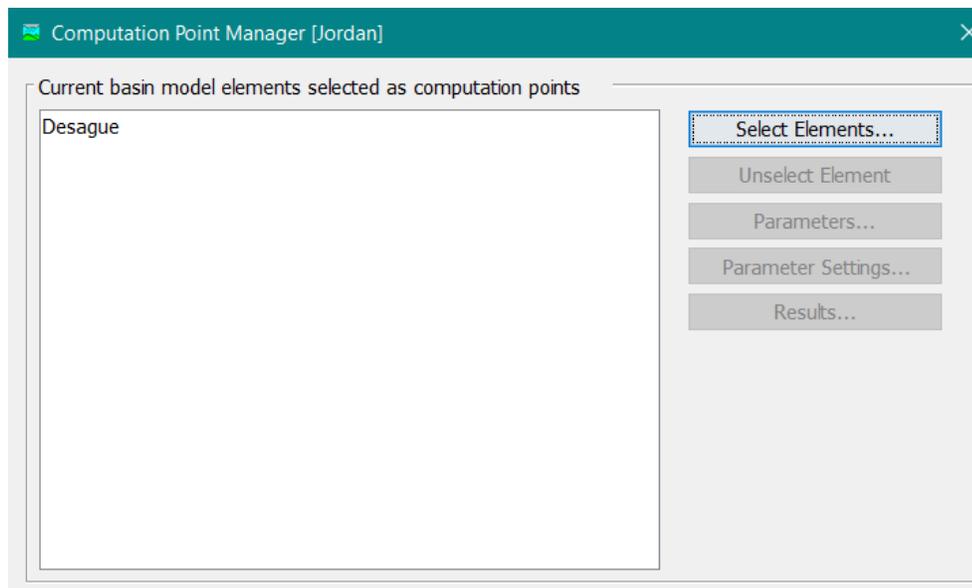
Number	Part A	Part B	Part C	Part D / range	Part E	Part F
1	CUENCA TUNJA	HARGREAVES	ET-POTENTIAL	31Dec1991 - 30Dec1998	1Day	
2	CUENCA TUNJA	LAS PILAS	FLOW	31Dec1991 - 31Dec1996	1Day	
3	CUENCA TUNJA	UPTC	PRECIP_ING	31Dec1991 - 30Dec1998	1Day	
4	CUENCA TUNJA	UPTC	TEMPERATURE	31Dec1991 - 30Dec1998	1Day	

Fuente: autores, 2022.

Calibración del método preliminar

Calibración manual. Con la finalidad de realizar una correcta calibración del modelo se hace uso del método de calibración mediante el punto de cálculo el cual hace parte del método de calibración semiautomática disponible en HEC-HMS.

Inicialmente se realiza la selección de un elemento hidrológico en HEC-HS el cual puede ser un tramo, un cruce o una subcuenca, en el presente caso se hizo uso del desagüe como elemento hidrológico.

Figura 12*Determinación punto de cálculo*

Fuente: autores, 2022.

Una vez seleccionado el elemento definido como punto de cálculo, se selecciona el administrador de punto de cálculo y se seleccionan los parámetros hidrológicos para la calibración del modelo, cabe resaltar que los parámetros a calibrar son los parámetros que no se hallaron por medio de las coberturas y tipos de suelo hallados en la imagen satelital del año 1992.

Inicialmente se configuran los rangos de los valores que tendrá cada parámetro esto tomando como referencia los valores en la literatura por (Cabrera-Balarezo et al., 2019) mostrados a continuación.

Tabla 9

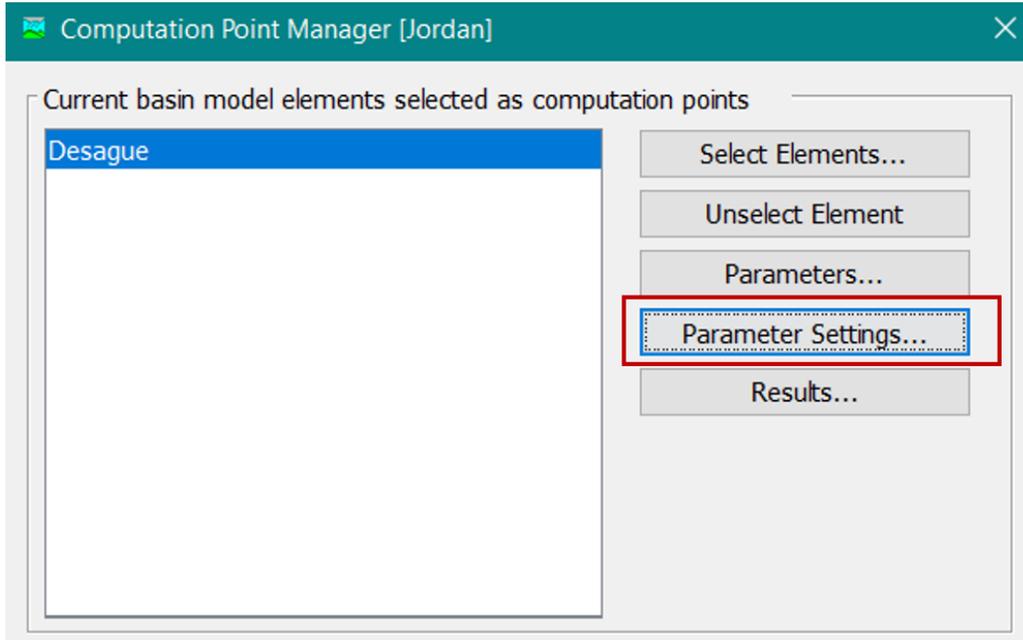
Parámetros usados para la calibración y rango de valores por defecto

	Parámetros	Condiciones Iniciales	Significado	Rangos de variación por defecto (Parámetros)
Canopy	Max Storage (mm)	Initial Storage (%)	Almacenaje máximo, Almacenaje inicial	0.001 - 1500
	Max Storage (mm)	Initial Storage (%)	Almacenaje máximo, Almacenaje inicial	0.001 - 1500
	Max infiltration (mm/hr)	Soil (%)	Infiltración máxima, Suelo	0.01 - 500
	Impervious (%)	Groundwater r 1 (%)	Zonas impermeables, agua subterránea 1	0 - 100
Surface	Soil Storage (mm)		Almacenaje del suelo	0.01 - 1500
	Tension Storage (mm)		Almacenaje en zona de tensión	0.01 - 1500
	Soil Percolation (mm/hr)		Percolación del suelo	0.01 - 500
	GW 1 Storage (m)		Almacenaje en agua subterránea 1	0.01 - 1500
	GW 1 Percolation (mm/hr)		Percolación en agua subterránea 1	0.01 - 500
	GW 1 Coefficient (hr)		Coefficiente en agua subterránea 1	0.01 - 10000
	GW 2 Storage (m)		Almacenaje en agua subterránea 2	0.01 - 1500
	GW 2 Percolation (mm/hr)		Percolación en agua subterránea 2	0.01 - 500
Transform	GW 2 Coefficient (hr)		Coefficiente en agua subterránea 2	0.01 - 10000
	Time of Concentration (hr)		Tiempo de concentración	0.0167 - 1000
Baseflow	Storage Coefficient (hr)		Coefficiente de almacenaje	0.01 - 1000
	GW 1 Storage Coefficient (hr)	GW 1 Initial (%)	Coefficiente de almacenaje en agua subterránea 1, Cantidad inicial en agua subterránea 1	0.01 - 10000
	GW 2 Storage Coefficient (hr)	GW 1 Initial (%)	Coefficiente de almacenaje en agua subterránea 2, Cantidad inicial en agua subterránea 1	0.01 - 10000

Fuente: autores, 2022.

Figura 13

Selección "Configuración de parámetros"



Fuente: autores, 2022.

Figura 14

Insertar rangos de valores de cada parámetro

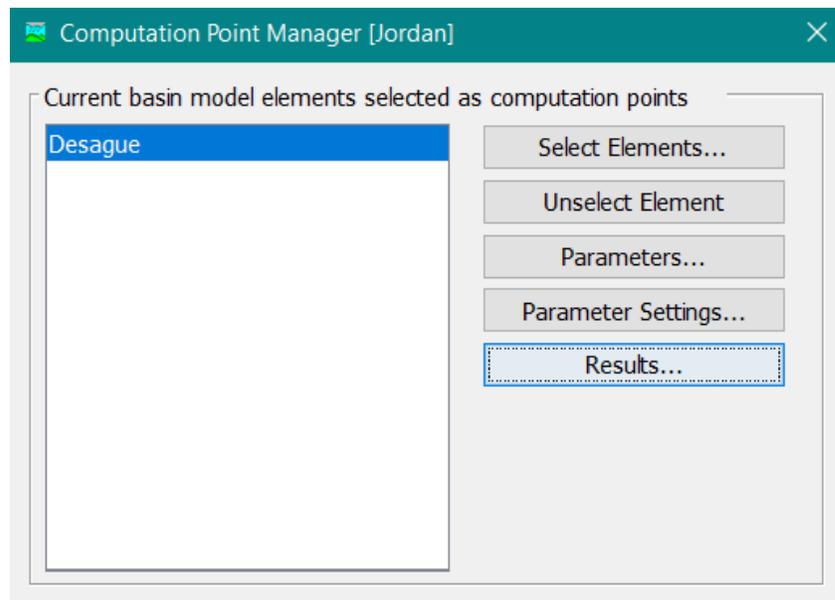
Elements	Parameters	Units	Minimum	Maximum
Cuenca	Soil Moisture Accounting - GW1 Storage	MM	1	100
Cuenca	Soil Moisture Accounting - GW1 Storage Coefficient	HR	1	100
Cuenca	Soil Moisture Accounting - GW1 Percolation	MM/HR	0.01	30
Cuenca	Soil Moisture Accounting - GW2 Storage	MM	20	1000
Cuenca	Soil Moisture Accounting - GW2 Storage Coefficient	HR	500	10000
Cuenca	Soil Moisture Accounting - GW2 Percolation	MM/HR	0.01	30
Cuenca	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	50	10000
Jordan	Muskingum - K	HR	8.25	13.75
Jordan	Muskingum - x		0.158	0.264
Jordan	Muskingum - Number of Subreaches		1.29	2.15
Cuenca	Simple Canopy - Max Storage	MM	0.52	0.88
Cuenca	Linear Reservoir - GW 1 Reservoirs		1	15
Cuenca	Linear Reservoir - GW 1 Coefficient	HR	1	500

Fuente: autores, 2022.

Una vez identificados los rangos sobre los cuales vamos a realizar la calibración, en la pestaña “Resultados” se seleccionará los resultados de las series de tiempo y permitirán identificar la variación tanto del gráfico como la actualización automática de los parámetros de calibración ajustados, como se observa a continuación.

Figura 15

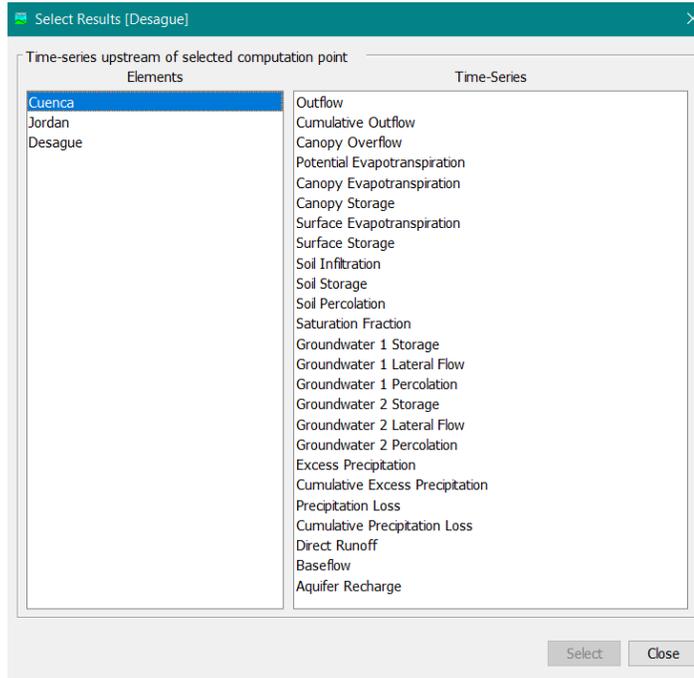
Selección pestaña "Resultados"



Fuente: autores, 2022

Figura 16

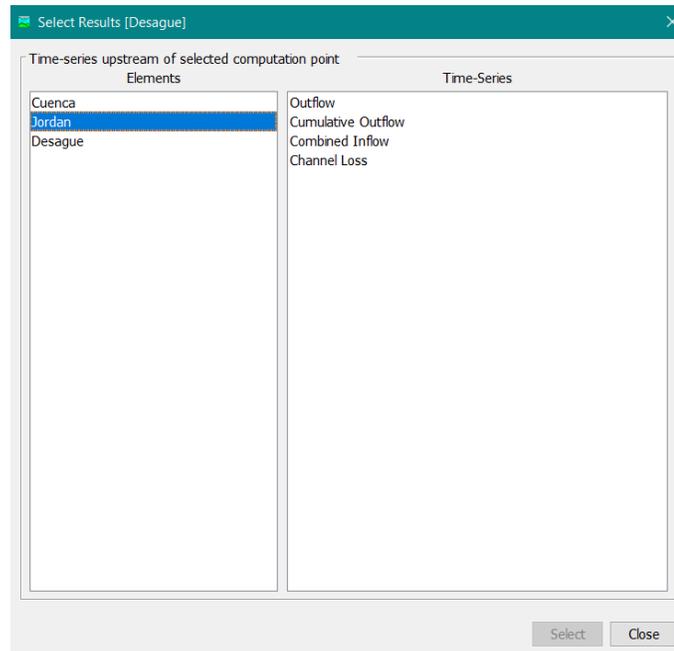
Serie temporal aguas arriba del punto de cálculo seleccionado



Fuente: autores, 2022.

Figura 17

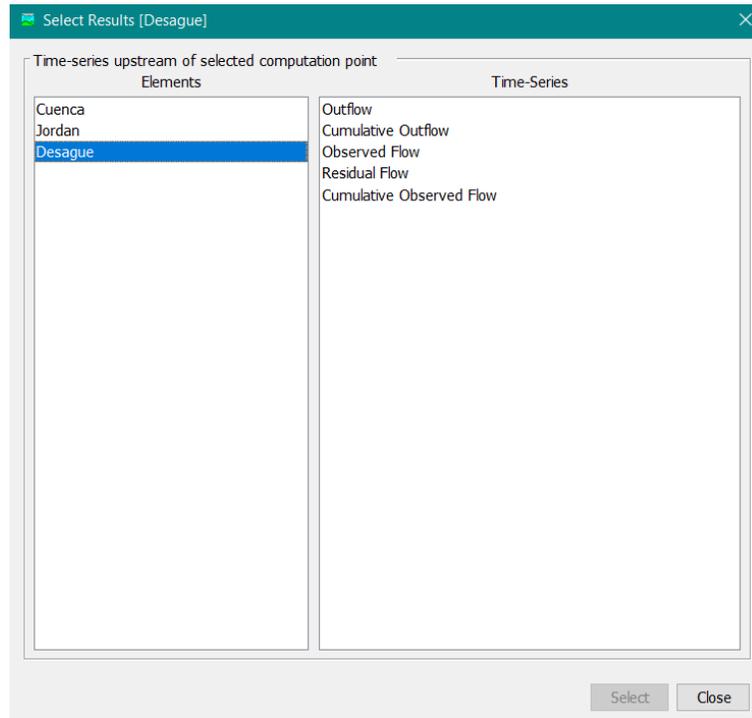
Serie temporal aguas arriba del punto de cálculo seleccionado



Fuente: autores, 2022.

Figura 18

Serie temporal aguas arriba del punto de cálculo seleccionado



Fuente: autores, 2022.

Una vez finalizada la ejecución de simulación normal, se selecciona el botón de cálculo (desagüe) y se selecciona “Ayudas de calibración”, esto arrojará una barra deslizante que nos permitirá realizar la calibración manual dentro de los rangos anteriormente seleccionados.

Parámetros calibrados. En las tablas a continuación se presentan los valores de los parámetros resultantes en el proceso de calibración.

Como bien se indicó antes son 40 parámetros en total, aunque tras la calibración hay algunos que han permanecido con el valor que tenían inicialmente que son los determinados por medio de los usos de suelo.

Tabla 10*Parámetros del Soil Moisture Accounting calibrados*

Soil Moisture Accounting Loss	
Subbasin	Cuenca
Soil (%)	0
Groundwater 1 (%)	0
Groundwater 2 (%)	0
Máximum Infiltration (mm/h)	8.96
Impervius (%)	1
Soil Storage (mm)	99.71
Tension Storage (mm)	26.75
Soil Percolation (mm)	8.96
Groundwater 1 Storage (mm/h)	9.94
Groundwater 1 Percolation (mm/h)	35
GW1 Coefficient (h)	8.27
Groundwater 2 Storage (mm/h)	2
Groundwater 2 Percolation (mm/h)	2.11
GW2 Coefficient (h)	57

Fuente: autores, 2022.

Tabla 11*Parámetros de métodos de subcuencas ya calibrados*

Simple Canopy		Simple Surface		SCS Unit Hydrograph Transform	
Initial Storage (%)	0	Initial Storage (%)	0	Lag time (min)	478
Max Storage (mm)	0.527	Max Storage (mm)	4.35		

Fuente: autores, 2022.

Tabla 12*Parámetros de Muskingum Routing calibrados*

Muskingum Routing	
Reach	Jordan

Initial Type	Discharge = Inflow
Initial Discharge (m ³ /s)	
Muskingum K (h)	8.25
Muskingum X (h)	0.264
Number of Subreaches	2

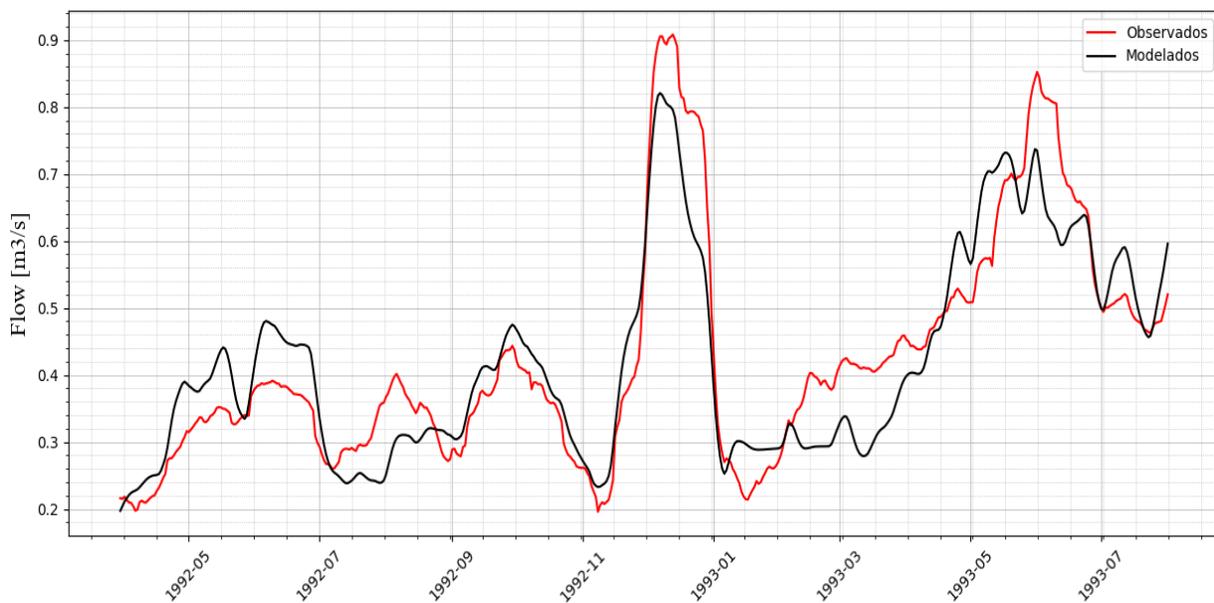
Fuente: autores, 2022.

Ajuste medio móvil 30. En muchas ocasiones al graficar parámetros como un flujo de agua se presentarán en las gráficas variaciones o volatilidad, por tal motivo es muy común hacer uso de una técnica de suavizado siempre llamada “promedio móvil” con la finalidad de ayudar a determinar una tendencia subyacente y otros datos volátiles. Un promedio móvil suaviza una serie de datos al consolidar varios puntos de datos en unidades de tiempo más largos haciendo un promedio de estos.

Por lo anterior, en el presente proyecto se hizo uso de la media móvil 30 la cual es una técnica de suavización de datos realizando un promedio móvil de 30 días generando como resultado la gráfica presentada a continuación.

Figura 19

Resultados obtenidos caudal periodo 01/03/1992 al 01/08/1993 con media móvil 30



Fuente: autores, 2022.

Medidas de bondad de ajuste. Para poder determinar qué tan alta o baja era la discrepancia entre los valores observados y los valores esperados en el modelo de estudio se realizó la prueba de bondad de ajuste, la cual nos permite entender el grado de acoplamiento que existe entre los datos modelados y los valores teóricos u observados que se obtienen de la regresión. Cuanto mejor sea el ajuste, significará una mayor concordancia entre valores.

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales podemos mencionar:

Eficiencia de Nash-Sutcliffe. Se utiliza para evaluar la capacidad del modelo de ajustarse al caudal observado y, por tanto, la eficacia en la predicción de series de caudales. Su función en este caso es la de intentar perfeccionar los eventos más extremos que generan un pico en el caudal y que son realmente complicados de ajustar a la realidad.

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Este determina cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 13

Ajuste de criterio Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: autores, 2022.

Teniendo en cuenta lo anterior, se obtuvo como resultado un coeficiente de NASH de 0.82 indicando un ajuste excelente.

Kling-gupta efficiency. La función KGE proviene de la descomposición del coeficiente NSE y resuelve el inconveniente en su aplicación, debido a que evita la subestimación en los valores máximos y de poca variabilidad al ponderar de forma equitativa los componentes de correlación, desviación y variabilidad. Varía entre 0 y 1 siendo este último el valor óptimo (Zúñiga, Muñoz, & Arumí, 2012).

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + \left(\frac{cd}{rd} - 1\right)^2 + \left(\frac{cm}{rm} - 1\right)^2}$$

Donde:

- ✓ CC: Valor del coeficiente de correlación de Pearson.
- ✓ cd: Desviación estándar de los valores observados.
- ✓ rd: Desviación estándar de los valores simulados.
- ✓ cm: Promedio de los valores observados.
- ✓ rm: Promedio de los valores de simulados.

Es un índice que se utiliza para cuantificar la bondad de un modelo hidrológico que considera buenos los modelos a partir del 0.4.

Los rangos de ajuste de KGE no se encuentran definidos de forma clara para evaluar la eficiencia de la modelación a escala diaria, por lo que se adoptaron los rangos de ajuste del índice NSE (Tabla 3) puesto que ambos índices se encuentran relacionados.

Teniendo en cuenta lo anterior, se obtuvo como resultado un índice KGE de 0.85 indicando un ajuste excelente.

R^2 . Este coeficiente, que se conoce más comúnmente como R-cuadrado (o R^2), evalúa la fuerza de la relación lineal entre dos variables, y es muy utilizado por los investigadores cuando realizan análisis de tendencias.

El coeficiente de determinación o R^2 es una medida utilizada para explicar cuánta variabilidad de un factor puede ser causada por su relación con otro factor relacionado. Esta correlación, conocida como "bondad de ajuste", se representa como un valor entre 0,0 y 1,0. Un

valor de 1,0 indica un ajuste perfecto y, por tanto, un modelo muy fiable para las previsiones futuras, mientras que un valor de 0,0 indicaría que el cálculo no logra modelar los datos con precisión en absoluto.

En un gráfico, la bondad del ajuste mide la distancia entre una línea ajustada y todos los puntos de datos que están dispersos en el diagrama. El conjunto de datos ajustado tendrá una línea de regresión que se acerca a los puntos y tiene un alto nivel de ajuste, lo que significa que la distancia entre la línea y los datos es pequeña.

Teniendo en cuenta lo anterior, se obtuvo como resultado un valor de R^2 de 0.909 indicando un ajuste del modelo muy fiable.

Resultados de la calibración y validación

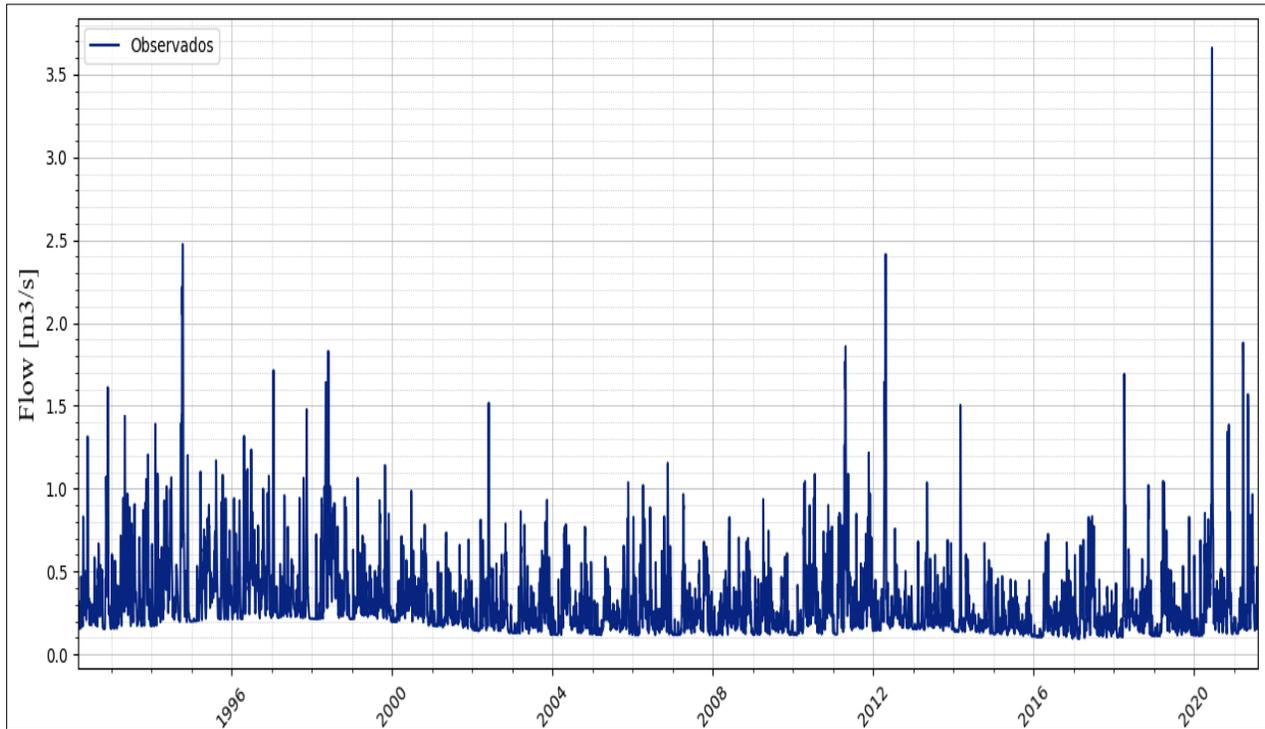
Como resultado del proceso de calibración, se obtuvo un modelo calibrado desde el 01-marzo-1992 al 01-agosto-1993 y con esto se realizó la corrida del modelo con los parámetros ya calibrados y teniendo en cuenta los resultados satisfactorios obtenidos de bondad de ajuste.

Una vez obtenidos los parámetros calibrados satisfactoriamente se procede a correr el modelo con los valores actualizados de los parámetros obtenidos por medio de la imagen satelital del año 2018, esto teniendo en cuenta el cambio de coberturas presentados desde año 1992 con el que se realizó la calibración anteriormente mencionada.

Lo anterior obteniendo como resultado unos caudales para un periodo del 01/03/1992 al 01/08/2021 dados a continuación.

Figura 20

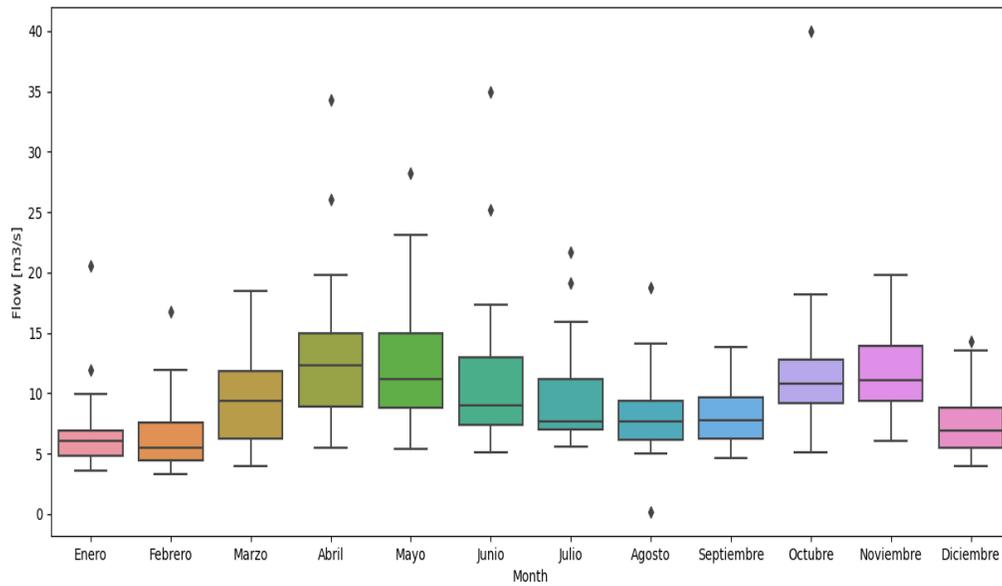
Modelo obtenido periodo 01-marzo-1992 al 01-agosto-2021



Fuente: autores, 2022.

Figura 21

Diagrama de cajas caudales obtenidos medios mensuales multianuales

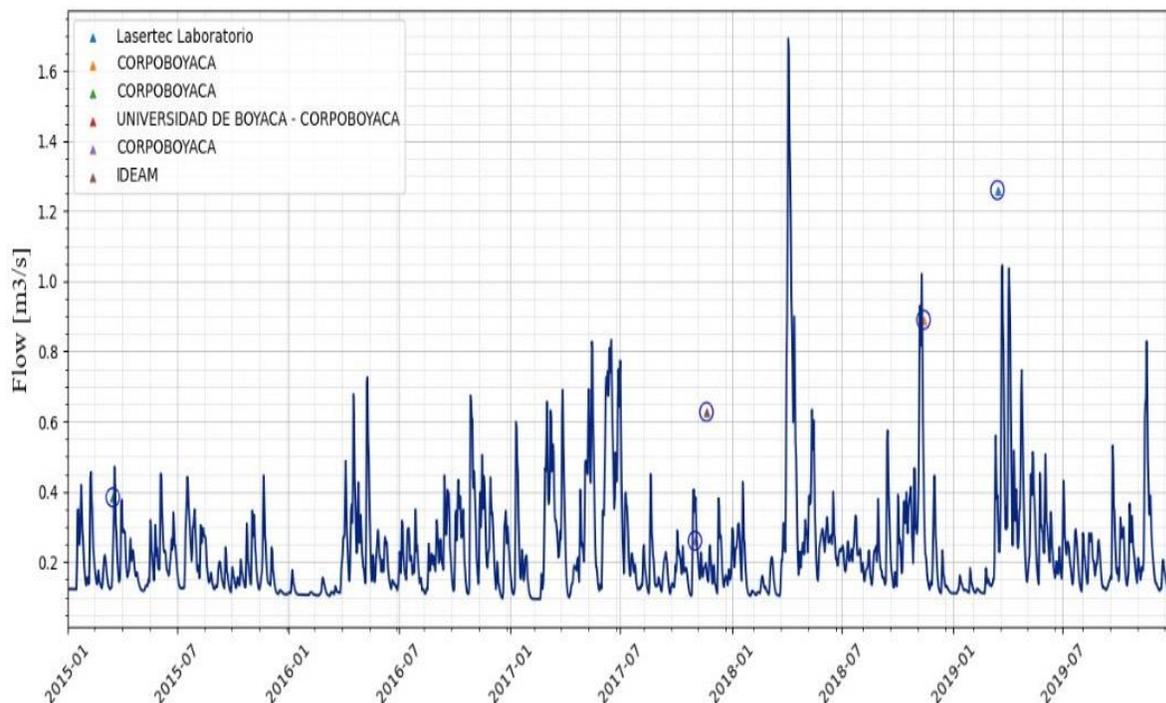


Fuente: autores, 2022.

Con el objetivo de verificar si los datos reportados por el modelo son válidos para los últimos años, se realizó un comparativo empleando los datos medidos mediante campañas puntuales por diferentes entidades, obteniendo lo ilustrado en la siguiente figura. Por medio de este análisis se comprobó que el modelo genera caudales en el orden de magnitud similares a los reportados durante las campañas de monitoreo.

Figura 22

Comparación datos modelados vs datos obtenidos en las campañas



Fuente: autores, 2022.

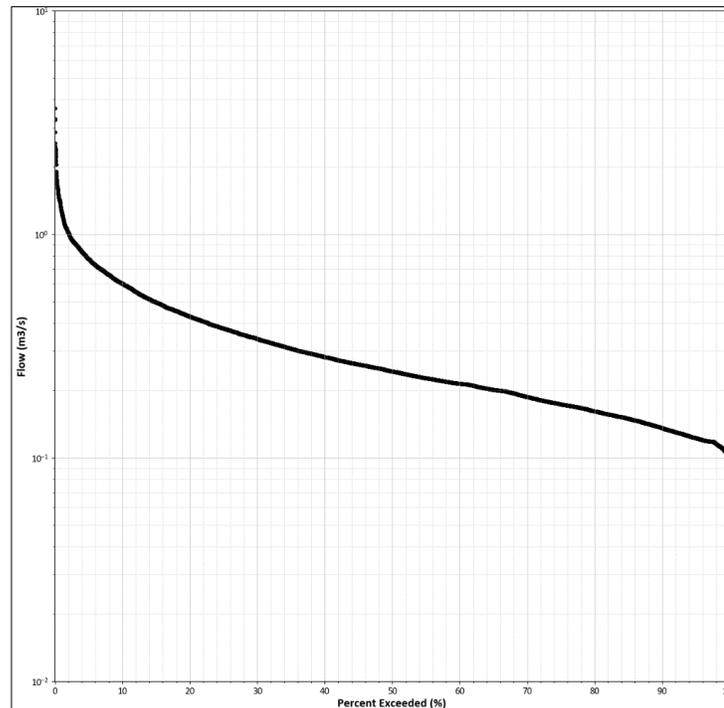
Curva de duración de caudales

Teniendo como resultado un modelo calibrado y los resultados obtenidos de valores de caudales dados desde el 01-marzo-1992 al 01-agosto-2021 se determina la curva de duración de caudales, con la finalidad de obtener los caudales correspondientes al percentil 50, 95 y 97.5, dados a continuación.

Tabla 14*Resultados obtenidos CDC*

Q (m ³ /s)	
97.5	0.465289
95	0.88405
95	0.902661

Fuente: autores, 2022.

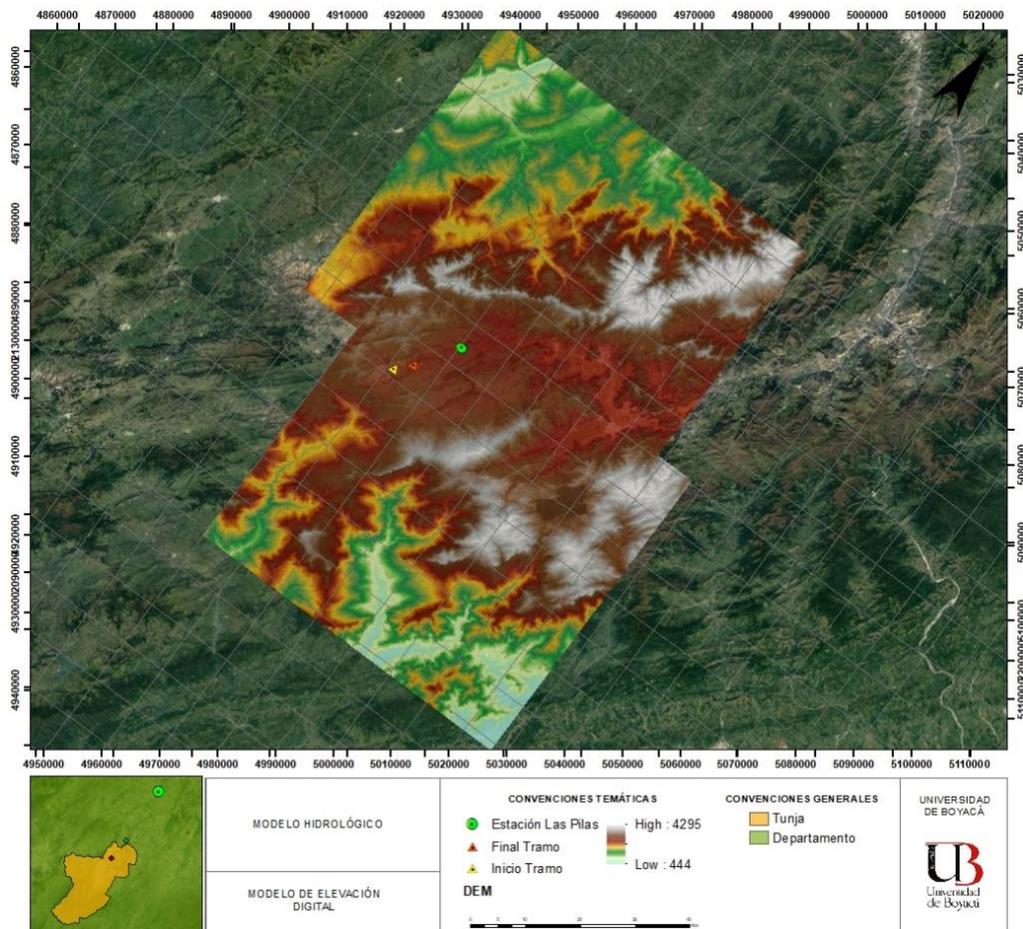
Figura 23*Curva de duración de caudales obtenida, CDC*

Fuente: autores, 2022.

Resultados modelamiento hidráulico

Simulación hidráulica del sistema

Con el objetivo de realizar el análisis hidráulico del sistema, se realizó la descarga de la topología ilustrada como se observa en la siguiente figura. Esta topología se empleó considerando las caracterizaciones realizadas sobre el cauce y su impacto en el desarrollo del modelo de calidad de agua.

Figura 24*Topología empleada en la modelación hidráulica*

Fuente: autores, 2022.

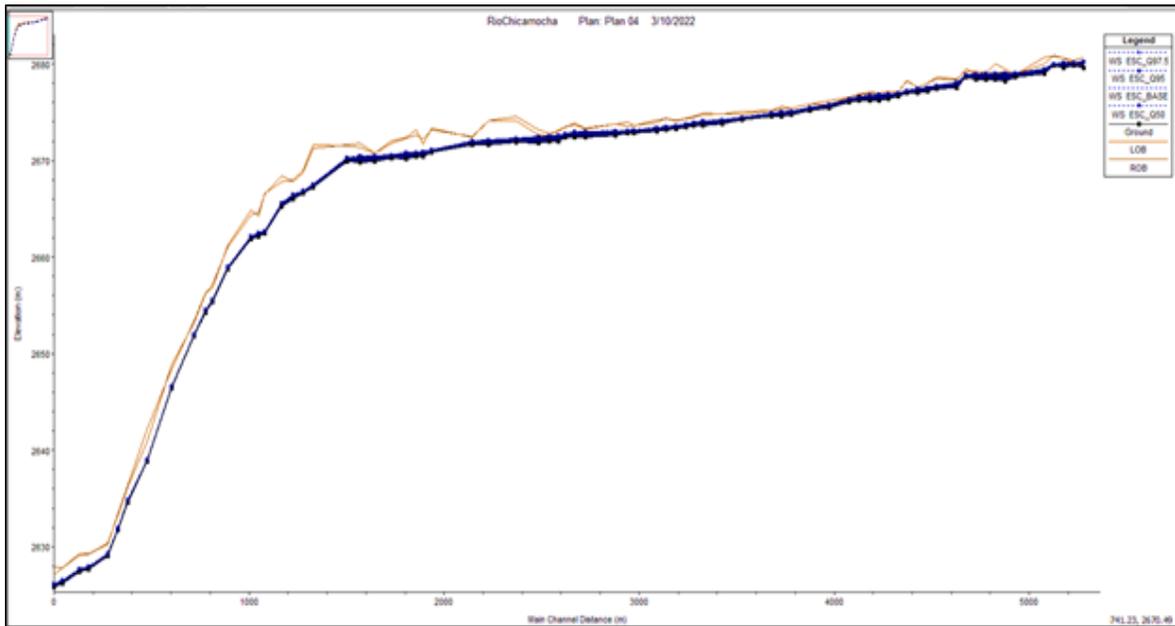
En la figura, se observa el tramo de estudio desde la confluencia de los ríos Jordán y la Vega hasta aguas debajo de la descarga de la PTAR del municipio de Tunja.

Análisis de inundación

Considerando flujo mixto en la corriente se toma un Manning de 0.025 valor teórico para cauces naturales con secciones pedregosas. A partir de esta información de partida se calculan el calado y la velocidad en cada una de las secciones levantadas con el objetivo de cuantificar ciertos parámetros hidráulicos que se emplearán como insumo dentro del modelo de calidad. Las Figuras a continuación muestran los calados resultantes de la simulación hidráulica bajo los tres escenarios de cada uno de los tramos simulados.

Figura 25

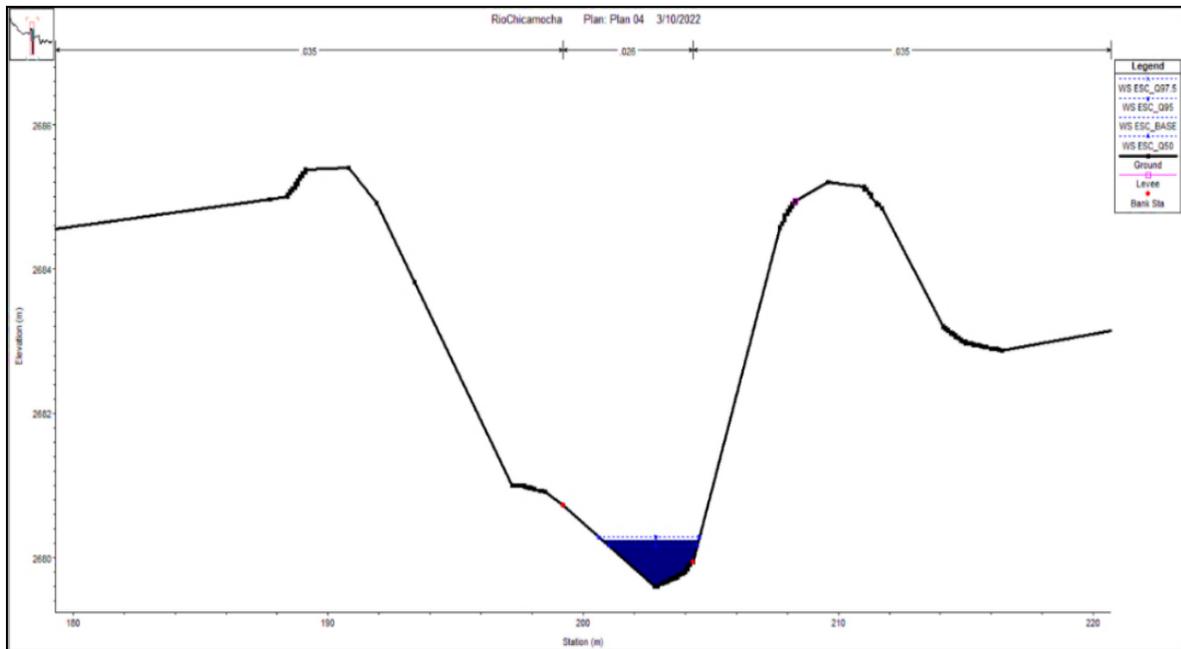
Perfil de niveles del tramo cuenca alta rio Chicamocha



Fuente: autores, 2022.

Figura 26

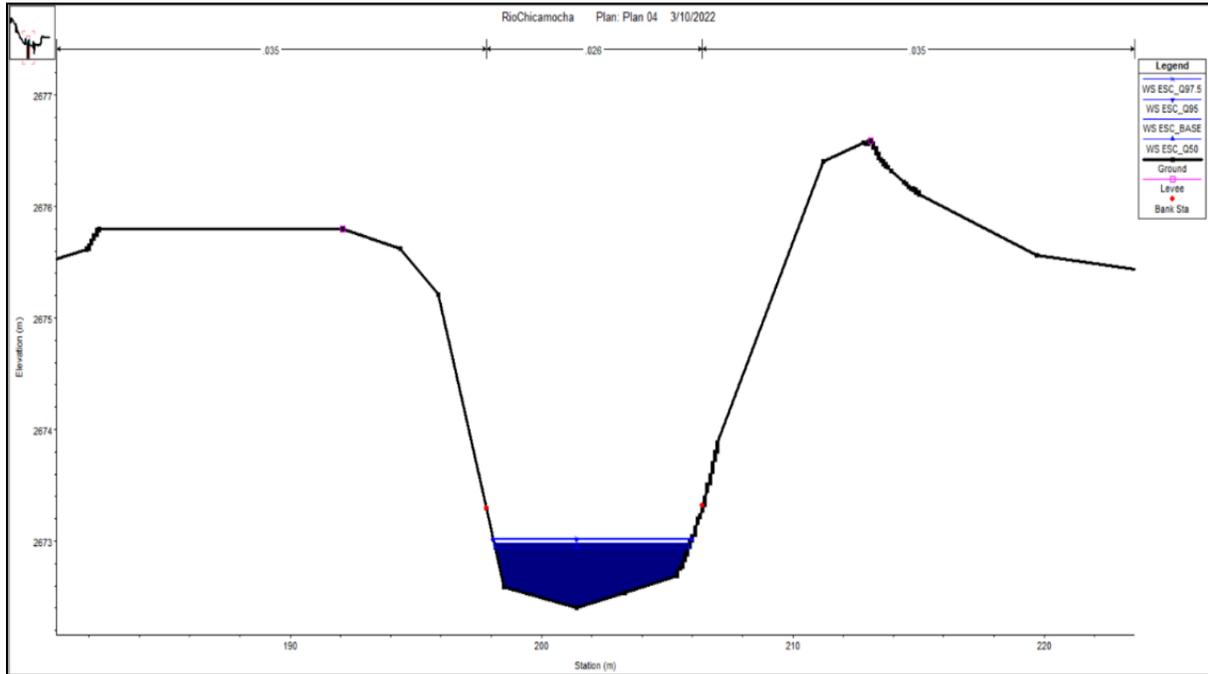
Sección 17522 aguas arriba coordenadas 5°34'12.86"N y 73°19'59.29



Fuente: autores, 2022.

Figura 27

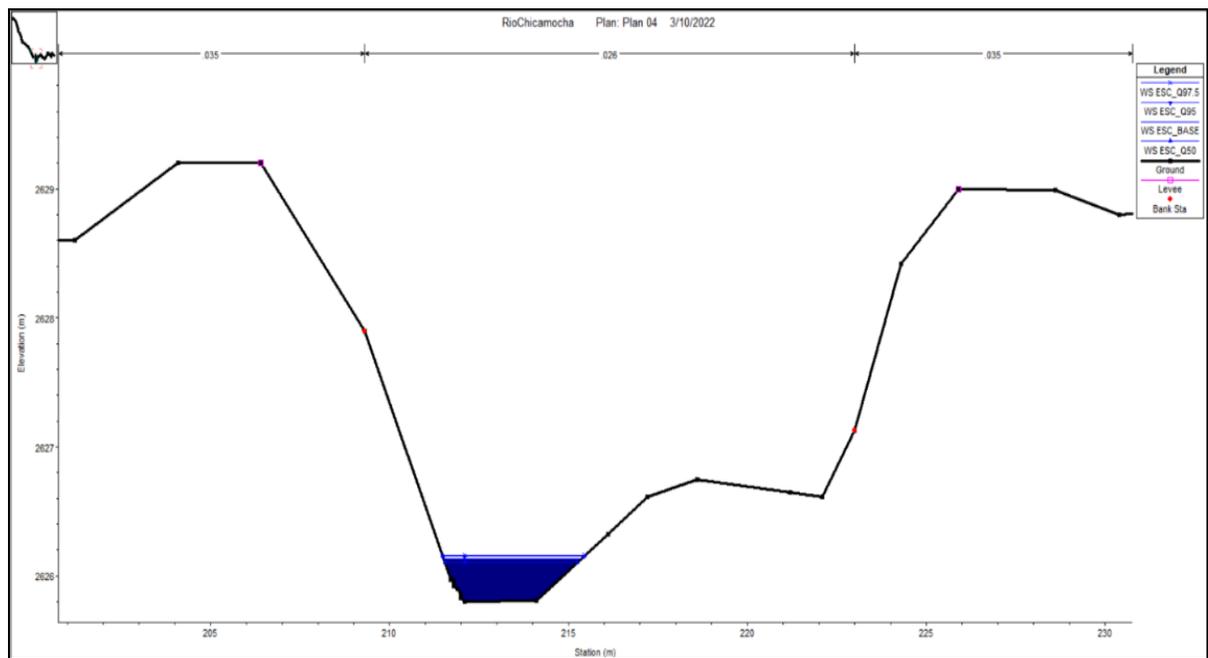
Sección 9180 punto medio del tramo coordenadas 5°34'40.58"N y 73°19'42.70"O



Fuente: autores, 2022.

Figura 28

Sección 238 aguas abajo del tramo coordenadas 5°35'0.78"N y 73°19'16.55"O



Fuente: autores, 2022.

Cabe resaltar que se reportarán principalmente los resultados obtenidos en las secciones 17522, 9180 y 238, debido a que son el insumo principal para elaborar la topología dentro del modelo de calidad. La siguiente tabla muestra los resultados hidráulicos obtenidos.

Tabla 15

Resultados hidráulicos

Sección	Escenario	Q Total (m ³ /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Área de flujo (m ²)
17552	ESC_BASE	0.7	0.38	0.49	1.44
17552	ESC_Q50	0.47	0.34	0.4	1.16
17552	ESC_Q95	0.88	0.41	0.54	1.63
17552	ESC_Q97.5	0.9	0.42	0.55	1.64
9180	ESC_BASE	1.19	0.43	0.36	3.32
9180	ESC_Q50	0.96	0.39	0.32	2.98
9180	ESC_Q95	1.38	0.45	0.38	3.6
9180	ESC_Q97.5	1.4	0.46	0.39	3.63
238	ESC_BASE	1.45	0.25	1.49	0.97
238	ESC_Q50	1.22	0.23	1.41	0.86
238	ESC_Q95	1.63	0.27	1.54	1.06
238	ESC_Q97.5	1.65	0.27	1.55	1.07

Fuente: autores, 2022.

Cálculo de las curvas de gasto

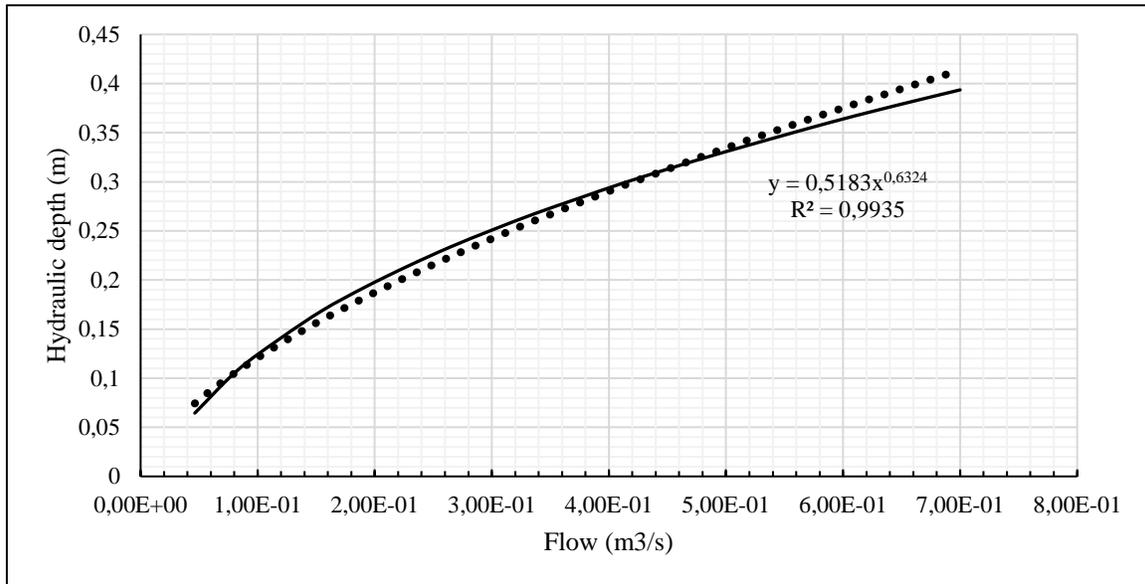
Las curvas de gasto son un instrumento para definir la oferta y la variabilidad de la esorrentía superficial que son indispensables para sustentar y planear diferentes usos del recurso hídrico superficial. Estas curvas se construyen con base en los datos geométricos de la sección transversal y las campañas de aforo y permiten deducir el caudal a partir de los niveles medidos en las estaciones hidrológicas. La relación entre estas dos variables es definida mediante la obtención de datos batimétricos y caudal conocida como aforo.

Para el caso de estudio, se realizará la construcción de las curvas de gasto para la sección de aguas arriba (17552), vertimiento 1 (16404), vertimiento 2 (9180), vertimiento 3 (9180), vertimiento 4 (3781), vertimiento 5 (2909), vertimiento 6 (819) y para la sección de aguas abajo (238) del cauce, mediante la simulación de diferentes escenarios de caudal, los cuales se simularán en estacionario, permitiendo la construcción de cada una de las curvas. Las Figuras de la 29 a la 42 se muestran las curvas obtenidas para las secciones de estudio con sus respectivas ecuaciones, las cuales se emplearán como insumo para el montaje del modelo de calidad de agua. Estas curvas

servirán como primera aproximación; no obstante, debido al seccionamiento realizado en QUAL 2KW, es probable que se deban variar estos valores, para refinar el modelo.

Figura 29

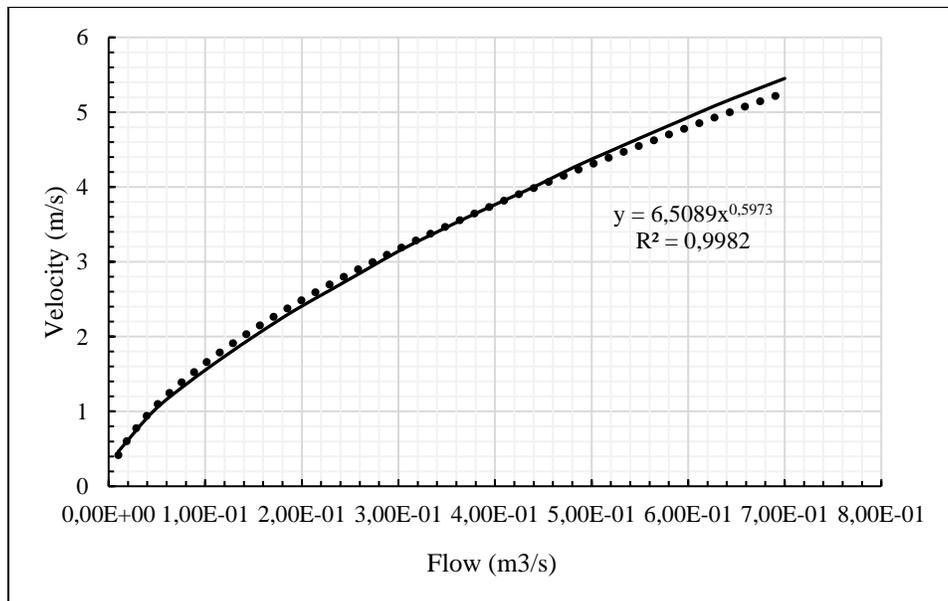
Curva de gasto (Calado hidráulico sección 17552)



Fuente: autores, 2022.

Figura 30

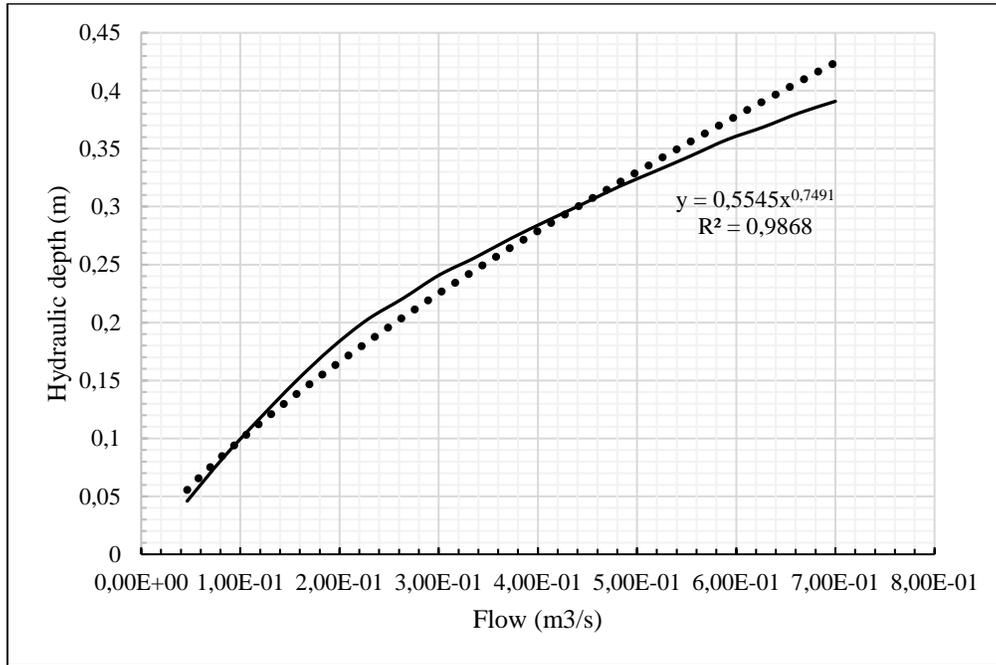
Curva de gasto (sección 17552)



Fuente: autores, 2022.

Figura 31

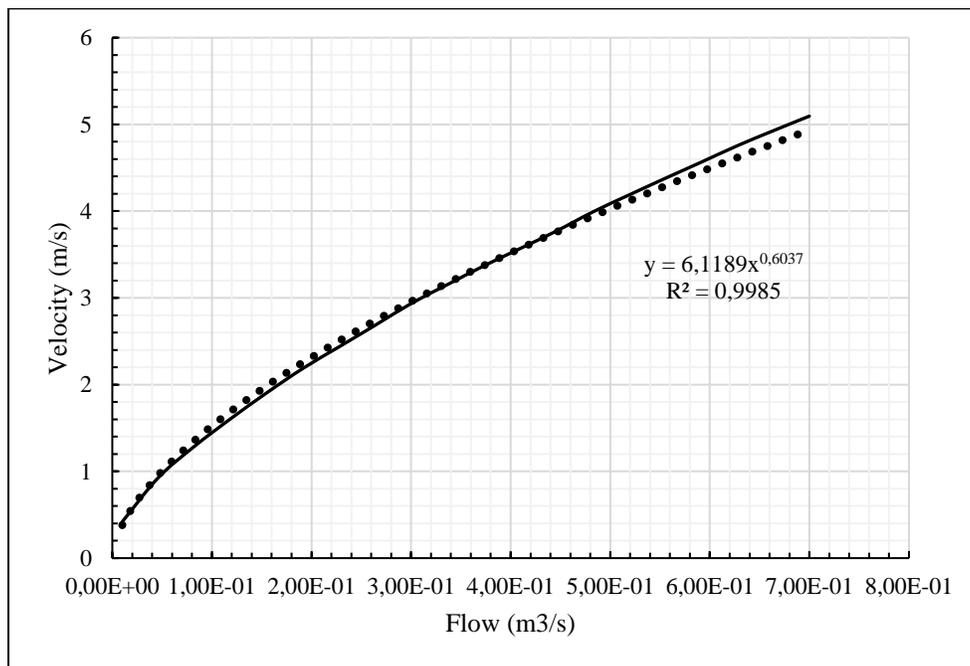
Curva de gasto (Calado hidráulico sección 16404)



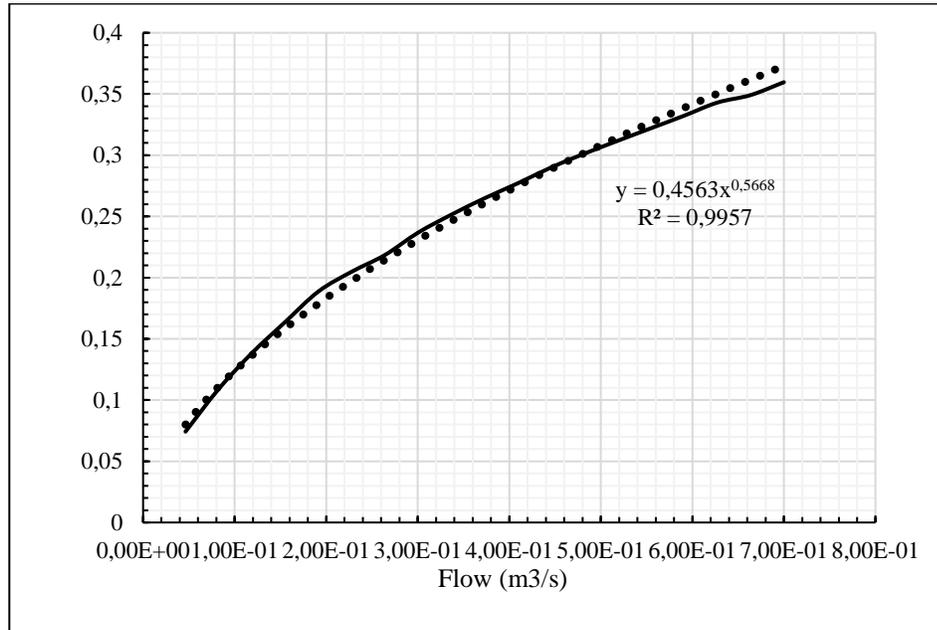
Fuente: autores, 2022.

Figura 32

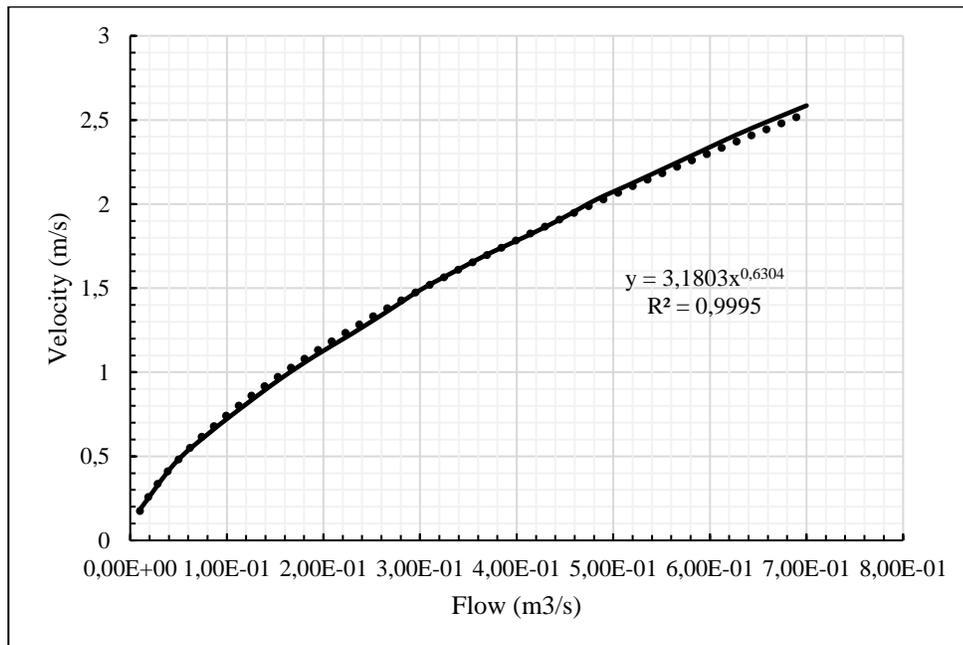
Curva de gasto (sección 16404)



Fuente: autores, 2022.

Figura 33*Curva de gasto (Calado hidráulico sección 9180)*

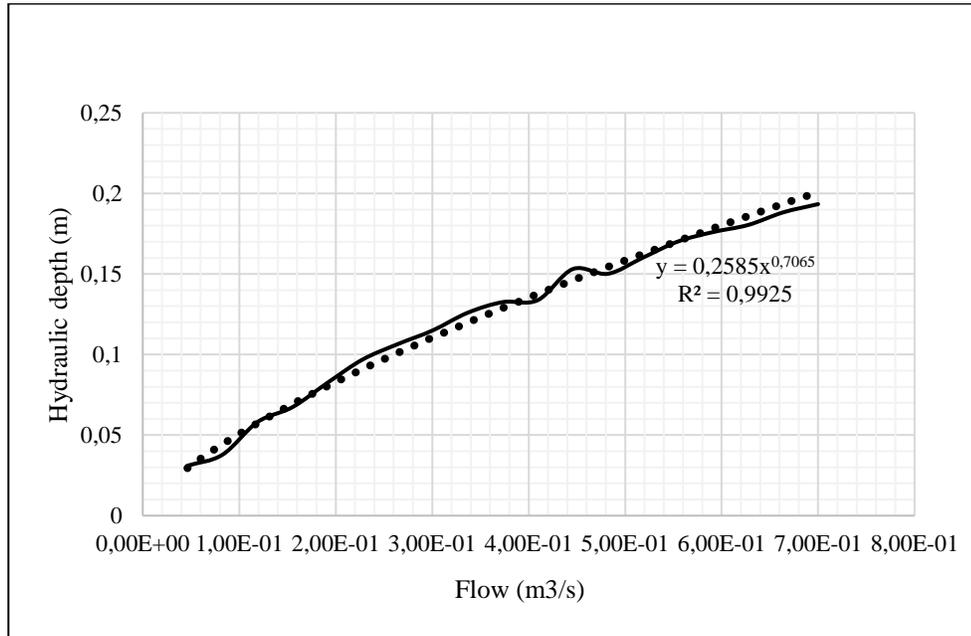
Fuente: autores, 2022.

Figura 34*Curva de gasto (sección 9180)*

Fuente: autores, 2022.

Figura 35

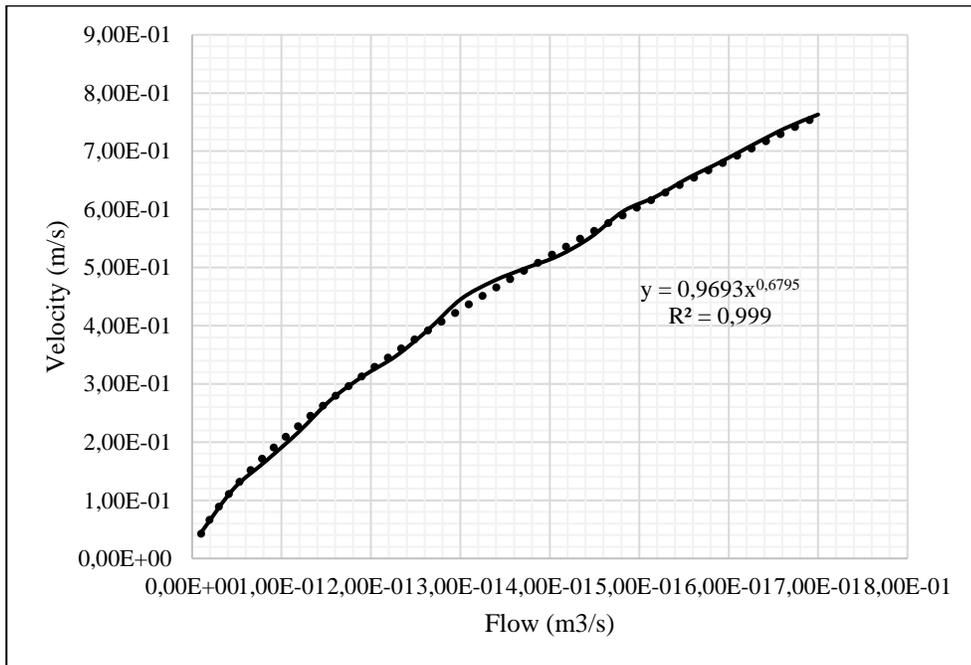
Curva de gasto (Calado hidráulico sección 3781)



Fuente: autores, 2022.

Figura 36

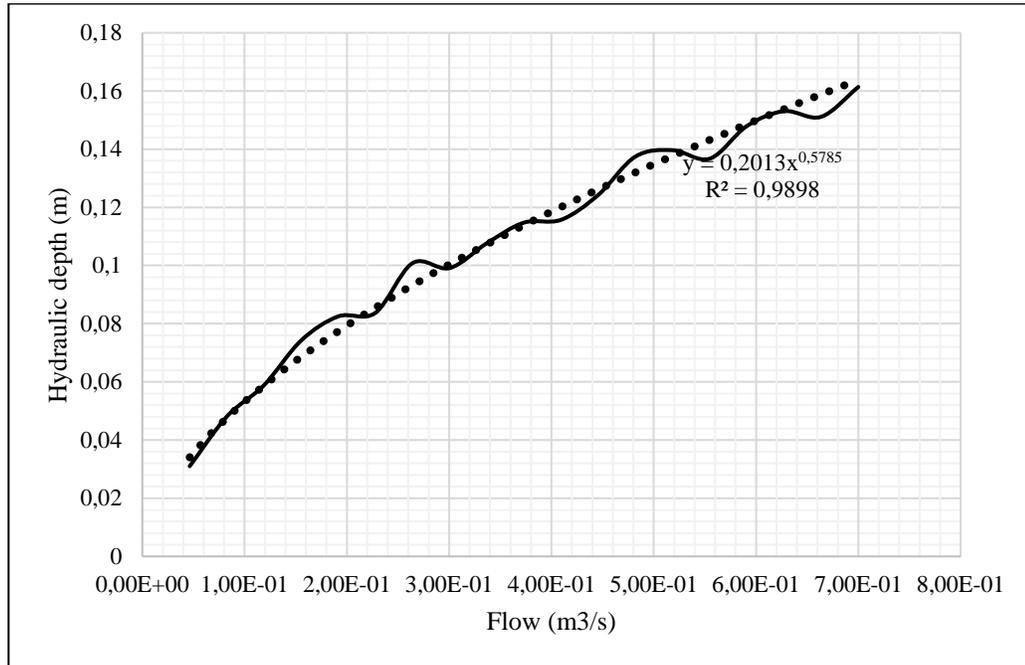
Curva de gasto (sección 3781)



Fuente: autores, 2022.

Figura 37

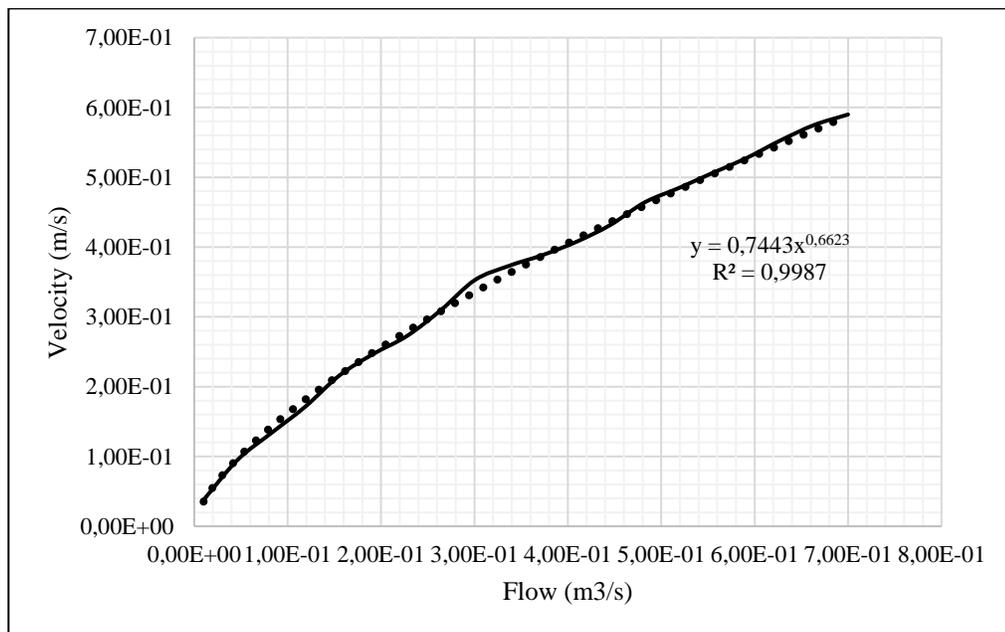
Curva de gasto (Calado hidráulico sección 2909)



Fuente: autores, 2022.

Figura 38

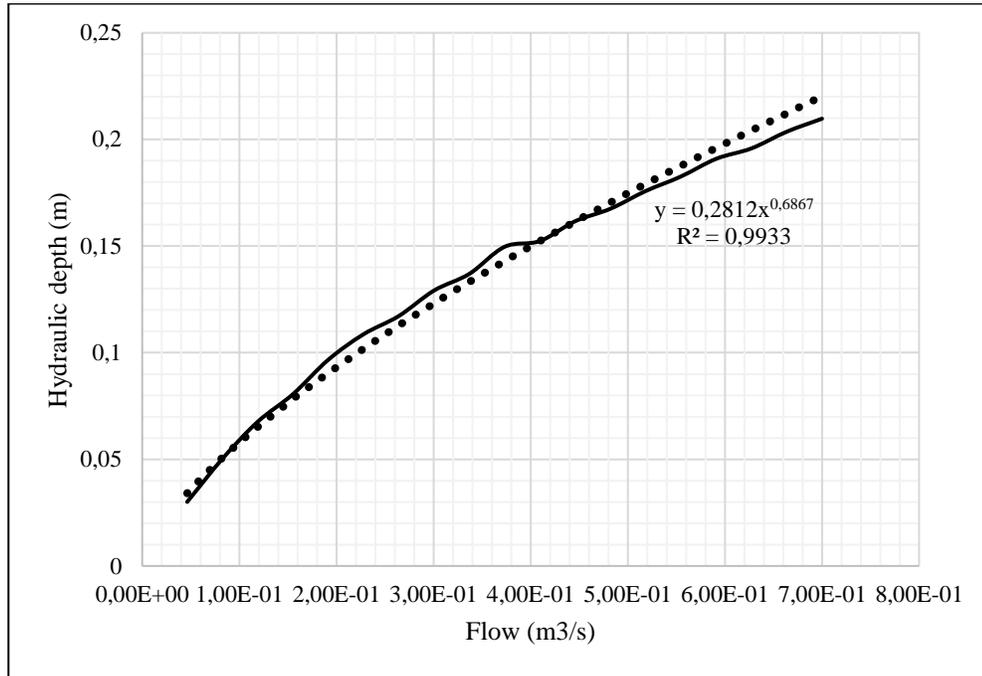
Curva de gasto (sección 2909)



Fuente: autores, 2022.

Figura 39

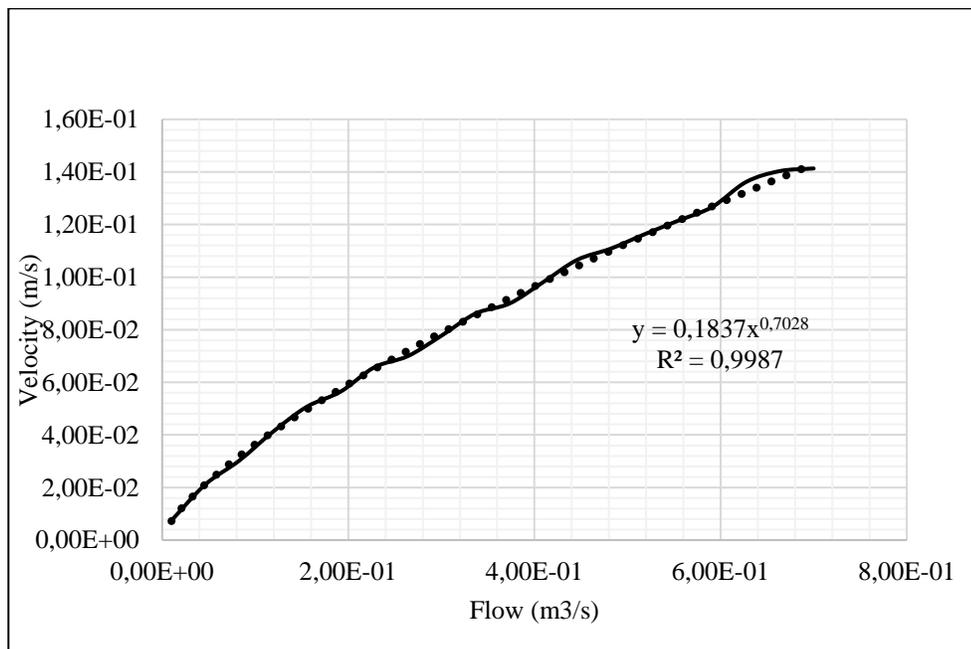
Curva de gasto (Calado hidráulico sección 819)



Fuente: autores, 2022.

Figura 40

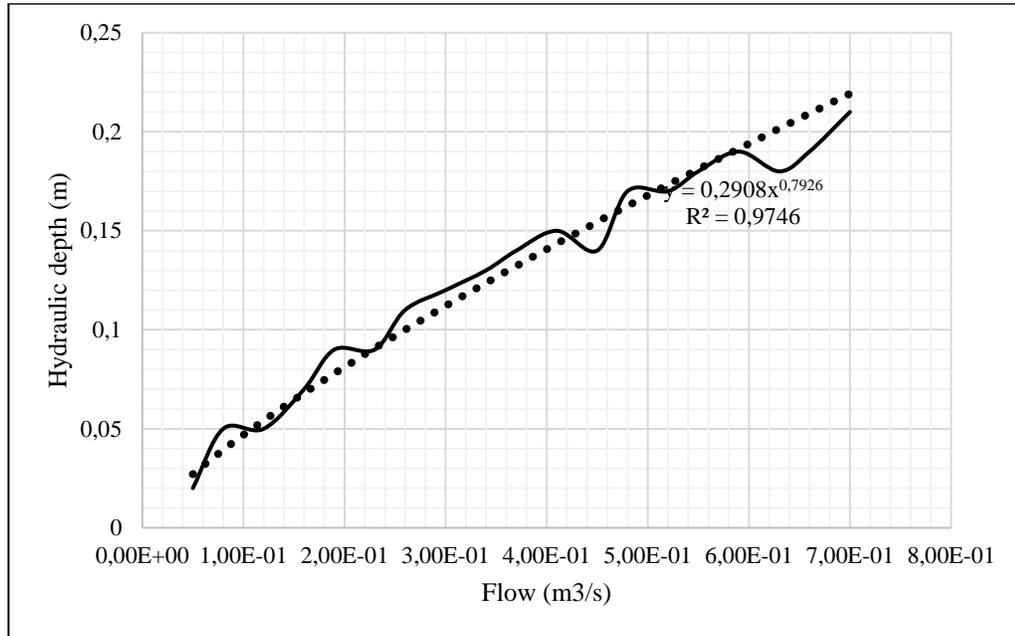
Curva de gasto (sección 819)



Fuente: autores, 2022.

Figura 41

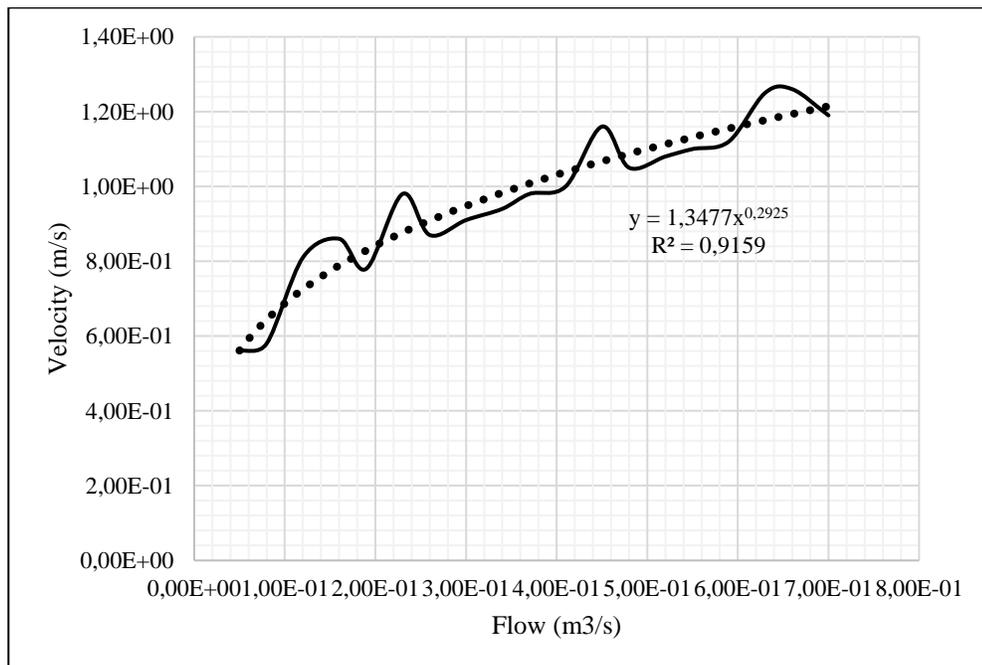
Curva de gasto (Calado hidráulico sección 238)



Fuente: autores, 2022.

Figura 42

Curva de gasto (sección 238)



Fuente: autores, 2022.

Modelación de la calidad del agua

Escenarios de simulación

El planteamiento de los escenarios de simulación, se realizó con base en los caudales calculados en las secciones previas, de esta forma, se establecieron los escenarios presentados a continuación.

Tabla 16

Escenarios de simulación

Escenarios	Descripción
Escenario base (Esc 1)	En este caso, se evaluará el comportamiento actual del cauce, el cual será considerado como el escenario de calibración
Escenario Q_50% (Esc 2)	En este caso, se evaluará el comportamiento del cauce en condiciones de caudal que estará presente el 50% del tiempo.
Escenario Q_95%(Esc 3)	En este caso, se evaluará el comportamiento del cauce en condiciones de caudal que estará presente el 95% del tiempo.
Escenario Q_97.5 (Esc 4)	En este caso, se evaluará el comportamiento del cauce en condiciones de caudal que estará presente el 97.5% del tiempo.

Fuente: autores, 2022.

Condiciones de los vertimientos

El tramo de estudio comprende seis vertimientos representativos denominados de la siguiente manera; vertimiento olímpica, tributario quebrada la colorada, vertimiento viaducto, vertimiento bypass rectangular, vertimiento bypass circular y el efluente de la PTAR que beneficia al municipio de Tunja, esta se encuentra ubicada sobre el sector nor-oriental de la ciudad la cual realiza el proceso de descontaminación de la cuenca alta del Río Chicamocha, ubicado en la vereda de Pirgua, sobre el caso rural de la ciudad de Tunja, vía Tunja- Oicatá. Las figuras a continuación muestran la ubicación de cada uno de los vertimientos mencionados.

Figura 43

Foto del vertimiento olímpica coordenadas 5°33'21.68"N y 73°20'55.09"O



Fuente: autores, 2022.

Figura 44

Foto del tributario quebrada la colorada coordenada 5°34'7.11"N y 73°20'3.59"O



Fuente: autores, 2022.

Figura 45

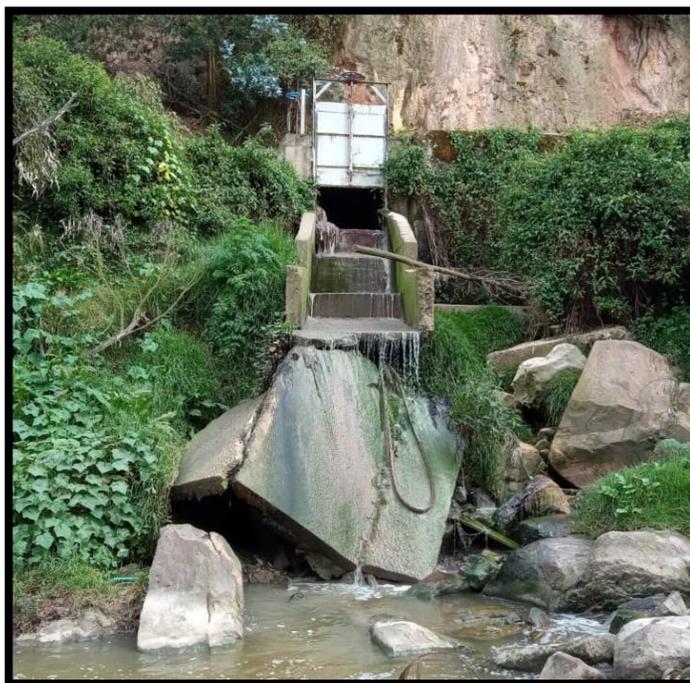
Foto del vertimiento viaducto coordenadas 5°34'40.58"N y 73°19'42.70"O



Fuente: autores, 2022.

Figura 46

Foto del vertimiento bypass rectangular 5°34'44.15"N y 73°19'37.10"O



Fuente: autores, 2022.

Figura 47

Foto del vertimiento bypass circular 5°34'55.41"N y 73°19'23.10"O



Fuente: autores, 2022.

Figura 48

Foto del vertimiento de la PTAR 5°34'51.386"N y 73°19'14.183"O



Fuente: autores, 2022.

De acuerdo a la identificación del sistema de tratamiento, se establece que la PTAR realiza un vertimiento continuo, cuya caracterización se ilustra en la siguiente Tabla:

Tabla 17

Caracterización propuesta para el vertimiento

Parámetro	Valor
Caudal [m ³ /s]	0.2120
T [°C]	16.15
DBO5 [mg/L]	24
SST [mg/L]	19
DQO [mg/L]	50
NO3 [mg/L]	2.6
pH [Unidades de pH]	7.49

Fuente: autores, 2022.

Caracterización de la calidad de agua del cauce

Con base en los datos recopilados durante las jornadas de muestreo y posterior al análisis realizado en el laboratorio de análisis ambiental de la universidad de Boyacá, se obtuvieron los siguientes datos de calidad, tanto en las secciones aguas arriba del cauce, como aguas abajo del cauce y en cada uno de los vertimientos anteriormente mencionados. Las Tablas 18 y 19 ilustran los análisis realizados.

Tabla 18

Caracterización de los puntos analizados

Parámetro	Q (m ³ /s)	T	pH	Con (µs/cm)	OD (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/LCaCO ₃)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO/DBO	NH ₄ (mg/L)	NO (mg/L)
Cuenca Alta	0.6994	15.4	8.23	389	1.97	104	73	43	0.589	18.48	238.905
Vertimiento Olímpica Tributario	0.0033	16	8.65	508	2.73	226	60	35	0.583	14	201.203
Cuenca Media	0.492	15.4	7.8	256	6	84	42	20	0.476	2.8	38.553
Vertimiento Viaducto Bypass Rectangular	1.1947	15.6	8.23	384.33	3.57	102	58.33	32.67	0.55	11.76	159.55
	0.0302	15.3	7.93	293	5.65		50	18	0.36	12.88	151.883
	0.0196	16.3	7.56	617	5.08	56	71	24	0.338	15.12	222.44

Bypass Circular	0.205	16.5	8.28	586	6.74	140	242	190	0.785	29.12	356.591
Salida de la PTAR	0.212	16.15	7.49		6	80	50	24	0.48	14.1	836.27
Cuenca Baja	1.6614	15.97	7.9	470.08	5.41	94.5	94.27	57.73	0.5	16.6	345.35

Fuente: autores, 2022.

Nitrógeno Total	Nitritos	Nitratos	Fosforo Total	Ortofos-fatos	DBO última	Fosforo Orgánico	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Sólidos Suspendidos Inertes (mg/L)	Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	Detritos	Nitritos + Nitratos
257.6	0.069	0.146	2.3	0.39	35.69	1.91	33	4.95	28.05	28.05	0.215
218.4	0.008	3.189	1.5	0.12	29.05	1.38	27	4.05	22.95	22.95	3.197
44.8	0.045	3.402	0.8	0.17	16.6	0.63	32	4.8	27.2	27.2	3.447
173.6	0.04	2.25	1.53	0.23	27.11	1.31	40	4.6	26.07	36	2.29
168	0.014	3.223	3.8	1.4	14.94	2.4	40	6	34	34	3.237
240.8	0.008	3.232	4.6	2.1	19.92	2.5	78	11.7	66.3	66.3	3.24
386.4	0.281	0.408	5.9	2.35	157.7	3.55	108	16.2	91.8	91.8	0.689
853	0.03	2.6	5.12	0.43	19.92	4.69	19	2.85	16.15	16.15	2.63
364.36	0.07	2.34	4.19	1.3	47.92	2.89	57	8.27	46.86	48.85	2.42

Fuente: autores, 2022.

Calibración

Para el proceso de Calibración se emplean los datos medidos en campo en las secciones inicial, media y final del tramo de estudio de la cuenca alta del río Chicamocha, por lo tanto, mediante pruebas de ensayo y error se realiza una calibración manual adecuando las constantes cinéticas del modelo de tal manera que el comportamiento de los constituyentes se asemeje a lo observado en la realidad. Cabe resaltar que para el ajuste de las constantes cinéticas se respetan los rangos de cada uno de estos, acorde a lo establecido por (Chapra, 1997). Y segundo se hace una calibración objetiva utilizando algoritmos genéticos de la versión Qual2Kw, la cual consiste en la implementación de la función objetiva de determinación de Nash para cada parámetro.

Cabe resaltar que debido a las condiciones sanitarias del momento y a las condiciones climáticas no fue posible realizar otra campaña de monitoreo, no obstante, para profundizar, se recomienda que para próximos estudios se complementen los análisis y se vuelva a simular el modelo.

Tabla 19*Rangos de calibración para las constantes cinéticas del modelo QUAL-2K*

Parámetro de calibración	Abreviación	Unidades	Rango de calibración
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d	0.001 – 0.7
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	VS - PO	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	VS - PI	m/d	0 – 2
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Vel. Sedimentación POM	1/d	0 – 5
Tasa de decaimiento de los patógenos	Tasa Decaimiento Patógenos	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación de los patógenos	VS - Patógenos	m/d	0 – 2
constante α para mortalidad de los patógenos por luz solar	Constante α Mortalidad - Patógenos	1/d per y/hr	0 – 1

Parámetro de calibración	Abreviación	Unidades	Rango de calibración
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d	0 – 2
Tasa de reaeración, descrita por la ecuación de reaeración	Ka	1/d	Auto- selección
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación DBO- DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d	0 – 5
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d	0.001 – 0.1
Tasa de nitrificación de amonio	Tasa Nitrificación	1/d	0 – 10
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	Tasa Desnitrificación	1/d	0 – 2
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	CT- Desnitrificación Sed.	m/d	0 – 1

Para la presente modelación, se emplearon las siguientes constantes cinéticas.

Tabla 20*Constantes cinéticas adecuadas al modelo*

Constante cinética	Unidades	837	-239
Tasa de oxidación de la DBO	1/d	2.5	2.5
Tasa de Nitrificación	1/d	0.1	0.1
Tasa de desnitrificación	m/d	0.5	0.5
Hidrolisis del fósforo orgánico	1/d	0.01	0.01
Tasa de disolución de los detritos	1/d	0.01	0.01
Fracción de DBO rápida			0.8

Fuente: autores, 2022.

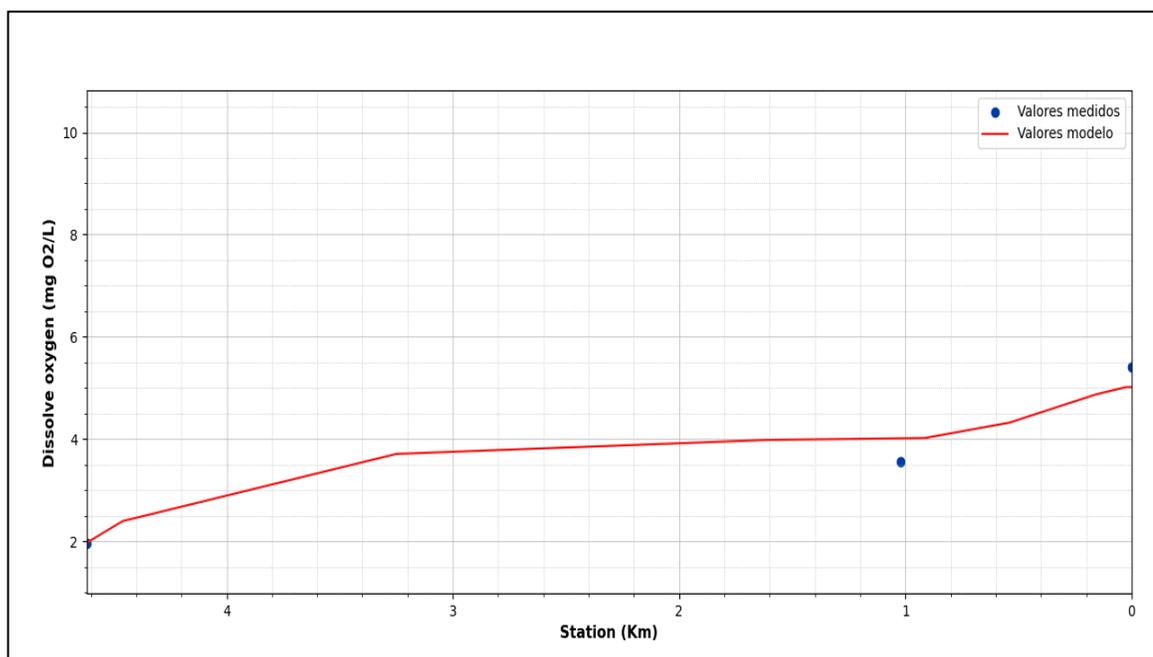
Comparación de los escenarios de simulación

Para el reporte de los escenarios se hace por medio de un comparativo, el cual establece la variación de cada parámetro conforme al escenario descrito. A continuación, se hace el análisis de cada parámetro en cada escenario.

Oxígeno disuelto. La concentración de O₂ depende de la solubilidad del agua, la presión atmosférica, la temperatura y la concentración de impurezas en el agua (salinidad, sólidos en suspensión). La presencia de OD en las aguas residuales es deseable porque evita la formación de olores nocivos (Metcalf & Eddy, 2014; Qasim & Zhu, 2018). En este caso, se observa que para el escenario base se evidencian niveles bajos de oxígeno disuelto a lo largo de tramo de estudio, lo que indica que se mantiene una importante depuración del cauce, impactado de manera positiva por el efluente de la PTAR de Tunja. Por otra parte, comparando los diferentes escenarios de simulación, se observa que existe una reaireación en cada uno de estos, explicado principalmente por la morfología del río y la descarga por parte de la PTAR.

Figura 49

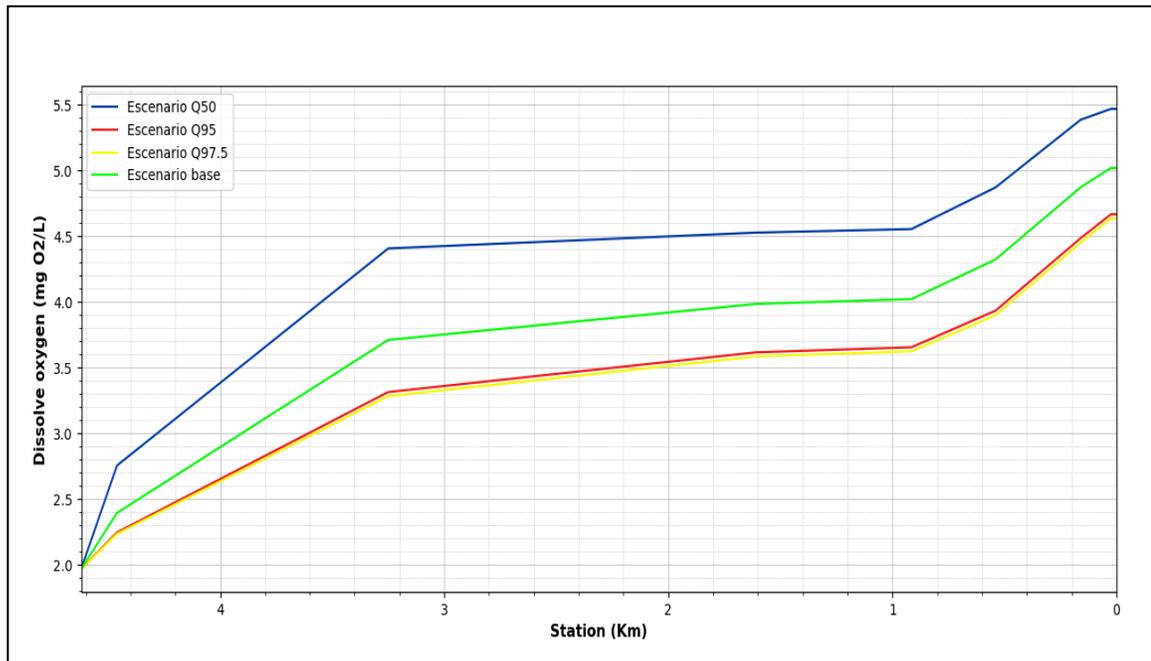
Calibración del constituyente oxígeno disuelto para el escenario actual.



Fuente: autores, 2022.

Figura 50

Variación espacial del oxígeno disuelto

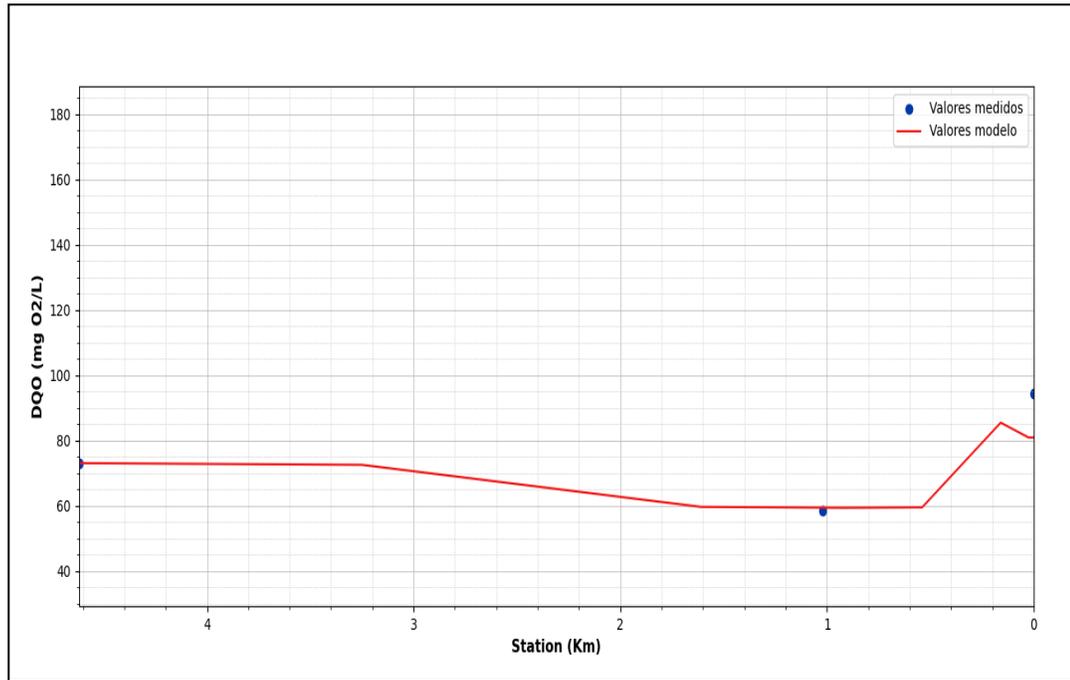


Fuente: autores, 2022.

Demanda química de oxígeno. La demanda química de oxígeno (DQO) representa la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica (biodegradable y no biodegradable) que hay en una muestra líquida y se utiliza para establecer un nivel de contaminación (Qasim & Zhu, 2018). En este caso, se observa un incremento en el valor del constituyente en el río a consecuencia de la descarga del vertimiento bypass de la PTAR de Tunja, no obstante, a causa del caudal del río, la reaireación, las cinéticas de degradación y el vertimiento del efluente tratado de la PTAR el impacto de la descarga disminuye. Adicionalmente, se ilustra la variación espacial de la DQO.

Figura 51

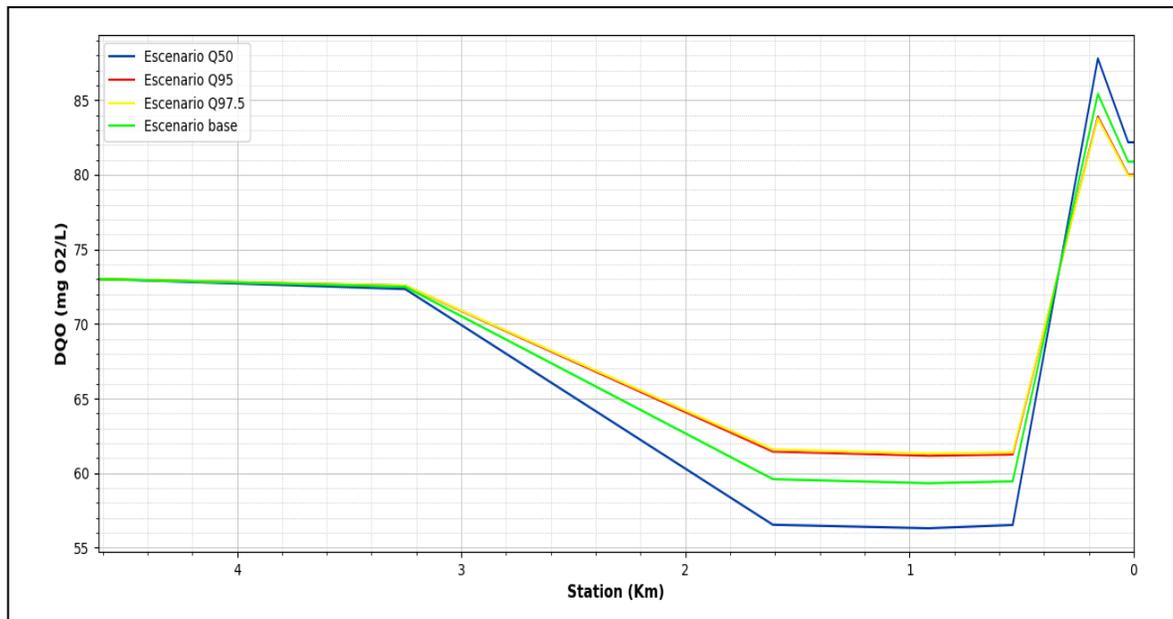
Calibración del parámetro de Demanda Bioquímica de Oxígeno para el escenario actual



Fuente: autores, 2022.

Figura 52

Demanda Química de Oxígeno en los diferentes escenarios



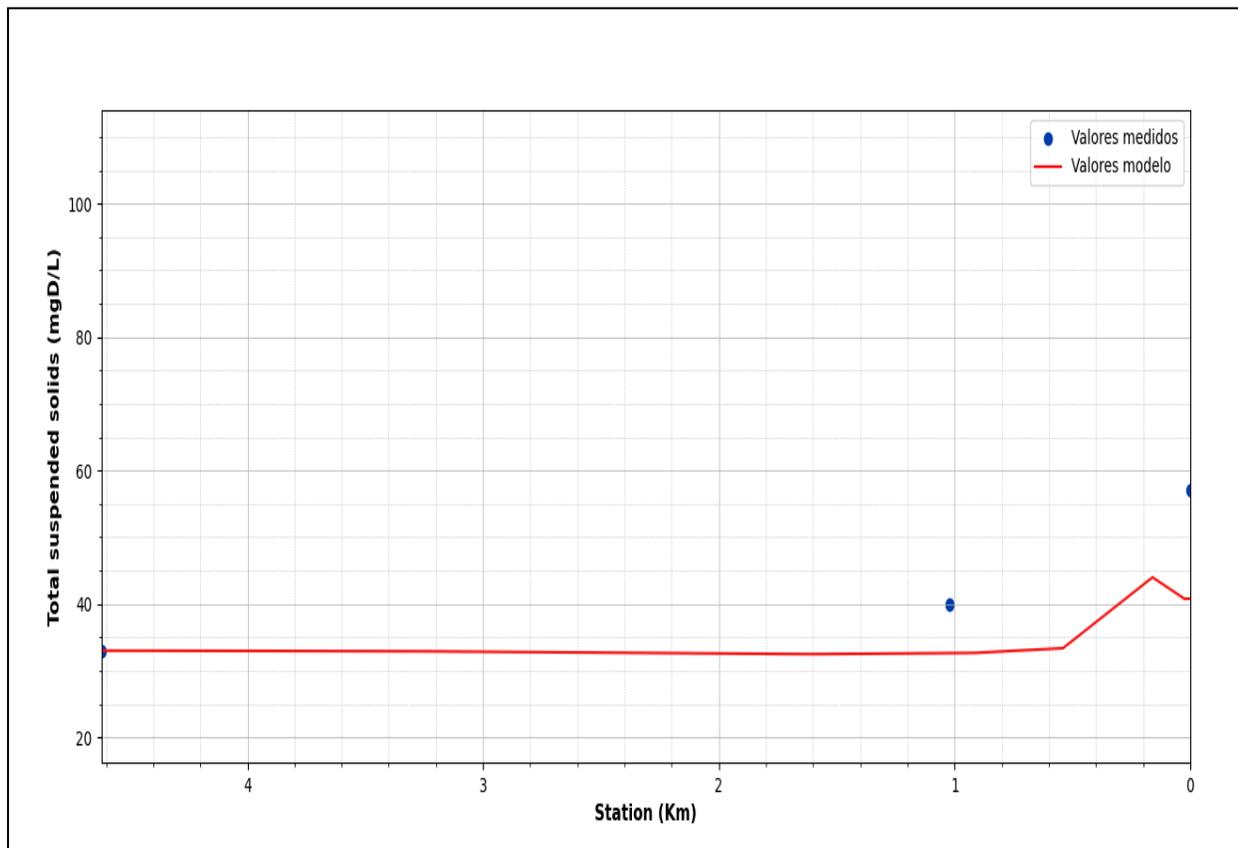
Fuente: autores, 2022.

Sólidos suspendidos totales. Para el caso de los sólidos suspendidos totales, se simuló en los distintos escenarios teniendo en cuenta la influencia de los detritos (85% de los SST) y los sólidos inorgánicos (15% de los SST) aportados por los vertimientos. Acorde a esto, se observa que los SST aumentan en el bypass de la PTAR. En este, se evidencia la influencia que tendría la descarga de agua residual sin tratamiento, debido al aumento de la carga de este constituyente sobre el río, cabe resaltar que las aguas residuales contienen una variedad de materiales sólidos suspendidos que pueden causar posibles efectos negativos sobre el medio receptor, pero del mismo modo, contribuyen al proceso de los tratamientos biológicos (Metcalf & Eddy, 2014).

Adicionalmente, se ilustra la variación espacial de los SST y se concluye que el efluente tratado de la PTAR presenta una influencia positiva disminuyendo la concentración de este parámetro sobre la dinámica natural del río.

Figura 53

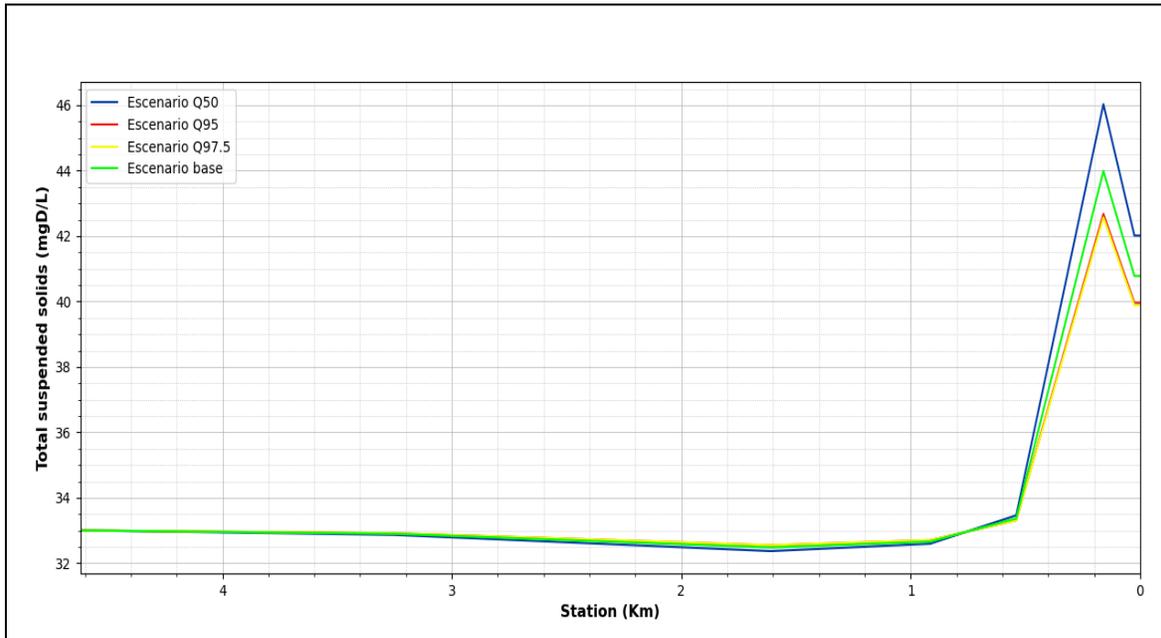
Calibración del constituyente Sólidos Suspendidos Totales para el escenario actual



Fuente: autores, 2022.

Figura 54

Sólidos suspendidos totales en los diferentes escenarios.



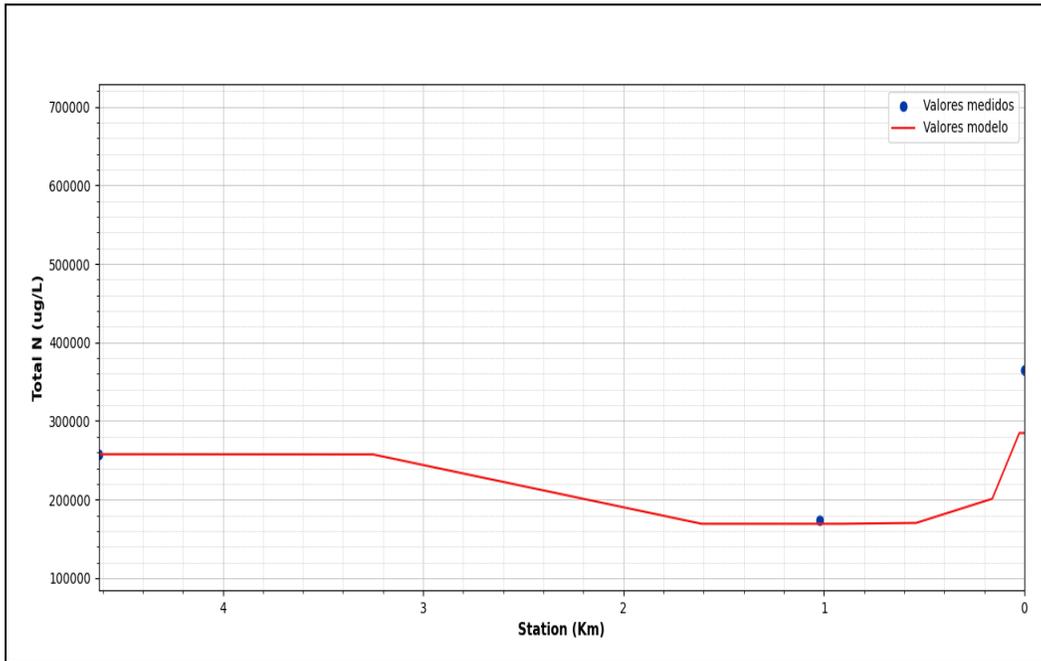
Fuente: autores, 2022.

Nitrógeno total. El nitrógeno en el medio ambiente acuático puede existir en muchas formas, estas formas son nitrógeno orgánico (NO), gas amoniacado disuelto (NH_3) o ion amonio (NH_4^+), nitrito NO_2^- , nitrato NO_3^- y gas nitrógeno (N_2). El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de microorganismos, sin embargo, la presencia en gran cantidad puede generar contaminación (Metcalf & Eddy, 2014).

En el caso de estudio, se mantiene una disminución a lo largo del tramo hasta el vertimiento del bypass de la PTAR donde se presenta un aumento considerable. Además, debido a que la carga aportante por el vertimiento tratado por la PTAR se experimenta una leve depuración del parámetro, que aumenta en los cuatro escenarios

Figura 55

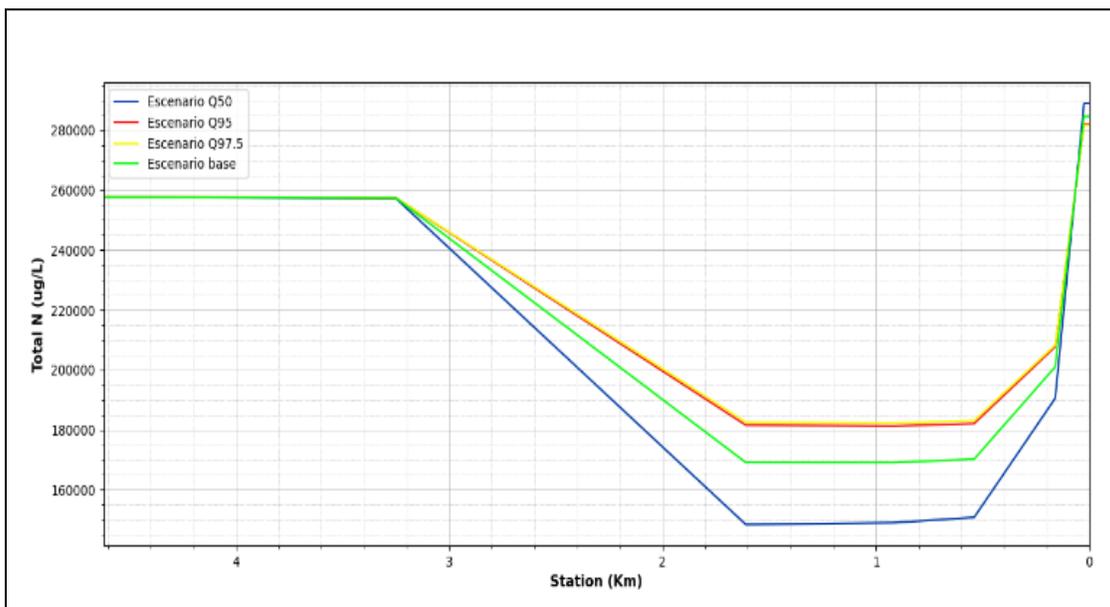
Calibración del constituyente nitrógeno total para el escenario actual



Fuente: autores, 2022.

Figura 56

Nitrógeno total para los diferentes escenarios

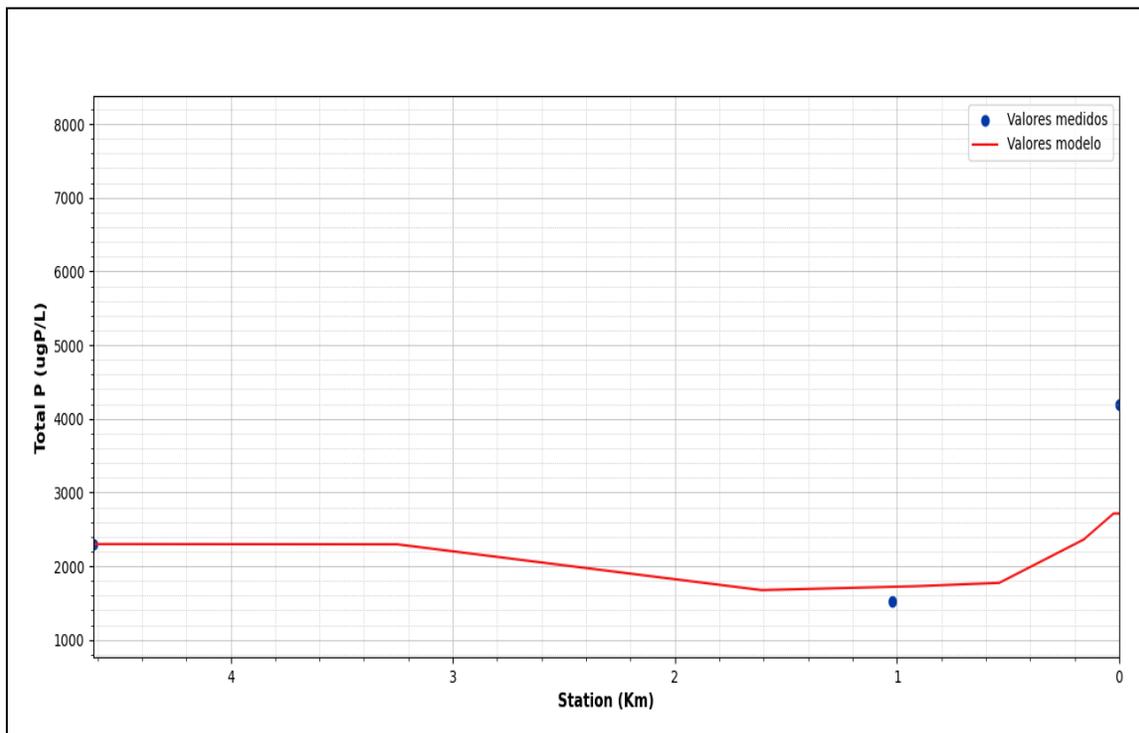


Fuente: autores, 2022.

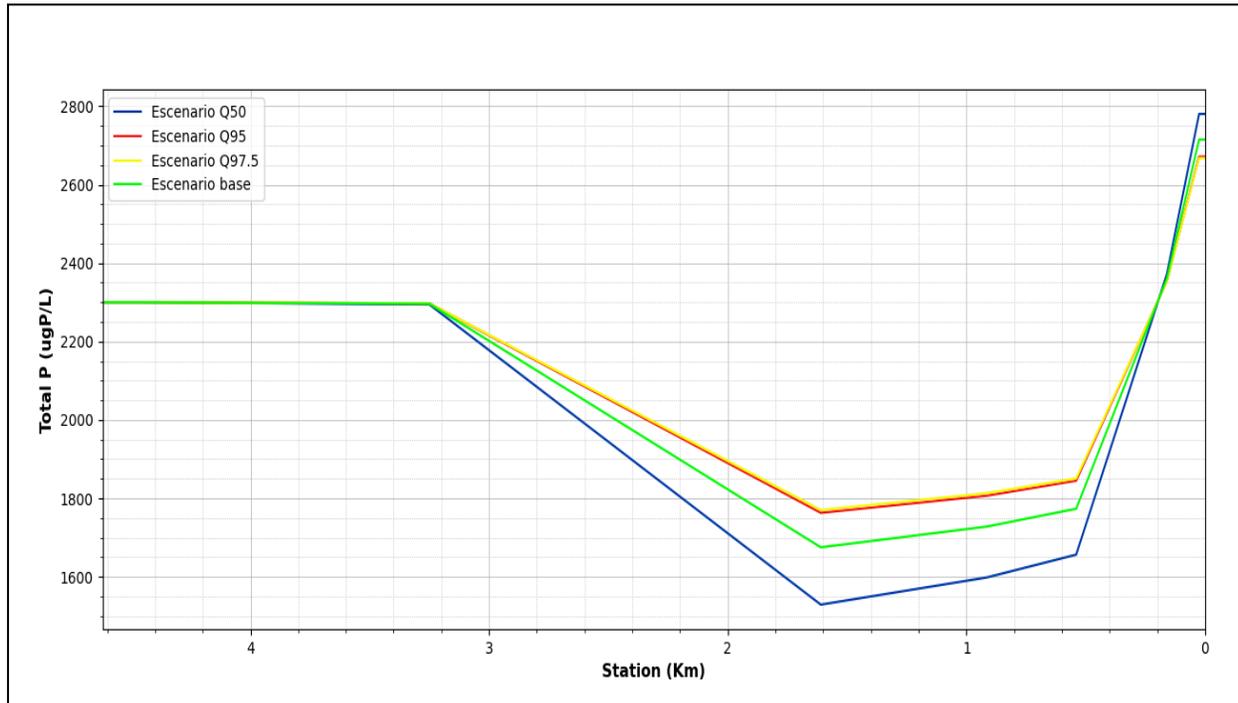
Fósforo total. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de las algas en los cuerpos hídricos, ya que es considerado como un nutriente limitante para su crecimiento. No obstante, la presencia del constituyente no es tóxica a menos de que se encuentre en altas cantidades. El fósforo puede encontrarse de dos formas en los cauces como orgánico o inorgánico, y la proporción de cada uno de estos se debe al origen del material; en el caso de los compuestos inorgánicos, su presencia está asociada con la existencia de hierro, aluminio o calcio, mientras que los compuestos orgánicos se originan debido a la presencia de organismos vivos. En el caso de estudio, se observa la presencia de fósforo orgánico en el cauce principalmente en el vertimiento del bypass de la PTAR, debido a la diferencia de cargas entre estos dos que genera un aumento en la concentración dentro del río. Analizando el contraste entre escenarios, se observa que todos los escenarios se comportan de manera similar.

Figura 57

Calibración del constituyente fósforo total



Fuente: autores, 2022.

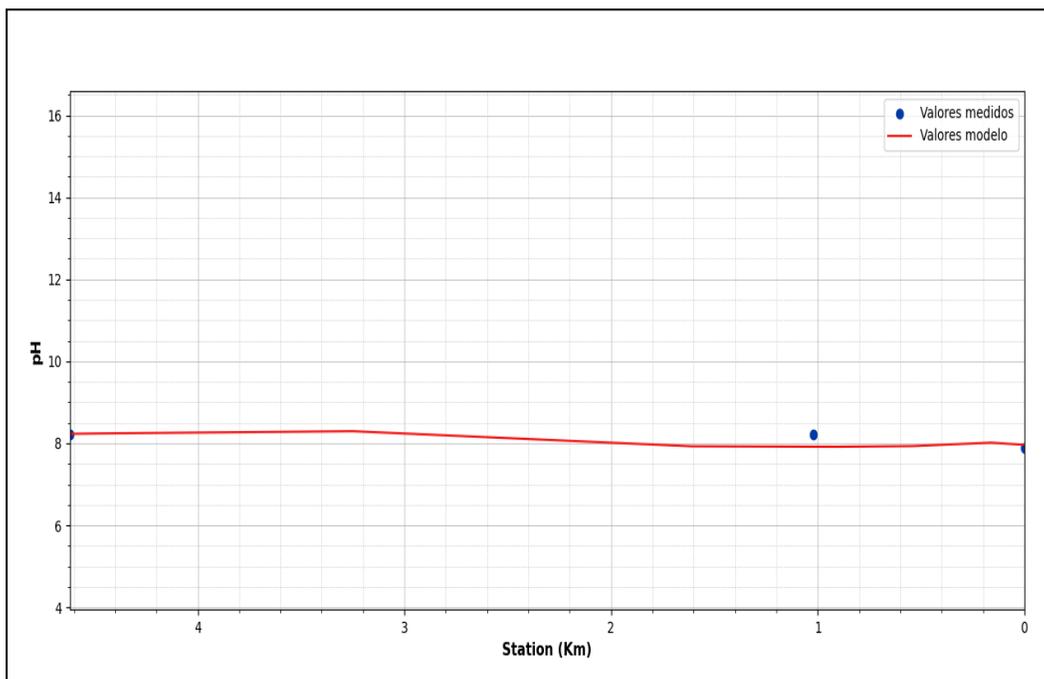
Figura 58*Fósforo para los diferentes escenarios*

Fuente: autores, 2022.

pH. El pH es un parámetro relevante al momento de representar procesos de calidad del agua en los cauces, pues es un indicativo del grado de acidez o alcalinidad del cuerpo; además, de que su valor regula la presencia de ciertas especies químicas en el agua. En el caso de estudio se observa una variación normal del parámetro dada la interacción de los diferentes constituyentes. El rango de concentración adecuado para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico (típicamente de 6 a 9). (Qasim & Zhu, 2018). El valor de este oscila dentro de ese rango, lo cual es un indicativo de un pH cuasi neutro dentro del cauce.

Figura 59

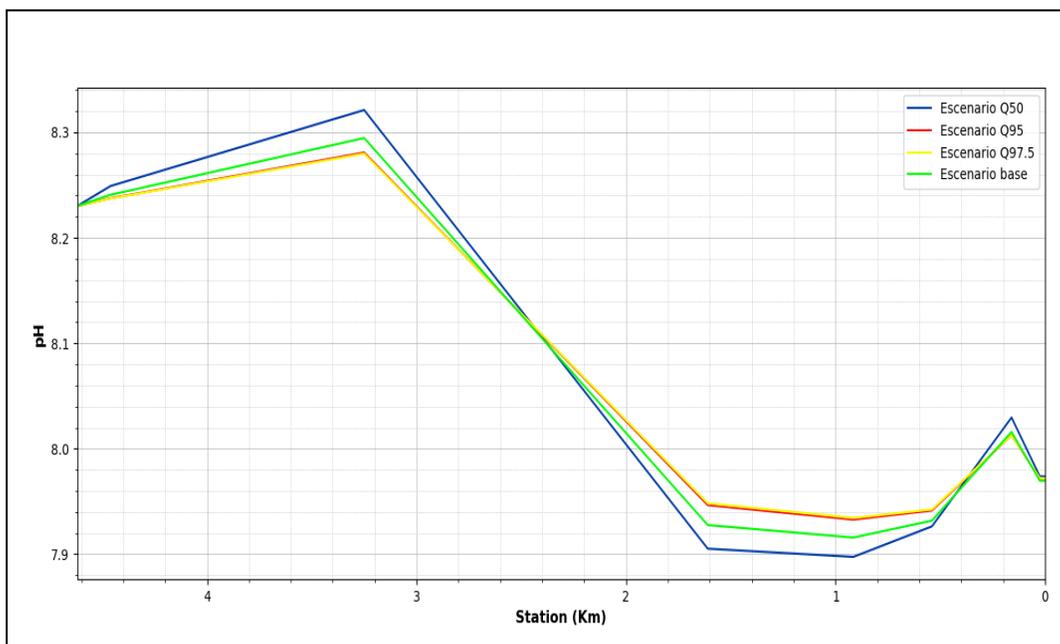
Calibración del pH en la corriente.



Fuente: autores, 2022.

Figura 60

pH para los diferentes escenarios

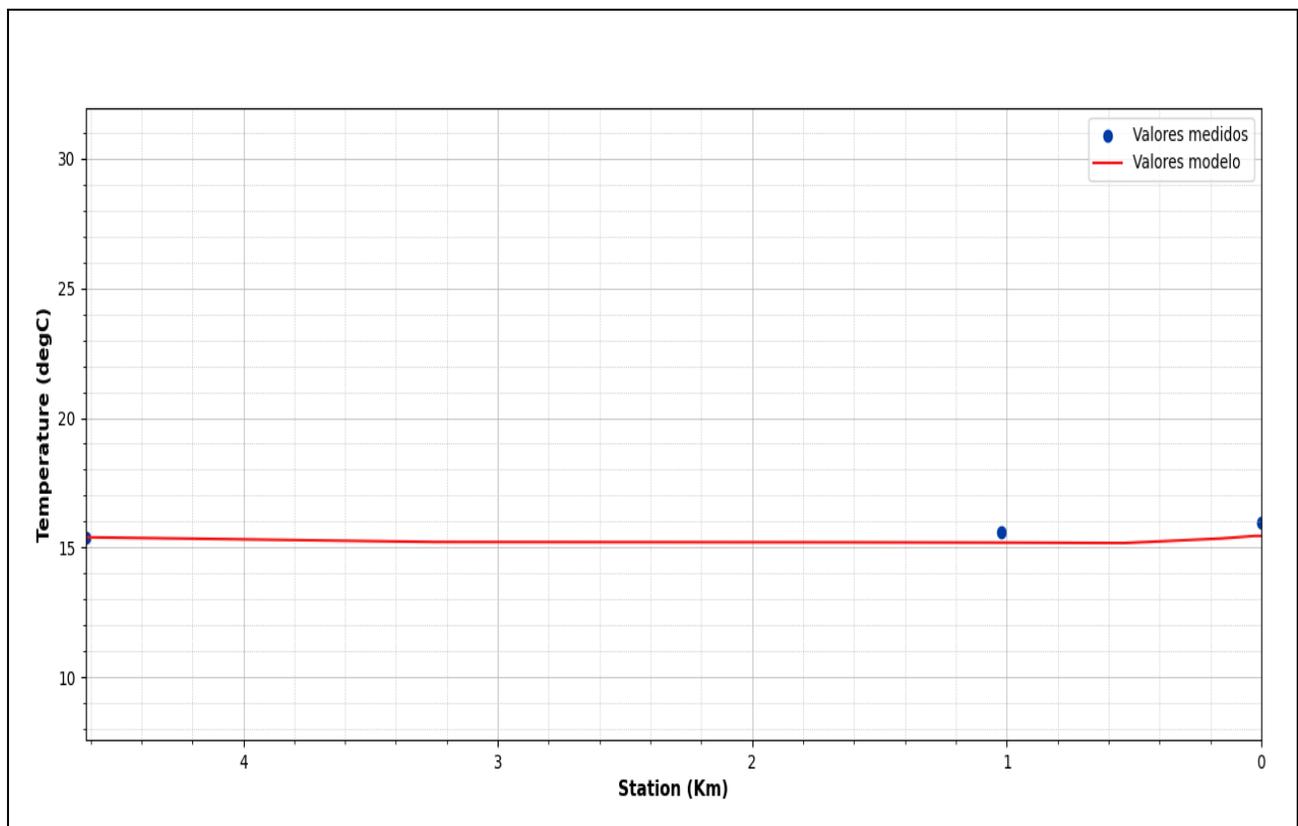


Fuente: autores, 2022.

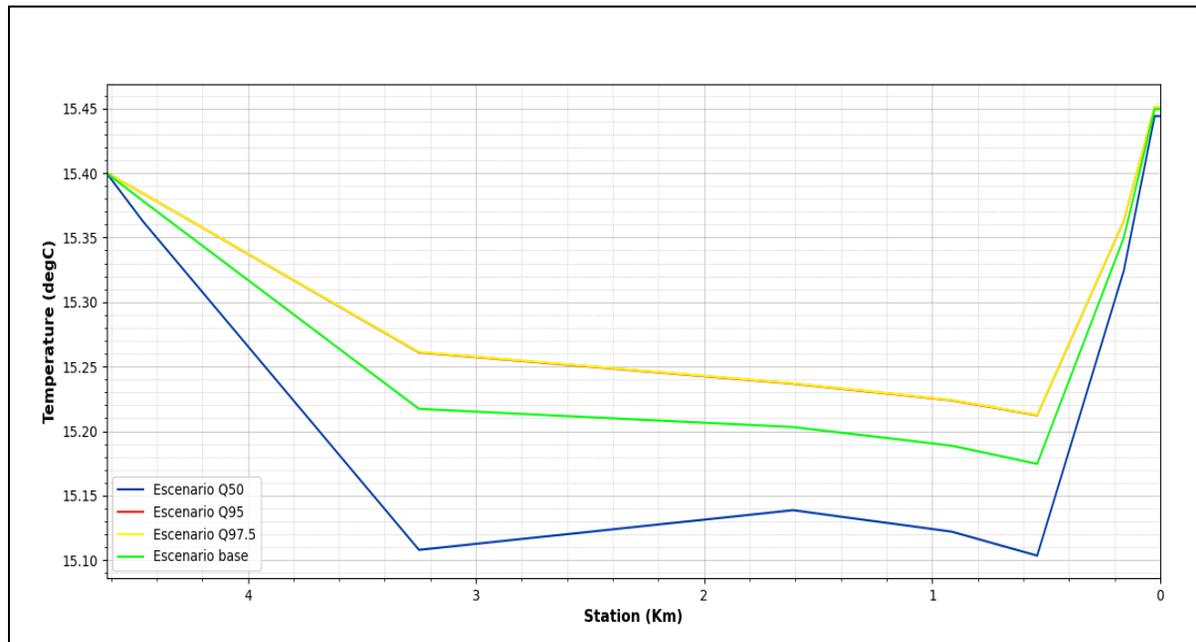
Temperatura. La temperatura de las aguas residuales municipales es ligeramente más alta que la del suministro de agua, y se mantiene en el rango de 10–21 ° C. La temperatura del agua residual tiene un efecto significativo sobre la actividad microbiológica, la tratabilidad, la solubilidad de los gases, la densidad y la viscosidad. Los intervalos de temperatura óptima típicos para las bacterias son de 10 a 35 °C (Metcalf & Eddy, 2014). En este caso de estudio la temperatura se mantiene constante a lo largo del tramo dentro del rango establecido para la actividad de los diferentes procesos que se llevan a cabo dentro del cauce.

Figura 61

Calibración de la temperatura en la corriente



Fuente: autores, 2022.

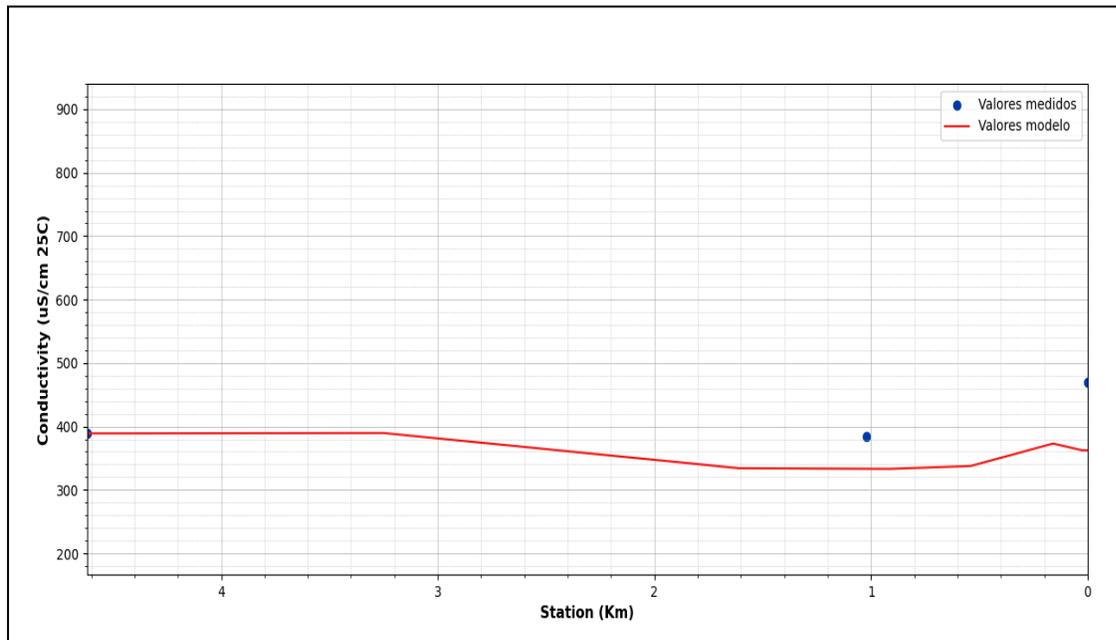
Figura 62*Temperatura para los diferentes escenarios*

Fuente: autores, 2022.

Conductividad. La conductividad es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición. En el caso de estudio se observa una disminución de este parámetro a lo largo del tramo con una variación mínima en el vertimiento del bypass de la PTAR.

Figura 63

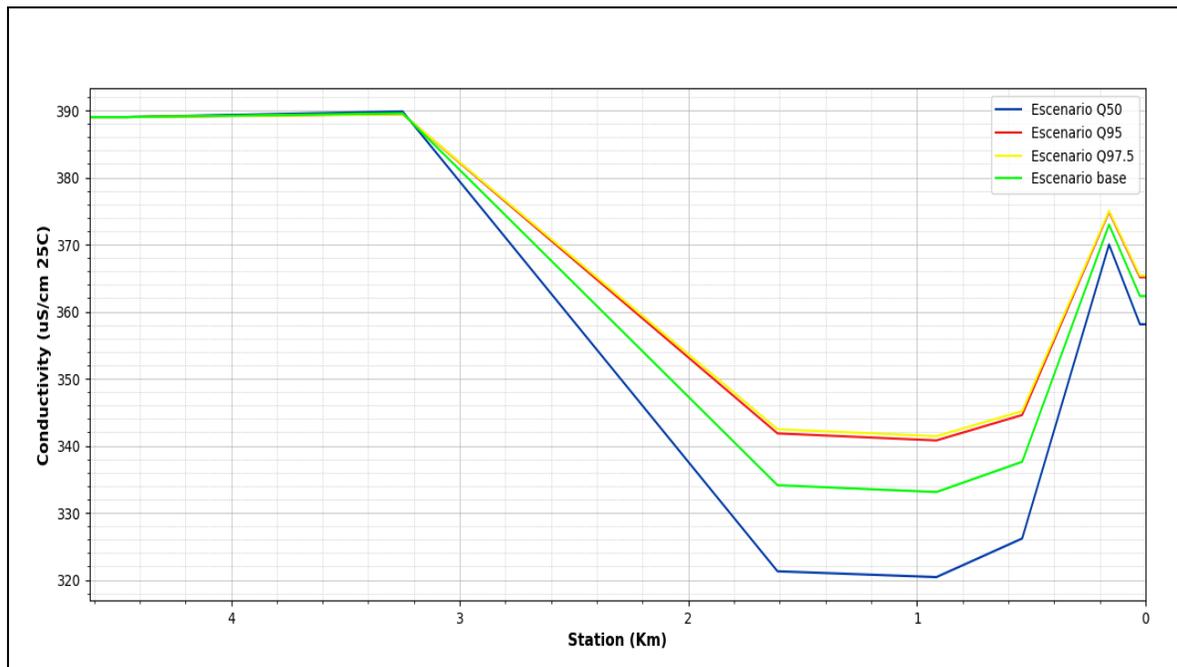
Calibración de la conductividad en la corriente



Fuente: autores, 2022.

Figura 64

Conductividad para los diferentes escenarios



Fuente: autores, 2022.

Estimación del Índice de Calidad de Agua ICA WQI-IDEAM en las diferentes secciones del tramo intersección río Jordán y la Vega

El índice de calidad de agua (ICA) es una herramienta que permite identificar la calidad de agua de un cuerpo superficial o subterráneo en un tiempo determinado. En general, el ICA incorpora datos de múltiples parámetros físicos y químicos, en una ecuación matemática, mediante la cual se evalúa el estado de un cuerpo de agua.

El indicador se calcula a partir de los datos de concentración de un conjunto de seis variables que determinan, en gran parte, la calidad de las aguas corrientes superficiales

La ecuación matemática del indicador es:

$$ICA_{njt} = (\sum_{i=0}^n W_i * I_{ikjt})$$

Donde:

ICA_{njt} : es el índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial de la calidad del agua j en el tiempo t , evaluado con base en n variables.

W_i : es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i .

I_{ikjt} : es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j , registrado durante la medición realizada en el trimestre k , del período de tiempo t .

n : es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5, o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione.

Cálculo del valor de cada variable. El procedimiento general consiste en ingresar el valor que, en una determinada medición haya registrado la variable de calidad i , en la curva funcional correspondiente y estimar el valor I_{ikjt} .

Oxígeno disuelto (OD)

Esta variable tiene el papel biológico fundamental de definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas.

Inicialmente se calcula el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto PS_{OD}

$$PS_{OD} = \frac{O_X * 100}{C_P}$$

donde:

O_x : Es el oxígeno disuelto medido en campo (mg/l) asociado a la elevación, caudal y capacidad de reoxigenación.

C_p : Es la concentración de equilibrio de oxígeno (mg/l), a la presión no estándar, es decir, oxígeno de saturación.

Una vez calculado el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, el valor I_{OD}

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * PS_{OD})$$

Sólidos suspendidos totales (SST)

La presencia de sólidos en suspensión en los cuerpos de agua indica cambio en el estado de las condiciones hidrológicas de la corriente. Dicha presencia puede estar relacionada con procesos erosivos, vertimientos industriales, extracción de materiales y disposición de escombros. Tiene una relación directa con la turbiedad.

El subíndice de calidad para sólidos suspendidos se calcula así:

$$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.03 * SST)$$

Si $SST \leq 4,5$, entonces $I_{SST} = 1$

Si $SST \geq 320$, entonces $I_{SST} = 0$

Demanda química de oxígeno (DQO)

Refleja la presencia de sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas a condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura, como la materia orgánica, ya sea biodegradable o no, y la materia inorgánica.

se calcula con la fórmula:

Si $DQO \leq 20$, entonces $I_{DQO} = 0,91$

Si $20 < DQO \leq 25$, entonces $I_{DQO} = 0,71$

Si $25 < DQO \leq 40$, entonces $I_{DQO} = 0,51$

Si $40 < DQO \leq 80$, entonces $I_{DQO} = 0,26$

Si $DQO > 80$, entonces $I_{DQO} = 0,125$

Conductividad eléctrica (C.E.)

Está relacionada con la suma de cationes y aniones determinada en forma química, refleja la mineralización. Se calcula de la siguiente manera:

$$I_{C.E.} = 1 - (10^{(-3.26+1.34\text{Log}10C.E.)})$$

Cuando $I_{C.E.} < 0$, entonces $I_{C.E.} = 0$.

pH

Mide la acidez, valores extremos pueden afectar la flora y fauna acuáticas.

Si $pH < 4$, entonces $I_{pH} = 0,1$

Si $4 \leq pH \leq 7$, entonces $I_{pH} = 0,02628419 e^{(pH*0,520025)}$

Si $7 < pH \leq 8$, entonces $I_{pH} = 1$

Si $8 < pH \leq 11$, entonces $I_{pH} = 1 * e^{(pH-8)-0,5187742}$

Si $pH > 11$, entonces $I_{pH} = 0,1$

Nitrógeno total/Fósforo total (NT/PT)

Mide la degradación por intervención antrópica, como la posibilidad de la fuente de asimilar carga orgánica.

La fórmula para calcular el subíndice de calidad para NT/PT es:

Si $15 \leq NT/PT \leq 20$, entonces $I_{NT/PT} = 0,8$

Si $10 < NT/PT < 15$, entonces $I_{NT/PT} = 0,6$

Si $5 < NT/PT \leq 10$, entonces $I_{NT/PT} = 0,35$

Si $NT/PT \leq 5$, ó $NT/PT > 20$, entonces $I_{NT/PT} = 0,15$

Resultados Índice Calidad de Agua (ICA)

Para el caso de estudio se realizó el cálculo del índice ICA para los cuatro escenarios de simulación.

Tabla 21*Resultados Índice de Calidad de Agua (ICA) por tramo*

	Escenario base	Escenario Q50	Escenario Q95	Escenario Q97.5
4.62	37.2	37.2	37.2	37.2
4.46	38.1	38.8	37.8	37.8
3.25	40.9	42.4	40.1	40
1.61	44.4	45.3	43.8	43.7
0.915	44.4	45.3	43.8	43.8
0.54	44.9	45.8	44.3	44.2
0.16	37.1	38	36.5	36.4
0.025	43.5	44.2	42.9	45.2
0	43.5	44.2	42.9	45.2

Fuente: Autores, 2022.

Los valores que puede llegar a tomar el indicador han sido clasificados en categorías, de acuerdo a ellos se califica la calidad del agua de las corrientes superficiales, al cual se le ha asociado un color como señal de alerta. En la siguiente tabla se registra la relación entre valores y calificación:

Figura 65*Clasificación de la calidad de agua según los valores que tome el ICA*

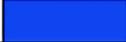
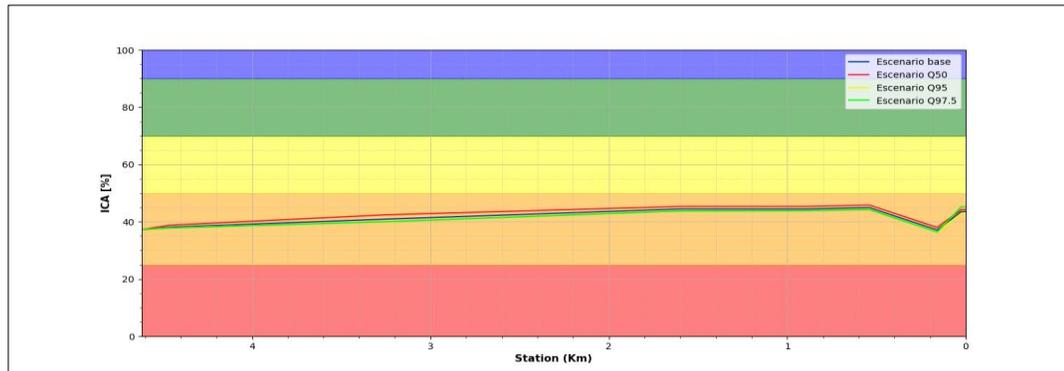
DESCRIPTOR	SÍMBOLO	ÁMBITO NUMÉRICO	R	G	B	COLOR
BUENO	CIRCULO	0,91 – 1,00	15	69	241	
ACEPTABLE	TRIANGULO	0,71 – 0,90	36	148	6	
REGULAR	CUADRADO	0,51 – 0,70	255	255	0	
MALO	PENTÁGONO	0,26 – 0,50	255	153	0	
MUY MALO	HEXÁGONO	0 – 0,25	204	0	0	

Figura 66*Resultados Índice de Calidad de Agua (ICA)*

Fuente: Autores, 2022

Los resultados obtenidos con respecto al índice de calidad de agua denotan que para todos los tramos de este comprendido desde la notación 0 hasta la notación 4.62 y para todos los escenarios de caudal, caudal base, caudal 50, caudal 95 y caudal 97.5 se presentó un ICA entre los porcentajes de 26% a 50% (ICA 0.26-0.50), esto equivalente a una clasificación de calidad de agua con descripción “mala” y correspondiente a una señal de alerta naranja razón por la cual es importante que las entidades encargadas tomen acciones correctivas sobre la cuenca alta del río Chicamocha.

Representación de los Índices de Calidad para Visualizar los Resultados Espacialmente

El ICA permiten una evaluación más amplia e integral de la calidad del agua, ya que consideran la variación en el tiempo y en el espacio. El estado del tramo de estudio del cauce se puede visualizar mediante el mapa de la figura 67, con las estaciones categorizadas de acuerdo a los valores calculados del Índice de calidad del agua para cada escenario de simulación.

Figura 67

Índice de Calidad de Agua para los distintos escenarios



Fuente: Autores, 2022.

El indicador refleja las malas condiciones de la calidad del agua, y en alguna medida permite reconocer problemas de contaminación espacial presente en el tramo de estudio afectado negativamente por los vertimientos sobre el cauce presentando limitaciones del uso del agua para determinadas actividades en municipios aguas abajo. Se han identificado las tendencias para

determinar degradación o recuperación de la calidad hídrica a través de cuatro escenarios de simulación reflejando el escenario Q50 como escenario crítico.

El mapa representa las variaciones de la calidad del agua a lo largo del tramo de estudio, se identifica como zona crítica el vertimiento del Bypass de la PTAR de Tunja debido a las altas cargas de los constituyentes y el caudal que vierte. Dadas las condiciones de diseño de la PTAR del municipio de Tunja es necesario aumentar el caudal del afluente al sistema de tratamiento y por ende reducir al mínimo el caudal del Bypass de la planta de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja.

Conclusiones

Con base al modelo de calidad de agua elaborado a partir de la delimitación del sistema y a la información recogida en campo, se reportan las condiciones hidráulicas y de calidad del tramo de estudio comprendido desde la confluencia de los ríos la Vega y Jordán hasta aguas debajo de la descarga de la PTAR de Tunja en el momento de realización de la campaña de monitoreo. De acuerdo a esto, se determinó la dinámica del sistema en términos de calidad en estado estacionario y se evaluó el impacto de la descarga de cinco vertimientos ante diferentes escenarios de caudal.

El presente estudio reportó un ICA dentro del rango 0.26-0.5 en todo el tramo del río y bajo todos los escenarios de caudal, con un porcentaje por debajo de la media reflejando las malas condiciones del cauce, razón por la cual, las autoridades ambientales deben tomar medidas correctivas sobre la calidad del agua de la cuenca alta del río Chicamocha; uno de los sistemas hídricos más importantes del departamento.

El comportamiento de calidad del agua se representa a partir de un mapa dinámico, el cual ilustra la variación espacial de los constituyentes a lo largo del tramo, en base a este se identificó el vertimiento del bypass de la PTAR de Tunja como el punto de mayor concentración que al entrar en contacto con el río provoca un aumento en la concentración de los constituyentes.

Recomendaciones

Se recomienda para futuras investigaciones en donde utilicen la misma metodología planteada en esta investigación o que estudien el mismo tramo, que implementen campañas de monitoreo en temporada seca y de invierno, así como mediciones puntuales en tramos más cortos, esto para la alimentación de los modelos los cuales reflejaran escenarios acordes a la realidad minimizando el margen de error entre los datos medidos y los datos observados, reduciendo así la banda de incertidumbre. Adicionalmente, con el mismo propósito se recomienda implementar un estudio de trazadores de tal manera que permita estimar los tiempos de viaje de los contaminantes a analizar.

Se recomienda a las autoridades ambientales considerar dentro del plan de ordenamiento de la cuenca, el índice de calidad del agua reportado en el presente estudio, esto como insumo para la legalización de vertimientos sobre el tramo de estudio.

Finalmente, se recomienda incluir el mapa en el sistema de información ambiental ya que representa la variación espacial de la calidad del agua del tramo intersección río Jordán y la Vega hasta la PTAR Tunja, insumo importante para la toma de decisiones sobre la cuenca.

Bibliografía

- Abbasi, T., y Abbasi, S. A. (2012). *Water quality indices*. Elsevier.
- Ahuja, S. (2013). *Monitoring water quality pollution assessment, analysis, and remediation*. (1a ed.). Newnes.
- Alcandía Mayor de Tunja. (2018). *Nuestro municipio*. <http://www.tunjaboyaca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Bojorge-García, M. G., y Cantoral-Uriza, E. A. (2016). The ecological importance of algae in rivers. *Hidrobiológica*, 26(1), 1-8. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2016v26n1/Cantoral>
- Bonilla Benítez, M. L., Goyeneche, O. L., y Cachón Rodríguez, M. (2017). *Análisis de la gestión en la descontaminación de la cuenca alta del río Chicamocha en el departamento de Boyacá, durante el periodo 2010-2016*. (Trabajo de grado especialista, Universidad Distrital Francisco José de Caldas). Repositorio institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23033/ChaconRodriguezMileidy2017pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water SA*, 33(1), 101-106. <https://doi.org/10.4314/wsa.v33i1.47882>
- Boyd, C.E. (2015). Water Quality Regulations. En: *Water Quality*. (2.a ed.). (p 339–352). Springer International Publishing.
- Buitrago, L. L. (2017). *Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua residual PTAR de Tunja-Boyacá*. (Trabajo de grado pregrado, Universidad Católica de Colombia). Repositorio institucional Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14554/1/Diagnostico%20de%20la%20planta%20de%20tratamiento%20de%20agua%20PTAR%20residual%20de%20Tunja%20-%20Boyac%C3%A1.pdf>
- Caballos-Lopez, J. D. (2011). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos. aplicación a la quebrada La Marinilla. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 30, 107-118. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302011000200010

- Caho-Rodríguez, C. A., y López-Barrera, E. A. (2017). Determinación del índice de calidad de agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Producción + Limpia*, 12(2), 35–49. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- Cárdenas Calvachi, G. L., y Sánchez Ortiz, I. A. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 72-88. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007
- Casilla, S. (2014). *Evaluación de la calidad de agua en los diferentes puntos de descarga de la cuenca del rio Suchez*. (Trabajo de grado pregrado, Universidad Nacional del Altiplano). Repositorio Universidad Nacional del Altiplano <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4546>
- Chakraborty, C., Huq, M., Ahmed, S., Tabassum, T., y Miah, R. (2013). Analysis of the causes and impacts of water pollution of buriganga river: a critical study. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2(9), 245-252. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2101402](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2101402)
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2009). *Implementación tasas retributivas por vertimientos puntuales*. http://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wpcontent/uploads/2016/08/INFOME_EJECUTIVO_1212.pdf
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2014). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico de la cuenca alta y media del Rio Chicamocha*. <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2019/09/informe-porh-chicamocha.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2015). *Resolución 3560. Corporación Autónoma Regional de Boyacá*. <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/10/resolucion-3560-2015.pdf>
- Cortés-Rodríguez, A. F. (2005). *Evaluación de la capacidad del agua subterránea en la ciudad de Tunja para abastecimiento de acueducto*. (Trabajo de grado posgrado, Universidad de los Andes). Repositorio institucional Universidad de los Andes.

- <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10689/u258968.pdf?sequence=1>
- Díaz-Pulido, A., Perilla-Castro, C., Muñoz-Moreno, D., Chingaté-Hernández, H., Sánchez-Sánchez, K., Sánchez-Ojeda, F., y Olaya-Sánchez, W. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. *Estudio Socio-Jurídico*, 11(1), 84-116. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-05792009000100005
- Gahm-Schlam, F., Miranda-Salgado, G., Pérez-López, F., Mayo-Díaz, O., Rojas-Serrano, F., y Coras-Merino, P. (2006). Monitoreo de la Calidad del Agua en el río Texcoco mediante sensores selectivos de iones. *Agrociencia*, 40(3), 277-287. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30240301.pdf>
- García, C. A. B., Silva, I. S., Mendonça, M. C. S., y Garcia, H. L. (2018). Evaluation of water quality indices: Use, evolution and future perspectives. En Suriyanarayanan sarvajayakesavalu. *Advances in Environmental Monitoring and Assessment*. (1a ed.). (p.21-36). IntechOpen.
- García-Quevedo, T. V. (2012). *Propuesta de índices de calidad de agua para ecosistemas de Chile*. (Trabajo de grado pregrado, Universidad de Chile). Repositorio institucional Universidad de Chile http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112367/cf-garcia_tq.pdf?sequence=1
- Gastezzi-Arias, P., Alvarado-García, V., y Pérez-Gómez, G. (2017). La importancia de los ríos como corredores interurbanos. *Biocenosis*, 31((1-2)), 39-45. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/view/1725/1952>
- Giraldo, L. C., Alberto-Palacio, C., Molina, R., y Alberto-Agudelo, R. (2015). Water quality modeling of the Medellin river in the Aburrá Valley. *Dyna*, 82(192), 195-202. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n192.42441>
- Gualdrón-Durán, L. E. (2018). Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros físicoquímicos y biológicos. *Dinámica Ambiental*, 1, 83-102. <https://doi.org/10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593>
- Helmer, R., y Hespanhol, I. (1997). *Water pollution control*. Taylor y Francis e-Library.
- Hernández-Romero, P., y Patiño-Gómez, C. (2018). *Manual para el uso del modelo hidrológico hec-hms. aplicaciones del modelo en simulación hidrológica a la cuenca del río conchos*. (Trabajo de grado pregrado, Universidad de las Américas Puebla). Repositorio institucional

Universidad de las Américas Puebla.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/lazzeri_alvarado_ca/etd_4011021157481.pdf

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2022). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial*. <http://www.ideam.gov.co/>
- Jiménez Beltrán, A. A., y Cortes Naranjo, D. A. (2016). *Modelación dinámica de la calidad del agua del Rio Chicamocha teniendo en cuenta el vertimiento de agua residual de la Ciudad de Tunja*. (Trabajo de grado pregrado, Universidad Santo Tomás). Repositorio institucional Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2843>
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., y Bourrié, G. (2019). Water quality indices: challenges and application limits in the literature. *Water*, 11(2), 361. <https://doi.org/10.3390/w11020361>
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y., Kanel, S. R., y Khan, S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132(1-3), 93-110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
- Lajayer, B. A., Ghorbanpour, M., y Nikabadi, S. (2017). Heavy metals in contaminated environment: Destiny of secondary metabolite biosynthesis, oxidative status and phytoextraction in medicinal plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 377-390. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.035>
- Loaiza, J. C., y Valentijn, R. N. (2011). Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales. *Revista Gestión y Ambiente*, 14(3), 23-32. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/29732/29971>
- Lumb, A., Sharma, T. C., y Bibeault, J. F. (2011). A review of genesis and evolution of water quality index (wqi) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(1), 11-24. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0>
- MacKenzie, D. I., Nichols, J. D., Royle, J. A., Pollock, K. H., Bailey, L. L., y Hines, J. E. (2018). Fundamental principals of statistical inference. En Darryl MacKenzie, James Nichols, J.

- Royle, Kenneth Pollock, Larissa Bailey, James Hines. *Occupancy estimation and modeling*. (2a ed.). (71-111). Elsevier.
- Manríque, F., y Manríque, R. A. (2009). Contaminación de la cuenca alta del río Chicamocha y algunas aproximaciones sobre la salud humana. *Salud Hist Sanid on-Line*, 2(1), 1-13. <https://agenf.org/ojs/index.php/shs/article/view/51/50>
- Martínez-Dallos, I. D., y Pinilla-Agudelo, G. A. (2018). Índice de estado limnológico fluvial para los ríos de la cuenca alta del río Chicamocha, Boyacá-Colombia. *Luna Azul*, 46, 125-144. <https://doi.org/10.17151/luaz.2018.46.8>
- Mavridis, D., Moustaki, I., y Knott, M. (2007). Goodness-of-fit measures for latent variable models for binary data. *Handbook of Computing and Statistics with Applications*, 1, 135-161. <https://doi.org/10.1016/b978-044452044-9/50010-0>
- Mbongowo, J. M., Richard, M., y Comfort, W. (2018). Water quality modeling and sensitivity analysis using water quality analysis simulation program (WASP) in the Shenandoah river watershed. *Physical Geography*, 40(2), 127-148. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1507339>
- Mosquera, J. A. (2018). *Propuesta de Índice de Calidad de Agua, como herramienta para el desarrollo sustentable en cuerpos de agua superficiales de la ciudad de Bogotá*. (Trabajo de grado magister, Universidad Distrital Francisco José de Caldas). Repositorio institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13166/1/SernaMosqueraJorgeAntonio2018.pdf>
- Mustafa, A. S., Sulaiman, S. O., y Shahooth, S. H. (2016). Application of QUAL2K for Water Quality Modeling and Management in the lower reach of the Diyala river. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 11(2), 66-80. <https://www.iasj.net/iasj/download/5df0696bc08cf960>
- Orlob, G. T. (1992). Water-Quality Modeling for Decision Making. Orlob, G. T. *Water-Quajournal of Water Resources Planning and Management*, 118(3), 295-307. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(1992\)118:3\(295\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(1992)118:3(295))
- Orozco-Barrenetxea, C., Pérez-Serrano, A., Gónzales-Delgado, M. N., Rodríguez-Vidal, F. J., y Alfayate-Blanco, J. M. (2005). *Contaminación ambiental: Una visión desde la química*. (3ª ed.). Thomson editoriales.

- Pelletier, G. J., Chapra, S. C., y Tao, H. (2006). QUAL2Kw e framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21, 419-425. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.002>
- Romero-Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rubio-Arias, H., Ochoa-Rivero, J. M., Quintana, R. M., Saucedo-Teran, R., Ortiz-Delgado, R. C., Rey-Burciaga, N. I., y Espinoza-Prieto, J. R. (2013). Development of a water quality index (WQI) of an artificial aquatic ecosystem in Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 4(11), 1296-1306. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.411151>
- Sabater, S., y Elosegí, A. (2014). Balancing conservation needs with uses of river ecosystems. *Acta Biológica Colombiana*, 19(1), 3-10. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v19n1.38045>
- Samboni-Ruiz, N. E., Carvajal-Escobar, Y., y Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0120-56092007000300019
- Sanabria-Suarez, D. (2004). *Fósforo total en agua por digestión acida, método del ácido ascorbico*. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/F%C3%B3sforo+Total+en+Agua+M%C3%A9todo+del+Acido+Asc%C3%B3rbico.pdf/bf2f449b-4b9b-4270-b77e-159258d653e2>
- Scarsbrook, M. R., y Townsend, C. R. (1993). Stream community structure in relation to spatial and temporal variation: A habitat templet study of two contrasting New Zealand streams. *Freshwater Biology*, 29(3), 395-410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1993.tb00774.x>
- Shahriparsa, A., Noori, M., Heydari, M., y Rashidi, M. (2016). Floodplain zoning simulation by using HEC-RAS and CCHE2D models in the sungai maka river. *Air, Soil and Water Research*, 9(9), 55-62. <https://doi.org/10.4137/ASWR.S36089>
- Sierra-Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico (1º)*. EdicionesdelaU.
- Silva, O. (2004). El modelo swat en una cuenca pequeña de altas pendientes: Simulación de la producción de agua 1. *Agronomía Tropical*, 54(3), 275-291. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000300002&lng=es&tlng=es.

- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., y Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 31(1), 36-46. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Susilowati, S., Sutrisno, J., Masykuri, M., y Maridi, M. (2018). Dynamics and factors that affects DO-BOD concentrations of madiun river. *AIP Conference Proceedings*, 2049(1), 20052. <https://doi.org/10.1063/1.5082457>
- Torres, P., Cruz, C. H., y Patiño, P. J. (2009). Water quality index in surface sources used in water production for human consumption: A critical review. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.
- Ungureanu, F., Lupu, G., Stan, A., Craciun, I., y Teodosiu, C. (2010). Towards real time monitoring of water quality in river basins. *Environmental Engineering and Management Journal*, 9(9), 1267-1274. <https://doi.org/10.30638/eemj.2010.164>
- Vega, P., y Medina, A. (2015). *Diagnóstico del plan de ordenamiento hídrico-PORH de la cuenca media y alta del rio Chicamocha*. <https://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/porh/#:~:text=Mediante%20Resoluci%C3%B3n%202769%20del%2025%20de%20agosto%20de,la%20cuenca%20y%2C%20particularmente%2C%20de%20sus%20recursos%20h%C3%ADdricos>.
- Victoria-Almeida, J. L. (1996). Modelo para simular la evolución del oxígeno disuelto en embalses. *Ingeniería del Agua*, 3(2), 63-74. <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2699>
- Wang, Q., Li, S., Jia, P., Qi, C., y Ding, F. (2013). A review of surface water quality models. *The scientific world journal*. <https://doi.org/10.1155/2013/231768>
- Wen, Y., Schoups, G., y van de Giesen, N. (2017). Organic pollution of rivers: Combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. *Scientific Reports*, 7(1), 43289. <https://doi.org/10.1038/srep43289>
- Zabala, I., y García, M. (2008). Historia de la educación ambiental desde su discusión y análisis en los congresos internacionales. *Revista de Investigación*, 32(63), 201-218. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142008000100011