

Modelación de Calidad del Agua Mediante el uso de los Programas QUAL2K, STRETEER & PHELPS e IBER Sobre la Capacidad de Asimilación del Rio Ejido Ante los Vertimientos que Comprende la Zona Urbana del Municipio de Popayán, para el Acueducto y Alcantarillado S.A

Isabella Ruiz Hurtado



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán-Cauca

2025

Modelación de Calidad del Agua Mediante el uso de los Programas QUAL2K, STRETEER & PHELPS e IBER Sobre la Capacidad de Asimilación del Rio Ejido Ante los Vertimientos que Comprende la Zona Urbana del Municipio de Popayán, para el Acueducto y Alcantarillado S.A

Isabella Ruiz Hurtado

Trabajo de Grado modalidad pasantía para optar por el título de
Ingeniera Ambiental y Sanitario

Director

Juan José Chaves Velasco



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán-Cauca

2025

Nota de Aceptación

El director y los respectivos jurados del trabajo de grado en modalidad pasantía titulado “ *Modelación de calidad del agua mediante el uso de los programas Qual2k, Streeter and Phelps e IBER, sobre la capacidad de asimilación del Rio Ejido ante los vertimientos que comprende la zona urbana del Municipio de Popayán, para el acueducto y alcantarillado de Popayán S.A.*” Realizado por la estudiante Isabella Ruiz Hurtado; Una vez realizado él informa final y aprobada la sustentación se da la autorización para realizar los trámites referentes para optar por el título de profesional en Ingeniera Ambiental y Sanitario.



Director del Proyecto**Juan José Chaves Velasco**

Evaluador**Arnol Arias Hoyos**

Evaluador**Juan Pablo Prado Medina**

Popayán, 2025

Dedicatoria

Este trabajo de grado va dedicado primeramente a Dios, por ser mi guía, fortaleza e iluminación en todo momento, donde me dio el valor y la sabiduría para lograr alcanzar mi meta.

A mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante durante toda mi carrera, infinitas gracias por creer en mí y por ser mi mayor inspiración para salir adelante cada día.

A mis compañeros quienes me acompañaron con sus palabras de aliento, risas y experiencias maravillosas en este hermoso camino.

Finalmente, a mis profesores y mentores, quienes compartieron mucho de su conocimiento y me motivaron a ser una mejor persona y una gran profesional día a día, este logro también es un reflejo de sus enseñanzas y guía.

Con todo mi corazón y cariño, dedico este trabajo a ustedes.

Isabella Ruiz Hurtado

Agradecimientos

A Dios, primeramente, por darme la vida, la salud y la fortaleza de aprender con amor y paciencia, por tomarme de la mano a la hora de enfrentar las adversidades que la vida tiene para mí, las cuales llamo enseñanzas, hoy dejo en sus manos mi vida profesional para que siempre este de mi lado.

A mis padres, por acompañarme y estar presentes en cada momento de mi formación académica y personal, gracias a ustedes soy la persona que soy hoy en día, la niña soñadora, la mujer valiente y la ingeniera ambiental y sanitaria que hoy les dedica este título, cada una de sus palabras y consejos me han acompañado en este camino llamado vida, lleno de infinitas experiencias y aventuras, los honro y los admiro por enseñarme la valentía, la dedicación, la disciplina y el amor, el amor por cada cosa que hago a diario, por instruirme siempre de la mejor manera, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos, por cuidarme siempre, por enseñarme el amor incondicional y por apoyarme y acompañarme en cada momento de mi vida, este logro también es en nombre de ustedes.

A mi novio y su familia, por ser un apoyo incondicional en este proceso, por estar conmigo brindándome siempre su cariño y su amor.

A mi demás familia agradecerles por ser parte de este camino, gracias infinitas porque los llevo en mi corazón y en cada una de mis oraciones.

Con cariño,

Isabella Ruiz Hurtado

Tabla de contenido

Resumen.....	10
Abstrac	11
Introducción	12
Capítulo 1: Problema de Investigación	14
1.1. Planteamiento del Problema.....	14
1.2. Justificación.....	15
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo General	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
Capítulo 2: Estado del Arte.....	19
2.1. Antecedentes	19
2.2. Marco Conceptual	21
2.3. Marco Legal	27
Capítulo 3: Metodología	29
3.1. Fase I: Condiciones hidráulicas y fisicoquímicas actuales del río Ejido en la zona urbana de la ciudad de Popayán – Cauca.	29
3.1.1. Visitas a Campo a la Fuente Hídrica Río Ejido	29
3.1.2. Parámetros Fisicoquímicos de la Fuente Hídrica.....	29
3.1.3. Estudio de Muestras de los Resultados Obtenidos	30
3.1.4. Localización Río Ejido	30
3.1.5. Descripción Cuenca Río Ejido.....	31
3.1.6. Caracterización de fuentes superficiales aguas arriba Río Ejido	33
3.1.7. Descripción del Punto de Monitoreo	34
3.1.8. Metodología de Monitoreo Fisicoquímico.....	37
3.2. Fase II: Evaluar los Modelos Existentes de la Calidad del agua del Río Ejido, Basado en Procesos de Simulación a través de los Programas Qual2k, Streeter & Phelps e IBER.....	39
3.2.1. Uso de los Programas para la Modelación de Calidad del Agua.....	39
3.3. Fase III: Identificar el Modelo que más se ajuste a los datos Fisicoquímicos, mediante un Análisis Estadístico	58
3.3.1. Resultados de Laboratorio	58

3.3.2. Resultados y Análisis Fisicoquímicos	60
Capítulo 4: Resultados e Interpretación	63
4.1. Fase I: Calibración y Confirmación de los Modelos.....	64
4.2. Fase II: Resultados	65
4.2.1. Resultados QUAL2K.....	65
4.2.2. Resultados STREETER AND PHELPS	72
4.2.3. Resultados IBER.....	75
4.3. Fase III. Tabla de comparación de los modelos aplicados al Rio Ejido Popayán Cauca	83
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	84
5.1. Conclusiones	84
5.2. Recomendaciones para la Gestión Sostenible del Agua	85
5.3. Estrategias para Mitigar la Contaminación y Preservar los Recursos Hídricos	87
Referencias Bibliográficas	88
Anexos	92

Lista de Tablas

Tabla 1 Tipos de Modelos y sus Características	26
Tabla 2 Normatividad para la modelación de calidad del agua	27
Tabla 3 Medición y Análisis de Variables	32
Tabla 4 Medición y Análisis de Variables	34
Tabla 5 Plan de Muestreo, 8462.....	35
Tabla 6	37
Tabla 7 Constantes Cinéticas de Calibración en el Modelo Qual2k.....	43
Tabla 8 Valores de la Demanda de Oxígeno por el Sedimento Según el Tipo de Fondo.....	55
Tabla 9 Valores Obtenidos de los Análisis de Laboratorio Comparación con el artículo 8 de la Resolución 0631 de 2015 (MADS).....	59
Tabla 10 Constantes Hidráulicas para la N de Manning.....	60
Tabla 11 Resultado de Laboratorio – Aguas Superficiales.....	61
Tabla 12 Manning Formula.....	65
Tabla 13 Datos de entrada Hoja Reach Modelo Qual2k.....	65
Tabla 14 Datos de Entrada Qual2K	70
Tabla 15 STREETER AND PHELPS Resultados por tramo, según su caudal, Dbo, Od yTemp°	73
Tabla 16 Tabla de Comparación de Modelos Aplicados al Rio Ejido (Popayán, Cauca)	83

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Esquema de Procesos del Modelo</i>	24
Figura 2 Ubicación Río Ejido, Municipio de Popayán Cauca	31
Figura 3 Balance de Flujo	40
Figura 4 Esquema Completo del Modelo de Calidad de Aguas	47
Figura 5 Términos Considerados en el Modelo de Temperatura.....	49
Figura 6 Ecuaciones Predictivas para Calcular Tasas de Re aireación.....	55
Figura 7 QUAL2K, Caudal Río Ejido	67
Figura 8 QUAL2K DBO Río Ejido	68
Figura 9 QUAL2K OD Río Ejido.....	69
Figura 10 QUAL2K Temperatura Río Ejido	71
Figura 11 STRETER - 1. Resultados por Tramo, Según su Caudal, Dbo, Od yTemp°	73
Figura 12 Simulación 1: Cota del Agua (m).....	75
Figura 13 Simulación 2: Cota del Agua (m).....	76
Figura 14 Simulación 1: Froude	77
Figura 15 Simulación 2: Froude	78
Figura 16 Simulación 1: Velocidad (m/S)	79
Figura 17 Simulación 2: Velocidad (m/S)	80
Figura 18 Calado 1- Altura de la Lámina de Agua.....	81
Figura 19 Calado 2- Altura de la Lámina de Agua.....	82
Figura 20 Evidencias Fotográficas Toma de Muestras.....	94
Figura 21 Evidencia Toma de Muestras Vertimientos	96

Resumen

En el presente proyecto, se presenta la modelación de la calidad del agua del río Ejido, ubicado en la zona urbana de la ciudad de Popayán, Cauca. Para lograr esto, se emplearon los programas Qual2k, Streeter & Phelps e IBER. El río Ejido enfrenta el impacto directo de descargas de aguas residuales provenientes de diversos sectores de la ciudad, lo cual está resultando la degradación de su ecosistema y la disminución de su diversidad biológica. Esta situación conlleva a la manifestación de problemáticas significativas, incluyendo la proliferación de vectores y la emisión de olores desagradables.

Se consideró una alternativa primordial para mejorar esta situación, esta solución implicó la implementación de los programas de modelación Qual2k, Streeter & Phelps e IBER. Mediante la utilización de estos programas, se nos otorga la capacidad de pensar en medidas pertinentes y equitativas a partir de diversos escenarios y simulaciones, estas medidas son esenciales para la formulación de una gran estrategia integral en relación a los recursos naturales y la restauración de la calidad de esta fuente hídrica.

Con el propósito de avanzar en la modelación de la calidad del agua del río Ejido, se procedió a recopilar información proveniente de diversas entidades pertinentes y mediante la ejecución de muestreos en el presente año, se realizó una minuciosa campaña de monitoreo que abarcó puntos estratégicos específicamente en su zona alta, media y baja, además de ello, se incorporaron variables climatológicas en la evaluación. Paralelamente, se integraron los datos históricos que engloban la caracterización y los parámetros fisicoquímicos del río Ejido, abarcando el período desde el año 2016 hasta el presente año 2023.

Seguidamente, los resultados recopilados en campo se ingresaron en cada uno de los modelos. En estos modelos, se llevaron a cabo ajustes y verificaciones con el fin de establecer escenarios confiables y eficaces. Las simulaciones obtenidas de este estudio indican que la calidad del agua en el río Ejido está en una situación crítica, lo que resalta la necesidad de tomar medidas para mejorar su calidad del agua.

Palabras Claves: Calidad del agua, modelación, Qual2k, Streeter & Phelps, IBER.

Abstrac

In this Project, the modeling of the water quality of the Ejido river, located in the urban area of the city of Popayán, Cauca, was carried out. To achieve this, the Qual2k, Streeter & Phelps and IBER programs were used. The Ejido River faces the direct impact of wastewater discharges from various sectors of the city, which is causing the degradation of its ecosystem and the reduction of its biological diversity. This situation leads to the manifestation of important problems, including the proliferation of vectors and the emisión of unpleasant odors.

A primary alternative was considered to improve this situation, this solution envolved the implementation of the Qual2k, Streeter & Phelps and IBER modeling programs. Through the use of these programs, we are given the ability to think about relevant and equitable measures from various scenarios and simulations, these measures are essential for the formulation of a comprehensive grand strategy in relation to natural resources and the restoration of the quality of these. water source.

With the purpose of advancing in the modeling of the water quality of the Ejido river, information was collected from various relevant entities and with sampling this year a meticulous monitoring Champaign was carried out that specifically included strategic points in its discharge, middle and lower zone, in addition to this, climatological variables were incorporated into the evaluation. At the same time, the historical data that encompasses the characterization and physicochemical parameters of the Ejido River were integrated, covering the period from 2016 to the present year 2023.

Next, the results collected in the field were introduced into each of the models. In these models, adjustments and verifications were made in order to establish reliable scenarios. The simulations obtained from this study indicate that the water quality in the Ejido River is in a critical situation, which highlights the need to take measures to improve the quality of its waters.

Keywords: Water quality, modelling, Qual2K, Streeter & Phelps, IBER

Introducción

Entre todos los recursos naturales, el agua se conoce como el más esencial, constituyendo un elemento fundamental para asegurar la supervivencia de los organismos en nuestro planeta Tierra. En Colombia, numerosos habitantes se ven enfrentados a múltiples dificultades en el acceso al agua potable debido al aislamiento geográfico al que se encuentran sometidas algunas comunidades. Como resultado de esta situación, recurren a las fuentes hídricas disponibles en sus alrededores, lo cual conlleva un riesgo para la salud debido a la posibilidad de que los recursos acuáticos empleados se encuentren contaminados.

En este sentido, Caicedo Zambrano y Eraso Huertas (2017), mencionan que las comunidades deben enfrentar el desafío de acceder al agua potable, lo que a menudo los lleva a utilizar fuentes hídricas que pueden no ser seguras, incrementando así el riesgo de enfermedades relacionadas con la calidad del agua.

Sin embargo, en la ciudad de Popayán se ven reflejadas las actuaciones antrópicas dentro del Río Ejido, estando presentes algunas descargas de vertimientos de aguas domésticas e industriales, claramente sin ningún tipo de tratamiento, viéndose afectada esta fuente hídrica dentro de sus características hidráulicas y fisicoquímicas.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM 2015), señala que la contaminación de los cuerpos de agua debido a la descarga de aguas residuales no tratadas es un problema crítico que altera la composición química del agua y afecta la biodiversidad acuática. Este fenómeno, además de representar un riesgo para el ecosistema, también compromete la salud de las comunidades que dependen de estos cuerpos de agua.

La modelación de la calidad del agua se ha utilizado en múltiples estudios con el fin de determinar la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua, también es una herramienta que es esencial en el diagnóstico y la predicción de un sistema (Contreras Rojas, 2020).

Por lo tanto, Contreras Rojas (2020), explica que la modelación ambiental es fundamental para entender los efectos de los vertimientos en cuerpos de agua, ya que proporciona una representación clara de cómo las cargas contaminantes afectan la calidad del agua en ríos y quebradas. Esta herramienta resulta esencial para la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos.

La modelación de calidad del agua en ríos se ha utilizado durante mucho tiempo como una herramienta clave para diagnosticar el estado de los cuerpos de agua, por otra parte también identifica fuentes de contaminación entendiendo así las dinámicas de los contaminantes presentes en la fuente hídrica, empleando así la planificación de la gestión de los recursos hídricos, destacando que los modelos de calidad del agua son sumamente importantes para desarrollar estrategias para prevenir y mitigar la contaminación ambiental (Presidente de la República, Decreto 3930, 2010).

En este sentido, El departamento administrativo de la función pública (2010), destaca que los modelos de calidad del agua son cruciales para la elaboración de estrategias que busquen prevenir y mitigar los impactos negativos sobre este recurso vital, facilitando un manejo más sostenible.

Finalmente, la Guía Nacional de Modelación (2018), define como usar cada uno de los modelos de calidad del agua, en Ríos y en otros cuerpos de agua, sirve para tres cosas principalmente, planear el uso del agua en las cuencas, estudiar y evaluar si los vertimientos y las descargas afectan el ambiente o los cuerpos de agua.

Esta guía nos permite entender que cada uno de los estudios se hagan de forma organizada y clara, para obtener resultados claros y eficientes. Este enfoque integral permite a los gestores del agua y a los responsables de la toma de decisiones comprender mejor cómo manejar y proteger los recursos hídricos en un contexto de creciente presión ambiental (Guía nacional de modelación, 2018).

De esta manera se expone la situación del río Ejido, donde es visible que recibe descargas directas de aguas residuales domésticas e industriales. Cabe destacar que la modelación se llevó a cabo mediante la implementación de los modelos Qual2k, Streeter & Phelps e IBER. A través de las simulaciones generadas, se pudo analizar detalladamente y minuciosamente la concentración de diversos parámetros que afectan la calidad del agua, estos esfuerzos culminaron en la obtención de resultados sumamente satisfactorios.

Capítulo 1: Problema de Investigación

1.1. Planteamiento del Problema

Colombia se caracteriza por la abundancia de ríos, sin embargo, se estima que casi el 90% de ellos se encuentran contaminados.

Por lo tanto, Reyes Ojeda y Ruiz Bravo (2017), asumen que el diagnóstico de la calidad del agua mediante el cálculo de un Índice de Calidad del Agua y la modelación de un tramo del río Tunjuelo en el sector de Bosa Libertador, revela que una gran parte de los ríos colombianos enfrenta serios problemas de contaminación, lo que pone en riesgo la salud ambiental y la calidad de vida de la población que depende de estos recursos hídricos.

En este contexto, se estima que anualmente se vertieron 756.945 toneladas de materia orgánica biodegradable a los sistemas hídricos, y no biodegradable, compuesta por sustancias químicas, alcanza las 918.670 toneladas anuales, este impacto resalta la necesidad urgente de abordar la gestión de los recursos hídricos en el país (Vera Puerto, 2007).

La situación del recurso hídrico se ve agravada a nivel mundial por el incumplimiento de normas que promueven su desarrollo sostenible y uso adecuado, lo que resulta en una disminución constante de los caudales de ríos y lagos. Esto genera efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos, como la degradación de la calidad del agua y la contaminación provocada por actividades humanas y comerciales.

Según, Reyes Ojeda y Ruiz Bravo (2017), la cuenca del río Cauca y la subcuenca del río Ejido en Popayán, reciben directamente la disposición final de las aguas residuales domésticas, comerciales e industriales, con una carga contaminante de 48,23% de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) según el Plan de Desarrollo y Saneamiento Básico (PDASB), lo que altera la composición hidrológica, fisicoquímica y biológica de los cuerpos de agua.

En Popayán, las aguas residuales de toda la zona urbana son dirigidas a tres fuentes, incluyendo el río Ejido. Sin embargo, la ciudad carece de una planta de tratamiento de aguas residuales, dependiendo únicamente de un sistema de alcantarillado y colectores, como Minuto de Dios, Edén y Chune, que desembocan en el río Ejido. Esta falta de infraestructura adecuada genera una carga contaminante significativa, lo que podría tener consecuencias graves para la calidad del

agua del río a corto o mediano plazo. El deterioro del río Ejido, causado por el vertimiento de residuos domésticos, resalta la necesidad de una gestión adecuada de los desechos líquidos (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017).

Por consiguiente el Área metropolitana del Valle de Aburra; Universidad de Antioquia UDEA (2016) considera que La implementación de modelos de simulación es crucial para establecer escenarios de vertimiento responsable, y la herramienta de modelación QUAL2K se utiliza para entender el comportamiento del agua en periodos no monitoreados, lo cual es fundamental para comprender las dinámicas y capacidades de asimilación de la fuente hídrica y apoyar la planificación a nivel nacional, regional y local.

1.2. Justificación

El Decreto 3930 de 2010 establece disposiciones fundamentales relacionadas con el uso del recurso hídrico, su ordenamiento y la regulación de vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados. Esta normativa es crucial para garantizar una gestión adecuada del agua en el contexto del Área Metropolitana de Medellín, donde se ha implementado la Red de Monitoreo Ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá (Área metropolitana del Valle de Aburra; Universidad de Antioquia UDEA, 2016).

Bajo términos del Área metropolitana del Valle de Aburra; Universidad de Antioquia UDEA, 2016) afirman que la red busca establecer un sistema de información que permita la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas para la conservación y manejo del recurso hídrico en la región.

Por otro lado, el Decreto 1076 de 2015 juega un papel esencial en la orientación y regulación del ordenamiento ambiental del territorio, definiendo políticas y regulaciones que guiarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables (López Castaño, 2022).

En este sentido, López Castaño (2022), señala que la implementación de este decreto es fundamental para establecer un marco normativo que garantice la sostenibilidad ambiental y el uso responsable de los recursos hídricos, especialmente en contextos vulnerables como el de la subcuenca del río Quindío.

Este proyecto se centra en el análisis y documentación de la capacidad de recuperación del cuerpo de agua mediante la implementación de un modelo ambiental. Este modelo permite interpretar y representar las dinámicas del recurso hídrico, utilizando constantes cinéticas y condiciones físicas, hidráulicas e hidrológicas recolectadas en campo.

Por lo tanto, Domínguez et al., (2005), mencionan que los modelos matemáticos utilizados, como Qual2k, Streeter & Phelps e IBER, son herramientas claves para identificar planes y acciones que mitiguen los impactos ambientales en cuerpos de agua receptores, facilitando así un enfoque más integral en la gestión de la calidad del agua.

Dentro de este contexto, la modelación se elige como una herramienta adaptable para la gestión del recurso hídrico, ya que permite evaluar diversas situaciones. Algunas autoridades han desarrollado directrices para la correcta realización de modelos de calidad del agua, con el fin de tomar decisiones informadas respecto a medidas de control de la contaminación.

Rodríguez Amézquita (2020), destaca que los modelos de calidad del agua son fundamentales para la obtención de permisos de vertido y para cumplir con los objetivos de calidad de agua establecidos por las actividades regionales, lo que resalta su importancia en la evaluación ambiental.

Considerando lo expuesto, es evidente que estos modelos son imprescindibles para comprender el impacto de los vertidos en un cuerpo de agua, teniendo en cuenta su estado actual de calidad y su capacidad de asimilación. La creación de escenarios de simulación es crucial para prever tanto el impacto de las descargas como las posibles alternativas de saneamiento ambiental (Rodríguez Amézquita, 2020).

En la actualidad, en Colombia se están llevando a cabo estudios sobre la calidad del agua y se analizan indicadores numéricos, aunque la información disponible es limitada. Muchos de los diagnósticos son realizados por países extranjeros, particularmente en Estados Unidos.

Rodríguez Amézquita (2020), señala que, a pesar de las limitaciones en la información local, la utilización de modelos en la toma de decisiones correctivas se presenta como una estrategia ingenieril efectiva para abordar problemas de calidad del agua.

Finalmente, la implementación del modelo propuesto en este proyecto es de suma importancia debido a los graves problemas de contaminación que enfrenta el Río Ejido en

Popayán, Cauca. Este cuerpo de agua se ve afectado por descargas constantes de aguas residuales, tanto domésticas como no domésticas, lo que ha generado una situación alarmante.

Por lo tanto, contar con un modelo de calidad de agua que simule diferentes escenarios se convierte en una herramienta vital para la toma de decisiones en la implementación de medidas efectivas para controlar la contaminación (Rodríguez Amézquita, 2020).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Ejecutar los modelos de calidad del agua mediante el uso de los programas Qual2k, Streeter & Phelps e IBER sobre la capacidad de asimilación del río Ejido ante los vertimientos que comprende la zona urbana del Municipio de Popayán, para el Acueducto y Alcantarillado S.A.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones hidráulicas y fisicoquímicas actuales del río Ejido en la zona urbana de la ciudad de Popayán – Cauca.
- Evaluar los modelos existentes de la calidad del agua del Río Ejido, basado en procesos de simulación a través de los programas Qual2k, Streeter & Phelps, IBER.
- Identificar el modelo que más se ajuste a los datos fisicoquímicos, mediante un análisis estadístico.

Capítulo 2: Estado del Arte

Para el desarrollo de este proyecto es de vital importancia tener en cuenta algunos conceptos que sirven para ordenar y articular los actos con relación al tema de investigación, como referentes conceptuales, legislativos y antecedentes de la modelación de la calidad del agua.

2.1. Antecedentes

Existen variedad de autores que han desarrollado modelaciones de calidad del agua en ríos, destacando la importancia y aplicabilidad de los modelos Qual2k y Qual2kw. Estos estudios enfatizan que los parámetros calibrados son altamente confiables (Pelletier, 2016).

Pelletier (2016) en particular, confirmó la flexibilidad y aplicabilidad de estos modelos para simular la calidad del agua en ríos, lo que refuerza su utilidad en el ámbito de la gestión ambiental. Al respecto.

Morales León (2020), señala que el uso de estos modelos en la optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales, como en el caso de la PTARD Nuevo Tambo en el Departamento del Cauca, es fundamental para asegurar la eficacia en la reducción de contaminantes en los recursos hídricos. Así, se establece que los modelos Qual2k y Qual2kw son herramientas esenciales para la evaluación y mejora de la calidad del agua en diferentes contextos.

Domínguez et al., (2005), afirman que el modelo Streeter & Phelps puede ser utilizado para describir el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y la demanda biológica de oxígeno (DBO), lo cual es crucial para valorar diversas alternativas de saneamiento.

Pelletier (2016), en este sentido, resalta la importancia de contar con software y herramientas de modelado ambiental que faciliten la simulación de la calidad del agua, lo que resulta en una mejor comprensión de los sistemas acuáticos y su respuesta a diferentes factores de contaminación. Estas aportaciones son vitales para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y la implementación de estrategias para la mitigación de impactos ambientales.

En el contexto colombiano, en el río Aburrá de la ciudad de Medellín, Prada y Valencia (2011) implementaron los modelos Qual2k y Qual2kw, evidenciando la necesidad de continuar con las obras de recolección de aguas residuales y la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Estas acciones son fundamentales para reducir las cargas contaminantes

en el río, así como para abordar el problema de los vertimientos de aguas residuales domésticas en otras microcuencas (Hernández et al., 2016).

Jiménez Jiménez (2017), complementa esta información al determinar los parámetros físico-químicos de calidad del agua, lo que subraya la importancia de realizar un seguimiento continuo de la calidad del agua para garantizar la salud de los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) en 2015 utilizó el modelo Qual2kw para modelar la calidad del agua en la quebrada Florida, en Armenia. Este estudio permitió identificar el impacto ambiental de los vertimientos que recibe la quebrada, resultando en la necesidad de planificar y diseñar obras de tratamiento que reduzcan los contaminantes a niveles aceptables (López Castaño, 2022).

Se destaca la relevancia de la modelación hidrodinámica y de la calidad del agua para evaluar los vertimientos generados a la ciénaga Mesolandia, lo que resalta la importancia de aplicar modelos de calidad del agua en la gestión ambiental (Hernández et al., 2016).

Barbosa Cadena, Pérez Martínez (2018), dentro del ámbito internacional aplicaron el modelo Qual2k en el río Hong, en China, para calibrar los parámetros de calidad del agua y simular su capacidad de recuperación. Los resultados mostraron un ligero aumento en la concentración de DBO a 0,9 km debido al vertido de aguas residuales locales, contribuyendo a la formulación de normas de gestión ambiental.

Hernández et al., (2016), confirman que los resultados de este modelo son precisos, lo que demuestra su efectividad en la gestión de la calidad del agua.

Blade et al., (2014), seguidamente implementaron y calibraron el modelo de simulación Qual2kw en el río Palo, en el departamento del Cauca, obteniendo un buen ajuste entre los valores calculados y los medidos en campo, especialmente en lo que respecta al OD y la DBO. Estos resultados evidencian la capacidad predictiva del modelo, ratificando su robustez y confiabilidad, lo que es esencial para la gestión y protección de los recursos hídricos en la región.

Gómez, Gómez (2015), agrega que la modelación de la calidad del agua en redes de distribución de agua potable es igualmente crucial, lo que demuestra la versatilidad y aplicabilidad de los modelos de calidad del agua en diferentes contextos y problemáticas ambientales.

2.2. Marco Conceptual

En Colombia, el recurso hídrico constituye uno de los elementos más valorados debido a la abundancia de fuentes de agua, lo que coloca al país en una posición privilegiada a nivel internacional. En el territorio colombiano, se reconocen cuatro vertientes principales: el Caribe, el Pacífico, el Orinoco y el Amazonas. Dentro de estas, los ríos Cauca y Magdalena se destacan como las principales corrientes de drenaje, siendo considerados las arterias fluviales más importantes del país.

Según Gómez, Gómez (2015), la modelación de la calidad del agua en redes de distribución de agua potable es un aspecto crítico que debe ser abordado para garantizar el adecuado manejo y conservación de estos recursos hídricos.

La calidad del agua puede definirse como un conjunto de concentraciones, especificaciones y características físicas de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como de la biota acuática presente en el cuerpo de agua. Esta calidad se ve afectada por variaciones espaciales y temporales, influenciadas por factores tanto externos como internos al cuerpo de agua. (Atencia, Escobar, 2021)

Gómez, Gómez (2015), enfatiza que la calidad del agua se convierte en un indicador crucial para entender y gestionar los recursos hídricos, lo que resalta la necesidad de realizar estudios continuos sobre este tema

Además, los vertimientos de aguas residuales se identifican como las aguas que han sido alteradas por actividades antrópicas y que, debido a su calidad, requieren un gran tratamiento previo antes de su reutilización, vertido en cuerpos naturales de agua o descarga en sistemas de alcantarillado.

Reyes Ojeda, Ruiz Bravo (2017), mencionan que el diagnóstico de la calidad del agua mediante el cálculo de un Índice de Calidad del Agua (ICA) es fundamental para evaluar el impacto de los vertimientos en ríos como el Tunjuelo, lo cual es esencial para la gestión de recursos hídricos en Colombia

La importancia de los modelos computacionales radica en su capacidad para simular el funcionamiento de reactores anaerobios diseñados para descomponer contaminantes presentes en

lixiviados, especialmente en un contexto donde los residuos y sustancias son vertidos de manera descontrolada en rellenos sanitarios (Pelletier, 2016).

Carabalí Camacho y Pineda Blanco (2022), destacan que el análisis de la capacidad de asimilación de un cuerpo de agua a partir de vertimientos es crucial para comprender los efectos de la contaminación en los ecosistemas acuáticos.

Para conocer y desarrollar cada una de las extensiones de la zona de mezcla y las concentraciones de diferentes parámetros que son aportados por un vertimiento a un cuerpo de agua, se deben diferenciar los tipos de cuerpos receptores, tales como cuerpos de agua lóticos, lénticos y marino-costero (Carabali Camacho, Pineda Blanco, 2022).

Atencia Osorio y Verbel Escobar (2021), proponen una metodología para establecer las características del agua residual tratada, proporcionando definiciones de términos técnicos y ejemplos prácticos de aplicación de los criterios definidos. Los estudios de caso han evidenciado que las cargas contaminantes son determinantes en la contaminación del agua, a excepción de en áreas de alta vulnerabilidad o cuencas con deficiencias constructivas.

Por lo tanto, Castaño Ossa (2015), argumenta que la identificación, comprensión y clasificación de las fuentes de contaminación son esenciales en los programas de gestión de la calidad del agua, lo que permite tomar medidas adecuadas ante actividades potencialmente contaminantes.

Según Reyes Ojeda y Ruiz Bravo (2017), Aseguran que la modelación ambiental de vertimientos es un proceso reciente en Colombia que busca soluciones integrales sobre los impactos ambientales, promoviendo la interacción con los elementos que sustentan la sostenibilidad de los recursos naturales.

Reyes Ojeda y Ruiz Bravo (2017), señalan que los modelos ambientales para la calidad del agua son herramientas valiosas que permiten realizar ajustes necesarios en los sistemas de tratamiento para conservar los cuerpos de agua receptores de vertimientos. La confirmación del modelo implica verificar que este represente adecuadamente la realidad, adaptándose a las necesidades particulares del área de estudio y minimizando la incertidumbre y sensibilidad.

Reyes Ojeda y Ruiz Bravo (2017), destacan que la confirmación es un paso crucial en la modelación, ya que asegura que los resultados sean confiables y aplicables.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es fundamental para evaluar la cantidad de oxígeno requerido para descomponer materia orgánica mediante procesos bioquímicos aeróbicos, expresándose en mg/L (Carabalí Camacho, Pineda Blanco, 2022).

Carabalí Camacho y Pineda Blanco (2022), subraya que la DBO es un indicador clave de la calidad del agua, ya que niveles elevados pueden indicar contaminación significativa.

El oxígeno disuelto (O.D) es crucial en el agua, proveniente principalmente del aire. Niveles bajos de oxígeno pueden indicar condiciones de contaminación elevada o actividad bacteriana intensa (Caicedo Zambrano, Eraso Huertas, 2017).

Carabalí Camacho y Pineda Blanco (2022), explican que la presencia de oxígeno disuelto es un indicador importante de la salud de un ecosistema acuático, dependiente de factores como temperatura y presión.

La conductividad eléctrica de una muestra de agua representa su capacidad para transportar corriente eléctrica, influenciada por la presencia y concentración de iones. La conductividad es un parámetro que ayuda a evaluar la calidad del agua, reflejando la cantidad de sales disueltas (Carabalí Camacho, Pineda Blanco, 2022).

La temperatura es un parámetro físico influyente en múltiples procesos biológicos y químicos dentro del agua, afectando la actividad biológica y la solubilidad de gases. La temperatura impacta en la mezcla, sedimentación y floculación, siendo un factor crítico en la dinámica de los ecosistemas acuáticos (Carabalí Camacho, Pineda Blanco, 2022).

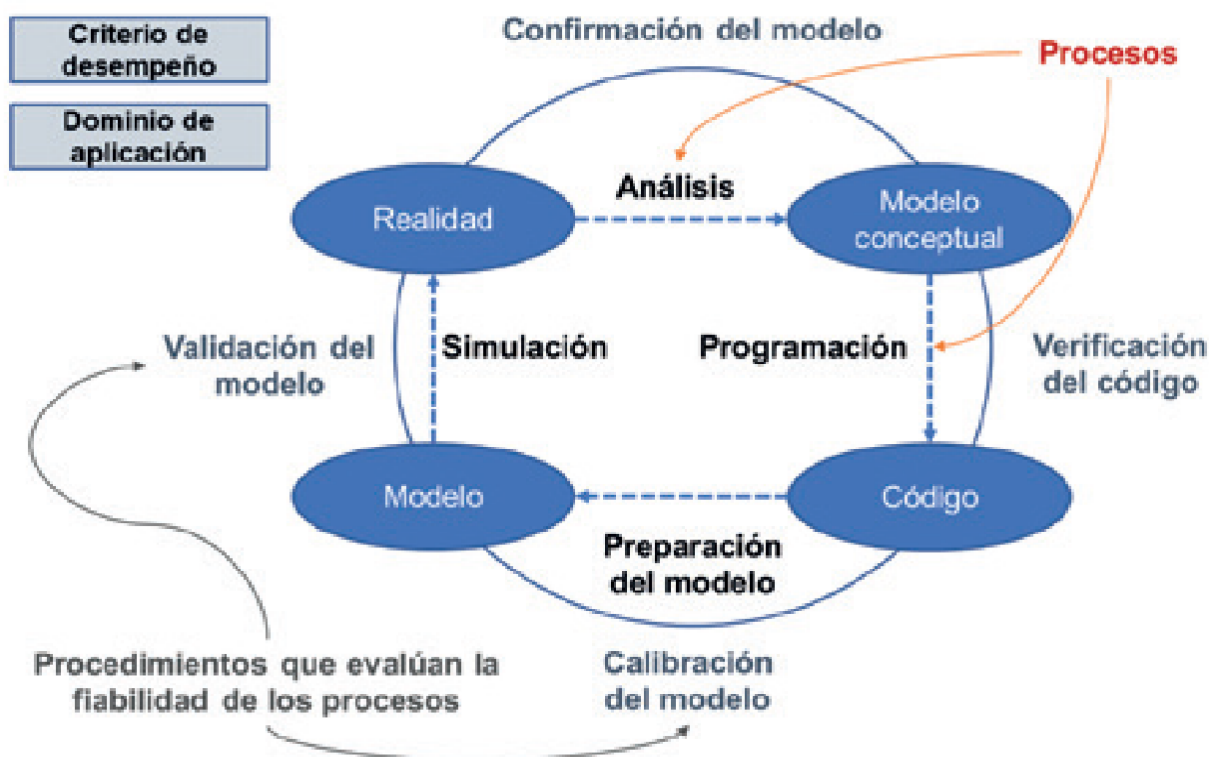
Los sólidos suspendidos totales (SST) se refieren a los sólidos presentes en aguas residuales, excluyendo los sólidos solubles. Los sólidos en suspensión son aquellos que superan un micrómetro y son retenidos durante análisis de laboratorio, siendo un indicador de la calidad del agua (Carabalí Camacho, Pineda Blanco, 2022).

La modelación matemática implica representar la realidad mediante modelos conceptuales que simplifican y describen el sistema natural de manera aceptable (Rodríguez, Amézquita, 2020).

Según, Barbosa Cadena, Pérez Martínez (2018), los modelos computacionales permiten realizar simulaciones y cálculos necesarios para obtener un caso de estudio, siendo fundamental la calibración y validación de los modelos para garantizar su efectividad.

Figura 1

Esquema de Procesos del Modelo



Nota, Tomado de la Guía Nacional de *Modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales* (p. 14), adaptado de Refsgaard y Henriksen (2004) por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018.

Por consiguiente, Morales León (2020), afirma que **la realidad** en referencia a la modelación es una herramienta muy útil y poderosa ya que su aplicación se ha utilizado en varios estudios dando como resultado eficacia, apoyando así decisiones de escenarios futuros ya que estos son claves para regir con cada una de las normas ambientales planificando el uso correcto del recurso hídrico en forma sostenible. Se debe tener en cuenta que dentro de las practicas la calidad de los resultados depende de la disponibilidad de los datos obtenidos en estudio o en campo. Por otra parte, el **Modelo conceptual** constituye una representación de cada uno de los comportamientos presentes dentro de la fuente hídrica, es decir como los procesos afectan la calidad del agua del rio, se consideró que este es el paso previo e importante que nos muestra la realidad de un cuerpo de agua para seguidamente realizar la modelación y su respectiva simulación. Así mismo, el **Código del modelo** dentro de una modelación ambiental se conoce

como un programa o herramienta que es útil para realizar los cálculos necesarios y sus respectivas simulaciones presentes dentro del modelo, claramente siguiendo con unas reglas que son directrices en esta modelación, nos permite identificar que tan afectado está el vertimiento y como cambiaría la calidad del agua si existiera la mitigación de contaminación ambiental. De la misma manera, Caicedo Zambrano y Eraso Huertas (2017), explican que el **Modelo** es una aproximación a las condiciones asociadas a un área de interés en particular, es esencial para predecir y simular cómo se comportan los flujos dentro del cuerpo de agua, permitiendo tomar decisiones aptas sobre su manejo, control de contaminación y planificación del uso del agua. Seguidamente la **Calibración y validación del modelo** son procesos claves para tener segura su precisión. También consiste en ajustar los parámetros del modelo para que coincidan con sus datos reales estando presentes en el río, una vez calibrado el modelo se realiza la comparación con cada uno de los datos, y así verificar si se puede predecir correctamente la calidad del agua en diferentes condiciones.

Caicedo Zambrano y Eraso Huertas (2017), Expresan que cada uno de los Componentes de un modelo son; **parámetro** el cual dentro de un modelo es un valor interno que se ajusta automáticamente perfectamente en un proceso de entrenamiento con el fin de identificar los comportamientos de los flujos dentro de un cuerpo de agua, variable es una característica o propiedad de un sistema de agua, estas variables resultan ser físicas, químicas o biológicas, teniendo en cuenta la temperatura, el pH, la concentración de oxígeno disuelto, nutrientes, o la presencia de contaminantes. También está la **Condición de frontera** las cuales son asociadas a las variables de entrada, definiendo los comportamientos del sistema en los límites espaciales del área modelada como las entradas y las salidas de un Río, también se cuenta con la **Condición inicial** la cual es el conjunto de valores donde describen el inicio de las simulaciones es decir el tiempo, contando con las condiciones iniciales, de ese modo los Criterios de desempeño dentro de una modelación de calidad del agua se conocen como indicadores cuantitativos que son utilizados para evaluar la precisión y la eficacia del modelo al presentar el comportamiento real de los flujos presentes dentro del sistema. Finalmente, la **Modelación de calidad del agua** es una herramienta que utiliza ecuaciones matemáticas para simular y predecir cada uno de los comportamientos y como cambian las condiciones físicas, químicas y biológicas del agua dentro del cuerpo hídrico, con el fin de evaluar su estado.

Tabla 1*Tipos de Modelos y sus Características*

Modelo	Características
STREETER & PHELPS	● Descripción: Es aplicable a ríos con condiciones aerobias, flujo con superficie libre, flujo permanente, unidimensional y que relaciona el abastecimiento de oxígeno disuelto en una corriente de agua, cuando ésta recibe descarga de materia orgánica. ● Parámetros modelados: OD y DBO5 ● Implementado en: Río: Vermelho (Brasil), Ubaté (Colombia) y Almendares (Cuba) ● Desarrollado por: Harold Warner Streeter y Earle Bernard Phelps
QUAL2K	● Descripción: Tiene la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, las cuales pueden ser manejadas de manera independiente o integrarse a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario. ● Parámetros modelados: Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, OD, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal. ● Implementado en: Río: Cauca, Bogotá, Chinchiná, Palo, Sinú, Aburrá y quebrada Manizales (Colombia). ● Desarrollado por: Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), 2008.
IBER	● Descripción: Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. ● El modelo consta de distintos módulos entre los que se encuentran los siguientes: hidrodinámica, turbulencia, transporte de sedimentos por carga de fondo y en suspensión, calidad de aguas. Todos los módulos están basados en ecuaciones de transporte bidimensionales promediadas en profundidad. ● Desarrollado por: Manual de referencias del módulo de calidad de aguas.

Nota. Información tomada del trabajo de grado *Modelación de la calidad del agua del río Molino en el área urbana de la ciudad de Popayán Cauca* (p. 26), por Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017.

2.3. Marco Legal

Tabla 2

Normatividad para la modelación de calidad del agua

Normatividad	Descripción
Decreto Ley 2811 de 1974	Código nacional de recursos naturales, establece la regulación y control del recurso hídrico, estableciendo el control de los vertimientos y procesos sancionatorios asociados a aguas residuales sin su debido tratamiento (Presidente de la República de Colombia, Decreto 2811, 1974).
Ley 09 de 1979	Código Sanitario Nacional, establece procedimientos y medidas para la regulación y control de los vertimientos. (Presidente de la República de Colombia, Ley 09, 1979).
Ley 99 de 1993	Se crea el Ministerio de Medio Ambiente, vivienda y desarrollo territorial como ente rector de las políticas ambientales nacionales, también establece la base normativa para la implementación de tasas retributivas por vertimientos líquidos puntuales a los cuerpos de agua y la competencia de las corporaciones en la evaluación, control y seguimiento de las descargas de aguas residuales. (Congreso de la República de Colombia, Ley 99, 1993)
Ley 142 de 1999	Aplica a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural; a las actividades que realicen las personas prestadoras de servicios públicos de que trata el artículo 15 de la ley, y a las actividades complementarias. (Congreso de la República de Colombia, Ley 142, 1999)
Ley 1333 de 2009	Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Titularidad de la potestad sancionatoria en materia ambiental por parte del estado. (Congreso de la República de Colombia Ley 1333, 2009)
Ley 388 de 1997	Ley general de ordenamiento territorial. (Congreso de la República de Colombia, Ley 388, 2009)
Decreto 1076 de 2015	Establece los requisitos para el trámite del Permiso de Vertimientos, entre los cuales se incluye en su numeral 19, la presentación de la Evaluación Ambiental del vertimiento presenta el contenido de la “Evaluación ambiental del vertimiento”, el cual se desarrolla a continuación de forma amplia y detallada con los ítems evaluados para su adecuada aplicación. (Presidente de la República de Colombia, Decreto 1076, 2015)

Decreto 1355 de 1970	Por el cual se dictan normas sobre Policía, art. 130. La policía velará por la conservación y utilización de las aguas de uso público. En consecuencia, el jefe de policía deberá evitar el aprovechamiento de dichas aguas, cuando no se haya obtenido el correspondiente permiso y velará por el cumplimiento de las condiciones impuestas en él y en las mercedes de aguas. (Presidente de la República de Colombia, Decreto 1355, 1970)
Decreto 3440 de 2004	Por el cual se reglamenta lo referente a las tasas retributivas y compensatorias por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales. (Presidente de la República de Colombia, decreto 3440, 2004)
Decreto 1449 de 1977	Uso de recursos naturales en Colombia. (Presidente de la República de Colombia, Decreto 1449, 1977)
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. (Presidente de la República de Colombia, Decreto 1575, 2015)
Resolución 631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y valores límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial y a los alcantarillados públicos. (Presidente de la República de Colombia, Resolución 631, 2015)
Resolución 959 de 2018	Guía Nacional de modelación del recurso hídrico. (Congreso de la República de Colombia, resolución 959, 2018)

Nota, Elaboración propia a partir de la normatividad.

Capítulo 3: Metodología

Para la solución del proyecto que se desarrolló, se empleó una metodología de investigación científica mixta que combina elementos cualitativos basados en la observación y cuantitativos basados en la estadística. Esta metodología permite examinar diferentes modelos que se ajusten al objetivo general y a los objetivos específicos del proyecto. En particular, se llevó a cabo la implementación de modelación del río Ejido considerando su geomorfología, lo que proporciona herramientas para realizar la caracterización fisicoquímica y biológica correspondiente. Esto permitió evaluar los modelos existentes de la calidad del agua del Río Ejido, utilizando procesos de simulación a través de programas como Qual2k, Streeter & Phelps e IBER. El objetivo es determinar el análisis estadístico del modelo que mejor se ajuste a las condiciones reales del Río Ejido. A partir de los resultados obtenidos con este software, se planteó algunas medidas adecuadas de mitigación para reducir el impacto ambiental.

3.1. Fase I: Condiciones hidráulicas y fisicoquímicas actuales del río Ejido en la zona urbana de la ciudad de Popayán – Cauca.

3.1.1. Visitas a Campo a la Fuente Hídrica Río Ejido

Se realizaron visitas a la zona de estudio donde se desarrolló el monitoreo y se recopiló la información necesaria para utilizar los programas anteriormente mencionados, los puntos de estudio fueron Río Ejido, especificando los vertimientos Minuto de Dios, Edén y Chune.

3.1.2. Parámetros Fisicoquímicos de la Fuente Hídrica

Se llevó a cabo la identificación de las condiciones hidráulicas del río Ejido mediante la realización de aforos y secciones transversales utilizando metros, correntómetros y molinetes. Así mismo, se realizó la evaluación de las condiciones fisicoquímicas que incluyen la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales, pH, temperatura, presión, concentración, potencial redox, seguidamente se desarrolló la toma detallada de datos como el ancho, la pendiente y la georreferenciación, utilizando para esta el sistema de posicionamiento global (GPS) en conjunto con la medición en trabajo de campo. además, se empleó la técnica de batimetría con el fin de evaluar el tránsito de crecientes con fines

hidrológicos. Por otra parte, se calculan las pendientes a partir de las diferencias de elevación entre los puntos de vertido como complemento para el resultado.

3.1.3. Estudio de Muestras de los Resultados Obtenidos

Las muestras obtenidas en la visita de campo a la fuente hídrica fueron enviadas al laboratorio ChemiLab quien fue el encargado de hacer el respectivo estudio de análisis de calidad del agua de cada muestra tomada para lograr obtener datos precisos y cargarlos a los programas de modelación como lo son: Qual2k, Streeter & Phelps e IBER.

Fase I: Se realizaron visitas al río Ejido para recopilar datos necesarios para el monitoreo y análisis. Se evaluaron las condiciones hidráulicas y fisicoquímicas del río Ejido, incluyendo parámetros como DBO, DQO, sólidos suspendidos, pH, temperatura, y otros, utilizando herramientas como metros, correntómetros, molinetes y GPS. También se desarrollaron mediciones de batimetría para evaluar la circulación de crecientes. Las muestras recolectadas fueron enviadas al laboratorio ChemiLab para su análisis de calidad del agua, y los datos obtenidos se utilizaron en programas de modelación como Qual2k, Streeter & Phelps e IBER.

3.1.4. Localización Río Ejido

El río Ejido nace en el suroccidente de la ciudad de Popayán, atravesándola de oriente a occidente y desembocando en el río Molino. Tiene una superficie de 1559 hectáreas y una longitud de cauce principal de aproximadamente 10.2 km. Su altitud varía desde los 1700 metros en la desembocadura hasta los 2400 metros en la parte alta. Entre sus principales afluentes se encuentran las quebradas Las Monjas, Los Sauces, Dos Agüitas y Los Tejares.

El río Ejido forma parte de la subcuenca Molino-Pubús, una fuente hídrica que es un afluente directo del río Cauca. El territorio de esta subcuenca se encuentra ubicado en el municipio de Popayán.

Figura 2*Ubicación Río Ejido, Municipio de Popayán Cauca**Nota, Elaboración Propia, Recuperado de Google earth.*

3.1.5. Descripción Cuenca Río Ejido

3.1.5.1. Río Ejido Aguas Abajo.

Se realizó el muestreo en los puntos denominados aguas abajo del Río Ejido, realizado en la empresa Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.E.S.P, efectuado durante los días 16 y 17 de marzo del 2024, donde además se incluyen tanto las mediciones In situ como las mediciones como los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

Por otro lado, se tienen en cuenta los límites máximos y mínimos permisibles para vertimientos de aguas residuales, establecidos en el artículo 8 resolución 699 de 2021 expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), para efectuar el análisis de

resultados de los parámetros In situ y de laboratorio obtenidos en la caracterización de la matriz de agua superficial (AN), en la empresa **Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P**, la cual está orientada especialmente a actividades de prestación de servicio público de acueducto y alcantarillado.

Resolución 0631 de 2015 (MADS). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (MADS, 2015).

Descripción del punto de Monitoreo: El muestreo se realizó en el lugar previamente determinado por el cliente; ubicado en el municipio de Popayán, departamento de Cauca. La caracterización se llevó a cabo los días 16 y 17 de marzo del 2024.

En la siguiente tabla se presentan las coordenadas de los puntos monitoreados, los códigos asignados en laboratorio a cada una de las muestras, fecha y hora de muestreos:

Tabla 3
Medición y Análisis de Variables

Parámetro	Método	Unidad
Caudal	No Aplica	L/S
Coliformes Termo tolerantes	SM 9223 B modificado	NMP/100m L
Coliformes Totales	SM 9223 B	NMP/100m L
Conductividad in situ	SM 2510 B 2017	μS/cm
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	SM 5210 B, ASTM D 888-12 METODO C	mg O2/L
DQO	SM 5220D	mg O2/L
Fósforo total	SM 4500-PB-E	mg P/L
Nitratos	SM 4500 NO3 D Ed.23 2017	mg N- NO3/L
Nitritos	SM 4500 NO2 B Ed.23 2017	mg N- NO2/L
Nitrógeno Amoniacal	SM 4500 NH3 B, C	mg/L NH3- N

Nitrógeno total	Cálculo	mg N/L
Nitrógeno total Kjeldahl	Semi-micro Kjeldahl SM 4500-Norg C, SM 4500 NH3 B, C	mg N/L
Oxígeno Disuelto (In situ)	ASTM D 888-18	mg O2/L
pH In situ	SM 4500 H+ B	Unidades de pH
Salinidad	SM 2520 B	ppt
Saturación de Oxígeno (In Situ)	ASTM D 888-09 METODO C	%
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540D	mg/L
Temperatura muestra (In situ)	SM 2550 B 2017	°C

Nota, Fuente, Elaborado por el laboratorio Chemilab S.A (2024).

3.1.5.2. Río Ejido Aguas Arriba.

3.1.6. Caracterización de fuentes superficiales aguas arriba Río Ejido

Se presentan los resultados y análisis derivados de la realización del muestreo en el Río Ejido, requeridas por en la empresa Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P. y efectuadas durante los días 14, 16 y 17 de marzo del 2024, donde además se incluyen tanto las mediciones In situ como los resultados de los análisis físicoquímicos y microbiológicos.

Por otro lado, se tienen en cuenta los límites máximos y mínimos permisibles para agua residual, establecidos en los Artículo 8 y 5 de la Resolución 0631 de 2015 expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), para efectuar el análisis de resultados de los parámetros In situ y de laboratorio obtenidos en la caracterización de las matrices de agua superficial (AN), de la empresa Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P., la cual está orientada especialmente a actividades de prestación de servicios públicos.

La normativa vigente para la validación de los resultados In situ y de laboratorio de la caracterización de las Aguas Superficiales (AN), en la empresa **Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P.**, corresponde específicamente a los Artículo 8 para cargas >3000 Kg/día de DBO5 de la Resolución 0631 de 2015 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

Resolución 0631 de 2015 (MADS): Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (MADS, 2015).

3.1.7. Descripción del Punto de Monitoreo

El muestreo se realizó en el lugar previamente determinado en cada uno de los puntos determinados de los puntos denominados el cual es el Río Ejido; ubicado en el municipio de Popayán, departamento del Cauca. La caracterización se llevó a cabo los días 14,16 y 17 de marzo del 2024.

En la siguiente tabla se presentan las coordenadas de los puntos monitoreados, los códigos asignados en laboratorio a las muestras, fechas y horas de muestreos, y registros fotográficos.

Tabla 4
Medición y Análisis de Variables

Parámetro	Método	Unidad
Caudal volumétrico	No Aplica	L/S
Coliformes termo tolerantes	SM 9223 B modificado	NMP/100mL
Coliformes Totales	SM 9223 B	NMP/100mL
Conductividad in Situ	SM 2510 B 2017	μS/cm
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	SM 5210 B, ASTM D 888-12 METODO C	mg O2/L
DQO	SM 5220D	mg O2/L
Fosforo total	SM 4500-PB-E	mg P/L
Nitratos	SM 4500 NO3 D Ed.23 2017	mg N-NO3/L
Nitritos	SM 4500 NO2 B Ed.23 2017	mg N-NO2/L

Nota, Fuente, Elaborado por el laboratorio Chemilab S.A (2024).

Tabla 5*Plan de Muestreo, 8462*

Código de Muestra	Nombre del punto Muestreado	Fecha de muestreo	Hora	Tiempo de Muestreo	Coordenadas Geográficas WGS 84		Coordenadas planas Magna- Sirgas Origen Nacional	
					Latitud (°)	Longitud (°)	Norte (m)	Este (m)
Plan de Muestreo: 8462								
MN43309 5	Ejido Aguas Arriba	2024-03-14	16:30	Puntual	2,431297	-76,604464	1827210,377	4599167,094
Aguas arriba Ejido: El punto de monitoreo se encuentra ubicado a unos 9 metros, de la planta de beneficio animal de Popayán, sobre la calle 17 y en una zona residencial. Presenta un cauce encajonado, recto con leves ondulaciones, en las orillas se observas arbustos y hierbas, lecho escabroso, compuesto principalmente de grava y arenas y poco sedimento. Se observan residuos plásticos y otros. La muestra presenta una apariencia traslucida, con algunas partículas en suspensión.								
Condiciones ambientales durante el monitoreo: Día soleado- temperatura ambiente (26,8 °C)- Humedad relativa (26,8%)								



Nota, Fuente, Elaborado por la empresa del Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A. (2024).

3.1.8. Metodología de Monitoreo Fisicoquímico

3.1.8.1. Metodología de Muestreo Compuesto.

Para la realización del muestreo compuesto de aguas superficiales aguas arriba requeridos por la empresa Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P, ubicado en Popayán, Cauca, se realizó el procedimiento de toma de muestras de aguas establecido en el Laboratorio ChemiLab (PGC 04 004), el cual se encuentra acreditado según Resolución N° 2234 de 10 de octubre del 2022 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Se hizo la toma de muestras puntuales cada sesenta (60) minutos durante ocho (8) horas, realizando mediciones In situ de pH, temperatura, Conductividad, Salinidad, Oxígeno Disuelto, Saturación de oxígeno y Caudal. En el punto Molino aguas arriba se efectuó la toma de muestras puntuales cada sesenta (60) minutos durante ocho (8) horas en tres sesiones cada una de ocho (horas) en total 24 horas, realizando mediciones In situ de pH, temperatura, Conductividad, Salinidad, Oxígeno Disuelto, Saturación de oxígeno y Caudal. Al finalizar el monitoreo se hizo la composición de una muestra representativa la cual fue trasladada al laboratorio para su análisis.

Además, se realizó la verificación de los equipos de campo, los cuales hacen parte del listado maestro de equipos de laboratorio y cuentan con un programa de mantenimiento y calibración (FOR 04 103) según lo establece la Norma NTC-ISO/IEC 17025:2005.

3.1.8.2. Caracterización de Agua Residual Domestica Vertimientos.

Descripción del Punto de Monitoreo. El muestreo se realizó en los lugares previamente determinados; ubicados en el municipio de Popayán, departamento del Cauca. La caracterización se llevó a cabo los días 12 al 16 de marzo del 2024.

En la siguiente tabla, se presentan las coordenadas de los puntos monitoreados, los códigos asignados en laboratorio a las muestras, fechas y horas de muestreos, y registros fotográficos.

Tabla 6

Puntos de Monitoreo (Minuto de Dios)

Código de la Muestra	Nombre del Punto muestreado	Fecha muestreo	Hora	Tipo de muestreo	Coordenadas geográficas WGS 84		Coordenadas Planas Magna - Sirgas Origen Nacional	
					Latitud (°)	Longitud (°)	Norte (m)	Este (m)
MD432678	MINUTO DE DIOS J1	2024-03-15	8:00-16:00	Compuesto	2,440000	-76,6188	1828178,154	4597573,33
MD433125	MINUTO DE DIOS J2	2024-03-14	16:00-24:00					
MD433119	MINUTO DE DIOS J3	2024-03-14	24:00-8:00					
Punto de monitoreo ubicado en el barrio minuto de dios, la muestra se toma en una caja de inspección donde es necesario una cuerda de 4m para acceder al agua residual doméstica. El canal es artificial y presenta un ancho de 3m, la columna de agua se mantuvo entre 0,11m y 0,14ma lo largo del monitoreo. Los caudales se midieron usando la fórmula base x altura x velocidad. Agua de apariencia visual gris clara, presencia de materia orgánica en suspensión, olor característico de ARD y sin iridiscencia aparentemente. La caja de inspección se encuentra en un lote con pastura verde y un árbol, contiguo al lote se encuentran vías y viviendas urbanas. Las coordenadas reportadas en papelería se toman en campo según lo acordado con el ing. Pablo del acueducto de Popayán. "n2.4400 w76.6188".								

Nota, Fuente, Laboratorio Chemilab S.A. (2024).

3.2. Fase II: Evaluar los Modelos Existentes de la Calidad del agua del Rio Ejido, Basado en Procesos de Simulación a través de los Programas Qual2k, Streeter & Phelps e IBER.

3.2.1. *Uso de los Programas para la Modelación de Calidad del Agua*

Cargados los resultados de las muestras en los programas se realizó un análisis detallado de los tres modelos mencionados, Qual2k, Streeter & Phelps e IBER, considerando las condiciones que prevalecen durante épocas de lluvia baja y alta, o según los períodos en que se hayan efectuado los monitoreos correspondientes por parte de la empresa encargada del Acueducto y Alcantarillado de Popayán Cauca S.A. De esta manera, se obtiene una evaluación rigurosa, la cual incluye precisión, efectividad y aplicabilidad en el desempeño de cada modelo en diversas situaciones.

3.2.1.1. Programa Qual2k.

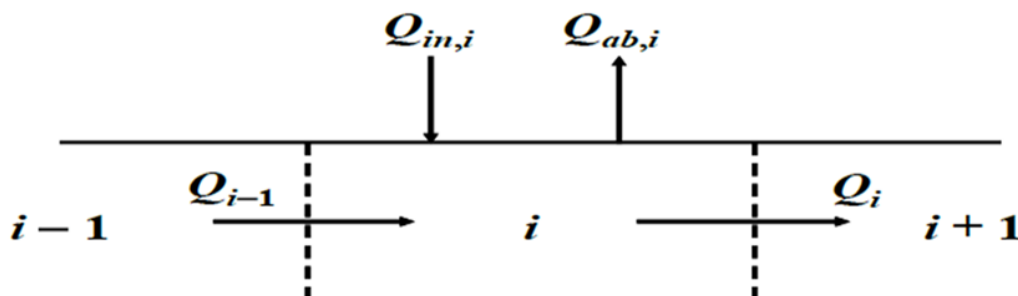
El modelo QUAL2Kw utiliza dos enfoques para calcular las constantes hidráulicas, uno de los cuales es la ecuación de Manning. En este contexto, se asigna un valor a la rugosidad del cauce en función de sus características específicas, apoyándose en las directrices proporcionadas en el manual de la USGS Science. Este manual ofrece métodos para estimar el coeficiente de Manning (n) a partir de las características de los canales naturales (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017).

Balance de flujo: Para la obtener el balance de flujo del modelo Qual2k, se debe de tomar en cuenta varios aspectos dentro de la corriente superficial en el estado estacionario, (los flujos de entrada y salida son constantes en el tiempo) encontrándose en estado no uniforme, teniendo en cuenta que el caudal vario en su trayecto, en la medida que recibe y/o extraen los aportes de flujo en entrada o salida (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017)

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i}$$

Donde, Q_i = Caudal que se encuentra en la salida principal (m³/d), Q_{i-1} = Caudal de entrada de la corriente principal (m³/d), $Q_{in,i}$ = Caudal de entrada de las fuentes puntuales y fuentes no puntuales (m³/d), y $Q_{ab,i}$ = Caudal de las salidas a las extracciones puntuales y no puntuales (m³/d) (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.28)

Figura 3 *Balance de Flujo*



Nota, Fuente Qual2k User Manual

Algunas de las pestañas que se utilizaron en la modelación Qual2k:

Qual2k (Información del río a modelar): Se incorporan datos generales que serán utilizados dentro del modelo, como el nombre del río o lugar de estudio, la zona horaria, entre otras (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

Headwater (Cabecera de la corriente o aguas arriba): Se ingresan los datos relacionados con la calidad del agua o algunas de las condiciones iniciales en los tramos superiores del río (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

Reach (Alcance): Representa una gran parte del río donde es notorio que se evidencia homogénea dentro de sus características hidráulicas, geomorfológicas y su calidad del agua, asume las condiciones como caudal, temperatura, oxígeno disuelto, entre otros (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

Reach rates (Alcance de tasas): Esta pestaña se refiere a cada uno de los coeficientes presentes en la velocidad de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen diferentes comportamientos en el tramo de estudio (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

Initial conditions (Condiciones iniciales): Se entienden como los valores de calidad del agua que se utilizan al inicio de cada simulación, para cada parámetro presente en el río como lo es; DBO, amonio, nitrato, fosforo, temperatura, entre otros (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

Rates (Tasa): Son los coeficientes cinéticos que controlan las velocidades donde ocurren distintos procesos físicos, químicos y biológicos afectando así la calidad del agua del río escogido para realizar el estudio de modelación, estas tasas determinan como cambian las concentraciones de las sustancias a lo largo del tiempo encontrando procesos como descomposición de materia orgánica (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

Hydraulics data (Datos hidráulicos): Se considera el comportamiento del flujo de agua en el río, son sumamente importantes para simular el transporte y transformación de los contaminantes presentes, dando información y resultados de cada uno de los parámetros presentes (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

Temperature data (Datos de temperatura): Donde se encuentra presente la información sobre temperatura del agua en el sistema fluvial la cual es esencial donde influye la velocidad de los procesos fisicoquímicos y biológicos que afectan la calidad del agua (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.31).

WQ data (Datos de calidad del agua): Son cada uno de los parámetros que describen el estado químico, físico y biológico del agua en el sistema fluvial. Estos datos incluyen concentraciones de diversos compuestos y características importantes para realizar una evaluación de calidad del agua (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.32).

WQ data min (Datos de calidad del agua mínima): Se refiere a los valores mínimos aceptables de ciertos parámetros de calidad del agua, utilizados en el modelo para desarrollar niveles mínimos permitidos (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.32).

WQ data max (Datos de calidad del agua máxima): Estos representan los valores máximos observados, permitidos o esperados de los parámetros presentes existentes en el modelo, también son utilizados para establecer condiciones de referencia (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.32).

Monitoreo de Calidad del Agua; Para la correcta realización del modelo, se utilizan necesariamente los datos medidos en campo dentro de la zona de estudio, para determinar las fronteras internas y externas, donde se explica respectivamente;

- Las condiciones de aguas arriba y/o aguas debajo de la corriente superficial.

- Las condiciones de extracciones (salida de flujo) y/o vertimientos (entrada de flujo) del río a modelar (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.32).

Constantes Hidráulicas; Dentro del modelo Qual2k se aplican dos formas para calcular las constantes hidráulicas, teniendo en cuenta las curvas de las relaciones hidráulicas utilizando la ecuación de Manning, para obtener un buen resultado se tendrá en cuenta la información del autor, como se representa a continuación (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.34).

Rating curves (Curvas de relaciones hidráulicas): las ecuaciones se pueden utilizar para relacionar la velocidad y la profundidad media con el flujo (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.34).

$$U = a Q^b$$

$$H = a Q^\beta$$

“Donde a , b , α y β son coeficientes empíricos que se determinan a partir de las curvas de velocidad, velocidad (U), profundidad (H) y caudal (Q)” (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.34).

Ecuación de Manning: Cuando se encuentra en condiciones de estado estable, se debe utilizar la ecuación de Manning y se desarrolla para la relación entre flujo y profundidad (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.35).

$$Q = \frac{S_0^{\frac{1}{2}} \times A_c^{\frac{5}{3}}}{n P^{\frac{2}{3}}}$$

“Donde, caudal (Q), pendiente del fondo (S_0), coeficiente de rugosidad de Manning (n), área transversal (A_c) y perímetro mojado (P)” (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.35).

Constantes Cinéticas: El modelo Qual2k nos muestra una multitud de variables y constantes cinéticas, donde se encuentran definidas cada una de las reacciones y disoluciones de los contaminantes del tramo a estudiar, los parámetros son dependientes únicamente para lo que requiera el autor (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.36).

Calibración del Modelo: En aguas superficiales la modelación de calidad del agua en el modelo Qual2k, depende específicamente sobre el desarrollo de la calibración el cual nos indica un proceso complejo donde se tiene como resultado un margen de error mínimo dentro de los datos calculados en campo y evidenciados en cada tramo (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.36).

Tabla 7

Constantes Cinéticas de Calibración en el Modelo Qual2k

Parámetros de Calibración	Abreviación	Unidades	Rango de Calibración
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánicos	VS-SSI	m/d	0-2
Tasa de re-aireación, descrita por la ecuación de re-aireación	Ka	1/d	Auto- selección
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO_{slow}	1/d	0-5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa oxidación $DBO - DBO_{slow}$	1/d	0-0,5
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	0-2
Tasa de nitrificación de amonio	T. Nitrificación	1/d	0-10
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	T. Desnitrificación	1/d	0-2
Coeficiente de transferencia por desnitrificación de sedimento	CT- Desnitrificación sed	m/d	0-1
Hidrólisis de Fosforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d	0-5
Velocidad de sedimentación de Fosforo Orgánico	VS-PO	1/d	0-2
Velocidad de sedimentación de Fosforo Inorgánico	VS-PI	m/d	0-2

Hidrolisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrolisis 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	T. Decaimiento patógenos	1/d	0-2
Velocidad de sedimentación de los patógenos	VS-Patógenos	m/d	0-2
Constante o para mortalidad de los patógenos por luz solar	Constante a Mortalidad - Patógenos	1/d pery/hr	0-1

Nota, *Información tomada del trabajo de grado Modelación de la calidad del agua del rio Molino en el área urbana de la ciudad de Popayán Cauca*, (p.30) por (Caicedo Zambrano & Eraso Huertas, 2017)

Calibración del Modelo: Seguidamente del proceso de calibración del modelo Qual2k es sumamente importante someterlo a la debida confirmación o verificación, donde cada uno de los resultados y escenarios que se visualicen, obtengan una mayor confiabilidad a la realidad de los parámetros estudiados en campo, se implementaron las constantes fijas y contar con la nueva información del modelo Qual2k, en los puntos que fueron utilizados para la calibración. Es importante tener en cuenta que la modelación de calidad del agua es una herramienta importante para la gestión del recurso hídrico (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.36).

3.2.1.2. Programa Streeter & Phelps.

Es un modelo matemático unidimensional de calidad del agua aplicable en aguas superficiales, también describe la variación de oxígeno disuelto (OD), en un rio o en algún cuerpo de agua, dando como resultado una estabilidad entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) la cual es causada por la descomposición de materia orgánica, dentro de este Software es de suma importancia tener presente el proceso de Re oxigenación natural desde la atmosfera (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.38).

$$L_0 = \frac{Q_w L_w + Q_r L_r}{Q_w + Q_r}$$

“Donde: L_0 = Concentración inicial; Q_w = Caudal del río; L_w = Concentración del río; Q_r = Caudal del vertimiento; L_r = Concentración del vertimiento” (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.38).

Se debe seleccionar una de las tres ecuaciones empíricas, como se detalla a continuación:

Owens and Gibbs
$$Ka = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$$

Churchill
$$Ka = 5.03 \frac{U}{H^{1.67}}$$

Oconor Dobbins
$$Ka = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$$

Donde: U = Velocidad (m/s); H = Profundidad (m).

Para corregir la variación de la temperatura que presenta en el flujo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$K_a = K_{2(20)} \times 1.024^{(T-20)}$$

En donde: K_a = Coeficiente de re-aireación; T = Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); $k_2(20)$: Coeficiente de re-aireación a 20°C

Para calcular la tasa de re-aireación, se desarrolla la siguiente ecuación:

$$K_r = K_d + K_s$$

Donde: k_r = Tasa de re-aireación; k_d = Tasa de desoxigenación; k_s = Tasa de sedimentación.

Una vez que se obtienen todos los datos se procede a desarrollar la siguiente ecuación:

$$D_{(t)} = D_0 e^{-K_a t} + \frac{K_d L_0}{K_r - K_a} (e^{-K_a t} - e^{-K_r t})$$

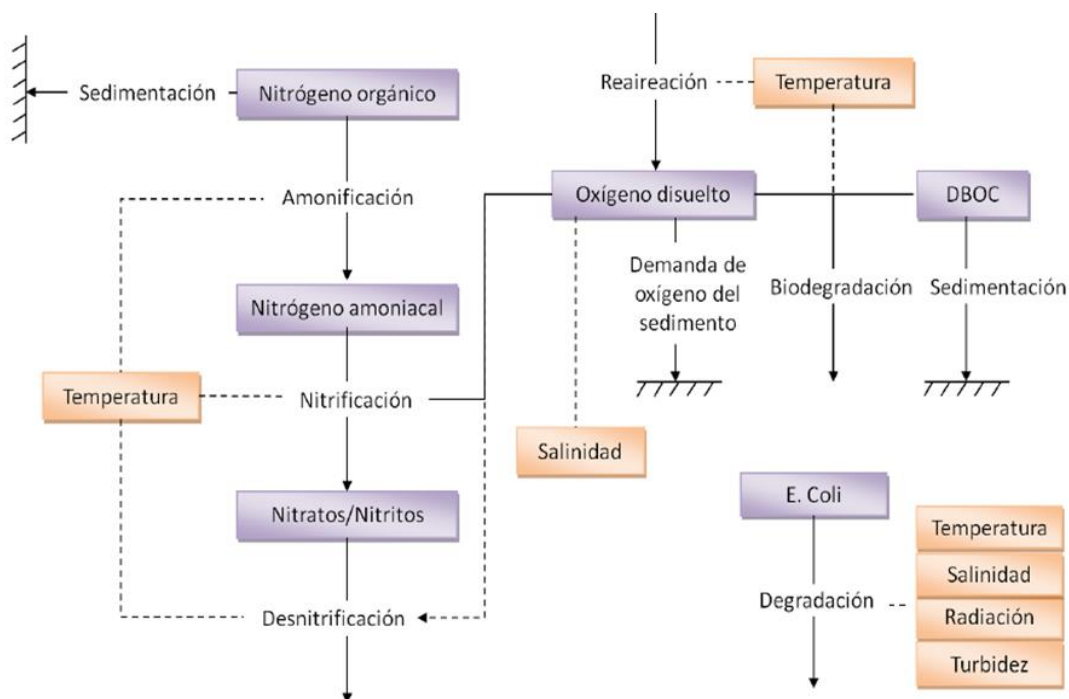
“Donde; L_0 = Concentración de la materia orgánica inicial dada por la DBO; D_0 = Déficit inicial de oxígeno disuelto; t = Tiempo” (Caicedo Zambrano y Eraso Huertas, 2017, p.38).

3.2.1.3. Programa Iber

Iber es un modelo numérico diseñado para simular el flujo turbulento en lámina libre bajo condiciones no permanentes, así como para analizar diversos procesos medioambientales en el ámbito de la hidráulica fluvial. Este modelo se compone de varios módulos que abordan diferentes aspectos de la dinámica del flujo, incluyendo hidrodinámica, turbulencia, el transporte de sedimentos tanto por carga de fondo como en suspensión, y la calidad de las aguas. Cada uno de estos módulos se fundamenta en ecuaciones de transporte bidimensionales que son promediadas en profundidad, lo que permite una representación más precisa de los fenómenos hidráulicos que se producen en los ríos. Esta herramienta se ha convertido en un recurso valioso para ingenieros y científicos que requieren simulaciones detalladas para la gestión y el estudio de cuerpos de agua en contextos fluviales (Bladé et al., 2014).

3.2.1.3.1. *Esquema del Módulo de Calidad de Aguas.*

Componentes del Modelo: Las componentes incluidas en la versión actual del módulo de calidad de aguas de Iber son las siguientes: Temperatura, Salinidad, Oxígeno disuelto, Materia orgánica carbonosa, Nitrógeno orgánico, Nitrógeno amoniacal, Nitritos y nitratos, Escherichia Coli (E. Coli) (Bladé et al., 2014, p.21).

Figura 4*Esquema Completo del Modelo de Calidad de Aguas*

Nota, Fuente IBER, herramienta de simulación numérica del flujo en ríos.

Términos Fuente: Son representados mediante aportes o pérdidas adicionales dentro del sistema hidrodinámico o de calidad del agua, teniendo en cuenta que estos no se originan directamente del flujo, si no de influencias externas o procesos internos, cada uno de estos términos pueden incluir las entradas de caudales desde los afluentes o las lluvias, creando variedad de reacciones bioquímicas que generan o consumen sustancias, estos términos de fuente permiten incorporar las simulaciones de los efectos de fenómenos físicos químicos y biológicos alterando así el comportamiento de los flujos que compone el modelo (Bladé et al.,2014, p.21).

$$S_C = K(T) * C$$

Donde S es el término fuente/sumidero, k(T) es la constante de reacción (depende de la temperatura) y C es la concentración de la variable considerada. El efecto de la temperatura se introduce en el valor de la constante cinética k mediante el modelo de Arrhenius, según; (Bladé et al.,2014, p.21).

$$K(T) = K(20) * \theta^{(T-20)}$$

Donde $k(20)$ es la constante cinética de reacción a 20°C, T es la temperatura del agua en °C y θ es el coeficiente de corrección por temperatura. Los valores del coeficiente θ para cada reacción utilizados en Iber (Bladé et al., 2014, p.21).

Modelo de Salinidad: Es un componente fundamental dentro del modelo de Iber, el cual nos otorga simular el transporte y distribución de sal o los sólidos disueltos totales presentes en los cuerpos de agua, este modelo se basa en la resolución de una ecuación de transporte de solutos en dos dimensiones, teniendo presente el flujo hidrodinámico como los procesos de dispersión y difusión del soluto (Bladé et al., 2014, p.23).

$$S_c = 0$$

Modelo de Temperatura: Dentro del software Iber es un componente que permite simular las variaciones y distribuciones de temperaturas de los cuerpos de agua fluviales o costeros en algunas ocasiones, sin embargo, el modelo de temperatura es útil para evaluar el impacto de vertidos térmicos o cambios climáticos, algunos afectan la temperatura del agua, lo cual podría influir significativamente en la calidad de la vida acuática y en los procesos bioquímicos (Bladé et al., 2014, p.24).

$$S_T = \frac{Q}{\rho C_p w}$$

Donde C_p es el calor específico del agua, ρ es la densidad del agua y q es el flujo neto de calor entre aire y agua. El término ST representa las transferencias de calor a través de la interfaz aire-agua. Este intercambio de calor puede realizarse por radiación, evaporación y conducción, siendo el flujo neto de calor q la suma algebraica de los diversos flujos de energía: (Bladé et al., 2014, p.24).

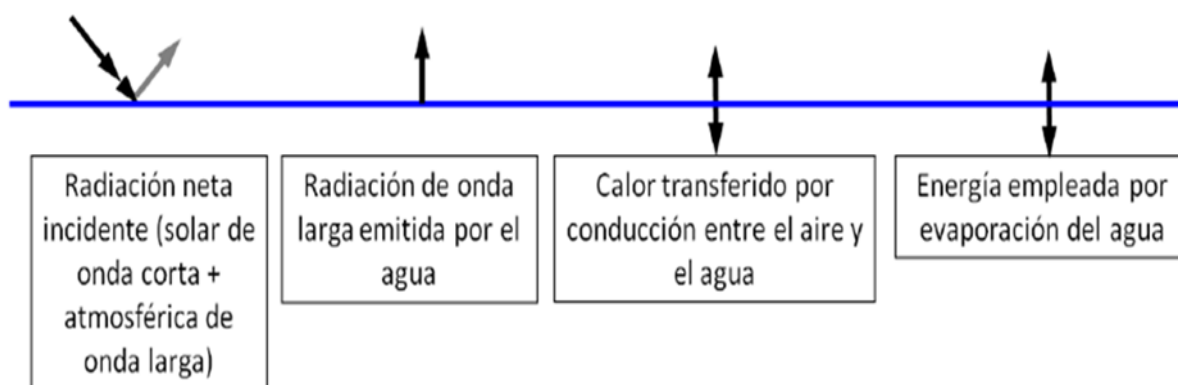
$$Q = Q_{rad} - Q_{br} - Q_{cond} - Q_{evap}$$

Donde q_{rad} es la radiación neta incidente (W/m²), que comprende la radiación solar de onda corta y la radiación atmosférica de onda larga, q_{br} es la radiación de onda larga

emitida por el agua, q_{cond} es el calor transferido por conducción entre el aire y el agua y q_{evap} es la transferencia de energía por evaporación/condensación del agua. A continuación, se detalla cómo se calculan e introducen dichos términos en Iber (Bladé et al., 2014, p.24).

Figura 5

Términos Considerados en el Modelo de Temperatura



Nota, Términos Considerados en el Modelo de Temperatura

Materia Orgánica Carbonosa: Se refiere específicamente a la cantidad de materia orgánica biodegradable que contiene carbono, y que puede ser descompuesta por los microorganismos en presencia de oxígeno, no obstante, durante el proceso de simulación la materia orgánica carbonosa se modela mediante una concentración que se transporta con el flujo y se va convirtiendo durante un periodo de tiempo usando la cinética de primer orden (Bladé et al., 2014).

En el término fuente de la ecuación de conservación de la demanda biológica de oxígeno carbonosa (SDBOC) se consideran los siguientes procesos:

- Degradación de la materia orgánica carbonosa
- Sedimentación de la materia orgánica carbonosa

El término fuente SDBOC se puede escribir como:

$$S_{DBOC} = K_{dboc} * \theta_2^{(T-20)} * F_{oxc} * DBOC - \frac{V_s DBOC}{h} * DBOC$$

Degradación

Sedimentación

Donde k_{dboc} es la constante de degradación de materia orgánica carbonosa, F_{oxc} es el factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno (adimensional), θ_2 es el coeficiente de corrección por temperatura ($\theta_3=1.047$), v_{sDBO} es la velocidad de sedimentación (con valores habituales entre 0.01 y 0.36 m/d) y h es el calado (Bladé et al.,2014, p.29).

La Velocidad a la que se descompone la materia orgánica esta influenciada por una gran cantidad de oxígeno presente, por lo tanto, se utiliza un factor de corrección denominado F_{oxc} para tener en cuenta esta variable (Bladé et al.,2014, p.29).

$$F_{oxc} = \frac{OD}{K_{socf} + OD}$$

“Donde K_{socf} es la constante de semisaturación para la corrección de k_{dboc} por concentraciones bajas de OD. Para esta constante en Iber se toma el valor de 0.5 mg/l” (Bladé et al.,2014, p.30).

La velocidad de sedimentación debe ser introducida por el usuario.

Nitrógeno: Dentro de este software el nitrógeno es un parámetro de calidad del agua representando la presencia de algunos compuestos nitrogenados, algunos pueden ser; el amonio, nitrato y nitrito, perteneciente a un cuerpo de agua, este parámetro es de suma importancia para el desarrollo de biogeoquímicos donde está presente la nitrificación, la desnitrificación y principalmente la asimilación de organismos acuáticos, donde estos influyen directa o indirectamente en la calidad del agua y en fenómenos como la eutrofización (Bladé et al.,2014).

- Hidrólisis del nitrógeno orgánico (amonificación)
- Nitrificación del amonio
- Desnitrificación de los nitratos
- Sedimentación del nitrógeno orgánico

Algunos procesos se modelan mediante las formulaciones que se describen a continuación.

Nitrógeno Orgánico: La ecuación de conservación de masa se escribe de esta manera: (Bladé et al.,2014, p.30).

$$S_{Norg} = -K_{hn} * \theta_4^{(T-20)} * N_{org} - \frac{V_{sN}}{h} N_{org}$$

3.2.1.3.2. *Hidrolisis (Amonificación) Sedimentación.*

Donde k_{hn} es la constante de hidrólisis del nitrógeno orgánico en amonio a 20°C, T la temperatura del agua en °C, N_{org} la concentración de nitrógeno orgánico, V_{sN} la velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico (con valores habituales entre 0.001 y 0.1 m/d), h es el calado y θ_4 es el coeficiente de corrección por temperatura ($\theta_4=1.047$) (Bladé et al.,2014, p.31).

La velocidad de sedimentación debe ser introducida por el usuario.

Nitrógeno Amoniacal: Es un parámetro clave para evaluar la contaminación orgánica y el estado trófico del agua, este compuesto se genera principalmente por la descomposición de materia orgánica y la descarga de aguas residuales (Bladé et al.,2014, p.31).

El término fuente considerado en la ecuación de conservación de masa del amonio resulta así:

$$S_{NH4} = K_{hn} * \theta_4^{(T-20)} * N_{org} - K_{nit} * \theta_3^{(T-20)} * F_n * NH4$$

Hidrolisis

Nitrificación

(Amonificación)

Donde k_{nit} es la constante de nitrificación a 20°C, $NH4$ la concentración de nitrógeno en forma amoniacal, F_n es el factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno (adimensional) y θ_3 , θ_4 son los coeficientes de corrección por temperatura ($\theta_3=1.083$, $\theta_4=1.047$) (Bladé et al.,2014, p.31).

La velocidad del proceso de nitrificación depende del oxígeno disponible, por lo que se emplea el siguiente factor corrector o factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno F_n (adimensional): (Bladé et al.,2014, p.31).

$$F_n = \frac{OD}{K_{n1/2} + OD}$$

“Donde $K_{n1/2}$ es la constante de semisaturación para la corrección de k_{nit} por concentraciones bajas de OD. Para esta constante se toma el valor de 0.5 mg/l (O)” (Connor et al., 1981).

Nitratos: Se conocen como una forma intermedia de nitrógeno inorgánico que está presente mediante el proceso de nitrificación (Bladé et al.,2014, p.32).

El término fuente considerado en la ecuación de conservación de masa de los nitratos se puede escribir como:

$$S_{NO3} = K_{nit} * \theta_3^{(T-20)} * F_n * NH3 - K_{denit} * \theta_5^{(T-20)} * F_{dn} * NO3$$

Nitrificación

desnitrificación

Donde K_{denit} es la constante de desnitrificación a 20°C, $NO3$ la concentración de nitrógeno en forma de nitratos, θ_3 y θ_5 son los coeficientes de corrección por temperatura ($\theta_3=1.083$, $\theta_5=1.045$) y F_{dn} el factor corrector para tener en cuenta que la desnitrificación sólo se produce en momentos de anoxia (adimensional). La formulación empleada para calcular el factor corrector por oxígeno F_{dn} es la siguiente: (Bladé et al.,2014, p.32).

$$F_{dn} = \frac{K_{dn1/2}}{K_{dn1/2} + OD}$$

“Donde $K_{dn1/2}$ es la constante de semisaturación para la corrección de desnitrificación por concentraciones altas de OD. Para esta constante se toma el valor de 0.1 mg/l” (O’Connor et al., 1981) (Bladé et al.,2014, p.32).

Oxígeno Disuelto: Es una variable de vital importancia la cual representa algunas de las concentraciones de oxígeno presente en el agua apta para los organismos acuáticos, es un indicador clave de la calidad del agua que interviene en algunos procesos bioquímicos, como la descomposición de materia orgánica y nitrificación (Bladé et al.,2014, p.34).

El término reactivo en la ecuación de transporte correspondiente se calcula como:

$$S_{OD} = K_{Aire} * \theta_1^{(T-20)} * (OD_{sat} - OD) - K_{dboc} * \theta_2^{(T-20)} * F_{OXC} * DBOC - \frac{K_{dos}}{h}$$

Re-aireación

Degradación DBOC

$$-r_a * K_{nit} * \theta_3^{(T-20)} * F_n * NH_4^+$$

Nitrificación

Donde OD es la concentración de oxígeno disuelto, kaire es la constante de reaeración a 20°C, T es la temperatura del agua en °C, OD_{sat} la concentración de saturación de oxígeno disuelto, k_{dboc} la constante de degradación de materia orgánica carbonosa, F_{oxc} es el factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno, k_{dos} es la tasa de demanda de oxígeno del sedimento, la representa el consumo de oxígeno por oxidación del amonio en el proceso de nitrificación, k_{nit} es la constante de nitrificación a 20°C, F_n es el factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno y θ el coeficiente de corrección por temperatura (θ₁=1.0238, θ₂=1.047, θ₃=1.083) (Bladé et al.,2014, p.34).

Re-aeración: Es el proceso mediante el cual el oxígeno transporta agua, dando mayor crecimiento al oxígeno disuelto, este cambio ocurre principalmente en la superficie del agua, influenciado por los factores como la turbulencia y la velocidad de cada uno de los flujos presentes, sin embargo, la Re aeración se modela como una fuente de oxígeno compensando las pérdidas causadas por la descomposición de materia orgánica (Bladé et al.,2014).

La saturación de oxígeno disuelto se estima a partir de la temperatura del agua y su salinidad utilizando la siguiente ecuación (APHA 1995) (Bladé et al.,2014, p.34).

$$\ln[OD_{sat}(T, S, 0)] = -139.34411 + \frac{1.575701 * 10^5}{T} - \frac{6.642308 * 10^7}{T^2} + \frac{1.243800 * 10^{10}}{T^3} - \frac{8.621949 * 10^{11}}{T^4} - S * \left(1.764 * 10^{-2} - \frac{10.754}{T} + \frac{2140.7}{T^2} \right)$$

“Donde OD_{sat} (T, S,0) es la concentración de saturación de oxígeno disuelto en mg/l a la temperatura T en Kelvin, con una salinidad del agua S en kg/m³ y al nivel del mar” (Bladé et al.,2014, p.34).

El efecto de la altitud sobre el nivel del mar se tiene en cuenta con la siguiente ecuación:

$$OD_{sat}(T, S, z) = OD_{sat}(T, S, 0) * (1 - 0.0001148z)$$

Siendo z la altitud sobre el nivel del mar en metros.

La constante de reaeración kaire se calcula en función del calado (h), la velocidad del agua (U) y la velocidad del viento (V_{viento}) según la siguiente ecuación:

$$K_{Aire} = K_{aireh} + \frac{K_{airew}}{h}$$

“Siendo kaireh la constante de reaereación a 20°C basada en las características hidráulicas del río (velocidad y profundidad) y kairew el coeficiente de reaereación en función de la velocidad del viento” (Bladé et al.,2014, p.36).

“La influencia del calado (h) y de la velocidad del agua (U) se incorpora mediante la constante kaireh siguiendo el método de Covar (1976)” (Bladé et al.,2014, p.36).

- Si la profundidad $h \leq 0,61\text{m}$ se utiliza la fórmula de Owens-Gibbs (Owens et al., 1964):

$$K_{Aireh}(20) = 5.32 \frac{U^{0.67}}{h^{1.85}}$$

Si $h > 0,61$ y $h > 3,45 \cdot U^{2.5}$ se utiliza la fórmula de O'Connor-Dobbins (O'Connor y Dobbins, 1958):

$$K_{aireh}(20) = 3.39 \frac{U^{0.5}}{h^{1.5}}$$

En otro caso se emplea la fórmula de Churchill (Churchil et al., 1962):

$$K_{aireh}(20) = 5.026 \frac{U}{h^{1.67}}$$

3.2.1.3.3. Tasa de Reaereación Kaireh (d-1) versus Profundidad y Velocidad (Covar, 1976)

Para incorporar los efectos del viento a la tasa de reaereación se emplea la fórmula de Banks-Herrera (Banks 1975, Banks and Herrera 1977) (Bladé et al.,2014, p.36).

$$K_{Airew} = 0.728V_{Viento\ 10}^{0.5} - 0.317V_{Viento\ 10} + 0.0372V_{Viento\ 10}^2$$

Donde $V_{viento10}$ es la velocidad del viento medida a 10 metros sobre el nivel del agua.

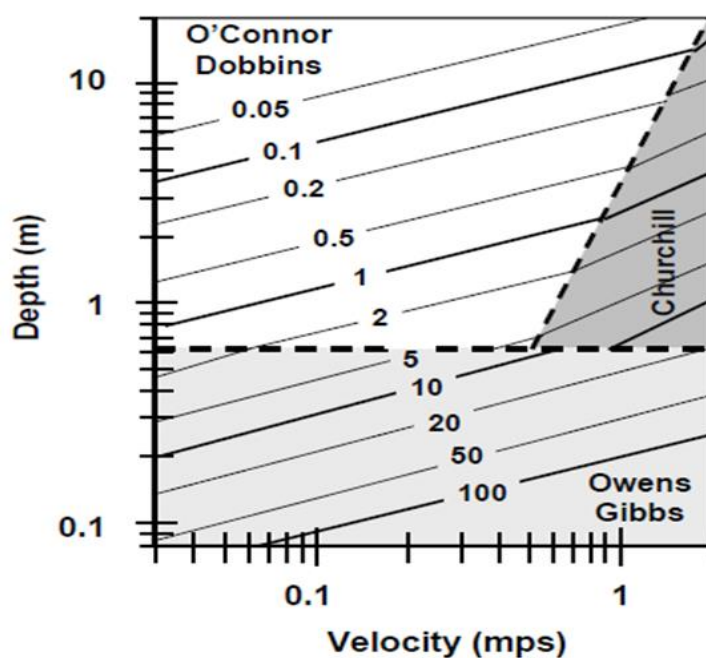
Demanda de Oxígeno por el Sedimento

Representa el consumo de oxígeno disuelto que representa la interfaz entre el agua y el fondo del cauce, gracias a los procesos biológicos y químicos en el sedimento, incluyendo la

degradación de materia orgánica depositada, En la modelación, este tipo de demanda se introduce como un término de pérdida de oxígeno, reduciendo las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua cercana al fondo, siendo un parámetro vital para evaluar zonas con mayor acumulación de sedimentos orgánicos , ya que puede ser beneficioso en la desoxigenación del agua, específicamente en los tramos lentos y profundos del Río (Bladé et al.,2014).

Figura 6

Ecuaciones Predictivas para Calcular Tasas de Re aireación



Nota, Fuente Surface Water Quality modeling.

Tabla 8

Valores de la Demanda de Oxígeno por el Sedimento Según el Tipo de Fondo

Tipo de Fondo	$K_{dos} (gO_2/m^2/d)$	
	Rango	Media
Fangos de Origen Urbano (Recientes)	2.0-10.0	40
Fangos de Origen Urbano (Antiguos)	1.0-2.0	1.5
Fangos en Estuarios	1.0-2.0	1.5
Suelos Arenosos	1.0-2.0	1.5

Suelos Minerales	0.2-1.0	0.5
------------------	---------	-----

Nota, Fuente, Rangos de DOS sugeridos por Thomann (1972) en función del tipo de ambiente.

La demanda de oxígeno por el sedimento se calcula mediante la siguiente ecuación:

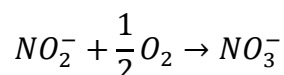
$$DOS = \frac{K_{dos}}{h}$$

Donde K_{dos} es la tasa de demanda de oxígeno por el sedimento y h es el calado.

Consumo de oxígeno en el proceso de nitrificación: La primera fase de oxidación es realizada por bacterias nitrosaminas según la reacción química: (Bladé et al.,2014, p.38).



En este proceso de oxidación se consumen 3.43 g de oxígeno por cada gramo de nitrógeno amoniacal. Durante la segunda fase, las bacterias denominadas Nitrobacter oxidan los nitritos a nitratos: (Bladé et al.,2014, p.38).



En esta segunda fase se consumen 1.14 g de oxígeno por cada gramo de nitrógeno en forma de nitritos. Si se combinan las dos reacciones, la oxidación completa del amonio a nitratos puede representarse por: (Bladé et al.,2014, p.38).



“Siendo necesarios un total de 4.57 g de oxígeno para la completa oxidación de cada gramo de nitrógeno amoniacal” (Bladé et al.,2014, p.38).

En Iber la nitrificación se considera en su totalidad incluyendo el paso de amonio a nitritos y de éstos a nitratos. El consumo de oxígeno debido al proceso de nitrificación se incorpora mediante el siguiente término reactivo en la ecuación de oxígeno disuelto: (Bladé et al.,2014, p.38).

$$S_{OD} = -r_a * K_{nit} * \theta_3^{(T-20)} * F_n * NH_4^+$$

Donde r_a es el consumo de oxígeno por oxidación del amonio (4.57 mgO/mgN), K_{nit} es la constante de nitrificación a 20°C, F_n es el factor de atenuación debido a bajos niveles de oxígeno (adimensional) y θ_3 es el coeficiente de corrección por temperatura ($\theta_3=1.083$) (Bladé et al.,2014, p.38).

Escherichia Coli: La bacteria *Escherichia E Coli*, es un indicador microbiológico utilizado para evaluar la contaminación fecal en los diferentes cuerpos de agua, ya que estas bacterias pueden transmitir enfermedades si las personas tienen algún tipo de contacto con el agua contaminada (Bladé et al.,2014, p.40).

El término fuente de la ecuación de conservación de *E. Coli* (SC) modela el proceso de desaparición bacteriana mediante una reacción cinética de primer orden definida como: (Bladé et al.,2014, p.40).

$$S_C = -K_{dec} * C$$

Donde k_{dec} es la constante de desaparición bacteriana y C es la concentración de *E. Coli*.

Es muy habitual emplear el concepto de T_{90} en lugar de la constante k_{dec} . El valor de T_{90} representa el tiempo necesario para que se produzca una reducción del 90% en el número de bacterias, por lo que la relación entre los valores de T_{90} y k_{dec} puede establecerse como: (Bladé et al.,2014, p.40).

$$T_{90} = \frac{\ln 10}{K_{dec}} = \frac{2.303}{K_{dec}}$$

El valor del T_{90} puede introducirse directamente por el usuario o calcularse por medio de alguno de los 2 modelos siguiente:

- Modelo de Mancini (1978)
- Modelo de Canteras (1995)

La formulación de Mancini tiene en cuenta la influencia de la radiación solar, la salinidad del agua y la temperatura del agua en la desaparición de *E. Coli*, según la siguiente ecuación: (Bladé et al.,2014, p.40).

$$K_{dec} = (0.8 + 0.02S)1.07^{(T-20)} + 0.086 \frac{I_0}{K_e H_c} (1 - e^{(-K_e H_c)})$$

Donde k_{dec} es la tasa de desaparición en días⁻¹, S es la salinidad en kg/m³, T es la temperatura en °C, I_0 es la radiación solar en superficie en W/m², k_e es el coeficiente de extinción de la luz en el agua en m⁻¹ y H_c es la profundidad de la capa vertical en la que se extienden los coliformes en m. A pesar de tratarse de un modelo 2D de aguas someras, la introducción del parámetro H_c permite considerar una posible estratificación de la capa

en la que se extienden los coliformes mediante el parámetro H_c , max: (Bladé et al.,2014, p.45).

El modelo de Canteras ha sido calibrado con datos obtenidos en el Mar Cantábrico. La ecuación que se formula para la constante de desaparición bacteriana es la siguiente:

$$K_{dec} = 2.533 * 1.040^{(T-20)} * 1.012^S + 0.113 \frac{I_0}{K_e H_C} (1 - e^{(-K_e H_C)})$$

Donde T es la temperatura del agua oC, S es la salinidad en kg/m3, I_0 es la intensidad de la luz en superficie (W/m2), k_e es el coeficiente de extinción de la luz en m-1 y H_c es la profundidad de la capa vertical en la que se extienden los coliformes en m (Bladé et al.,2014, p.45).

3.3. Fase III: Identificar el Modelo que más se ajuste a los datos Fisicoquímicos, mediante un Análisis Estadístico

En esta fase, se hizo uso de los tres modelos diferentes: Qual2k, Streeter & Phelps e IBER, donde se llevó a cabo la comparación detallada entre los resultados obtenidos mediante dichos modelos y datos reales de las aguas situadas aguas abajo y aguas arriba de la fuente hídrica. De esta manera se emplea un método estadístico adecuado donde se realiza el análisis correspondiente y se determina cuál de los tres modelos se ajusta mejor a las características de las aguas situadas aguas abajo y aguas arriba para obtener e identificar el modelo más apropiado para su implementación en el río Ejido.

3.3.1. Resultados de Laboratorio

Tabla**9**

Valores Obtenidos de los Análisis de Laboratorio Comparación con el artículo 8 de la Resolución 0631 de 2015 (MADS).

Parámetro	Unidad	Fecha de análisis (A-M-D)	Ejido aguas abajo MN433694		Res. 631 Art 8 > 3000 Kg/ día DBO5
			Concentración reportada	Incertidumbre calculada	
Caudal	L/S	2024-03-16	226,3	--	-
Coliformes termo tolerantes	NMP / 100m L	2024-03-17 2024-03-18	1122	+/- (891-1412)	-
Coliformes Totales	NMP / 100m L	2024-03-17 2024-03-18	10462	+/- (8067-13568)	-
Conductividad In situ	μS/ cm	2024-03-16	295	+/- 2,626	-
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	Mg O2/ L	2024-03-17 2024-03-22	37,3	+/- 3,43	70
DQO	Mg O2/ L	2024-03-23	74,5	+/- 6,37	150
Fosforo total	Mg P/L	2024-03-22	1,45	+/- 0,108	Análisis y reporte
Nitratos	Mg N-NO3 /L	2024-03-17	< 1,00	--	Análisis y reporte
Nitritos	Mg N-NO2 /L	2024-03-18	< 0,00608	--	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal	Mg/L NH3-N	2024-03-25	< 1,00	--	Análisis y reporte
NITROGENO TOTAL	Mg N/L	2024-03-25	3,10	--	Análisis y reporte
Nitrógeno total kjeldahl	Mg N/L	2024-03-25	< 3,00	--	-
Oxígeno disuelto In situ	Mg O2/L	2024-03-16	2,46	+/- 0,092	-
PH In situ	Unidades de pH	2024-03-16	7,66	+/- 0,077	6,00-9,00
Salinidad	ppt	2024-03-18	0,168	+/- 0,0151	-
Saturación de oxígeno In situ	%	2024-03-16	43,6	--	-

Solidos suspendidos totales	Mg / L	2024-03-20	12,5	+/- 1,08	70
Temperatura muestra In situ	°C	2024-03-16	22,5	+/- 0,173	40

Nota, Fuente ChemiLab S.A.S, (2024).

Tabla 10
Constantes Hidráulicas para la N de Manning

Chanel Shope	Manning n	Bot Width m	Side Slope	Side Sople
0.0231	0.0750	2.90	0.19	0.19
0.0231	0.0600	1.15	0.38	0.38
0.0085	0.0600	8.14	0.17	0.17
0.0058	0.0110	1.20		
0.0031	0.0110	1.10		
0.0115	0.0750	4.77		
0.0167	0.0750	5.02	0.13	0.13
0.0084	0.0750	7.34	0.23	0.23

Nota, Fuente ChemiLab S.A.S, (2024).

3.3.2. Resultados y Análisis Fisicoquímicos

Resultados de Laboratorio: Los valores obtenidos de los análisis de laboratorio se presentan a continuación en la Tabla x , adicionalmente se realiza la comparación con el Artículo 8 (límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas

residuales domésticas, (ARD) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD Y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales) de la Resolución 0631 de 2015 (MADS).

Tabla 11

Resultado de Laboratorio – Aguas Superficiales

Parámetro	Unidad	Fecha de análisis (AAAA-MM-DD)	Ejido aguas arriba MN433095		Artículo 8 - >3000 kg / Día DB05 Resolución 631 /2015 (MADS)
Caudal Volumétrico	L/S	2024-03-14	147,600	--	---
Coliformes Termo tolerantes	NMP/100ml	2024-03-15 2024-03-16	663	$\pm(527 - 834)$	---
Coliformes Totales	NMP/100ml	2024-03-15 2024-03-16	7270	$\pm(5606 - 9429)$	---
Conductividad in Situ	$\mu S/cm$	2024-03-14	77,4	$\pm 0,689$	---
DBO5 Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg O2/L	2024-03-15 2024-03-20	9,58	$\pm 0,882$	70
DQO	mg O2/L	2024-03-23	22,0	$\pm 1,88$	150
Fósforo total	mg P/L	2024-03-21	0,226	$\pm 0,0169$	Análisis y Reporte
Nitratos	mg N-NO3/L	2024-03-15	<1,00	--	Análisis y Reporte
Nitritos	mg N-NO2/L	2024-03-15	0,0366	$\pm 0,00313$	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal	mg/L NH3-N	2024-03-20	<3,00	--	Análisis y Reporte
NITRÓGENO TOTAL	mg N/L	2024-03-22	<3,00	--	Análisis y Reporte
Nitrógeno total Kjeldahl	mg N/L	2024-03-21	<3,00	--	---
Oxígeno disuelto in Situ	mg O2/L	2024-03-14	4,38	$\pm 0,163$	---

pH In Situ	Unidades de pH	2024-03-14	7,50	$\pm 0,0750$	6,00 a 9,00
Salinidad	Ppt	2024-03-15	<0,1000	--	---
Saturación de Oxígeno In Situ	%	2024-03-14	62,3	-	---
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	2024-03-18	<10,0	--	70
Temperatura muestra In situ	°C	2024-03-14	21,5	$\pm 0,166$	40

Nota, Fuente Estudio investigativo para: Modelación de Calidad del Agua Mediante el uso de los Programas QUAL2K, STRETEER & PHELPS e IBER Sobre la Capacidad de Asimilación del Rio Ejido Ante los Vertimientos que Comprende la Zona Urbana del Municipio de Popayán, para el Acueducto y Alcantarillado S.A.

Nota, Información tomada de informe de laboratorio Chemilab S.A (2024).

Capítulo 4: Resultados e Interpretación

Los resultados de calibración muestran un ajuste modesto en algunos parámetros, mientras que la fase de confirmación revela resultados más robustos. Esto se debe a que los datos históricos fueron recopilados durante una temporada de baja pluviosidad, lo que permite que los valores calculados por los modelos se alineen más estrechamente con los valores medidos en campo de las diferentes variables.

En este contexto, se procede a analizar los resultados de los distintos parámetros y simulaciones generados por los modelos. En primer lugar, se realizarán los análisis correspondientes para evaluar los modelos existentes de calidad del agua del Río Ejido, utilizando procesos de simulación a través de los programas Qual2k, Streeter & Phelps e IBER. Este análisis contempla las condiciones que prevalecen durante períodos de lluvia baja y alta, así como los intervalos en los que se han llevado a cabo los monitoreos por parte de la empresa encargada del Acueducto y Alcantarillado de Popayán Cauca S.A.

De esta manera, se obtiene una evaluación rigurosa que incluye aspectos de precisión, efectividad y aplicabilidad del desempeño de cada modelo en diversas situaciones. Los resultados obtenidos permiten identificar las fortalezas y debilidades de cada herramienta, así como su capacidad para predecir con precisión la calidad del agua bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Es así como los análisis realizados no solo validan la utilidad de los modelos en la gestión de la calidad del agua del Río Ejido, sino que también ofrecen recomendaciones para futuras investigaciones y monitoreos. Esto es fundamental para garantizar la sostenibilidad y la gestión adecuada de este recurso hídrico, contribuyendo así a la conservación del ecosistema local y al bienestar de las comunidades que dependen de él.

4.1.Fase I: Calibración y Confirmación de los Modelos



Nota, Fuente Google Earth, Recuperado de www.googleearth.com

Los datos utilizados para la calibración de los modelos provienen de los resultados del monitoreo realizado, cuyos valores se detallan a continuación. Como parte de este proceso, se generaron una serie de gráficas analíticas que también se presentan más adelante. Tras ingresar los promedios de los datos históricos y ejecutar el programa, se produjeron las gráficas correspondientes. Estas gráficas evidencian que los parámetros de confirmación se ajustan de manera óptima en relación con los resultados obtenidos durante el proceso de calibración. Este ajuste sugiere que se ha llevado a cabo un proceso efectivo de calibración y validación en los modelos Qual2kw y Streeter & Phelps.

Además, se destaca que el análisis de estas gráficas no solo respalda la precisión de los modelos, sino que también proporciona una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en la gestión de recursos hídricos. La consistencia observada entre los datos de monitoreo y los resultados de los modelos refuerza la confiabilidad de las simulaciones, lo que permite una mejor toma de decisiones en el ámbito de la gestión ambiental.

4.2. Fase II: Resultados

4.2.1. Resultados QUAL2K

Tabla 12

Manning Formula

	Manning Formula				
	Channel	Manning	Bot Width	Side	Side
	Slope	n	m	Slope	Slope
Tramo 1	0.0004	0.0350	2.40	10.000	10.000
Tramo 2	0.0004	0.0350	3.50	10.000	10.000
Tramo 3	0.0003	0.0350	5.50	10.000	10.000
Tramo 4	0.0003	0.0350	5.50	10.000	10.000
Tramo 5	0.0003	0.0350	2.80	10.000	10.000
Tramo 6	0.0003	0.0350	3.50	10.000	10.000
Tramo 7	0.0004	0.0350	4.20	10.000	10.000
Tramo 8	0.0010	0.0350	5.00	10.000	10.000
Tramo 9	0.0020	0.0350	6.50	10.000	10.000
Tramo 10	0.0006	0.0350	7.00	10.000	10.000

Nota, Fuente Elaboración Propia

Tabla 13

Datos de entrada Hoja Reach Modelo Qual2k

Datos de entrada hoja reach modelo Qual2k														
	Location		Element	Elevation		Dowstream						Weir		
	Upstream (km)	Dowstream (km)		Number	Upstream	Dowstream	Latitud			Longitud			Adam	Bdam
							Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds		
Tramo 1	3.050	2.750	1	1718.000	1719.000	2.00	26	30	76.00	37	13.16	1.2500	0.9000	
Tramo 2	2.750	2.450	1	1719.000	1719.000	2.00	26	33	76.00	37	16.47	1.2500	0.9000	
Tramo 3	2.450	1.850	1	1719.000	1716.000	2.00	26	41	76.00	37	20.24	1.2500	0.9000	
Tramo 4	1.850	1.400	1	1716.000	1714.000	2.00	26	45	76.00	37	34.01	1.2500	0.9000	
Tramo 5	1.400	1.200	1	1714.000	1712.000	2.00	26	57	76.00	37	32.06	1.2500	0.9000	
Tramo 6	1.200	1.000	1	1712.000	1712.000	2.00	26	60	76.00	37	30.76	1.2500	0.9000	
Tramo 7	1.000	0.900	1	1718.000	1708.000	2.00	27	3	76.00	37	30.3	1.2500	0.9000	
Tramo 8	0.900	0.600	1	1708.000	1711.000	2.00	27	7	76.00	37	30.1	1.2500	0.9000	
Tramo 9	0.600	0.300	1	1711.000	1700.000	2.00	27	11	76.00	37	35.3	1.2500	0.9000	
Tramo 10	0.300	0.000	1	1700.000	1695.000	2.00	27	16	76.00	37	43.55	1.2500	0.9000	

Nota, Fuente Elaboración Propia

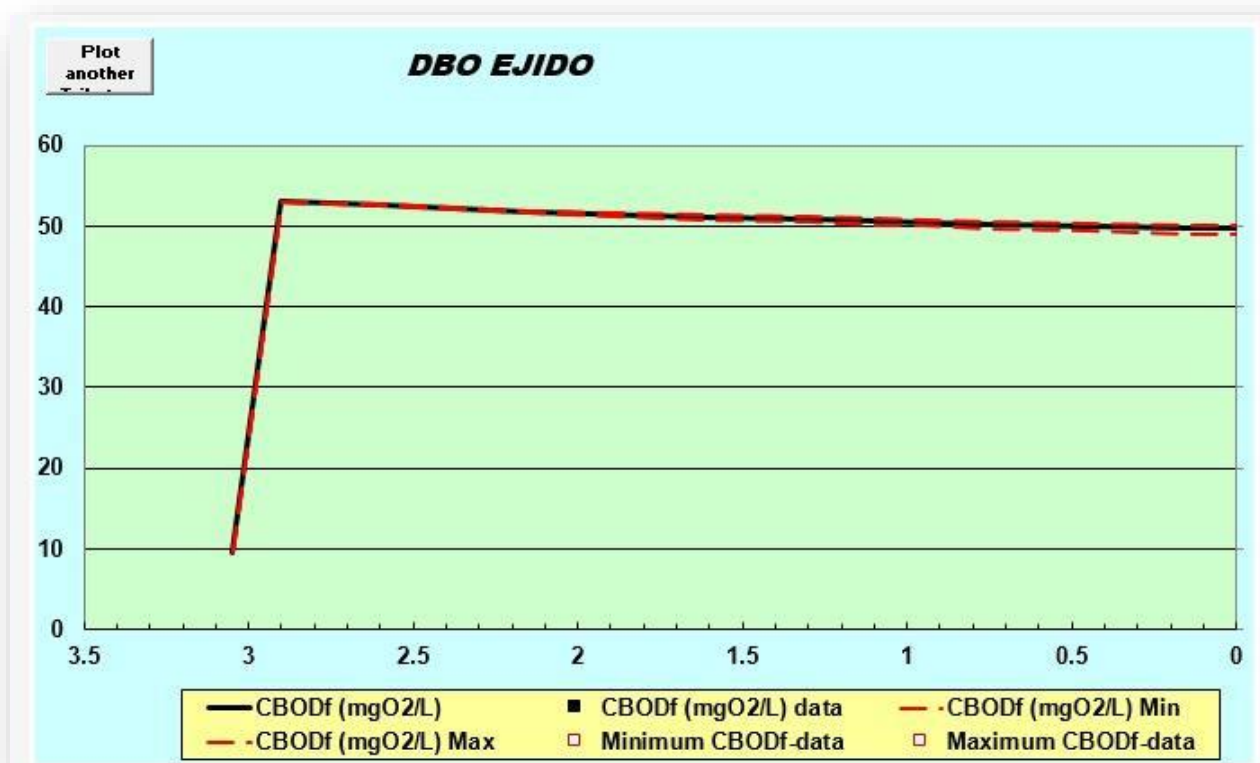
A partir de los datos analizados de las tablas 12 y 13 sobre el río Ejido de Popayán utilizando la fórmula de Manning, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Variabilidad en la Pendiente del Canal: La inclinación del lecho del río varía significativamente entre los tramos, con pendientes que oscilan entre 0.0003 y 0.0020. Esto indica que el flujo de agua no es uniforme a lo largo del río. En particular, el tramo 9, con la pendiente más pronunciada, probablemente presenta un caudal más rápido en comparación con los tramos 3, 4, 5 y 6, que tienen pendientes más suaves. Esta variabilidad podría influir en la erosión del lecho del río y en el ecosistema acuático.

Constancia del Coeficiente de Manning: El hecho de que el coeficiente de Manning se mantenga constante en 0.0350 para todos los tramos sugiere una simplificación en el análisis, asumiendo que la rugosidad del canal es uniforme. Sin embargo, esta suposición puede no reflejar la realidad, ya que la rugosidad puede variar debido a factores como la vegetación, la presencia de rocas y sedimentos. Esta uniformidad podría llevar a una subestimación o sobreestimación del flujo en ciertos tramos.

Variación en el Ancho del Lecho: La variación en el ancho del río, que va de 2.40 m a 7.00 m, es significativa y afecta directamente el caudal. Un lecho más ancho generalmente permite un mayor volumen de agua, mientras que un lecho más estrecho puede restringir el flujo, lo que podría contribuir a la formación de áreas de mayor velocidad de agua y posibles acumulaciones en zonas más angostas.

Figura 7
QUAL2K, Caudal Río Ejido



Nota, Fuente Elaboración Propia

La gráfica muestra el caudal del río Ejido en m^3/s a lo largo del tiempo. Se observa que:

El caudal inicialmente es bajo: Comienza alrededor de $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ en el punto de inicio de la gráfica (tramo 3).

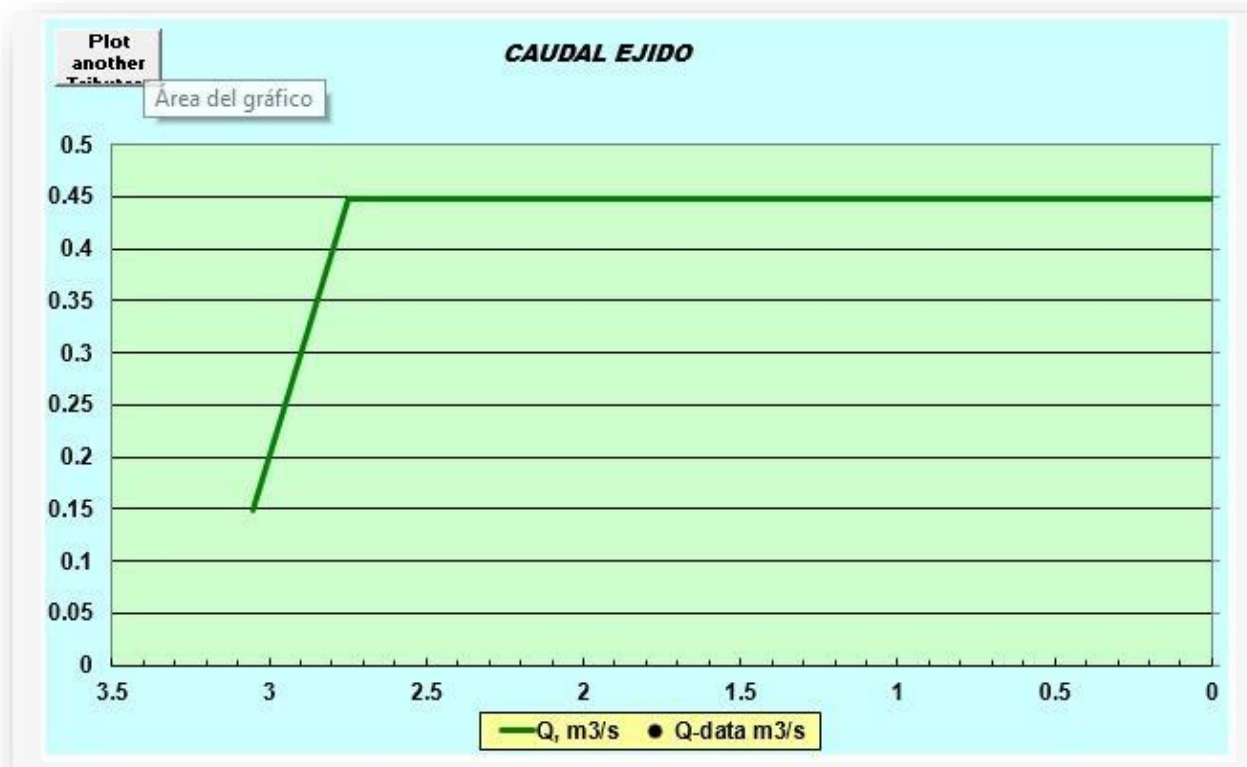
Aumento brusco del caudal: Experimenta un aumento rápido y pronunciado hasta alcanzar un caudal de aproximadamente $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$ (tiempo 2.5). Esto sugiere un evento que incrementó repentinamente el flujo del río, como una fuerte lluvia.

Caudal constante: Después del aumento inicial, el caudal se mantiene constante en aproximadamente $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el resto del período mostrado en la gráfica.

En resumen: La gráfica ilustra un evento que incrementó significativamente el caudal del río Ejido, seguido de un período prolongado de caudal constante a un nivel superior a la inicial.

Figura 8

QUAL2K DBO Río Ejido



Nota, Fuente Elaboración Propia

La gráfica muestra los datos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) para el río Ejido en Popayán, Cauca. Específicamente, presenta los valores máximos y mínimos de la DBO (CBODf) en mg/L a lo largo de un periodo de tiempo, se analiza lo siguiente:

Rápido aumento inicial: La gráfica muestra un aumento significativo de la DBO desde un valor cercano a 0 hasta alrededor de 52-53 mg/L. Este salto implica un evento de contaminación considerable al comienzo del periodo monitoreado. Posibles causas podrían ser vertimientos de aguas residuales, descargas industriales o eventos de lluvia intensa que arrastran contaminantes.

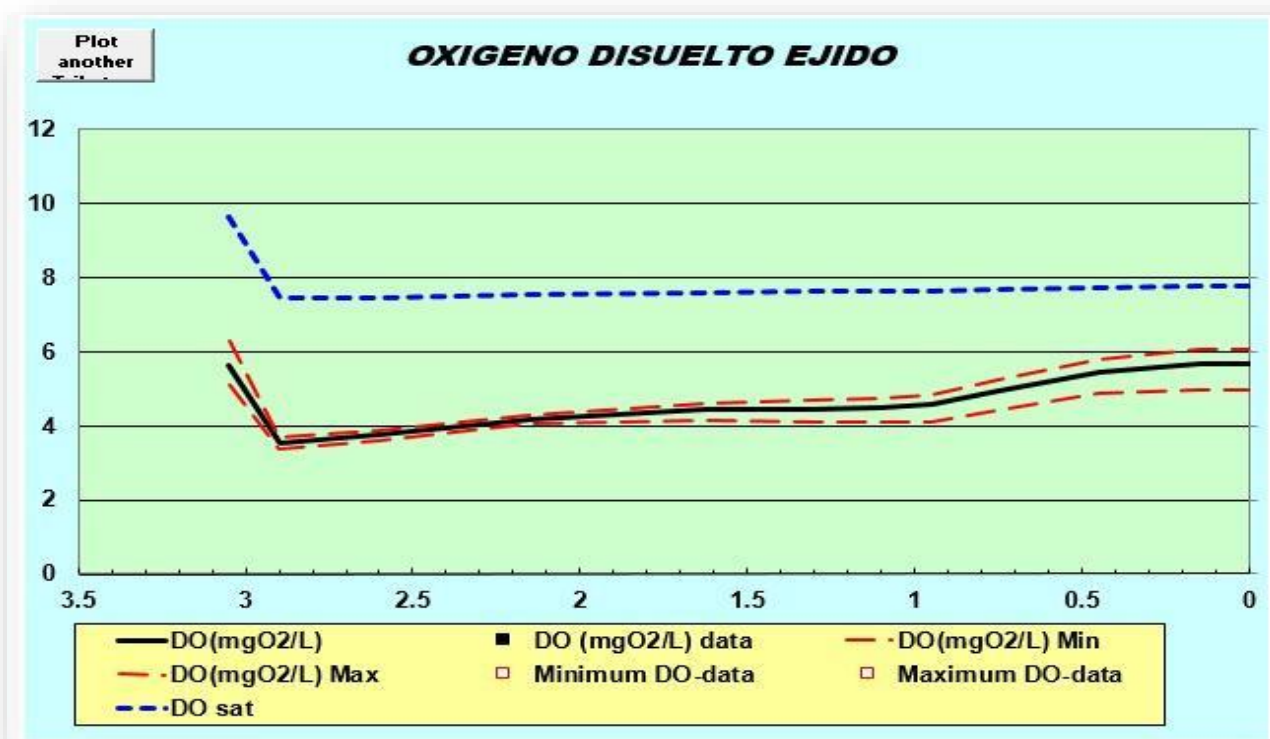
Estabilización posterior: Después del aumento inicial, la DBO se mantiene relativamente estable alrededor de los 52-53 mg/L. Esto sugiere que la fuente de contaminación se mantiene constante o que el río tiene una capacidad de autodepuración limitada en este tramo específico.

Valores altos de DBO: Los valores de DBO permanecen consistentemente altos a lo largo de todo el periodo de tiempo mostrado. Esto indica una calidad del agua significativamente comprometida, con una elevada cantidad de materia orgánica en descomposición. Valores de DBO tan altos sugieren una grave contaminación que puede tener un impacto negativo en la vida acuática y el ecosistema del río en general.

En conclusión: La gráfica indica una contaminación significativa y continua del río Ejido con materia orgánica.

Figura 9

QUAL2K OD Río Ejido



La gráfica muestra los niveles de oxígeno disuelto (OD) en el río Ejido, en Popayán, Cauca. Se observa una variación significativa, donde se analiza lo siguiente:

OD Saturación (DO sat): La línea punteada azul representa la saturación de oxígeno disuelto. Se mantiene relativamente constante alrededor de 7-8 mg/L a lo largo de todo el tramo de medición. Esto sirve como referencia para evaluar la calidad del agua.

OD Medido (DO (mgO₂/L) data): La línea negra sólida representa los datos medidos de OD. Al inicio (3.5 en el eje X) presenta un valor alto, que disminuye significativamente hasta aproximadamente 3.8 en el eje X, para luego aumentar ligeramente y estabilizarse alrededor de los 5 mg/L. Esto sugiere una posible contaminación o un cambio en las condiciones ambientales en la zona representada por 3.5 a 3.8.

Máximo y Mínimo de OD (Max & Min): Las líneas roja y marrón representan los valores máximos y mínimos de OD medidos. La diferencia entre el máximo y el mínimo indica la variabilidad en los niveles de OD. Esta variabilidad parece ser mayor al principio de la muestra, en la zona antes mencionada.

En conclusión, la gráfica indica una posible degradación de la calidad del agua en el río Ejido en el punto o período representado por el eje X entre 3.5 y 3. En esta zona, el nivel de oxígeno disuelto cae significativamente por debajo del nivel de saturación, lo que puede indicar contaminación orgánica o falta de oxigenación. La posterior recuperación a niveles de aproximadamente 5 mg/L sugiere una posible recuperación del río aguas abajo, aunque aún se encuentra por debajo de la saturación.

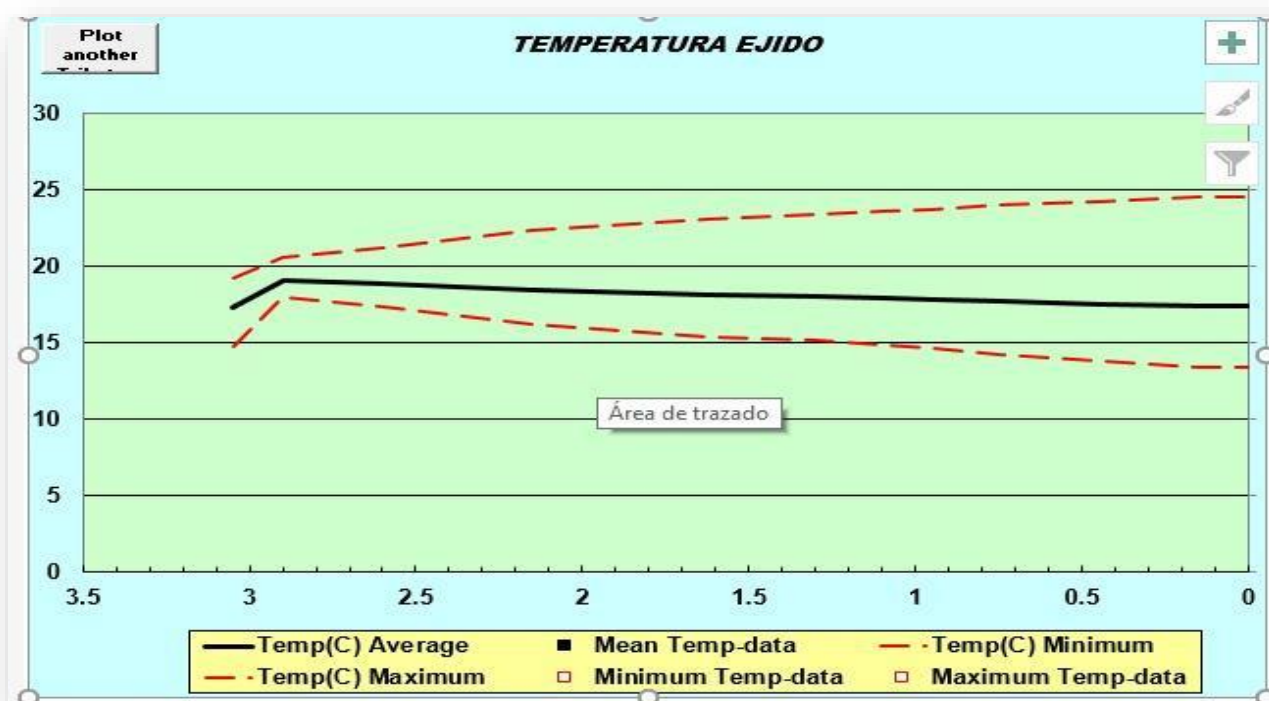
Tabla 14

Datos de Entrada Qual2K

Datos de entrada Qual2k						
Parametro	Temperatura	Conductividad	Oxígeno disuelto	DBO rápida	Alcalinidad	PH
Unidades	C°	Umhos	Mg/l	Mg/l	Mg/l	S.u
Valor	15.5	50	5.21	9.58	100	7.73

Nota, Fuente Elaboración Propia

Figura 10
QUAL2K Temperatura Río Ejido



Nota, Fuente Elaboración Propia

El gráfico muestra la temperatura del río Ejido en Popayán, Cauca, de lo cual se puede analizar lo siguiente:

Temp(°C) Average (línea negra): Representa la temperatura promedio del río. Se observa una tendencia ligeramente decreciente a lo largo del período mostrado.

Temp(°C) Maximum (línea roja discontinua): Muestra la temperatura máxima registrada. Mantiene una tendencia casi plana, con una ligera subida hacia el final del período.

Mean Temp-data (cuadrados negros): Estos datos parecen representar la temperatura promedio medida en puntos específicos. Se alinean cerca de la línea de la temperatura promedio.

Minimum Temp-data y Maximum Temp-data (círculos y cuadrados pequeños): Estos datos individuales, tanto mínimos como máximos, confirman la tendencia general de las líneas de promedio y máximo.

En Conclusión, la gráfica indica que la temperatura promedio del río Ejido se mantuvo relativamente estable durante el período observado, mostrando una leve disminución. La

diferencia entre la temperatura máxima y mínima también parece ser relativamente constante, sugiriendo una variabilidad moderada en la temperatura a lo largo del tiempo.

4.2.2. Resultados *STREETER AND PHELPS*

Tabla 15

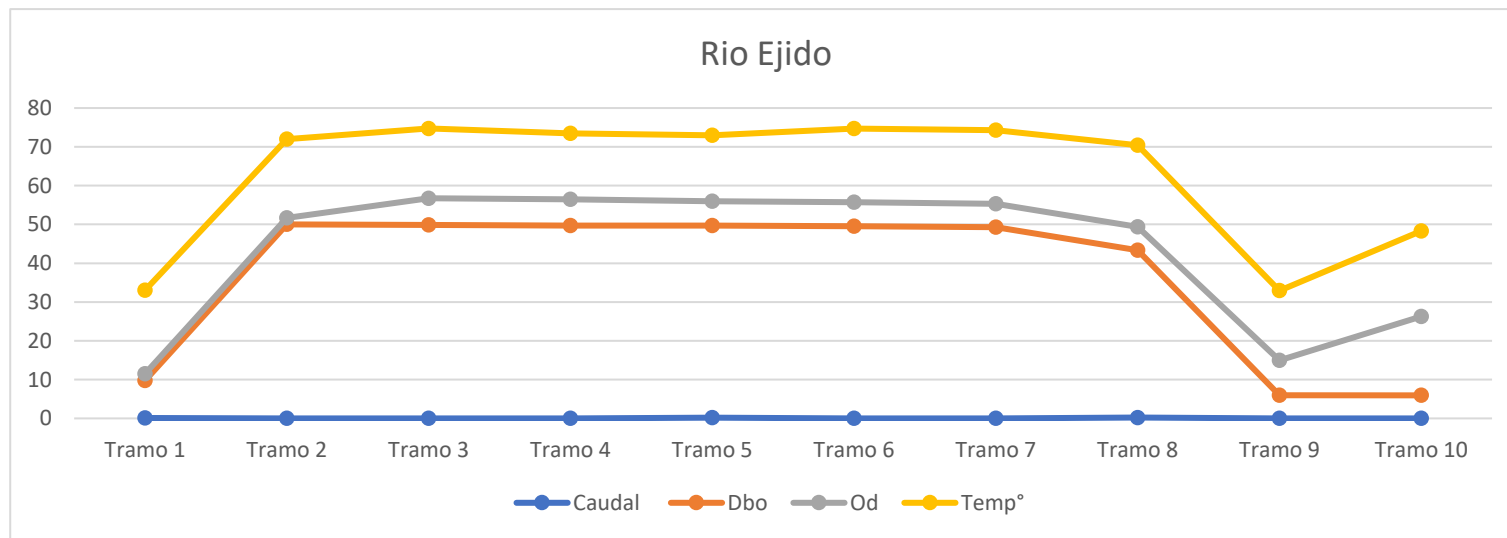
STREETER AND PHELPS Resultados por tramo, según su caudal, Dbo, Od yTemp°

Rio Ejido										
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7	Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10
Caudal	0.1476				0.148			0.226		
Dbo	9.58	50.0016303	49.89	49.73	49.58	49.5	49.25	43.11	5.95	5.94
Od	1.8	1.67006854	6.85	6.74	6.25	6.2	6.07	6.07	8.97	20.34
Temp°	21.5	20.3006327	18	17	17	19	19	21	18	22

Nota, Fuente Elaboración Propia

Figura 11

STRETER - 1. Resultados por Tramo, Según su Caudal, Dbo, Od yTemp°



Nota, Fuente Elaboración Propia

De los resultados obtenido del modelo **STRETER** se analiza que los datos del Río Ejido en Popayán, Cauca, muestran una variación significativa en los parámetros medidos a lo largo de sus diez tramos. Observando cada parámetro, se tiene:

Caudal: El caudal permanece relativamente constante y bajo a lo largo de todo el río, con un valor mínimo alrededor de 0.1476 en los tramos iniciales y un ligero aumento hasta 0.226 en el tramo 8, para luego disminuir de nuevo. Esto sugiere un flujo de agua estable, pero con poca variación a lo largo de su recorrido.

DBO (Demanda Biológica de Oxígeno): La DBO muestra un cambio drástico. Comienza con un valor bajo en el tramo 1 (9.58) y aumenta significativamente en el tramo 2 (50.0016303), indicando una alta contaminación orgánica en esa sección del río. Luego, la DBO se mantiene relativamente alta (alrededor de 49-50) hasta el tramo 8 donde cae abruptamente (43.11), para finalmente disminuir a niveles muy bajos en los tramos 9 y 10 (5.95 y 5.94). Esta fuerte variación sugiere la presencia de fuentes puntuales de contaminación orgánica en el tramo 2, con una posible mejora de la calidad del agua en tramos posteriores, aunque con un nuevo descenso en los últimos dos tramos.

OD (Oxígeno Disuelto): El oxígeno disuelto muestra un comportamiento correlativo inverso, aunque menos extremo que la DBO. Presenta valores bajos en los primeros tramos, aumentando gradualmente hasta alcanzar los 6-7 mg/L aproximadamente a lo largo de la mitad del recorrido. Luego, disminuye ligeramente en los tramos finales, pero no tan drásticamente como la DBO. Esta relación sugiere que la contaminación orgánica afecta la cantidad de oxígeno disuelto en el agua.

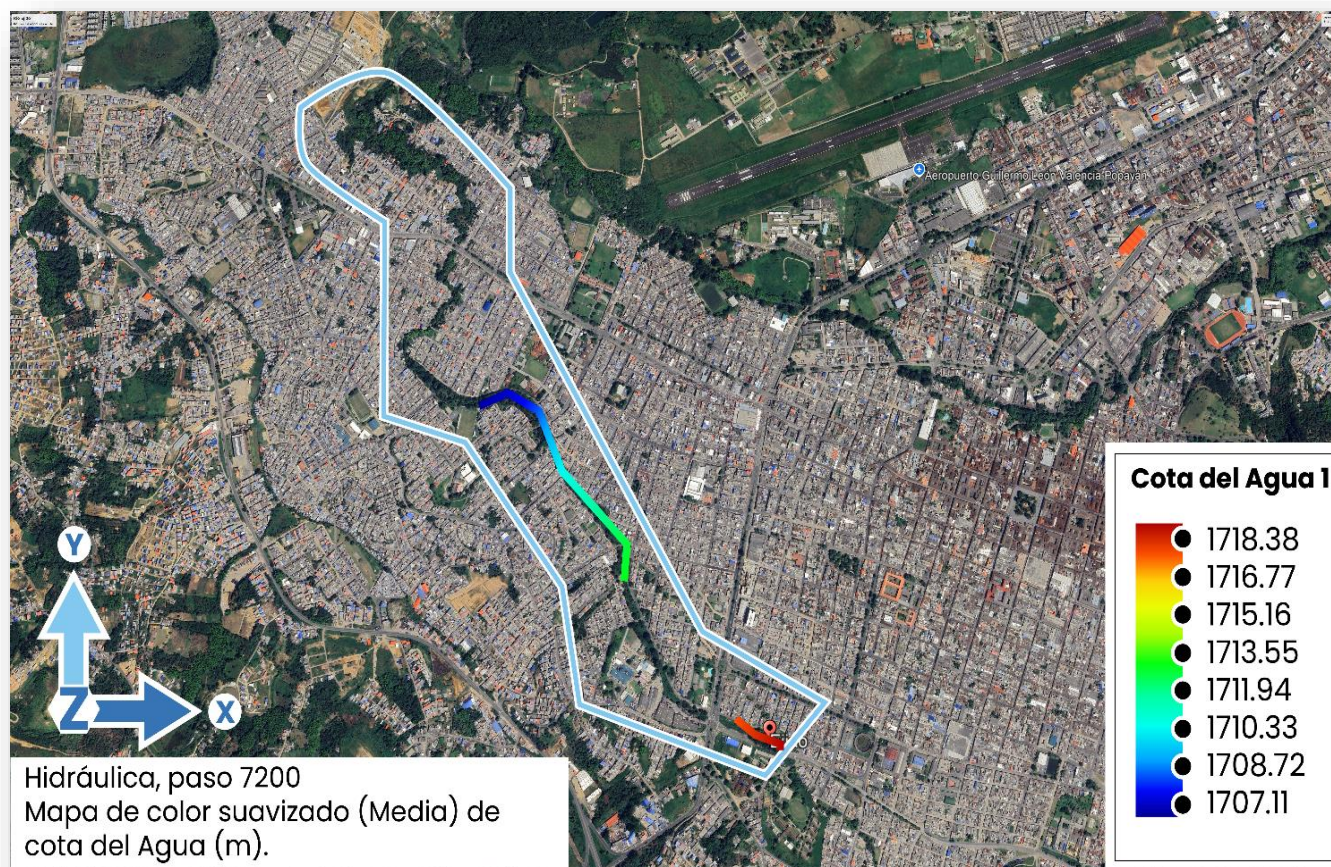
Temperatura: La temperatura permanece relativamente estable en alrededor de 17-19°C a lo largo de la mayor parte del río, con un ligero aumento en los tramos finales. No hay una variación drástica en este parámetro, lo que indica una influencia menor de factores externos en este aspecto específico.

En conclusión, los datos indican una problemática de contaminación orgánica en el Río Ejido.

4.2.3. Resultados IBER

Figura 12

Simulación 1: Cota del Agua (m)



Nota, Fuente Elaboración Propia

Figura 13
Simulación 2: Cota del Agua (m)



Nota, Fuente Elaboración Propia

El análisis de las simulaciones 1 y 2 presenta un mapa de colores suavizado que ilustra la cota del agua (altura del nivel del agua) en el río Ejido de Popayán, Cauca, en un paso hidráulico específico de 7.200. La escala cromática utilizada indica que las cotas del agua oscilan entre aproximadamente 1707,11 metros y 1718,38 metros, así como entre 1719,36 metros y 1707,06 metros en las diferentes simulaciones. La transición uniforme de los colores sugiere una disminución gradual del nivel del agua a lo largo del área analizada.

Figura 14
Simulación 1: Froude



Nota, Fuente Elaboración Propia

Figura 15
Simulación 2: Froude



Nota, Fuente Elaboración Propia

Las imágenes muestran dos simulaciones hidrológicas del número de Froude diferentes zonas del río Ejido en Popayán, Cauca, en el paso 7200 de la simulación con las cuales se hace el siguiente análisis:

Distribución Espacial: El número de Froude no es uniforme a lo largo del río. Se observan zonas con valores altos (representados en rojo y naranja) y zonas con valores bajos (amarillo y verde). La zona con mayor número de Froude se concentra en una parte más estrecha del cauce.

Rango de Valores: El número de Froude varía aproximadamente entre 0 y 3.67. Esto indica una variabilidad significativa en la relación entre la velocidad del flujo y la velocidad de propagación de las ondas superficiales en el río. Valores superiores a 1 indican flujo supercrítico (rápido), mientras que valores inferiores a 1 indican flujo subcrítico (lento).

Influencia de la Geometría del Cauce: La forma del río (ancho, profundidad) parece influir significativamente en la distribución del número de Froude. Las zonas más estrechas del cauce presentan valores de Froude más altos.

Suavizado de Datos: La leyenda indica que el mapa es un "mapa de color suavizado". Esto significa que los valores representados son una media espacial de los datos originales, lo que reduce el impacto de fluctuaciones locales.

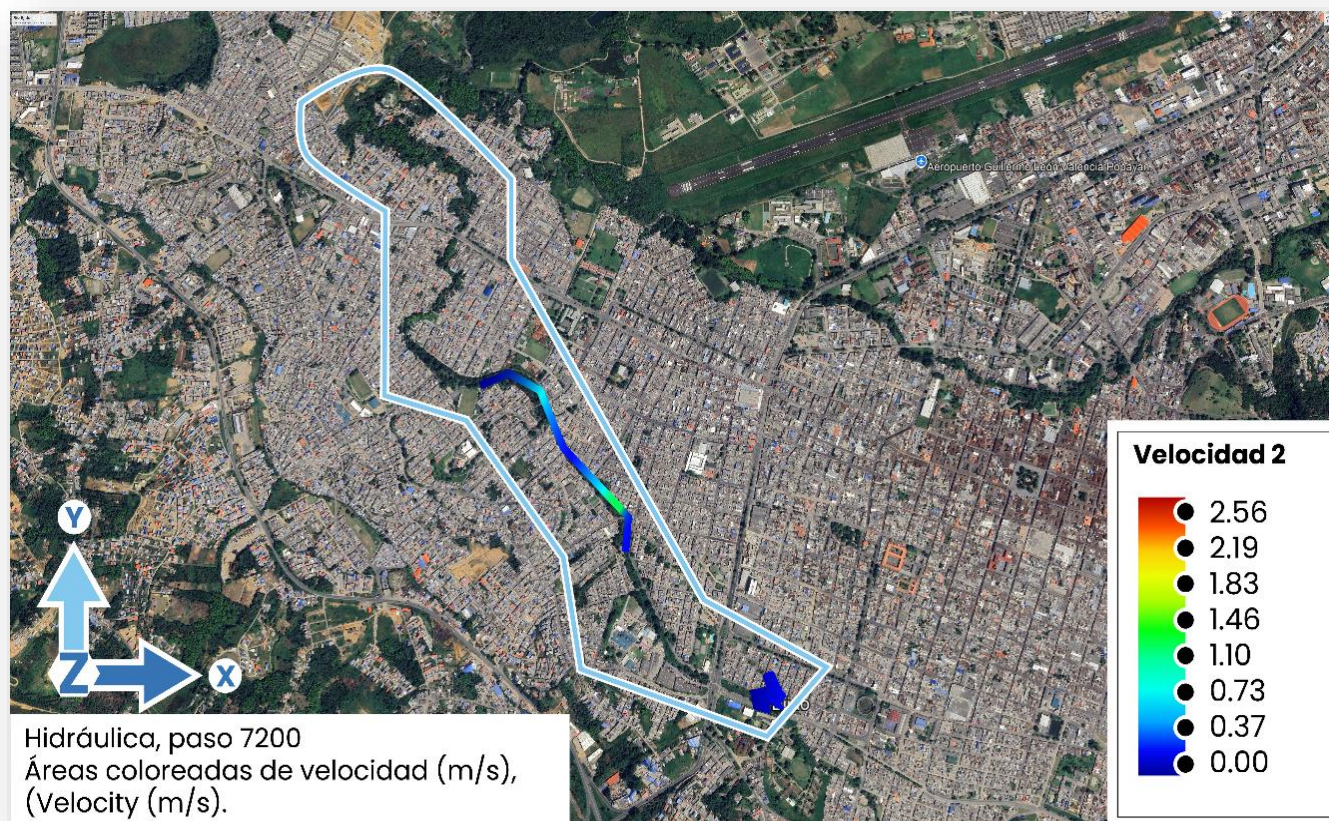
Este análisis sugiere una distribución del número de Froude probablemente asimétrica, con una cola a la derecha (valores altos). Esto indica que la mayoría de los valores del número de Froude están en un rango menor, con algunos puntos con valores significativamente más altos.

Figura 16

Simulación 1: Velocidad (m/S)



Nota, Fuente Elaboración Propia

Figura 17*Simulación 2: Velocidad (m/S)**Nota, Fuente Elaboración Propia*

Las imágenes muestran dos simulaciones (Simulación 1 y Simulación 2) de la velocidad del agua en el Río Ejido en Popayán, Cauca, utilizando el modelo hidráulico IBER, en marzo de 2024. El análisis comparativo requiere entender que las imágenes representan la velocidad media del agua en diferentes puntos del río, visualizadas a través de un mapa de color. Las escalas de color indican la magnitud de la velocidad en metros por segundo (m/s).

Comparación entre Simulaciones

Diferencias en la escala de velocidades: La Simulación 2 muestra una escala de velocidades mayor (0.00 a 2.56 m/s) que la Simulación 1 (0.00 a 2.04 m/s). Esto sugiere que la Simulación 2 predice velocidades de flujo significativamente más altas en algunas zonas del río que la

Simulación 1. Esto podría deberse a diferencias en los parámetros de entrada del modelo IBER entre ambas simulaciones (por ejemplo, caudal, rugosidad del lecho, geometría del río).

Distribución espacial de la velocidad: Una comparación visual de los mapas de color revela diferencias en la distribución espacial de la velocidad del agua. Algunas zonas muestran velocidades mayores en una simulación que en la otra.

Figura 18

Calado 1- Altura de la Lámina de Agua



Nota, Fuente Elaboración Propia

Figura 19*Calado 2- Altura de la Lámina de Agua**Nota, Fuente Elaboración Propia*

Las imágenes muestran dos simulaciones ("Calado 1" y "Calado 2") de la altura de la lámina de agua en el río Ejido de Popayán, Cauca, realizadas en marzo de 2024 utilizando el modelo IBER, observando algunas diferencias preliminares:

Diferencias Observables

Extensión de la inundación: A simple vista, parece que la extensión del área inundada es diferente entre ambos calados. En una de las simulaciones, la inundación se extiende más ampliamente que en la otra.

Profundidad del agua: Las escalas de color indican la profundidad del agua. Aunque las escalas son iguales, la distribución de colores sugiere variaciones en la profundidad del agua entre ambos calados. Algunas zonas podrían mostrar mayor o menor profundidad en una simulación en comparación con la otra.

Distribución espacial del agua: La forma en que el agua se distribuye espacialmente parece diferente entre las dos simulaciones. Esto podría indicar variaciones en la configuración del modelo, las condiciones de entrada (precipitación, caudal), o la rugosidad del terreno utilizada en la simulación.

4.3. Fase III. Tabla de comparación de los modelos aplicados al Río Ejido Popayán Cauca

Tabla 16

Tabla de Comparación de Modelos Aplicados al Río Ejido (Popayán, Cauca)

Tabla de Comparación de Modelos Aplicados al Río Ejido (Popayán, Cauca)

Aspecto	QUAL2K	Streeter-Phelps	Iber
Tipo de modelo	Modelo de calidad de agua completo (cualitativo y cuantitativo)	Modelo clásico de calidad de agua (simplificado)	Modelo hidrodinámico 2D
Variables analizadas	DBO, OD, caudal, temperatura, entre otras	DBO, OD	Velocidad, profundidad, cota, número de Froude
Detalle espacial y temporal	Alta resolución en tiempo y espacio	Baja resolución (curva idealizada)	Alta resolución espacial (2D), sin enfoque en calidad del agua
Resultados clave	DBO > 50 mg/L en tramos iniciales; OD muy bajo	Punto crítico en tramo 2; recuperación parcial aguas abajo	Zonas de alta velocidad; diferencias de profundidad y ancho
Fortalezas	Multivariable; muestra evolución de la calidad del agua	Simplicidad y rapidez; útil para visualizar OD y DBO	Permite ver el comportamiento físico del flujo
Limitaciones	Requiere muchos datos y calibración precisa	No considera muchas variables ni dinámica del flujo	No modela calidad de agua; solo aspectos hidráulicos
Aplicación en el Río Ejido	Evidencia alta contaminación y baja oxigenación	Confirma punto crítico y poca capacidad de recuperación	Muestra zonas donde el flujo puede favorecer o dificultar la autodepuración
Utilidad para la gestión ambiental	Alta: diagnóstico completo para tomar decisiones	Media: útil como herramienta inicial de evaluación	Alta: para planificación hidráulica y ubicación de obras

Nota, Fuente Elaboración Propia

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

La calibración de los modelos mostró un ajuste moderado en algunos parámetros, mientras que la fase de confirmación generó resultados más sólidos. Esto sugiere que el proceso de calibración fue efectivo, especialmente al considerar que los datos fueron recopilados durante un periodo de baja pluviosidad, lo que permitió que los modelos se alinearan mejor con las mediciones en campo.

Los análisis de los modelos Qual2k, Streeter & Phelps e IBER demostraron la capacidad de estos para predecir la calidad del agua en diversas condiciones hidrológicas. Esto no solo valida su utilidad en la gestión de recursos hídricos, sino que también aporta información valiosa para futuras investigaciones y monitoreos, contribuyendo a la sostenibilidad y conservación del ecosistema local.

Los datos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) indican una contaminación significativa en el río, especialmente en el tramo 2, donde la DBO se elevó drásticamente, sugiriendo fuentes puntuales de contaminación. A pesar de que la calidad del agua mostró cierta mejora en tramos posteriores, los niveles de DBO permanecieron preocupantemente altos, indicando una grave afectación al ecosistema.

La variación de los niveles de oxígeno disuelto sugiere que la calidad del agua se ve afectada por la contaminación orgánica. Los valores de OD caen por debajo de los niveles de saturación en ciertos tramos.

La temperatura del río se mantuvo relativamente estable, indicando que no hay una influencia significativa de factores externos en este aspecto. Esto podría ser un indicador positivo para la salud del ecosistema, aunque se debe seguir monitoreando.

El análisis del modelo Streeter revela variaciones significativas en los parámetros medidos a lo largo de los diez tramos del río. Esto resalta la necesidad de un monitoreo continuo y de atención a las áreas más afectadas por la contaminación.

Las simulaciones de flujos y niveles de agua, junto con el análisis del número de Froude, indican una variabilidad espacial considerable en la velocidad y profundidad del agua. La

identificación de zonas con flujo supercrítico y subcrítico ofrece información crucial para la gestión de inundaciones y la planificación de intervenciones en el cauce del río.

Las conclusiones del análisis ofrecen una base para futuras investigaciones y monitoreos, enfatizando la necesidad de abordar las fuentes de contaminación y mejorar la gestión del agua en el Río Ejido, para proteger tanto el ecosistema acuático como el bienestar de las comunidades dependientes del recurso hídrico.

Estas conclusiones subrayan la importancia de la gestión sostenible del agua y la necesidad de implementar estrategias efectivas para mitigar la contaminación y preservar los recursos hídricos.

5.2. Recomendaciones para la Gestión Sostenible del Agua

Implementación de Monitoreo Continuo: Establecer un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua a lo largo de todo el río, con especial atención a los tramos más afectados por la contaminación. Esto permitirá detectar de manera temprana las variaciones en los parámetros de calidad y reaccionar rápidamente ante cualquier deterioro.

Identificación y Control de Fuentes de Contaminación: Realizar un diagnóstico exhaustivo para identificar las fuentes puntuales de contaminación en el río. Una vez identificadas, se deben implementar medidas de control y remediación, como la regulación de descargas industriales y el tratamiento adecuado de aguas residuales.

Promoción de la Educación y Conciencia Ambiental: Fomentar programas de educación y sensibilización dirigidos a la comunidad sobre la importancia de la conservación del agua y la reducción de la contaminación. Involucrar a las comunidades en acciones de limpieza y conservación puede generar un sentido de responsabilidad colectiva.

Fomento de Prácticas Agrícolas y Urbanas Sostenibles: Promover la adopción de prácticas agrícolas que minimicen el uso de fertilizantes y pesticidas, así como la implementación de técnicas de manejo sostenible de aguas en áreas urbanas, como la recolección de aguas pluviales y el uso de tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Restauración de Ecosistemas Acuáticos: Desarrollar proyectos de restauración de ecosistemas ribereños y acuáticos que ayuden a mejorar la calidad del agua y proporcionen hábitats

saludables para la vida acuática. Esto incluye la reforestación de orillas y la creación de zonas de amortiguamiento.

Utilización de Modelos Predictivos: Aprovechar modelos como Qual2k, Streeter & Phelps e IBER para predecir la calidad del agua bajo diferentes escenarios y condiciones. Esto puede ayudar en la planificación de intervenciones y en la gestión proactiva de los recursos hídricos.

Planificación de Intervenciones Basadas en Datos: Utilizar los datos obtenidos de simulaciones de flujo y análisis de la velocidad y profundidad del agua para planificar intervenciones en el cauce del río, especialmente en zonas vulnerables a inundaciones o erosión.

Colaboración Multisectorial: Establecer alianzas entre gobiernos, organizaciones no gubernamentales, comunidades locales y el sector privado para abordar de manera integral la gestión del agua. La colaboración puede facilitar la implementación de políticas efectivas y la movilización de recursos.

Es fundamental considerar las limitaciones inherentes a la extensión relativamente corta del Rijo Ejido al realizar una modelación en el software Iber. Para optimizar los resultados y la precisión del estudio, se sugiere encarecidamente la inclusión de batimetría en el informe. Este dato es crucial para la obtención de secciones fijas, lo que facilitaría un análisis más detallado y riguroso durante el proceso de modelación.

Además, se debe prestar especial atención al ajuste del modelo digital de elevación al terreno, ya que cualquier inexactitud en este aspecto puede comprometer la fiabilidad de los resultados. Se recomienda realizar un análisis exhaustivo de la calidad de los datos disponibles y, si es posible, buscar fuentes de información adicionales que puedan proporcionar una resolución más alta. La utilización de imágenes satelitales más detalladas contribuiría significativamente a mejorar la calidad del modelo generado y, en consecuencia, a ofrecer conclusiones más precisas y aplicables al contexto estudiado.

Implementar estas recomendaciones no solo enriquecerá la calidad del estudio, sino que también permitirá una mejor toma de decisiones en función de los resultados obtenidos.

5.3. Estrategias para Mitigar la Contaminación y Preservar los Recursos Hídricos

Regulación y Cumplimiento Normativo: Fortalecer las regulaciones ambientales y garantizar su cumplimiento por parte de industrias y agricultores. Establecer sanciones efectivas para aquellos que no cumplan con las normativas de calidad del agua.

Inversión en Infraestructura de Tratamiento: Aumentar la inversión en infraestructura de tratamiento de aguas residuales y pluviales, asegurando que todas las descargas de aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de ser vertidas en el río.

Monitoreo Participativo: Involucrar a las comunidades locales en el monitoreo de la calidad del agua, capacitando a grupos comunitarios para que realicen muestreos y reporten condiciones anómalas, lo que puede aumentar la transparencia y responsabilidad.

Planificación Espacial y Uso del Suelo Sostenible: Integrar la gestión del agua en la planificación espacial y el uso del suelo, asegurando que las áreas críticas para la conservación de recursos hídricos sean protegidas de desarrollos no sostenibles.

Investigación y Desarrollo: Fomentar la investigación sobre nuevas tecnologías y prácticas para el tratamiento y la gestión del agua, así como sobre los efectos de la contaminación en el ecosistema acuático, garantizando que las estrategias se basen en evidencia científica actualizada.

Establecimiento de Zonas de Protección: Delimitar zonas de protección alrededor de fuentes de agua, ríos y acuíferos para limitar actividades que puedan causar contaminación, asegurando la conservación de estos recursos vitales.

Evaluación de Impacto Ambiental: Implementar evaluaciones de impacto ambiental rigurosas para proyectos que puedan afectar la calidad del agua, garantizando que se tomen en cuenta los efectos a largo plazo sobre el ecosistema y las comunidades locales.

Estas recomendaciones y estrategias no solo ayudarán a mitigar la contaminación del agua, sino que también promoverán un enfoque sostenible en la gestión de los recursos hídricos, beneficiando tanto al medio ambiente como al bienestar de las comunidades que dependen de él.

Referencias Bibliográficas

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad de Antioquia – UdeA. (2016). *Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá en jurisdicción del Área Metropolitana – Fase V* [Informe técnico]. Medellín, Colombia. <http://www.metropol.gov.co/recursohidrico/Pages/Informes.aspx>
- Atencia Osorio, M. C., & Verbel Escobar, M. (2021). Modelación hidrodinámica y de la calidad del agua para evaluar la capacidad de asimilación de vertimientos del río Sinú (tramo Sierra Chiquita – Universidad de Córdoba) [Trabajo de grado – pregrado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional de la Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4364>
- Barbosa Cadena, C. D., & Pérez Martínez, J. C. (2018). Aplicación del modelo de simulación hidrológica e hidráulica HEC HMS y HEC RAS para la estimación de manchas de inundación a una escala 1:25 000 en la cuenca del río Chicú [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional USTA. <http://hdl.handle.net/11634/13971>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Caicedo Zambrano, D. R., & Eraso Huertas, Y. (2017). *Modelación de la calidad del agua del río Molino en el área urbana de la ciudad de Popayán* [Trabajo de grado pregrado, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca]. Repositorio Institucional Uniautónoma del Cauca. <https://repositorio.uniautonomo.edu.co/handle/123456789/24>
- Carabali Camacho, J. Y., & Pineda Blanco, H. M. (2022). Análisis de la capacidad de asimilación de un cuerpo de agua por acción de un vertimiento a partir de la modelación hidrodinámica y de calidad en un tramo de la quebrada El Medio en el municipio Titiribí – Antioquia [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional de la Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/32435>

- Castaño Ossa, J. M. (2015). *Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá* [Trabajo de grado de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56729>
- Contreras Rojas, C. A. (2020). *Modelación ambiental del vertimiento generado por una fundación a la quebrada Santa Clara en el municipio de Tena, Cundinamarca* [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/38789>
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2010, 25 de octubre). Decreto 3930 de 2010: Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40620>
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2015, 7 de octubre). *Decreto 1076 de 2015: Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Domínguez Catasús, J., Borroto Portelas, J., & Hernández Garcés, A. (2005). Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río "Almendares". *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 36(2), 98–105. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620581006>
- Gómez Gómez, L. (2015). *Modelación de la calidad del agua en redes de distribución de agua potable: Mezcla completa vs mezcla incompleta en nudos haciendo uso de un modelo físico y dinámica de fluidos computacional* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13276>
- Hernández Rangel, J., Martínez Ricardo, D., & Torres Bejarano, F. (2016). *Modelación hidrodinámica y de la calidad del agua para la evaluación ambiental de vertimientos generados a la ciénaga Mesolandia, Atlántico – Colombia* [Trabajo de grado, Universidad de la Costa]. Repositorio Institucional de la Universidad de la Costa. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/644>

- Hidalgo Santana, M., & Mejía Álvarez, E. (2010). Diagnóstico de la contaminación por aguas residuales domésticas, cuenca baja de la quebrada La Macana, San Antonio de Prado. Municipio de Medellín [Tesis de especialización, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional de la Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/1304>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf
- Jiménez Jiménez, A. A. (2017). *Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas* [Tesis de licenciatura, Universidad de Bogotá]. Repositorio Institucional de la Universidad de Bogotá. https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/16463/1/tres-ensayos-sobre.pdf?utm_source
- López Castaño, M. A. (2022). *Uso de la teoría de redes para modelar la contaminación térmica de la subcuenca del río Quindío* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional de la Universidad de los Andes. <https://funes.uniandes.edu.co/handle/1992/54553>
- Morales León, J. C. (2020). Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) Nuevo Tambo, ubicada en el municipio del Tambo, Departamento del Cauca, priorizada en la subdirección de patrimonio ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Cauca [Trabajo de grado, Universidad Autónoma del Cauca]. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Cauca. <https://repositorio.uniautonomia.edu.co/handle/123456789/300>
- Pelletier, S. C. G. (2016). Software y modelado ambiental: Un marco para modelar la calidad del agua. *Revista*, 21(3), 400. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992015000400001&script=sci_arttext
- Reyes Ojeda, C. F., & Ruiz Bravo, L. E. R. (2017). Diagnóstico de la calidad del agua mediante cálculo de un ICA y modelación de un tramo del río Tunjuelo en el sector de Bosa Libertador [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15510>

- Rodríguez Amézquita, D. N. (2020). *Implementación del modelo de calidad de agua QUAL2k sobre un tramo del río Pamplonita para simulación de escenarios* [Trabajo de grado, Especialización en Recursos Hídricos, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/10983/25529>
- Torres Bejarano, F. M., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. D. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 5(10). Repositorio Institucional de la Universidad de la Costa. <https://hdl.handle.net/11323/854>
- Vera Puerto, I. L. (2007). Aplicación de técnica de optimización mediante algoritmos genéticos para calibración de modelo Qual2k como una aproximación a la modelación de la calidad del agua de los principales ríos de la zona urbana de Bogotá D.C. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/10554/3805>

Anexos

Tabla 17

Preservación de Muestras

Muestras Aguas Abajo Rio Ejido

Análisis	Preservación	Envase	Cantidad (ml)
Coliformes termo tolerantes	Refrigerar <10 C°	Bolsa plástica estéril con aire	100
Coliformes totales	Refrigerar <10 C°	Bolsa plástica estéril con aire	100
DBO5 Demanda bioquímica de oxígeno	Refrigerar <6 C°	Plástico/vidrio	1000 sin presencia de burbujas
DQO	H2SO4 PH <2 Refrigerar <6 C°	Vidrio	100
Fosforo total	H2SO4 PH <2 Refrigerar <6 C°	Plástico/ vidrio	100
Nitratos	Refrigerar <6 C°	Plástico/ vidrio	300
Nitritos	Refrigerar <6 C°	Plástico/ vidrio	300
Nitrógeno amoniacal	H2SO4 PH <2 Refrigerar <6 C°	Plástico/ vidrio	500
Nitrógeno total	H2SO4 PH <2 Refrigerar <6 C°	Plástico/ vidrio	500
Nitrógeno total Kjeldahl	H2SO4 PH <2 Refrigerar <6 C°	Plástico/ vidrio	500
Salinidad	Analizar inmediatamente o use sella de parafina	Vidrio	250
Solidos suspendidos totales	Refrigerar <6 C°	Plástico/ vidrio	1000

Nota, Fuente, laboratorio Chemilab S.A 2024

Tabla 18

Metodología de Medición Análisis de Variables

Parámetro	Método	Técnica	Límite de Cuantificación del método	Unidad
Caudal	No Aplica	Área-Velocidad	N. A	L/S

Coliformes Termo tolerantes	SM 9223 B modificado	Sustrato Enzimático Multicelda	1,00	NMP/1 00 m L
Coliformes Totales	SM 9223 B	Sustrato Enzimático Multicelda	1,00	NMP/1 00 m L
Conductividad in situ	SM 2510 B 2017	Electrometría	0,100	µS/cm
DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	SM 5210 B, ASTM D 888-12 METODO C	Incubación 5 días y Luminiscencia	2,00	mg O2/L
DQO	SM 5220D	Reflujo cerrado y Colorimétrico	5,00	mg O2/L
Fósforo total	SM 4500-PB-E	Digestión - colorimetría con Ácido Ascórbico	0,0700	mg P/L
Nitratos	SM 4500 NO3 D Ed.23 2017	Ion Selectivo	1,00	mg N- NO 3/L
Nitritos	SM 4500 NO2 B Ed.23 2017	Colorimetría	0,00608	mg N- NO 2/L
Nitrógeno Amoniacal	SM 4500 NH3 B, C	Volumetría	1,00	mg/L N H3 - N
NITROGENO TOTAL	Cálculo	Cálculo	3,00	mg N/L
Nitrógeno total Kjeldahl	Semi-micro Kjeldahl SM 4500-Norg C, SM 4500 NH3 B, C	Digestión - kjeldhal	3,00	mg N/L
Oxígeno Disuelto (In situ)	ASTM D 888-18	Luminiscencia	0,0500	mg O2/L
PH In situ	SM 4500 H+ B	Potenciometría	N. A	Unidad es de pH
Salinidad	SM 2520 B	Electrometría	0,1000	ppt

Saturación de Oxígeno (In Situ)	ASTM D 888-09 METOD O C	Luminiscencia	N. A	%
Solidos Suspendidos Totales	SM 2540D	Gravimetría Secado 103-105°C	10,0	mg/L
Temperatura muestra (In situ)	SM 2550 B 2017	Termométrico	N. A	°C

Nota, Fuente, laboratorio chemilab S.A 2024

Figura 20

Evidencias Fotográficas Toma de Muestras



Nota, Fotografía empresa de acueducto y alcantarillado de Popayán S.A.

Aguas Arriba Rio Ejido

Aguas arriba Ejido: el punto de monitoreo se encuentra ubicado a unos 9 m de la planta de beneficio animal de Popayán, sobre la calle 17 y en una zona residencial. Presenta un cauce encajonado, recto con leves ondulaciones, en sus orillas se observan arbustos y hierbas, lecho escabroso, compuesto principalmente de grava y arenas y poco sedimento. se observan residuos

plásticos y otros. La muestra presenta una apariencia traslúcida, con algunas partículas en suspensión.



Nota, Fotografía empresa de acueducto y alcantarillado de Popayán S.A

Figura 21*Evidencia Toma de Muestras Vertimientos**Ubicación: Minuto de Dios*

