



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y POSGRADO

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL CON MENCIÓN EN RECURSOS
HÍDRICOS**

TEMA:

**“MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PARTE BAJA DEL RÍO
MAGUAZO APLICANDO EL SOFTWARE QUAL2K PARA UNA GESTIÓN
SOSTENIBLE DEL RECURSO HÍDRICO”**

AUTOR:

Ing. Katherin Pamela López Adriano

TUTOR:

Ing. Iván Ríos García, Ph.D.

Riobamba – Ecuador

2025

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PARTE BAJA DEL RÍO MAGUAZO APLICANDO EL SOFTWARE QUAL2K PARA UNA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL RECURSO HÍDRICO”**, ha sido elaborado por la Ingeniera Katherin Pamela López Adriano, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta anti plagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 05 de febrero, de 2025



Ing. Iván Ríos García, Ph.D.

TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Katherin Pamela López Adriano**, con número único de identificación **060485652-6**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Modelación de la calidad del agua en la parte baja del río Maguazo aplicando el Software QUAL2K para una gestión sostenible del recurso Hídrico” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 05 de febrero, de 2025



Ing. Katherin Pamela López Adriano

N.U.I. 060485652-6

Agradecimiento

Doy gracias a Dios, por inspirarme a seguir adelante con esperanza y propósito, a mi familia, especialmente a mis padres Narcisa y Gustavo, le agradezco profundamente por su amor incondicional y su constante aliento, me motivaron a continuar en los momentos más difíciles de mi etapa académica. Su fe en mí ha sido el motor que me permitió completar este reto. A mi director de tesis Ing. Iván Ríos García Ph.D, cuya guía y apoyo fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su paciencia y experiencia me inspiraron a superar cada desafío y a alcanzar mis metas planteadas. Su apoyo no solo me proporcionó claridad académica, sino también motivación en momentos de duda. Gracias a todas las personas quienes me brindaron su apoyo y confianza para cumplir con esta etapa de mi vida.

Katherin

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía y fortalece por permitirme cumplir cada una de las metas propuestas en mi vida, a mis padres, Gustavo López y Narcisa Adriano, por ser un ejemplo de lucha y dedicación quienes pusieron su confianza y apoyo incondicional en cada una de las decisiones que he tomado, su sacrificio han sido el pilar que me ha permitido llegar hasta este momento. A Estalín Coello que con su compañía y apoyo permitieron terminar este proyecto, a mis hermanos, mis hermanas, sobrinos y cuñados, por creer en mis capacidades incluso cuando yo dudaba de ella, por sus palabras de aliento, por su presencia y cariño. Este logro también es suyo.

Katherin

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Índice General	vi
Resumen	xiii
Abstract	xiv
Introducción	15
Capítulo 1	18
1.1. Generalidades	18
1.2. Planteamiento del problema	19
1.3. Justificación de la Investigación.....	22
1.4. Objetivos.....	23
1.4.1. Objetivo General	23
1.4.2. Objetivos Específicos	23
Capítulo 2	25
Estado del Arte y la Práctica	25
2.1. Antecedentes Investigativos	25
2.2. Fundamentación Legal	27
2.3. Fundamentación Teórica	30
2.3.1. Contaminación del agua	31
2.3.2. Contaminación física.....	31
2.3.3. Contaminación química.....	31
2.3.4. Contaminación microbiológica	31
2.3.5. Parámetros de medición	32
3 Capítulo 3	36
Diseño Metodológico	36
3.1. Enfoque de la investigación.....	36
3.2. Diseño de la investigación.....	36
3.3. Tipo de investigación.....	37
3.3.1. Investigación aplicada.	37

3.3.2	Nivel de investigación.....	37
3.3.3	Área de estudio.....	38
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	38
3.4.1	Técnica de muestreo.....	38
3.4.2	Envases de la muestra	39
3.4.3	Etiquetado de muestra	39
3.4.4	Preservación de la muestra.....	39
3.4.5	Transporte de la muestra	39
3.4.6	Materiales.....	40
3.5	Etapa 1: Caracterización geomorfológica, biológica e hidrológica del río Maguazo en la zona de captación del proyecto de trasvase de agua superficial Maguazo-Alao.....	41
3.5.1	Descripción del área de estudio.....	41
3.5.2	Recopilación de información disponible.....	42
3.5.3	Caracterización geomorfológica	43
3.5.4	Parámetros Físicos.....	43
3.5.5	Longitud y Ancho de la microcuenca:	44
3.6	Parámetros de Forma	44
3.6.1	Índice de compacidad o índice de Gravelius (KC):	45
3.6.2	Factor de forma Horton (Ff):.....	45
3.6.3	Índice de alargamiento (Ia):.....	46
3.6.4	Índice asimétrico:	47
3.6.5	Características de Relieve	47
3.6.6	Pendiente media de la cuenca.....	47
3.6.7	Curva hipsométrica:	48
3.7	Características del Sistema de Drenaje.....	49
3.7.1	Longitud del cauce.	49
3.7.2	Perfil del cauce:.....	49
3.7.3	Tiempo de concentración:	49
3.7.4	Medición de Caudales	50
3.7.5	Procesamiento y Validación.....	51
3.8	Etapa 2: Calibración del modelo matemático QUAL2K en la zona baja del río Maguazo, con el fin de evaluar la calidad de agua en esta área.	52
3.8.1	Descripción geográfica del tramo del río modelado	52
3.8.2	Esquemmatización del tramo del río modelado	52

3.8.3	Identificación de puntos críticos	53
3.8.4	Programación de toma de muestras.....	53
3.8.5	Configuración inicial del modelo QUAL2K.....	53
3.8.6	Modelo hidráulico	56
3.8.7	Modelo de calidad de agua.....	58
3.8.8	Información de entrada del modelo.....	59
3.8.9	Información de salida del modelo	67
3.8.10	Calibración del modelo matemático QUAL2K.....	68
3.9	Etapa 3: Simulación de escenarios con el modelo QUAL2K y alternativas para la conservación ambiental del río Maguazo.	71
3.9.1	Escenario 1: Incremento de carga contaminante.....	71
Capítulo 4	73
Análisis y Discusión de los Resultados	73
4.1	Descripción de la zona de estudio	73
4.1.1	Ubicación política del área de estudio.....	73
4.1.2	Ubicación geográfica e hidrográfica	74
4.1.3	Información Ambiental Básica.....	75
4.2	Geomorfología de la microcuenca del río Maguazo	85
4.2.1	Curva Hipsométrico.	86
4.2.2	Perfil Longitudinal	87
4.3	Descripción geográfica del tramo seleccionado	88
4.3.1	Descripción de los puntos de muestreo	88
4.3.2	Esquematación del tramo de estudio seleccionado	90
4.3.3	Segmentación del tramo monitoreado.....	92
4.4	Puntos seleccionados de toma de muestras y medición de caudales.....	93
4.5	Caudales del río Maguazo.	94
4.6	Análisis de resultados de muestras.	94
4.6.1	Información Hidráulica	95
4.6.2	Temperatura:	96
4.7	Modelado inicial parámetros hidráulicos	97
4.7.1	Tiempo de viaje:.....	97
4.7.2	Caudal:	99
4.7.3	Velocidad:	100
4.7.4	Profundidad:	101

4.7.5	Temperatura	102
4.7.6	Sólidos suspendidos inorgánicos.....	104
4.7.7	Oxígeno disuelto	105
4.7.8	Demanda bioquímica de oxígeno rápida.....	106
4.7.9	Nitrógeno orgánico.....	108
4.8	Análisis de los resultados del modelado calibrado.....	109
4.8.1	Caudal.....	109
4.8.2	Sólidos Suspendidos Inorgánicos.....	110
4.8.3	Oxígeno Disuelto.....	112
4.8.4	Demanda Bioquímica de Oxígeno Rápida.....	113
4.8.5	Nitrógeno Orgánico.....	114
4.9	Simulación de escenarios utilizando el modelo QUAL2K.....	116
4.9.1	Escenario 1: Incremento de la carga contaminante.....	116
4.9.2	Escenario 2: Disminución de Caudales.....	120
4.10	Discusión de los Resultados	125
Capítulo 5		127
Conclusiones		127
Recomendaciones		129
Referencias Bibliográficas		130
Anexos		139

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros permisibles para aguas de consumo humano según la Norma INEN 1108 2020.....	28
Tabla 2: Clasificación del índice de compacidad o Gravelius.	45
Tabla 3: Factor de Forma de Horton	46
Tabla 4: Clasificación del índice de alargamiento.	46
Tabla 5: Clasificación del índice asimétrico	47
Tabla 6: Parámetros a modelar en el modelo QUAL2K sobre el río Maguazo.	54
Tabla 7: Coeficiente de Rugosidad de Manning.	69
Tabla 8: Registro de uso de agua de la microcuenca	83
Tabla 9: Parámetros morfométricos de la microcuenca del río Maguazo.....	86
Tabla 10: Descripción de los puntos de muestro del río Maguazo.	89
Tabla 11: Tabla de puntos que ingresan y extraen agua del río Maguazo.	92
Tabla 12: Aforo del área de estudio del río Maguazo.....	94
Tabla 13: Resultados de análisis de muestras tomadas en los puntos de estudio.	95
Tabla 14: Información Hidráulica.	95
Tabla 15: Parámetros Físico químico del software QUAL2K.....	96
Tabla 16: Incremento de la carga contaminante de los parámetros claves del río Maguazo.	119
Tabla 17: Disminución de Caudales.	123

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación de la microcuenca del río Maguazo.	38
Figura 2: Tipos de Curvas Hipsométricas.....	48
Figura 3: divisor del ancho del río.	50
Figura 4: Flujograma en base al desarrollo del primer objetivo: Etapa 1.....	51
Figura 5: Esquema de segmentación QUAL2K.....	55
Figura 6: Esquema de segmentación de QUAL2K.....	56
Figura 7: Balance del caudal de alcance	57
Figura 8: Hoja de trabajo QUAL2K	61
Figura 9: Hoja de trabajo “Headwater”	63
Figura 10: Hoja de trabajo Reach o Tramos.	64
Figura 11: Hoja de Trabajo Rates.	65
Figura 12: Hoja de cálculo para Fuentes Fijas o tributarios.	66
Figura 13: Hoja de salida.	67
Figura 14: Flujograma en base al desarrollo del segundo objetivo: Etapa 2.	71
Figura 15: Flujograma en base al desarrollo del tercer objetivo.....	72
Figura 16: Mapa de Riobamba con sus parroquias.....	73
Figura 17: Mapa de la cuenca, Subcuenca y la microcuenca del rio Maguazo.	75
Figura 18: Mapa de Topografía COTA Máx. y Min.	76
Figura 19: Mapa de temperatura de la microcuenca.....	77
Figura 20: Mapa de Precipitación de la Microcuenca.	78
Figura 21: Mapa de Geología de la microcuenca.	79
Figura 22: Mapa de Geomorfología de la microcuenca.....	80
Figura 23: Mapa de Pendientes de la microcuenca.....	81
Figura 24: Mapa de la cobertura vegetal de la microcuenca Maguazo.....	82
Figura 25: Mapa de uso y Cobertura del suelo.	82

Figura 26: Traspase del Río Maguazo	84
Figura 27: Central Hidroeléctrica Alao.....	85
Figura 28: Curva Hipsométrica de la microcuenca Maguazo.....	87
Figura 29: Perfil Longitudinal de la microcuenca del río Maguazo	87
Figura 30: Mapas de puntos de monitoreo de la Microcuenca Maguazo.	88
Figura 31: Flujograma del tramo de estudio seleccionado.	91
Figura 32: Mapa de puntos seleccionados.	93
Figura 33: Temperatura de la microcuenca Maguazo.....	96
Figura 34: Tiempo de viaje del río Maguazo.....	97
Figura 35: Variación de Caudal.	99
Figura 36: Varianza de velocidad de los tres tramos del río Maguazo.....	100
Figura 37: Análisis de la profundidad del río Maguazo	101
Figura 38: Variación de temperatura del agua en el río Maguazo.....	103
Figura 39: Sólidos Suspendidos Inorgánicos (SSI) en el río Maguazo.	104
Figura 40: Oxígeno Disuelto (OD) del río Maguazo	105
Figura 41: Demanda Bioquímica de oxígeno rápido.	107
Figura 42: Nitrógeno Orgánico (NO) en el río Maguazo.	108
Figura 43: Análisis de Caudales del tramo de estudio del río Maguazo.....	110
Figura 44: Sólidos suspendido Inorgánicos del tramo de estudio del río Maguazo.	111
Figura 45: Oxígeno Disuelto del tramo de estudio del río Maguazo.....	112
Figura 46: DBO5 del tramo de estudio del río Maguazo.....	113
Figura 47: Nitrógeno Orgánico del tramo de estudio del río Maguazo.	115

Resumen

El objetivo principal de este estudio es modelar la calidad del agua en la parte baja del río Maguazo, por su importancia en el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Riobamba. Para ello, se establecieron objetivos específicos que incluyen la caracterización físico-química del agua del río, la calibración del modelo QUAL2K y la simulación de escenarios para evaluar la capacidad de autodepuración del río ante condiciones de cambio climático. La metodología adoptada tiene un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental. Se realizaron muestreos en puntos estratégicos del río para analizar parámetros físico-químicos, como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitritos, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos. El software QUAL2K se utilizó para modelar la calidad del agua, permitiendo simular procesos de autodepuración y evaluar el impacto de distintos escenarios a largo plazo. Los resultados obtenidos indican que la calidad del agua en el río Maguazo es, en general, adecuada para el consumo humano, cumpliendo con los estándares establecidos por la normativa ecuatoriana. La modelación permitió además evaluar escenarios futuros, como un incremento del 8 % en las cargas contaminantes y una reducción del 20 % en el caudal, lo que podría comprometer la calidad del agua. Los resultados encontrados plantean la necesidad de implementar estrategias de gestión sostenible y un monitoreo continuo de la calidad del recurso hídrico para su protección.

En conclusión, este estudio proporciona información valiosa sobre la capacidad de autodepuración del río Maguazo y sugiere que, si bien la calidad del agua se encuentra dentro de los límites aceptables, es fundamental adoptar medidas preventivas para mitigar los riesgos asociados a la contaminación y al cambio climático. Se recomienda realizar análisis periódicos de calidad del agua, instalar estaciones meteorológicas y fomentar campañas de educación sobre el uso sostenible del recurso hídrico.

Palabras Clave: *Modelo QUAL2K, Agua Potable, Depuración Agua Superficial.*

ABSTRACT

The main objective of this study is to model the water quality in the lower part of the Maguazo River due to its importance in the supply of drinking water for the city of Riobamba. For this purpose, specific objectives were established that include the physical-chemical characterization of the river water, the calibration of the QUAL2K model, and the simulation of scenarios to evaluate the self-purification capacity of the river under climate change conditions. The methodology adopted has a quantitative approach and a non-experimental design. Sampling was carried out at strategic points in the river to analyze physical-chemical parameters, such as biochemical oxygen demand (BOD), nitrites, dissolved oxygen, and suspended solids. The QUAL2K software was used to model the water quality, allowing the simulation of self-purification processes and the evaluation of the impact of different scenarios in the long term. The results indicate that the water quality in the Maguazo River is suitable for human consumption, complying with the standards established by Ecuadorian regulations. The modeling also allowed the evaluation of future scenarios, such as an 8% increase in pollutant loads and a 20% reduction in flow, which could compromise water quality. The results raise the need to implement sustainable management strategies and continuous monitoring of water resource quality for its protection. In conclusion, this study provides valuable information on the self-purification capacity of the Maguazo River. It suggests that, although water quality is within acceptable limits, it is essential to adopt preventive measures to mitigate the risks associated with pollution and climate change. It is recommended periodic water quality analyses, meteorological stations installed, and educational campaigns on the sustainable use of water resources should be promoted.

Keywords: QUAL2K Model, Drinking Water, Surface Water Purification.



Firmado electrónicamente por:
**KERLY YESENIA
CABEZAS LLERENA**

Reviewed by:

Mgs. Kerly Cabezas
ENGLISH PORFESSOR
I.D. 0604042382

Introducción

El crecimiento acelerado de la población urbana en diversas ciudades ha provocado un aumento considerable en la demanda de agua potable, recurso esencial para satisfacer las necesidades básicas de la sociedad (Gallego et al., 2024). Sin embargo, la gestión de los recursos hídricos se ha enfocado predominantemente en asegurar la cantidad y disponibilidad de agua para consumo humano y actividades productivas, relegando a un segundo plano la problemática asociada al vertido de aguas residuales en fuentes superficiales, como los ríos (Velásquez, 2017). Esta deficiencia en la gestión de aguas residuales ha resultado en un deterioro notable de las propiedades físico-químicas del agua, afectando la capacidad de los cuerpos hídricos para autodepurarse. Esto, a su vez, ha ocasionado daños graves e irreversibles en los ecosistemas acuáticos, impactando a la flora y fauna (ASFEE, 2018).

En Ecuador, el vertido directo de aguas residuales a los ríos sigue siendo un problema de gran magnitud. A pesar de los esfuerzos gubernamentales y locales por mejorar la gestión y saneamiento de los recursos hídricos, persisten limitaciones significativas en la implementación de herramientas eficaces para un manejo adecuado (Osorio et al., 2021). En este contexto, el uso de modelos de calidad del agua se presenta como una estrategia crucial para la planificación, gestión y monitoreo de la calidad del agua. Estos modelos permiten evaluar la capacidad de un cuerpo hídrico para depurar y asimilar sustancias vertidas, tanto presentes como futuras (Caballero et al., 2023).

La microcuenca del río Maguazo, situada en la parroquia de Pungalá a 40 kilómetros de Riobamba, es un ejemplo relevante. Con un caudal promedio de 2,5 metros cúbicos por segundo, este río nace en las lagunas de Quillmás y Mishga. En el corto plazo, la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Riobamba (EP-EMAPAR) pondrá en

funcionamiento el proyecto de captación de agua Maguazo-Alao, que proporcionará 500 litros por segundo al sistema de agua potable de la ciudad. Este escenario subraya la necesidad de realizar estudios detallados sobre la calidad del agua en la parte baja del río Maguazo, dado su papel crucial en el abastecimiento de agua.

El presente estudio de maestría tiene como objetivo principal modelar la calidad del agua en la parte baja del río Maguazo utilizando el software QUAL2K (River and Stream Water Quality Model), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). Esta herramienta gratuita, implementada a través de Microsoft Excel, facilita la simulación de procesos de calidad del agua en ríos y corrientes. Los resultados obtenidos contribuirán a proporcionar información actualizada sobre la calidad del agua destinada al consumo humano en Riobamba, apoyando así una gestión sostenible de los recursos hídricos.

Este documento está organizado en cinco capítulos, los cuales abarcan los distintos aspectos del proyecto:

En el Capítulo I: Se contextualiza el proyecto y detalla la problemática de la calidad del agua en la parte baja del río Maguazo. Se presenta un diagnóstico general basado en una revisión bibliográfica, y se definen los objetivos, alcance y justificación de la investigación.

En el Capítulo II: Se analiza las ventajas y limitaciones de los modelos de calidad del agua, con una revisión de estudios previos y un marco de referencia sobre la normativa ecuatoriana relacionada. También incluye una descripción del modelo QUAL2K.

En el Capítulo III: Se describe el desarrollo metodológico, incluyendo la recopilación de datos de campo, análisis de laboratorio, la construcción y calibración del modelo en QUAL2K.

En el Capítulo IV: Se presenta y discute los resultados de la construcción, calibración y validación del modelo, así como de escenarios hipotéticos de contaminación.

En el Capítulo V: Se expone las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

Este trabajo busca proporcionar información clave sobre la capacidad de autodepuración del río Maguazo, con el fin de orientar a los actores locales en la gestión integral y sostenible del recurso hídrico.

Capítulo 1

1.1.Generalidades

El agua es un recurso cada vez más valioso, tanto para el uso doméstico como para el industrial, agrícola y generación eléctrica. Su escasez, especialmente en regiones áridas y semiáridas, la convierte en una prioridad crítica para el desarrollo de las comunidades: "sin agua, no hay vida" (UNESCO, 2021). Para garantizar que el agua sea segura para el consumo humano, es necesario someterla a tratamientos que eliminen partículas y organismos perjudiciales para la salud.

El crecimiento de las necesidades derivadas del desarrollo económico y demográfico ha incrementado la dependencia de este recurso. A pesar de su inestimable valor, la contaminación resultante de efluentes domésticos e industriales, la deforestación y las prácticas de uso del suelo está reduciendo considerablemente la disponibilidad de agua apta para su uso (UNESCO, 2024).

Como respuesta, las administraciones públicas y técnicos están dedicando una atención especial a la planificación y gestión del agua para controlar su calidad. La calidad del agua se refiere a las propiedades físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, las cuales afectan su capacidad para sostener tanto a las comunidades humanas como a la vida vegetal y animal (Baeza, 2016). Las aguas naturales no contaminadas presentan concentraciones muy bajas de materia orgánica. La contaminación orgánica generalmente proviene de fuentes domésticas/urbanas, agrícolas e industriales.

Los parámetros utilizados para medir la cantidad de materia orgánica en el agua incluyen varios compuestos, siendo la demanda biológica de oxígeno a 5 días (DBO5) uno de los más importantes. Este parámetro mide la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la

materia orgánica biodegradable, calculando a partir de la disminución en la concentración de oxígeno disuelto después de incubar una muestra de agua durante 5 días a 20°C. La incubación se realiza en oscuridad, para evitar la producción de oxígeno por algas, con dilución adecuada y pH controlado entre 7 y 7,5. Bajo estas condiciones, se degrada entre el 60% y el 70% de la materia orgánica carbonada en 5 días, mientras que la nitrificación del amoníaco comienza entre los 6 y 10 días. Valores elevados de DBO5 indican una alta concentración de materia orgánica biodegradable (Arango et al., 2020).

Dada la complejidad de los fenómenos físico-químicos que intervienen en los procesos de contaminación, es indispensable el uso de modelos de simulación asistida por ordenador como herramienta de apoyo para los técnicos. El modelo Qual2K se utiliza para realizar un diagnóstico hidrológico basado en la modelación del impacto de la materia orgánica en un río (Castillo, 2024). Este software es un modelo dinámico que simula la hidrodinámica de la calidad del agua en ríos y arroyos de bajo caudal, considerando zonas anóxicas, tramos longitudinalmente heterogéneos, así como fuentes puntuales y difusas de contaminación.

1.2. Planteamiento del problema

El acceso al agua potable y al saneamiento es reconocido como un derecho humano básico según el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6. No obstante, a pesar de este reconocimiento, la disponibilidad de agua para consumo humano sigue siendo un desafío complejo en muchas regiones, incluyendo la ciudad de Riobamba. Este desafío se amplifica por varios factores, como el crecimiento poblacional, la sobreexplotación de fuentes de agua superficiales y subterráneas, y la contaminación de los recursos hídricos tanto por eventos naturales como por actividades humanas.

La ONU estima que más del 80% de las aguas residuales provenientes de actividades humanas son vertidas en ríos o mares sin tratamiento previo, lo que resulta en una significativa contaminación. Esta contaminación es un factor crítico en la incidencia de enfermedades, particularmente entre niños menores de 5 años, donde más de 800 mueren diariamente debido a enfermedades diarreicas relacionadas con la falta de higiene adecuada (ONU, 2018).

Se calcula que solo el 10% de las aguas residuales urbanas reciben tratamiento en países de ingresos medios y bajos. A medida que aumenta la cantidad de aguas residuales sin tratar, los impactos negativos en la salud pública se agravan. El Banco Mundial señala que el acceso a un saneamiento adecuado es crucial para lograr buenos resultados en áreas como la agricultura, la energía, la adaptación a desastres, la salud humana, el medio ambiente y el crecimiento económico (Dahan & Kashiwase, 2016).

En Ecuador, la contaminación de los ríos debido al inadecuado manejo de las cuencas hídricas es motivo de creciente preocupación. En gran parte de las zonas rurales del país, no existe un manejo adecuado de las aguas residuales, lo que genera contaminación por la descarga de efluentes, como aguas grises y negras, provenientes de fuentes domésticas, industriales, agropecuarias y desechos sólidos, hacia cuerpos de agua como ríos y quebradas.

En 2020, a nivel nacional el 56,7% de las aguas residuales no tratadas fueron vertidas en ríos, el 36,1% en quebradas, y el porcentaje restante en otros cuerpos de agua dentro del mismo cantón (Terán et al., 2020). Entre 2018 y 2020, aumentó el porcentaje de vertimiento en otras categorías, como acequias, esteros, canales y el mar, pasando del 1,6% al 7,2% (Terán et al., 2020).

Es esencial comprender que el vertimiento de aguas residuales en ríos de montaña, sin evaluar previamente la capacidad autolimpiante de los mismos, compromete seriamente la sostenibilidad de los sistemas de agua potable. Esta situación afecta considerablemente los

recursos hídricos del país, disminuyendo la calidad de vida de la población y obstaculizando el desarrollo sostenible de la nación.

En el caso de Riobamba, con una población de 181,384 habitantes, el suministro de agua potable presenta deficiencias notables. Según datos de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Riobamba EMAPAR (2020), el servicio de agua no es continuo para la mayoría de los usuarios, obligando a un 38% de ellos a contar con el servicio en tres horarios, y a un 7% de usuarios a depender de tanqueros para obtener agua. Ante esta situación, el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Riobamba implementó el proyecto de captación de agua superficial Maguazo-Alao y la construcción de reservas en San Martín de Veranillo, con el objetivo de aumentar el caudal de agua en 500 l/s y mejorar la eficiencia del sistema.

Sin embargo, el problema fundamental se relaciona con la falta de información suficiente para el control y monitoreo de la calidad del agua en el río Maguazo. La implementación de un modelo de calidad del agua, como el QUAL2K, podría ser una herramienta invaluable para abordar esta problemática, permitiendo una planificación más efectiva y una simulación confiable del recurso hídrico ante diferentes intervenciones humanas o cambios naturales en la cuenca.

Por lo tanto, es importante abordar con urgencia la situación de la calidad del agua del río Maguazo y a través de la aplicación de un modelo matemático que responda a la pregunta de investigación:

¿La utilización del modelo QUAL2K para evaluar la calidad del agua en el río Maguazo permitirá identificar riesgos y mejoras en el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Riobamba?

1.3. Justificación de la Investigación

El agua es un recurso vital que se ve cada vez más afectado por la contaminación, lo cual impacta de manera directa en múltiples ecosistemas. Esta problemática es particularmente evidente en microcuencas como la del río Maguazo, donde las actividades humanas, tanto agrícolas como ganaderas, generan descargas de aguas residuales y de abrevaderos de animales directamente al cauce. Estas descargas no tratadas deterioran la calidad del agua, poniendo en riesgo la biodiversidad acuática y la disponibilidad de agua para las comunidades locales. Es imperativo, entonces, desarrollar estrategias sostenibles que permitan la conservación y recuperación de este recurso hídrico (Basantes & Andrade, 2022).

El manejo eficiente de los recursos hídricos es esencial para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, lo cual exige reconocer el valor del agua, medir su calidad de forma precisa y tomar decisiones informadas. Esto debe realizarse con la participación de las comunidades locales y el respaldo de las autoridades nacionales e instituciones clave como la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Riobamba (EMAPAR), que tiene un papel fundamental en la provisión de agua potable para la ciudad (UNESCO, 2021).

El río Maguazo no sólo es una fuente de agua crucial para las comunidades locales, sino también para la provisión de agua potable a la ciudad de Riobamba, a través de proyectos como el sistema de captación Maguazo-Alao que opera EMAPAR. Sin embargo, las descargas de aguas residuales y de abrevaderos de animales han generado problemas de contaminación que requieren ser cuantificados y gestionados. En este sentido, la necesidad de contar con información precisa sobre la calidad del agua se vuelve indispensable para que EMAPAR pueda desarrollar planes de acción efectivos, garantizando un suministro de agua de calidad para la ciudad.

El software QUAL2K se presenta como una herramienta robusta para modelar la calidad del agua en el río Maguazo. Este modelo permite simular los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la calidad del agua superficial, evaluando el impacto de diversas fuentes de contaminación. A través de la aplicación de este modelo, es posible cuantificar los efectos de las descargas de aguas residuales y de los abrevaderos de animales, proporcionando datos valiosos para la toma de decisiones de las autoridades locales y de EMAPAR. De esta manera, se podrán proyectar escenarios de gestión que minimicen el impacto ambiental y promuevan un uso sostenible del recurso hídrico.

La implementación del modelo QUAL2K ofrece una base científica sólida para evaluar la capacidad del río Maguazo para enfrentar las presiones locales de contaminación. La información generada será clave para la planificación de estrategias de conservación y el uso sostenible de los recursos hídricos, asegurando la sostenibilidad del suministro de agua potable gestionado por EMAPAR y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos de la región.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Modelar la calidad de agua en la parte baja del río Maguazo utilizando el software QUAL2K con el objetivo de contribuir a una gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Examinar las características geomorfológicas, hidrológicas y biológicas del río Maguazo en la zona de captación del proyecto de trasvase de agua superficial Maguazo-

Alao con el fin de comprender su importancia en el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Riobamba.

- Realizar la calibración del modelo matemático QUAL2K en la zona baja del río Maguazo, con el fin de evaluar la calidad de agua en esta área.
- Utilizar el modelo matemático QUAL2K para simular escenarios con el propósito de proponer alternativas para la conservación ambiental del río Maguazo.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1. Antecedentes Investigativos

La calidad del agua en los ríos es esencial para el bienestar humano y el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos. No obstante, muchas cuencas fluviales en el mundo han sido gravemente afectadas por la contaminación generada por actividades humanas, tales como descargas de aguas residuales sin tratamiento y prácticas agrícolas e industriales no reguladas.

Basantes & Andrade (2022), en su estudio "Evaluación de la calidad del agua del río Chibunga por medio del índice EPT", destacaron los efectos negativos de las descargas residuales en la calidad del agua de este río ecuatoriano. Los autores señalaron una disminución progresiva en la calidad del agua, desde niveles regulares en las partes altas hasta niveles malos en las zonas bajas, usando el índice EPT, un método basado en la presencia de insectos acuáticos indicadores.

A nivel internacional, en Perú, Mamani (2023), en el estudio Modelamiento de la Calidad del agua aplicando Qual2k para la Evaluación de Impactos Ambientales y Propuestas de Medidas de Mitigación en el canal Vista Alegre de Chorrillos en Lima, buscó evaluar cuantitativamente los impactos ambientales de acuerdo con el comportamiento de sus principales contaminantes, mediante la simulación de parámetros de calidad de agua. El estudio concluyó que, el modelo Qual2k, aporta en la comparación de los resultados con los estándares de calidad Ambiental vigente, demostrando que los parámetros de calidad de agua son muy sensibles a los caudales ingresados en los tramos que se definen en el estudio.

En un contexto similar, (Herrera & Carol, 2024) en su tesis “Aplicación del modelo QUAL2Kw en la evaluación de la calidad del agua en la cuenca del río Chillón, Perú”, utilizó un enfoque similar para modelar la calidad del agua en el río Chillón. Su trabajo permitió identificar los tramos críticos de la cuenca donde las descargas de efluentes no tratados tienen el mayor impacto, y propuso medidas correctivas basadas en la simulación de escenarios futuros, que incluyeron estaciones de tratamiento de aguas residuales en puntos clave.

Amezquita (2020), en su investigación “Implementación del modelo de calidad de agua QUAL2K sobre un tramo del río Pamplonita”, utilizó el modelo QUAL2K (Quality-Quantity 2K) para evaluar la calidad del agua en un tramo de este río colombiano, que recibe descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento. El estudio simuló diferentes escenarios de tratamiento y reveló que la construcción de una planta de tratamiento mejoraría significativamente la calidad del agua, permitiendo cumplir con los objetivos de calidad establecidos por las autoridades ambientales.

Otro estudio relevante es el de Bracho et al. (2016), quienes en su investigación “Evaluación del software Qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar (Colombia) impactados por actividad minera” En este estudio se aplicó el software Qual2k, considerando la dinámica individual de ríos afluentes del río Cesar, río Tocuy (en la Jagua de Ibirico), río Maracas (en Becerril) y río Calenturitas (La Loma corregimiento del municipio de El paso Cesar); los aportes de carga contaminante y las diferentes características fisicoquímicas de cada uno de estos, reconociendo procesos de contaminación que surgen en cada subcuenca. Los resultados indicaron que se aplicó correctamente el desempeño del modelo, debido a que la variación entre los parámetros medidos y los calculados se encuentran en un rango admisible.

En Ecuador, Caiza & Meléndez (2020), en su investigación “Modelamiento de la Autodepuración de la Acequia Pumamaqui, Comunidad de Pesillo, Cantón Cayambe” después de analizar los resultados laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito - Campus Sur, proceden a modelar los valores obtenidos, dando como resultado que el DQO con un 68,19 % y 76,84 %, DBO5 65,42 % y 92,88 %, Sólidos Suspendidos 68,43 % y 85,32 %, Nitratos 68,38 y 93,85 %, y Fosfatos 66,38 % y 85,32 %. Los autores reportan que la utilización del Software QUAL2K, determinando que la acequia Pumamaqui sí se logra una auto depuración satisfactoria.

2.2. Fundamentación Legal

Constitución de la República del Ecuador

En lo que respecta a la Constitución de la República del Ecuador, expresa en su Art. 14 el derecho que mantiene la ciudadanía para vivir y desarrollarse en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado asegurando de esta manera el Sumak Kawsay, de igual en su segundo capítulo denominado “Biodiversidad y Recursos naturales”, sexta sección se declara que: “el estado es el responsable de asegurar la conservación, recuperación y el manejo adecuado de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos”, además de regular actividades que puedan afectar la calidad y la cantidad del agua disponible siendo la prioridad la sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA)

La LORHUyA, publicada el 6 de agosto de 2014, define el marco normativo para la gestión del agua en Ecuador. Destaca la responsabilidad de la Autoridad Única del Agua para coordinar políticas sobre calidad del agua y control de la contaminación (Art. 18). Reconoce el

derecho de las personas a disponer de agua limpia y suficiente (Art. 57) y establece obligaciones para proteger los ecosistemas acuáticos y mantener el caudal ecológico (Art. 64).

Acuerdo Ministerial 097 (Texto Unificado de Legislación Secundario del Medio Ambiente - TULSMA).

Rigente a escala nacional nos indica en su Libro VI, Anexo 1 denominado “Norma de calidad Ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua”, apartado 5.1.1 “Criterios de calidad para aguas de consumo doméstico” que: pasan a ser aguas de consumo doméstico aquellas que han sido extraídas de cuerpos de hídricos tanto superficiales como subterráneos para ser sometidas a un tratamiento y que finalmente sean empleadas por individuos en actividades de bebida, preparación de alimentos, higiene personal y limpieza de elemento, materiales y utensilios (TULSMA, 2015).

NTE INEN 1108. Agua para consumo humano.

Se consideran aplicables para esta norma aquellas aguas que provienen de sistemas de abastecimiento y sistemas de distribución, incluyendo en esta última camiones cisterna o tanques y depósitos móviles (INEN 1108 2020). Por último, indica mediante su apartado 4, Tabla 1 los requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano.

Tabla 1: *Parámetros permisibles para aguas de consumo humano según la Norma INEN 1108 2020.*

Parámetro	Unidad	Límite Permisible
Arsénico	mg/L	0,01
Cadmio	mg/L	0,003
Cloro libre residual	mg/L	0,3 a 1,5
Cobre	mg/L	2,00
Color aparente	Pt-Co	15,00

Cromo (cromo total)	mg/L	0,05
Fluoruro	mg/L	1,50
Mercurio	mg/L	0,006
Nitratos (como NO ₃)	mg/L	50,00
Nitritos (como NO ₂)	mg/L	3,00
Plomo	mg/L	0,01
Turbiedad	NTU	5,00
Coliformes fecales	Numero/100 mL	Ausencia

Fuente: (INEN 1108, 2020).

Control de la Contaminación del Agua.

La contaminación del agua en Ecuador proviene de diversas fuentes, incluyendo descargas de aguas residuales urbanas, minería artesanal, actividades hidrocarburíferas y agricultura (Foros de los Recursos Hídricos, 2011). La falta de saneamiento adecuado y tratamiento de aguas residuales contribuye significativamente al deterioro de la calidad del agua. La cobertura de saneamiento a nivel nacional es del 64,51%, con una menor cobertura en áreas rurales (SENAGUA, 2016). Las descargas industriales y el uso de agroquímicos también afectan la calidad del agua, requiriendo estrategias de manejo y tratamiento para mitigar estos impactos (Párraga & Galarza, 2009).

Control de la Calidad del Agua en las Fuentes

El control de la calidad del agua en las fuentes es crucial para regular los usos autorizados y detectar problemas de contaminación. Aunque la información sobre la calidad del agua y los controles existentes está disponible, aún no se implementan de manera efectiva las medidas necesarias para abordar la contaminación y asegurar el acceso a agua de calidad (Escobar, 2002; Torre et al., 2009).

Control de Descargas Líquidas a Cuerpos Receptores

La regulación de descargas líquidas es gestionada por la Autoridad Ambiental Nacional y las Autoridades Ambientales de Aplicación Responsable. Se utilizan mecanismos como autorizaciones de vertidos y auditorías ambientales para controlar la calidad de las descargas. Para una gestión efectiva, es necesario mantener registros detallados de sustancias químicas y vertidos, así como planes de manejo y normativa de monitoreo (MAE, 2015; Montesdeoca & Granja, 2013).

Control de la Calidad del Agua Potable

El control de la calidad del agua potable abarca la evaluación del sistema de abastecimiento en su totalidad, desde las fuentes hasta el tratamiento y distribución. Se debe garantizar el cumplimiento de los límites máximos permisibles y prevenir riesgos para la salud mediante el monitoreo regular de las fuentes y la red de distribución (OMS, 2006).

2.3 Fundamentación Teórica

El modelo Qual2k ha demostrado ser efectivo para simular la calidad del agua en ríos. Pelletier (2022) confirmó su flexibilidad en entornos cambiantes. Domínguez (2005) usó Streeter & Phelps en La Habana para evaluar OD y DBO, resaltando su aplicabilidad en saneamiento. Zhang (2012) aplicó Qual2K en el río Hongqi en China, ayudando a establecer normas de gestión ambiental tras detectar un aumento en la DBO.

En Colombia, Lozano-Rivas (2012) mostraron la necesidad de mejorar el tratamiento y recolección de aguas residuales en Medellín y Cauca, respectivamente. En Ecuador, un estudio reciente David et al. (2024) en el río Tomebamba demostró la utilidad de estos modelos para gestionar los vertidos industriales.

2.3.1 Contaminación del agua

Orellana (2022), manifiesta que en un cuerpo hídrico puede contaminarse al recibir efluentes industriales, domésticos y agrícolas sin tratamiento previo. Estos vertidos alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua, provocando cambios que pueden afectar su calidad de diversas formas, impactando tanto el ecosistema como los usos del recurso hídrico.

2.3.2 Contaminación física

La contaminación física impacta directamente en la flora y fauna acuática al alterar las características físicas del agua, como el color, olor, sabor y temperatura. Entre los contaminantes más comunes se encuentran la materia orgánica y los compuestos de hierro, los cuales pueden causar modificaciones significativas en estos parámetros (Orellana, 2022).

2.3.3 Contaminación química

Este tipo de contaminación es causada por la descarga de efluentes líquidos con altas concentraciones de sustancias químicas que alteran el equilibrio del ecosistema acuático, afectando a los microorganismos y otros organismos vivos. Entre las sustancias más comunes se encuentran ácidos, detergentes, aceites y grasas, entre otros (Guadarrama et al., 2016).

2.3.4 Contaminación microbiológica

De acuerdo con Ortiz (2023), la contaminación biológica puede generarse por la presencia de bacterias, virus y parásitos, los cuales impactan negativamente a los seres vivos que habitan o se desarrollan en torno al cuerpo hídrico.

2.3.5 Parámetros de medición

2.3.5.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Considerando a Cirelli y Volpedo (2020), la DBO representa la cantidad de oxígeno requerido para descomponer la materia orgánica mediante procesos bioquímicos aeróbicos. Se expresa en miligramos por litro (mg/L) y está relacionada con la demanda ejercida por sustancias carbonadas, nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores. Esta medición cuantifica un fenómeno natural aparentemente simple, pero que en realidad es complejo.

El cálculo de la DBO se realiza midiendo el contenido inicial de oxígeno en una muestra y el remanente después de cinco días, en una muestra similar, mantenida en un frasco cerrado a una temperatura de 20 °C. La diferencia entre ambos valores es conocida como DBO₅, la cual es el estándar comúnmente utilizado. Sin embargo, según Cirelli y Volpedo (2020), el periodo de medición puede variar dependiendo de los requerimientos específicos, aunque cinco días es el más frecuente. Es importante destacar que la diversidad de microorganismos presentes en la muestra puede causar ligeras variaciones en los resultados.

2.3.5.2 Oxígeno Disuelto.

La presencia de oxígeno disuelto según CIMCOOL, (2011) es esencial en el agua, ya que proviene principalmente del aire. Niveles bajos o ausencia de oxígeno pueden ser indicativos de una elevada contaminación, condiciones sépticas causadas por la descomposición de materia orgánica o una intensa actividad bacteriana, por lo que se considera un importante indicador de contaminación. El OD en el agua cruda depende de factores como la temperatura, la presión y la mineralización, y se mide en miligramos por litro (mg/L).

Con base en Carrillo, (2013) la cantidad de oxígeno disuelto en el agua refleja los procesos biológicos que ocurren en el cuerpo hídrico. Este oxígeno se introduce principalmente por

intercambio con la atmósfera y mediante la fotosíntesis de los productores primarios. Sin embargo, los niveles de OD pueden disminuir significativamente en presencia de altas concentraciones de materia orgánica en descomposición, lo que compromete la supervivencia de las especies acuáticas.

2.3.5.3 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH influye en procesos importantes del agua, como la corrosión y la formación de incrustaciones en las redes de distribución. Aunque no tiene un impacto directo en la salud, sí afecta los tratamientos de agua, como la coagulación y la desinfección. Se recomienda que el pH del agua, tanto cruda como tratada, esté entre 5,0 y 9,0 ya que este rango controla su influencia sobre otros componentes (OMS, 2018).

2.3.5.4 Conductividad

La conductividad eléctrica del agua mide su capacidad para transportar corriente, la cual depende de la concentración de iones presentes, su movilidad, carga y temperatura, y se expresa en S/cm (Serrano & Martínez, 2015).

2.3.5.5 Temperatura

De acuerdo con Díaz & González, (2022) la temperatura es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, ya que influye en la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos y en procesos como la desinfección, mezcla, floculación, sedimentación y filtración. Factores ambientales pueden hacer que la temperatura varíe continuamente, y se expresa en °C.

Según Cirelli y Volpedo (2020), la temperatura afecta los procesos fisicoquímicos de los cuerpos acuáticos, como la solubilidad de gases y sales, y los comportamientos de los

microorganismos. Estos cambios pueden ocurrir por la interacción de corrientes de diferentes temperaturas o por alteraciones en la composición del agua.

2.3.5.6 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Con base en Norma Mexicana, (2015) los sólidos suspendidos totales (SST) corresponden a las partículas en el agua que no son solubles ni están en estado coloidal, generalmente superiores a un micrómetro, y se retienen mediante filtración en el laboratorio. Este parámetro es importante ya que la presencia de SST reduce el paso de la luz, afectando la fotosíntesis en los cuerpos de agua y, por ende, la producción de oxígeno. Se mide en miligramos por litro (mg/L).

2.3.5.7 Caudal

En dinámica de fluidos, el caudal se refiere a la cantidad de fluido que atraviesa una determinada área en un intervalo de tiempo. Generalmente, se expresa como flujo volumétrico, es decir, el volumen de fluido que pasa por una sección específica en un tiempo dado, medido en litros por segundo (L/s) o metros cúbicos por segundo (m^3/s), (Alvarado, 2017).

2.3.5.8 Nitritos y Nitratos

En los sistemas acuáticos y terrestres, los compuestos nitrogenados tienden a transformarse en el ion nitrato (NO_3^-), que es altamente soluble en agua. El ion nitrito (NO_2^-) se genera de manera natural a partir de los nitratos, ya sea por oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno o por reducción bacteriana en condiciones de baja oxigenación (Baeza, 2016).

De acuerdo con Greenpeace, (2022) el nitrito es menos estable que el nitrato, siendo altamente reactivo y capaz de actuar como agente oxidante o reductor. Por esta razón, solo se encuentra en cantidades significativas cuando los niveles de oxígeno son bajos.

El nitrato (NO_3^-) es la forma más relevante de nitrógeno en el ambiente, siendo una fuente clave de nutrientes para organismos autótrofos. Sin embargo, concentraciones elevadas de nitratos pueden desencadenar procesos de eutrofización. La presencia de estos compuestos se mide en miligramos por litro (mg/L) (Balcorta, 2010).

3 Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la investigación.

Para Hernández et al. (2014), El enfoque cuantitativo de la investigación permite recoger, procesar, y analizar datos cuantitativos o numéricos sobre variables previamente determinadas.

En el presente estudio de investigación, el enfoque de la investigación se determina como cuantitativo, al identificar y evaluar los parámetros hidrológicos a través de la recolección y el análisis de datos numéricos y cuantitativos, proporcionando una evaluación detallada y precisa de la calidad de agua mediante el Software QUAL2K.

3.2 Diseño de la investigación.

El diseño no experimental es el estudio que se realiza sin manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos (Hernández et al., 2014).

El diseño de investigación es no experimental porque no existe una manipulación de las variables utilizadas para establecer una relación sistemática y empírica, a través del software QUAL2K, permite simular diferentes escenarios validando los hallazgos de los datos analizados, mediante diferentes ensayos de laboratorio, determinando las condiciones de las muestras analizadas. Los datos obtenidos se utilizan para identificar los patrones que podrían alterar la salud del ecosistema acuático y los factores que influyen en la calidad del agua de la parte baja del río Maguazo.

3.3 Tipo de investigación

3.3.1 Investigación aplicada.

Según su propósito la investigación es de tipo aplicada, de acuerdo con Escudero et al. (2018), se caracteriza por considerar los fines prácticos de los conocimientos, planteando como objetivo desarrollar un conocimiento técnico permitiendo dar una solución inmediata a una situación determinada. Este tipo de estudio representa un gran valor a los posibles resultados de una investigación básica determinando nuevos métodos para conseguir los objetivos (Monjarás & Kimberly, 2021).

En este estudio se llevó a cabo un tipo de investigación de nivel aplicada. Dado que busca modelar la calidad de agua en la parte baja del río Maguazo, a través del modelo matemático QUAL2K, permitiendo conocer la situación actual del campo de estudio, mediante la identificación de los tramos y reconociendo los puntos adecuados para realizar los aforos, toma de datos in-situ y muestreos.

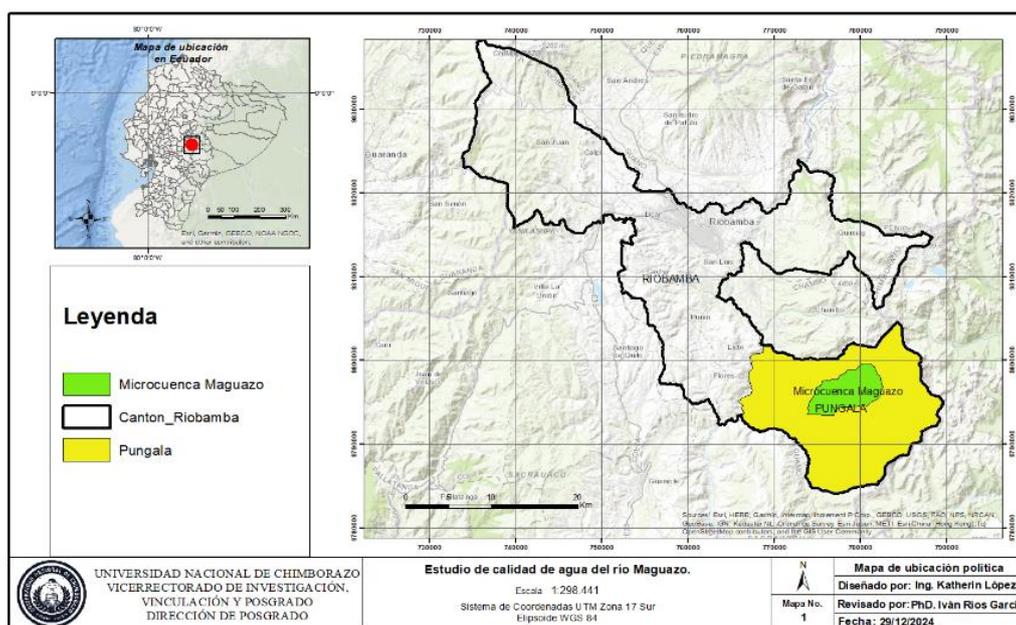
3.3.2 Nivel de investigación

Se lleva a cabo un nivel descriptivo debido a que se detallan características geomorfológicas, hidrológicas y biológicas de la parte baja del río Maguazo, y se realiza un modelamiento de la calidad de agua. De acuerdo Cabezas Damián et al. (2018), indican que este nivel de investigación describe situaciones, eventos o hechos según los datos recolectados y las mediciones realizadas.

3.3.3 Área de estudio

El presente estudio corresponde a la microcuenca del río Maguazo ubicada en la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba parroquia de Pungalá a 40 km de la ciudad de Riobamba, dentro de las comunidades de Peltetec y Shullidis (Figura 1).

Figura 1: Mapa de ubicación de la microcuenca del río Maguazo.



Fuente: Autor

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Considerando que la investigación es del tipo cuantitativa los datos se obtienen a través de la revisión de documentos, toma de muestras y su análisis. Por lo cual se considera la metodología pertinente para cada situación.

3.4.1 Técnica de muestreo

Tomando en cuenta los requerimientos del proyecto de investigación y las opciones presentadas en la normativa NTE INEN 2176 (2013), se considera que la técnica de muestreo adecuado es un método de muestreo puntual, puesto que permite identificar la calidad del agua

en un momento y espacio determinado, además de considerarse idóneo para cuando el cuerpo hídrico presenta un flujo de agua irregular, finalmente considera también la toma de parámetros in situ, que son necesarios para el estudio.

3.4.2 Envases de la muestra

Según la norma, los envases para la toma de muestras de agua deben evitar la contaminación o modificación de la misma, por lo cual se recomienda el uso de recipientes con características específicas que limiten su modificación, por lo que se decide el uso de botellas de vidrio Winkler y botellas plásticas con características específicas, de igual manera se utilizará la metodología establecida en la NTE INEN 1108 para el aforado de envases.

3.4.3 Etiquetado de muestra

Considerando la normativa INEN 1108 (2020), en el documento 2169 el rotulado de la muestra debe indicar claramente lugar de procedencia de la muestra, fecha y hora en la que es tomada, punto al que corresponde y nombre del técnico que la toma.

3.4.4 Preservación de la muestra

La muestra debe ser conservada a una temperatura adecuada, de lo contrario las características químicas y microbiológicas podrían ser modificadas, por lo cual estas deberán ser colocadas dentro de un recipiente especializado (cooler) mismo que cuenta con bolsas de hielo o gel frío que permita mantener una temperatura estable (INEN, 2013b) documento 2169.

3.4.5 Transporte de la muestra

En cumplimiento de lo que establece la normativa NTE INEN 2176 (2013), la muestra debe ser transportada de manera segura, evitando que esta pueda ser derramada y contaminada,

de igual manera en función del parámetro a medir, origen de la muestra y tipo de agua que almacena. Se considera que el transporte debe ser estable evitando movimientos bruscos.

3.4.6 Materiales

- Envases de vidrio Winkler
- Envases de plástico boca ancha
- Cooler
- Bolsa de hielo
- Cinta masking
- Marcador
- Botas
- Cinta métrica
- Medidor de pH

El presente estudio se desarrolló en tres etapas, diseñadas para abordar de manera integral la caracterización, modelación de la calidad de agua del río Maguazo en el contexto del proyecto de trasvase de agua superficial Maguazo-Alao.

Cada etapa responde a objetivos específicos que garantizan un análisis técnico y detallado del ecosistema acuático y sus dinámicas hidrológicas.

3.5 Etapa 1: Caracterización geomorfológica, biológica e hidrológica del río Maguazo en la zona de captación del proyecto de trasvase de agua superficial Maguazo-Alao.

Esta etapa tuvo como objetivo recopilar y analizar información básica sobre la microcuenca del río Maguazo, estableciendo una línea base con datos relevantes sobre las características físicas, químicas e hidrológicas de la microcuenca.

Estos datos son fundamentales para entender el contexto ambiental y los procesos naturales de la zona de captación.

3.5.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio fue caracterizada en términos de:

- **Aspectos geospaciales:** Se utilizaron datos geográficos obtenidos de instituciones como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y estudios previos relevantes. Se elaboraron mapas temáticos que incluyen elevación, pendiente y uso del suelo.
- **Aspectos climáticos:** Se documentaron las condiciones de precipitación, temperatura en la región utilizando registros históricos disponibles y modelos climáticos recientes. Estos datos fueron fundamentales para analizar el clima en la microcuenca.
- **Aspectos sociales:** Se describieron los usos del suelo y las actividades humanas predominantes, tales como agricultura y ganadería, que impactan directamente en la calidad del agua.

3.5.2 Recopilación de información disponible

Se sistematizaron datos primarios y secundarios esenciales para la caracterización y modelación de la microcuenca del río Maguazo. Este proceso permitió integrar información espacial, climática, y ambiental (Castro et al., 2021).

- **Sistema ambiental**

Se consultó información en planes técnicos y normativos, como los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (ANA, 2021), que proporcionaron información sobre los objetivos de calidad de agua fuentes superficiales, priorización de áreas críticas y estrategias de manejo sostenible.

- **Condiciones climáticas e hidrológicas**

- ✓ **Datos hidrometeorológicos:** Se obtuvo un registro de series temporales de estaciones locales y bases globales como Terra-Climate, ERA5 y CHIRPS, validadas mediante análisis estadísticos como correlación y regresión lineal (Ruiz et al., 2023).
- ✓ **Cobertura y uso del suelo:** Utilizando imágenes satelitales y SIG, se clasificaron las coberturas actuales y se analizaron las tendencias históricas (Gómez-Delgado et al., 2022).

- **Presiones ambientales**

Se georreferenciaron sitios de vertimientos y actividades antropogénicas mediante inspecciones de campo, donde se identificó puntos críticos que contribuyen a la carga contaminante del río Maguazo.

3.5.3 Caracterización geomorfológica

La caracterización geomorfológica de la microcuenca del río Maguazo se desarrolló mediante un análisis detallado de mapas topográficos, imágenes satelitales y datos de modelos digitales de elevación (DEM), utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ArcGIS. Este análisis incluyó los siguientes componentes:

3.5.3.1 Delimitación de la Microcuenca

Para la delimitación de la microcuenca, se utilizó el Modelo Digital de Terreno (MDT), complementado con la red de drenaje y herramientas SIG especializadas que facilitaron la identificación precisa de las divisorias de aguas. Este proceso permitió establecer la cartografía básica y validar los límites de la microcuenca con datos obtenidos en campo.

3.5.3.2 Caracterización Morfométrica

La caracterización morfométrica se centró en analizar los rasgos físicos, de forma, de relieve y del sistema de drenaje, los cuales tienen un impacto directo en el régimen hidrológico. Estos parámetros numéricos permiten cuantificar las características geomorfológicas de la microcuenca y establecer relaciones comparativas con otras áreas similares (López et al., 2021).

3.5.4 Parámetros Físicos

Área de drenaje de la microcuenca:

- Se delimitó la cuenca utilizando el algoritmo *Fill y Watershed* en ArcGIS, que permiten corregir depresiones en el MDE y calcular la red de flujo.
- A partir de la delimitación, se calculó el área total con la herramienta *Calculate Geometry*.

Perímetro de la microcuenca:

Con la delimitación de la cuenca en ArcGis se calculó el perímetro de la microcuenca a través de la herramienta *Calculate Geometry*, la cual se mide a partir del punto de interés del cauce (Ricce & Robles, 2014)

3.5.5 Longitud y Ancho de la microcuenca:

Longitud Axial (Km):

Es la distancia entre la parte más alta de la microcuenca y la desembocadura, medición que se realiza en línea recta mediante la regleta en ArcGis, (Tacusi & Hacha, 2015).

Ancho de la microcuenca (W):

De acuerdo con Tacusi & Hacha (2015); Se define como la relación entre el área y la longitud axial de la microcuenca, calculada con la siguiente ecuación.

$$W = \frac{A}{L_a} \quad (1)$$

Donde:

A: Superficie de la cuenca (km²)

L_a: longitud axial de la microcuenca (km)

3.6 Parámetros de Forma

Los parámetros de forma sirven para describir y analizar la forma, estructura, y características físicas, utilizados para analizar el comportamiento hidrológico de una microcuenca, tales como la escorrentía, velocidad de concentración y la susceptibilidad a inundaciones, entre los principales tenemos:

3.6.1 Índice de compacidad o índice de Gravelius (KC):

Está determinado por el perímetro de la microcuenca, entre el perímetro de una circunferencia con la condición de que tengan la misma área, definiendo la forma y la superficie que abarca la cuenca (Zhicay, 2020).

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Kc = \frac{0,28 * P \text{ cuenca}}{\sqrt{A \text{ cuenca}}} \quad (2)$$

Donde:

P: perímetro de la microcuenca (Km)

A: área de la microcuenca (Km²)

Tabla 2: Clasificación del índice de compacidad o Gravelius.

KC	Clasificación	Interpretación Ambiental
1a 1,25	Casi redonda a oval-redonda	Alta tendencia a inundaciones
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-alargada	Media tendencia a inundaciones
1,5 a 1,75	Oval alargada a alargada	Baja tendencia a la inundación
>1,75	Alargada	Cuencas propensas a la conservación

Fuente: Villela e Matos (1975), citado por (Zhicay, 2020)

3.6.2 Factor de forma Horton (Ff):

Está relacionado entre el ancho de la cuenca (w) y la longitud de la cuenca (L), el cual se determina la forma de la cuenca.

$$Ff = \frac{w}{L} \quad (3)$$

Donde:

A: Ancho de la cuenca (km)

L_a: Longitud de la cuenca (km)

Tabla 3: Factor de Forma de Horton

Rango de Valores	Forma de la Cuenca
<0,22	Muy Alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,3 - 0,37	Ligeramente alargada
0,37 - 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 - 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 - 0,80	Ensanchada
0,80 - 1,12	Muy Ensanchada
>1,20	Rodeando el desagüe

Fuente: Villela e Matos (1975), citado por (Zhicay, 2020).

3.6.3 Índice de alargamiento (I_a):

Relaciona la longitud máxima de la cuenca con su ancho máximo medido perpendicularmente a la dirección anterior (Cañibano et al., 2016).

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_a = \frac{L_a}{W} \quad (4)$$

Donde:

L_a : Longitud axial de la cuenca (km)

W : Ancho de la cuenca (km)

Tabla 4: Clasificación del índice de alargamiento.

Rangos de I_a	Clases de alargamiento
0 - 1,4	Poco alargada
1,5 - 2,8	Moderadamente alargada
>2,9	Muy Alargada

Fuente: Cañibano et al., (2016)

3.6.4 Índice asimétrico:

Es la relación del área de las vertientes mayor y menor las cuales son separadas por el cause principal, evalúa la homogeneidad en la distribución de la red de drenaje (Pomca, 2010).

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_{AS} = \frac{A_{mayor}}{A_{menor}} \quad (5)$$

Donde:

I_{AS}: Índice Asimétrico

A_{mayor}: Vertiente mayor (km²)

A_{menor}: Vertiente menor (Km²)

Tabla 5: Clasificación del índice asimétrico

K_f	Características
I _{AS} >1	Cause principal bastante recargado a una de las vertientes.
I _{AS} =1	Distribución uniforme del cauce principal.

Fuente: Pomca, (2010)

3.6.5 Características de Relieve

Las características del relieve sirven para comprender y gestionar como influye en la forma que el agua, los suelos y ecosistemas interactúan en un área específica entre ellos tenemos:

3.6.6 Pendiente media de la cuenca.

La pendiente media es la caracterización del relieve de una cuenca Hidrográfica que tiene relación con infiltración. Para realizar el cálculo de la pendiente media de la cuenca, se realiza mediante la delimitación de la cuenca en ArcGis, creando un mapa de pendientes a través

de un Raster (Archivo Tiff), con la herramienta *Spatial Analyst tools – Zonal Statistics as Table*. A partir del proceso se obtiene el valor de la pendiente media en porcentaje (%).

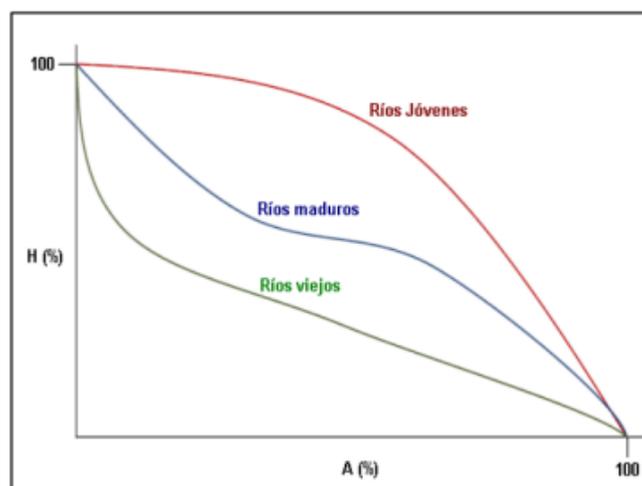
3.6.7 Curva hipsométrica:

Es la representación gráfica de la variación de altitud que se presenta en una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico, es decir es la gráfica del área acumulada a medida que descendemos de la cuenca (Zhicay, 2020).

La cuenca puede presentar diferentes tipos de curva hipsométrica debido a su evolución (edad del río) permitiendo definir características fisiográficas (Zhicay, 2020):

- ✓ **Cuenca con ríos jóvenes:** presentan gran potencial de erosivo.
- ✓ **Cuenca con ríos maduros:** se encuentran en estado de equilibrio.
- ✓ **Cuenca con ríos viejos:** son sedimentarios (Aza et al., 2018).

Figura 2: Tipos de Curvas Hipsométricas.



Fuente:(Aza et al., 2018)

3.7 Características del Sistema de Drenaje

Las características de drenaje son importantes, puesto que nos permite conocer cómo se distribuye y moviliza el agua en su interior, entre las principales características tenemos:

3.7.1 Longitud del cauce.

Es la dista del cauce principal de un rio receptor hasta su nacimiento. Se suma junto con la longitud de los cauces secundario (Lcs) de la longitud total de cauce (Ltc). Este parámetro influye en el tiempo de concentración y la mayoría de los índices morfométricos, se obtienen a partir de mapas digitalizados de la red de drenaje, que se puede calcular mediante ArcGIS (Ricca & Robles, 2014).

3.7.2 Perfil del cauce:

El perfil del cauce es la línea que dibuja la cuenca desde su nacimiento hasta el sitio de estudio se representa gráficamente como una curva cuya forma ideal es la de una curva exponencial cóncava hacia arriba, se puede calcular mediante ArcGIS (Pomca, 2010).

3.7.3 Tiempo de concentración:

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida (Zhicay, 2020)

Se calcula con la siguiente ecuación.

$$Tc = 0,0194 * \left(\frac{Lr^{0,77}}{S^{0,365}} \right) \quad (6)$$

Donde:

Lr: Longitud del río

S: pendiente del cauce principal

3.7.4 Medición de Caudales

Se realizaron mediciones de caudales en puntos estratégicos, empleando métodos de medición con flotador y análisis indirectos basados en fórmulas hidrológicas (Barreto & Espinoza, 2011). Para este fin se tiene que conocer el área de la sección y la velocidad del agua.

$$V = L * H * A \quad (7)$$

$$Q = V/T \quad (8)$$

Donde:

L: Largo del tramo

H: Profundidad promedio de la sección.

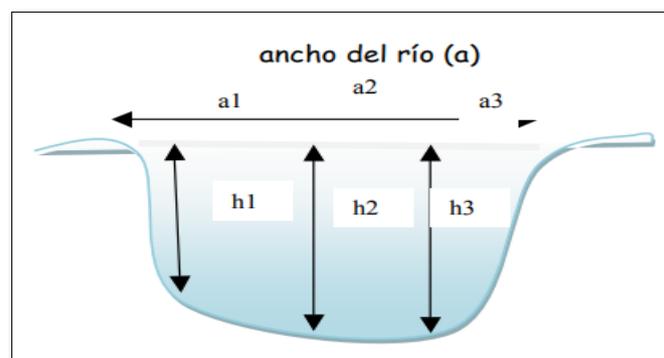
A: Promedio de anchos

V: Volumen final.

T: Tiempo promedio del recorrido por el flotador

Q: Caudal

Figura 3: divisor del ancho del río.

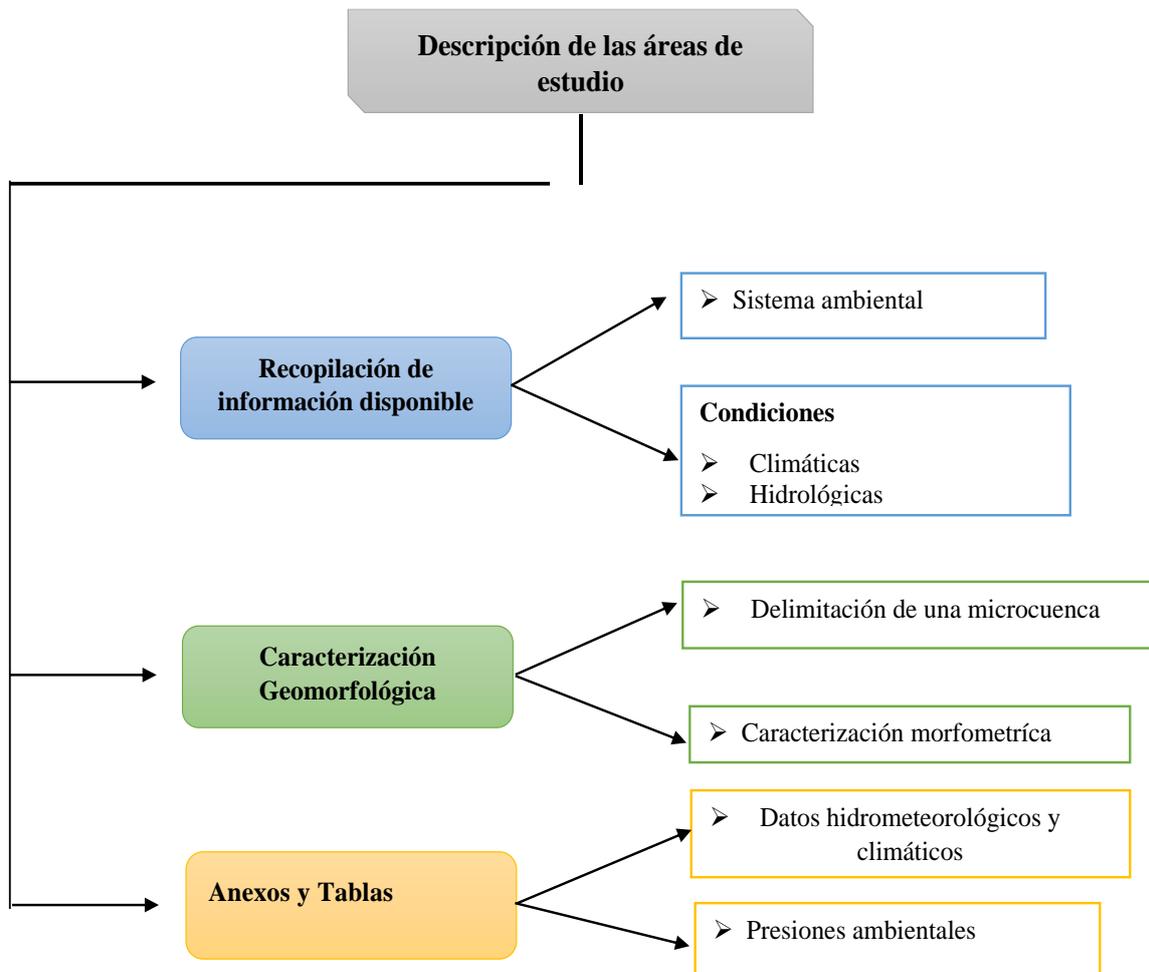


Fuente: (Barreto & Espinoza, 2011)

3.7.5 Procesamiento y Validación

Los datos geomorfológicos fueron procesados y verificaron utilizando herramientas SIG y técnicas estadísticas. Este proceso garantizó la precisión de las mediciones (Pérez et al., 2022).

Figura 4: Flujograma en base al desarrollo del primer objetivo: Etapa 1.



Fuente: Autor

3.8 Etapa 2: Calibración del modelo matemático QUAL2K en la zona baja del río Maguazo, con el fin de evaluar la calidad de agua en esta área.

En esta etapa, se implementó el modelo matemático QUAL2K (Q2K) para simular y evaluar la calidad del agua en la parte baja del río Maguazo. La metodología incluyó la identificación de puntos estratégicos de monitoreo, la recopilación de datos hidráulicos, fisicoquímicos y la segmentación de tramos representativos para el modelado. Estas actividades permitieron generar una representación precisa de las condiciones actuales del río Maguazo, que se toma como base para el análisis de escenarios.

3.8.1 Descripción geográfica del tramo del río modelado

Se realizó una caracterización inicial del terreno mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permitió identificar las características topográficas e hidrológicas, así como las fuentes puntuales de vertimientos que afectan al cuerpo de agua en estudio. La creación de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución fue clave para determinar pendientes, divisorias de agua y posibles zonas de acumulación y dispersión de contaminantes (ANA, 2021; IDEAM, 2021).

3.8.2 Esquematización del tramo del río modelado

Con base en el DEM y el análisis de flujo hídrico, el tramo del cuerpo de agua se subdividió en secciones homogéneas. Esta segmentación se realizó mediante herramientas SIG y algoritmos de redes de drenaje que consideran variables como longitud del tramo, áreas de influencia de vertimientos y conectividad entre puntos críticos de interés (ANA, 2020; IDEA, 2021).

3.8.3 Identificación de puntos críticos

Se definieron los puntos en los cuales se realizaron las mediciones para la modelación de la autodepuración del río Maguazo.

Se aplicaron criterios de accesibilidad y seguridad para garantizar el monitoreo periódico y confiable.

- Puntos de vertimiento directo.
- Sectores aguas abajo de actividades antropogénicas intensivas
- Sitios representativos de la calidad base del agua, aguas arriba de los vertimientos.
- Lugares de confluencia de afluentes secundarios con potencial aporte contaminante.

Una vez identificados los puntos mediante SIG, se realizaron visitas de campo para verificar su viabilidad. Este proceso incluyó la medición de coordenadas exactas con GPS de alta precisión, el análisis visual de las condiciones del sitio y pruebas preliminares de calidad del agua (IDEAM, 2021).

3.8.4 Programación de toma de muestras

Consistió en realizar mediciones de aforo, parámetros de campo y toma de muestras, para el análisis de laboratorio. Los parámetros necesarios para la implementación del modelo y su calibración se obtuvieron a partir de muestras de agua tomadas y preservadas en campo para un posterior análisis de laboratorio.

3.8.5 Configuración inicial del modelo QUAL2K

El modelo matemático QUAL2K (EPA, 2007) es una herramienta computacional desarrollada para la simulación de parámetros (Tabla 6) de calidad del agua en ríos y arroyos, basada en ecuaciones de transporte de masa y procesos biogeoquímicos. Este modelo opera

bajo una interfaz de Excel con programación en Visual Basic, integrando múltiples variables, como dinámica de nutrientes, producción algal, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y parámetros hidráulicos, geográficos y meteorológicos.

Tabla 6: Parámetros a modelar en el modelo QUAL2K sobre el río Maguazo.

Parámetro	Unidades
pH	
Conductividad eléctrica	uS/cm
Oxígeno Disuelto	mg/L O ₂
Temperatura del agua	oC
Fisicoquímicos	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L
Nitratos	mg/L
Fósforo Total	mg/L

Fuente: Autor

Entre las principales características del modelo destacan:

- a) **Ecuaciones gobernantes:** QUAL2K utiliza ecuaciones de advección-dispersión con fuentes y sumideros para modelar la dinámica longitudinal de la calidad del agua en cuerpos de agua bien mezclados lateral y verticalmente.
- b) **Segmentación del río:** El modelo divide el sistema fluvial en segmentos computacionales homogéneos, considerando variaciones en velocidad, profundidad, dispersión, descargas puntuales y cambios en la geomorfología.
- c) **Parámetros físico-químicos y biológicos:** El modelo incorpora la capacidad de especificar coeficientes variables para procesos como fotosíntesis, respiración, demanda de oxígeno y nitrificación, ajustados según las características del segmento analizado.

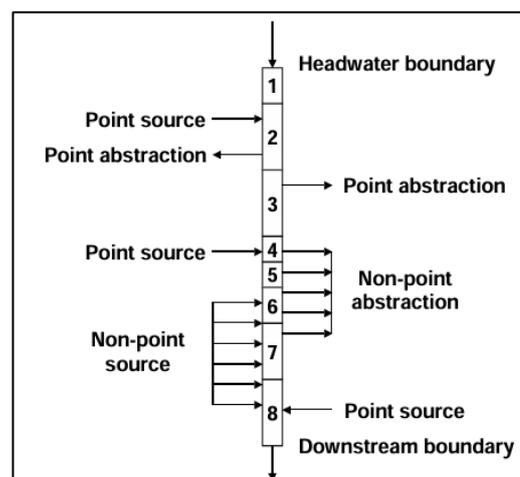
- d) **Estado estacionario y dinámico:** En estado estacionario, QUAL2K permite evaluar el impacto de descargas constantes sobre la calidad del agua. En estado dinámico, es útil para simular variaciones diurnas, como las asociadas a la temperatura y el oxígeno disuelto debido a la actividad algal (Odel et al., 1998).

El modelo ha sido ampliamente validado y utilizado en investigaciones científicas y aplicaciones prácticas, destacándose como un estándar en la evaluación de calidad de agua en ríos (Brown y Barnwell, 1987; Melching y Yoon, 1996). Su flexibilidad y capacidad de calibración lo hacen ideal para adaptarse a las condiciones específicas de la microcuenca del río Maguazo.

Se realizó un esquema donde se definen entradas, salidas y características del sistema a modelar. En esta etapa se pretende ubicar los elementos que afectan la calidad del agua. Se contemplan los siguientes aspectos:

- 1) **Esquemización del sistema:** Se realizó una segmentación del sistema donde se ramifica el cuerpo de agua de acuerdo con los sitios donde se den las principales transformaciones de calidad del agua.

Figura 5: Esquema de segmentación QUAL2K.



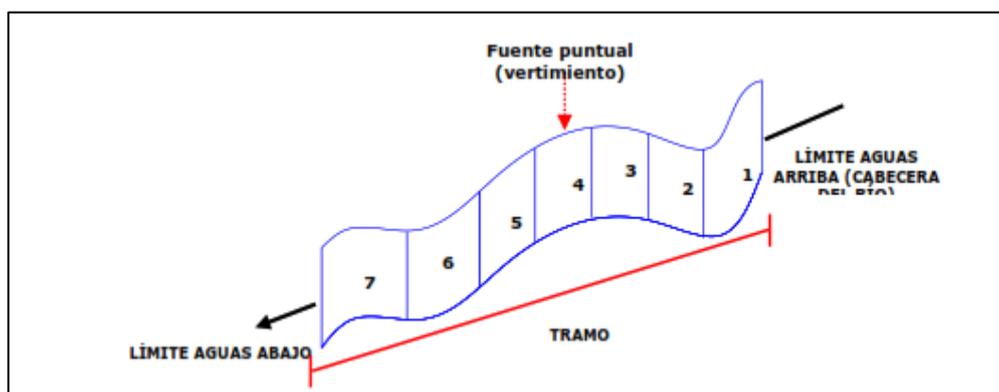
Fuente: Chapra & Pelletier, 2003

- 2) **Procesos y variables a simular:** Se seleccionaron las variables físicas, químicas, microbiológicas e hidrobiológicas que se incluyen en el modelo, basadas en los procesos dominantes identificados en el sistema o las problemáticas de contaminación existente.
- 3) **Condición climática:** la capacidad de asimilación y dilución de los contaminantes está influenciada por la magnitud del vertimiento y el volumen de agua que se encuentre en el cuerpo receptor. De acuerdo con lo anterior, la capacidad de asimilación está en función de las condiciones hidrológicas del cuerpo de agua. Por tanto, es importante conocer los flujos, características de transporte y condiciones de calidad del agua. Estos flujos dependen en gran manera de las variaciones estacionales y las precipitaciones en la zona.

3.8.6 Modelo hidráulico

El modelo hidráulico incluido en QUAL2K representa la parte del río que se estudia como una serie de tramos con características hidráulicas similares. Los tramos son numerados en orden ascendente iniciando desde la cabecera del río (Figura 6). A su vez, cada tramo puede ser subdividido en series de elementos igualmente espaciados, que corresponden a las unidades fundamentales de cómputo.

Figura 6: Esquema de segmentación de QUAL2K.



Fuente: Chapra & Pelletier, 2003

En cada elemento se lleva a cabo un balance de flujo de estado estable con la ecuación

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \quad (9)$$

Donde:

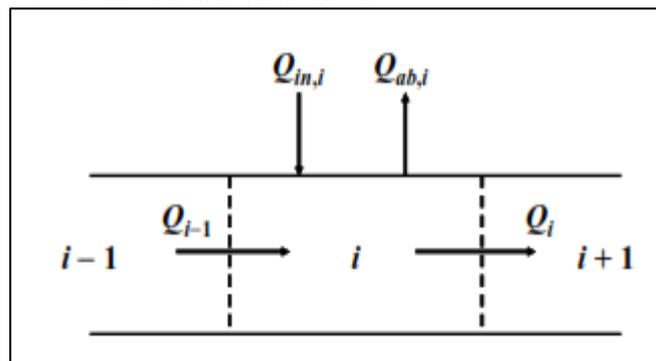
Q_i : es el caudal que sale del elemento i y entra al elemento $i + 1$ [m^3/d],

Q_{i-1} : corresponde al caudal que ingresa desde el elemento anterior $i - 1$ [m^3/d],

$Q_{in,i}$: es el caudal total que ingresa al elemento desde fuentes puntuales (vertimientos) o no puntuales (escorrentía) [m^3/d],

$Q_{ab,i}$: indica el caudal total que sale del elemento debido a captaciones puntuales (bocatomas) y no puntuales (desbordamientos) [m^3/d] (Figura 7) (Chapra & Pelletier, 2003).

Figura 7: Balance del caudal de alcance



Fuente: Chapra & Pelletier, 2003

Una vez el flujo de cada elemento es calculado, la profundidad y velocidad del canal son determinadas mediante uno de tres métodos: vertederos, curvas de calibración y ecuaciones de Manning. Las “curvas de calibración” son el método utilizado para evaluar las variables hidráulicas en cuerpos de agua naturales en donde el flujo no es uniforme.

Las “curvas de calibración” o ecuaciones de poder (algunas veces llamadas Ecuaciones de Leopold-Maddox) pueden ser usadas para relacionar la velocidad media y la profundidad con el caudal para los elementos en un tramo (Ecuaciones 10 y 11).

$$U = aQ^b \quad (10)$$

$$H = aQ^\beta \quad (11)$$

Donde: a, b, α y β : son coeficientes empíricos determinados a partir de curvas de calibración de profundidad-caudal y velocidad-caudal, respectivamente. Los exponentes b y β típicamente toman valores entre 0,4 y 0,6 para b y entre 0,3 y 0,5 para β .

3.8.7 Modelo de calidad de agua

3.8.7.1 Relación estequiométrica.

$$100gD: 40gD: 7200mgH: 100mP: 100mgA \quad (12)$$

Donde:

D: Peso total de nitrógeno orgánico.

N: Nitrógeno

C: Carbono

P: Fósforo

A: Clorofila a

$$SST = SSF + SSV \quad (13)$$

Donde:

SST: Sólidos Suspendidos Totales

SSF: Sólidos Suspendidos Fijos

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles

$$SSV = DEtritus + fitoplantón \quad (14)$$

$$SSI = 0,15 * SST \quad (15)$$

Donde:

SSI: Sólidos Suspendidos Inorgánico

SST: Sólidos Suspendidos Totales

$$SSV = 0,85 * SST \quad (16)$$

$$MoP = SSV - ChA * r_{Dia} \quad (17)$$

Donde:

MoP: Materia orgánica de fosforo

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles

ChA: Clorofila A

$$Norg = Nto - Namo - Nitritos - Nitratos - Cha * r_{N:A} \quad (18)$$

$$r_{N:A} = \frac{7200mgN}{1000mgA} \quad (19)$$

Donde:

Norg: Nitrógeno orgánico

Ntot: Nitrógeno total

ChA: Clorofila A

$$Cf = DBO_5 \quad (20)$$

$$C_s = DBO_u - DBO_5 \quad (21)$$

$$e_{(T)}^0 = 0,6108 * e^{\frac{17,27*T}{T+273,3}} \quad (22)$$

$$T_{rocio} = \frac{116,91 + 273,3 * Lne_a}{16,78 - Lne_a} \quad (23)$$

$$e_a = e(T)^0 * \frac{H.R}{100} \quad (24)$$

3.8.8 Información de entrada del modelo

El modelo QUAL2K requiere que el usuario posea un nivel adecuado de experiencia en modelación, ya que necesita proporcionar entradas individuales, muchas de las cuales dependen de estimaciones y análisis técnicos. Estas entradas se agrupan en tres categorías principales: sistema de corriente/río, variables globales y funciones forzadas.

- a) **Geometría del sistema de corriente/río:** Describe las características físicas del río o corriente de agua en un formato compatible con el modelo.

- b) **Variables globales:** Incluyen parámetros como unidades, tipo de simulación, características generales de calidad del agua y atributos físicos de la cuenca.
- c) **Funciones forzadas:** Representan entradas específicas proporcionadas por el usuario que controlan el sistema modelado.

La configuración de las entradas varía según el tipo de simulación y la cantidad de variables de estado seleccionadas. Estudios recientes han señalado la importancia de integrar datos de calidad del agua y parámetros hidrológicos calibrados para mejorar la precisión del modelo (Liu et al., 2022; Mahato & Karmakar, 2020).

En el modelo se usan colores en las celdas para identificar si la información debe ser ingresada por el usuario o si corresponden a resultados del programa. Las celdas azules corresponden a las variables de diseño y los valores de los parámetros que deben ser ingresados por el usuario. Las celdas amarillas son los datos medidos en campo que deben ser ingresados por el usuario. Estos datos posteriormente se muestran en las gráficas generadas por el modelo QUAL2K. Las celdas verdes corresponden a los resultados tabulares del modelo y las celdas rojas corresponden a los resultados gráficos.

3.8.8.1 Hoja de trabajo inicial:

La hoja de trabajo “QUAL2K” sirve para introducir información general sobre el modelo (Figura 8) que incluye:

Nombre del río: Identifica el cuerpo de agua modelado.

Nombre del archivo guardado: Corresponde al nombre del archivo de datos, se genera cuando se ejecuta QUAL2K.

Directorio del archivo guardado: Especifica la ubicación completa donde se guarda el archivo, junto con los datos de mes, día, año y huso horario.

La hora de verano: Un menú desplegable permite especificar si el horario de verano está en vigor (Sí o No).

Paso de cálculo: Define el intervalo de tiempo utilizado en los cálculos, seleccionable desde un menú desplegable.

Número de días: Esto define la duración de la operación, debe ser un entero mayor que cero o igual a dos días. Esta restricción se impone porque el modelo se ejecuta en un modo de tiempo variable hasta alcanzar un estado estable. Por lo tanto, el primer día de la simulación es, por definición, dominado abrumadoramente por sus condiciones iniciales. Si el usuario introduce un valor inferior a dos días, el programa establece automáticamente la última vez a 2 días. El tiempo final debe ser de al menos dos veces el tiempo de viaje del río.

Figura 8: Hoja de trabajo QUAL2K

QUAL2K FORTRAN Stream Water Quality Model Steve Chapra, Hua Tao and Greg Pelletier Version 2.07		
System ID:		<input type="button" value="Open Old File"/> <input type="button" value="Run Fortran"/>
River name	Rio Maguazo	
Saved file name	Rio_Maguazo	
Directory where file saved	D:\QUAL2K\Datafiles	
Month	10	
Day	13	
Year	2024	
Time zone	Eastern	
Daylight savings time	No	
Calculation:		
Calculation step	0.03 hours	
Final time	4 day	
Solution method (integration)	Euler	
Solution method (pH)	Bisection	
Program determined calc step	0.023438 hours	
Time of last calculation	0.02 minutes	
Time of sunrise	5:31 AM	
Time of solar noon	11:34 AM	
Time of sunset	5:36 PM	
Photoperiod	12.07 hours	

Fuente: Autor

Método de solución Integración de variables de estado: El usuario puede elegir entre tres métodos numéricos.

1. Método de Euler,
2. Runge-Kutta de cuarto orden
3. Método adaptativo de paso del tiempo.

El método de Euler fue seleccionado para este estudio, ya que proporciona resultados precisos con una tasa de cálculo moderada.

Método de solución (pH): Un menú desplegable le permite elegir entre dos métodos numéricos para la solución de pH.

1. Newton-Raphson
2. Bisección.

Para este estudio se eligió Newton-Raphson debido a su mayor velocidad de cálculo.

3.8.8.2 Hoja Headwater

La hoja de trabajo "Headwater" se utilizó para definir las condiciones de frontera del tramo inicial modelado en el río Maguazo. En este módulo se ingresaron los datos obtenidos durante la campaña de monitoreo en campo, como el pH, la conductividad, el oxígeno disuelto y la temperatura del agua. Estos parámetros permitieron caracterizar las condiciones fisicoquímicas actuales del río, sirviendo como insumos para las simulaciones en el QUAL2K.

Además, se incorporaron datos relacionados con el caudal y la geometría del punto inicial del tramo modelado, que incluye altura, ancho y las características del flujo en el punto de cabecera. Esta información es esencial para caracterizar el comportamiento hidráulico del sistema y garantizar la precisión de las simulaciones.

Figura 9: Hoja de trabajo "Headwater"

QUAL2K Stream Water Quality Model Rio Maguazo (10/13/2024) Headwater Data:														
				Open Old File		Run Fortran								
Note: * required field														
ID	Number of Headwaters*													
No. 1	Reach No.*	Headwater Name	Flow*	Elevation	Weir				Rating Curves					Chan
			Rate	(m)	Height	Width	adam	bdam	Velocity		Depth		Slop	
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)			Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Slop	
	1	Puente Yurispamba	1.090	3418.000			1.2500	0.9000						
		Headwater Water Quality	Units	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.	6:00 a. m.	7:00 a. m.	8:00 a. m.	9:00 a. m.	10:00 a. m.
		Temperature	C											
		Conductivity	umhos											
		Inorganic Solids	mgD/L											
		Dissolved Oxygen	mg/L											
		CBODslow	mgO2/L											
		CBODfast	mgO2/L											
		Organic Nitrogen	ugN/L											
		NH4-Nitrogen	ugN/L											
		NO3-Nitrogen	ugN/L											
		Organic Phosphorus	ugP/L											
		Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L											
		Phytoplankton	ugA/L											
		Detritus (POM)	mgD/L											
		Pathogen	cfu/100 mL											
		Alkalinity	mgCaCO3/L	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
		pH	s.u.	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
No. 2	Reach No.*	Headwater Name	Flow*	Elevation	Weir				Rating Curves					Chan
			Rate	(m)	Height	Width	adam	bdam	Velocity		Depth		Slop	
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)			Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent	Slop	
		Headwater Water Quality	Units	12:00 a. m.	1:00 a. m.	2:00 a. m.	3:00 a. m.	4:00 a. m.	5:00 a. m.	6:00 a. m.	7:00 a. m.	8:00 a. m.	9:00 a. m.	10:00 a. m.
		Temperature	C											
		Conductivity	umhos											
		Inorganic Solids	mgD/L											
		Dissolved Oxygen	mg/L											
		CBODslow	mgO2/L											
		CBODfast	mgO2/L											
		Organic Nitrogen	ugN/L											

Fuente: Autor

En la Figura 9, se detalla la configuración de la hoja "Headwater", que incluye:

1. **Condiciones de calidad del Agua:** Parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, DBO rápida y lenta, nitrógeno en distintas formas (orgánico, NH₄, NO₃) y fósforo (orgánico e inorgánico).
2. **Características hidráulicas:** Información sobre caudales flujo (m³/s), geometría del punto inicial: altura y ancho del flujo.

3.8.8.3 Hoja de trabajo Reach o Tramos

La hoja de trabajo "Reach" se utilizó para incorporar los parámetros hidráulicos que permiten caracterizar los diferentes tramos del río Maguazo. Esta configuración es importante

3.8.8.4 Hoja de trabajo Rates

En la hoja de trabajo "Rates" del modelo QUAL2K, se establecieron los valores iniciales de los parámetros cinéticos que regulan los procesos bioquímicos dentro del sistema analizado

Figura 11: Hoja de Trabajo Rates.

QUAL2K Stream Water Quality Model Rio Maguazo (10/13/2024) Water Column Rates			
Parameter	Value	Units	Symbol
Stoichiometry:			
Carbon	40	gC	gC
Nitrogen	7.2	gN	gN
Phosphorus	1	gP	gP
Dry weight	100	gD	gD
Chlorophyll	1	gA	gA
Inorganic suspended solids:			
Settling velocity	0.3	m/d	v_i
Oxygen:			
Reaeration model	Internal		
User reaeration coefficient α	3.93		α
User reaeration coefficient β	0.5		β
User reaeration coefficient γ	1.5		γ
Temp correction	1.024		θ_a
Reaeration wind effect	None		
O2 for carbon oxidation	2.69	gO ₂ /gC	r_{oc}
O2 for NH4 nitrification	4.57	gO ₂ /gN	r_{on}
Oxygen inhib model CBOD oxidation	Exponential		
Oxygen inhib parameter CBOD oxidation	0.60	L/mgO ₂	K_{socf}
Oxygen inhib model nitrification	Exponential		
Oxygen inhib parameter nitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sona}
Oxygen enhance model denitrification	Exponential		
Oxygen enhance parameter denitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sodn}
Oxygen inhib model phyto resp	Exponential		
Oxygen inhib parameter phyto resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sop}
Oxygen enhance model bot alg resp	Exponential		
Oxygen enhance parameter bot alg resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sob}
Slow CBOD:			
Hydrolysis rate	0	/d	k_{hc}
Temp correction	1.07		θ_{hc}
Oxidation rate	0.3	/d	k_{dex}

▶ ▶ / Air Temperature / Dew Point Temperature / Wind Speed / Cloud Cover / Shade / **Rates** / Light and He

Fuente: Autor

En la Figura 11, se puede observar la selección y ajuste de los valores en función de los datos obtenidos durante la investigación y las características específicas del área de estudio.

Esta hoja incluye mediciones específicas de la calidad de agua, como DBO₅, concentraciones de nutrientes y parámetros de oxígeno disuelto.

3.8.9 Información de salida del modelo

Después de realizar las simulaciones en el modelo QUAL2K, se generan diversos resultados en forma de hojas electrónicas y gráficos, los cuales permiten analizar el comportamiento de los parámetros modelados a lo largo del río.

3.8.9.1 Hojas de salida

El modelo genera una serie de hojas de cálculo que contienen los resultados numéricos obtenidos para cada parámetro simulado. Estas hojas incluyen:

- **Valores estimados por el modelo:** Resultados calculados en función de las ecuaciones y parámetros definidos previamente.
- **Datos medidos:** Observaciones tomadas en campo para cada tramo del río.
- **Errores o desviaciones:** Diferencias entre los valores simulados y los medidos, utilizados para validar el desempeño del modelo.

Figura 13: Hoja de salida.

QUAL2K Stream Water Quality Model Rio Maguazo (10/13/2024) Source Summary (Hourly)												Open Old File	Run Fortran
Time	Tributary Label	Reach Label	Downstream Label	Up Dist x(km)	Down Dist x(km)	Abstraction cms	Inflow cms	Temp C	Cond umhos	ISS mgD/L	Oxygen mgO2/L	GBODs mgO2/L	
10/13/24 4:00 AM	Main	Puente Rio Magu	esembocadura R	0.49	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.56	2.06	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.06	1.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	1.55	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	1.05	0.77	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10/13/24 6:00 AM	Main	Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	0.77	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Rio Magu	esembocadura R	0.49	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.56	2.06	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.06	1.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	1.55	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10/13/24 6:00 AM	Main	Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	1.05	0.77	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	0.77	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Rio Magu	esembocadura R	0.49	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.56	2.06	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.06	1.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10/13/24 7:00 AM	Main	Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	1.55	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	1.05	0.77	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	0.77	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Rio Magu	esembocadura R	0.49	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.56	2.06	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10/13/24 8:00 AM	Main	Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.06	1.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	1.55	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	1.05	0.77	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Antes Bocatoma	Puente Rio Magu	0.77	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Rio Magu	esembocadura R	0.49	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10/13/24 9:00 AM	Main	Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.56	2.06	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	2.06	1.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		Puente Yurspamb	Antes Bocatoma	1.55	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Fuente: Autor

3.8.10 Calibración del modelo matemático QUAL2K

La calibración del modelo matemático QUAL2K es importante para asegurar la representatividad y confiabilidad de los resultados simulados (Chapra et al., 2022).

El proceso se realizó considerando los tres componentes principales del modelo: cantidad, temperatura y calidad. En este caso particular, la metodología se adaptó a los datos recolectados durante una única campaña de medición en el río Maguazo.

3.8.10.1 Componente de Cantidad

El componente de cantidad se enfocó en la calibración del coeficiente de rugosidad de Manning (“n”), el cual es el único parámetro de calibración en esta etapa (Martin et al., 2021).

El proceso de calibración se desarrolló directamente siguiendo los pasos descritos a continuación:

1. **Cálculo de variables hidráulicas:** Se determinó el caudal medio, la velocidad y la profundidad hidráulica asociada al caudal medio en cada estación de muestreo.
2. **Determinación de rangos del coeficiente de Manning:** Se identificaron los rangos de variación de “n” según la clasificación del tipo de cauce utilizando la Tabla 7 de coeficientes de Manning.
3. **Organización de datos:** Se diseñó un formato que facilitó el registro de los datos asociados al proceso de calibración.
4. **Calibración iterativa:** Se realizó varias corridas del modelo hasta obtener un ajuste aceptable.

5. **Evaluación de resultados:** Se seleccionó la corrida con el mejor ajuste según los valores simulados y observados, y se graficó los resultados obtenidos para validar visualmente el ajuste.

Tabla 7: Coeficiente de Rugosidad de Manning.

DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE	Mín.	Norm.	Máx.	Clasificación del río asociado a valores de Manning.
A. Cauces naturales				
A.1.1 Cauces en planicies				
Limpios, rectos, sin fallas ni pozos profundos.	0,025	0,030	0,033	D-1-a-1
Igual que arriba pero más piedras y pastos.	0,030	0,035	0,040	D-1-a-2
Limpios curvado, con algunos pozos y bancos.	0,033	0,040	0,045	D-1-a-3
Igual que arriba, niveles inferiores, más pendiente y secciones inefectivas.	0,035	0,045	0,050	D-1-a-4
A.1.2 En Montaña				
Fondo: grava, canto rodado y algunas rocas.	0,030	0,040	0,050	D-1-b-1
Fondo: canto rodado con grandes rocas.	0,040	0,050	0,070	D-1-b-2

Fuente: Chow (1982)

3.8.10.2 Componente de Temperatura

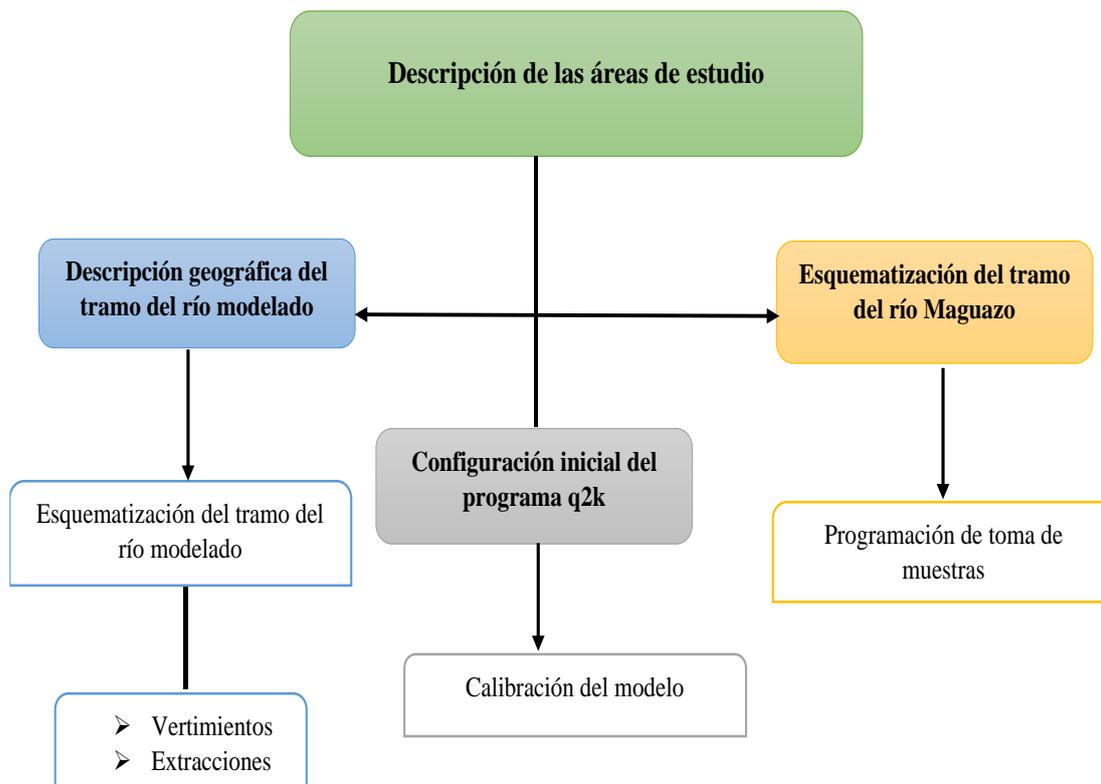
Para el componente de temperatura, se calibró la variable de cobertura de nubosidad, puesto que tiene una influencia significativa en el balance térmico del agua (Xu et al., 2021). Sin embargo, para este proyecto, debido a la limitación de datos y al enfoque en la calidad del agua, se omitió este paso. En futuras investigaciones, se recomienda realizar un ajuste detallado de este componente.

3.8.10.3 Componente de Calidad

El componente de calidad incluye varios parámetros de calibración que afectan significativamente los resultados del modelo (Zambrano-Bigiarini et al., 2020). La calibración se realizó siguiendo los pasos detallados a continuación:

1. **Identificación de parámetros relevantes:** Se determinó los rangos de variación mínimos y máximos para los parámetros de calibración, como tasas de descomposición biológica y coeficientes de sedimentación.
2. **Organización de datos:** Se diseñó un formato para registrar los valores de los parámetros, los resultados de las corridas y los indicadores de ajuste.
3. **Corridas para análisis de sensibilidad:** Se preparó y ejecutó corridas del modelo variando sistemáticamente los parámetros de calibración para identificar aquellos con mayor influencia en los resultados.
4. **Análisis de sensibilidad:** Se organizó los resultados obtenidos y graficó la influencia de cada parámetro sobre los valores simulados respecto al valor objetivo.
5. **Calibración iterativa:** Se realizaron varias corridas enfocándose en los parámetros más influyentes identificados en el análisis de sensibilidad. Se ajustaron los valores hasta obtener un grado de ajuste aceptable.
6. **Evaluación de resultados:** Se seleccionó la corrida con el mejor ajuste y se validó los resultados obtenidos mediante comparaciones gráficas y estadísticas.

Figura 14: Flujograma en base al desarrollo del segundo objetivo: Etapa 2.



Fuente: Autor

3.9 Etapa 3: Simulación de escenarios con el modelo QUAL2K y alternativas para la conservación ambiental del río Maguazo.

Finalmente, se desarrollaron escenarios de simulación para evaluar los impactos potenciales de variaciones en la carga contaminante y el caudal del río. Además, se plantearon alternativas para la conservación ambiental, basadas en los resultados del modelo y las condiciones identificadas en las etapas anteriores.

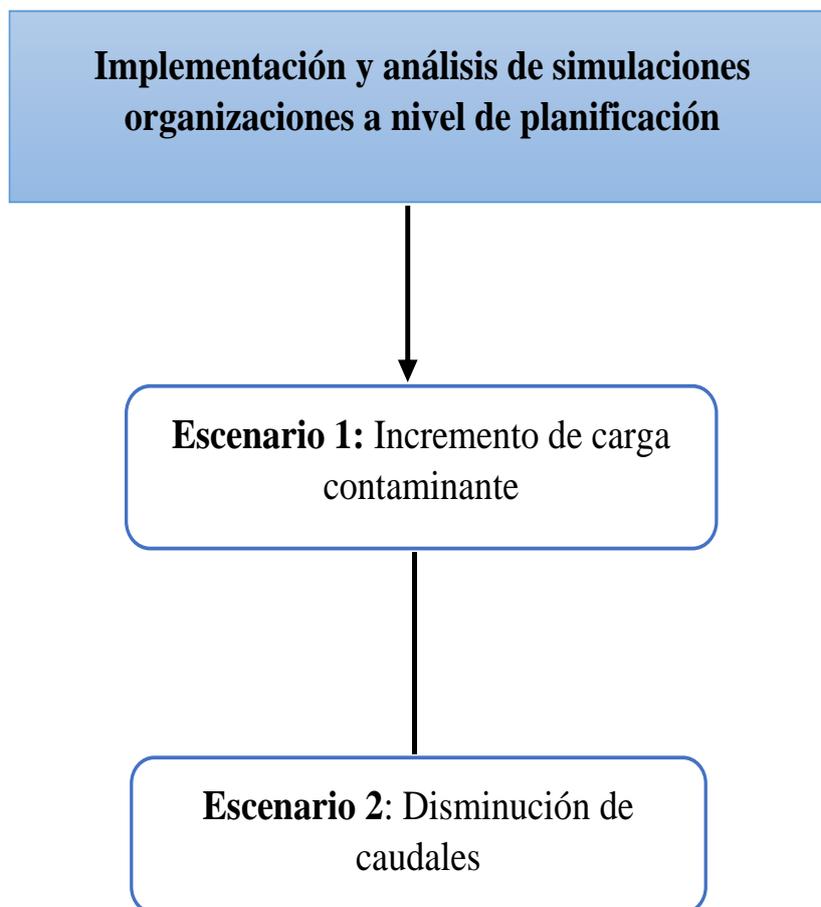
3.9.1 Escenario 1: Incremento de carga contaminante

Se simuló escenarios que evalúan el impacto de aumentos en la carga de nutrientes y materia orgánica. Estos escenarios se basaron en proyecciones de desarrollo urbano y agrícola (Gómez-Martínez et al., 2021).

3.9.1.1 Escenario 2: Disminución de caudales

Se analizaron escenarios de estrés hídrico mediante la reducción de caudales, considerando eventos climáticos extremos y cambios en el uso del agua (IPCC, 2021).

Figura 15: Flujograma en base al desarrollo del tercer objetivo.



Fuente: Autor

Capítulo 4

Análisis y Discusión de los Resultados

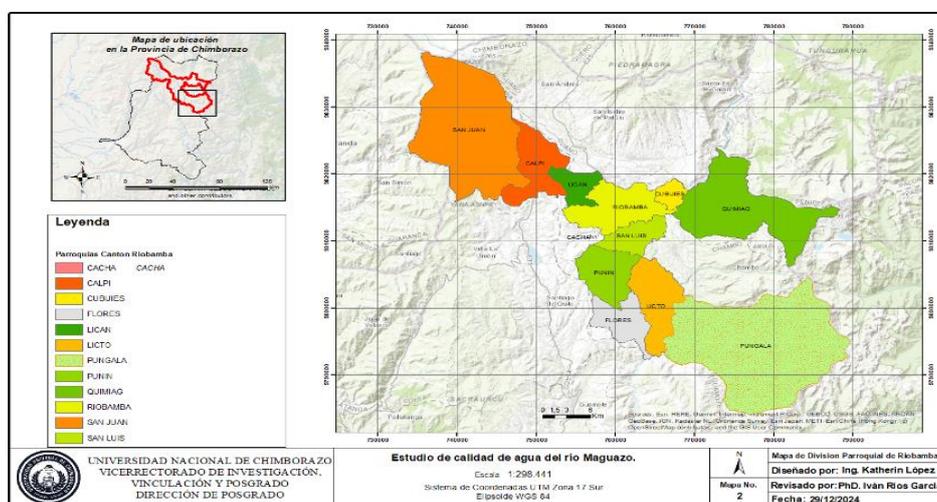
4.1 Descripción de la zona de estudio

4.1.1 Ubicación política del área de estudio

La parroquia Pungalá se encuentra en la provincia de Chimborazo, al sureste del cantón Riobamba, en las estribaciones de la cordillera oriental de los Andes. Limita al norte con el cantón Chambo, al sur con el cantón Guamote y la parroquia Cebadas, al este con la provincia de Morona Santiago, y al oeste con la parroquia Licto.

Administrativamente, el cantón Riobamba está constituido por cinco parroquias urbanas: Maldonado, Veloz, Lizarzaburu, Velasco y Yaruquíes; y once parroquias rurales: San Juan, Licto, Pungalá, Calpi, Químiag, Cacha, Flores, Punín, Cubijíes, Licán y San Luis. La parroquia Pungalá es relevante dentro de esta estructura administrativa debido a su rol como una fuente clave de recursos hídricos, principalmente el Maguazo, que abastece de agua de consumo humano a parte de la ciudad de Riobamba (INEC, 2022; GAD Pungalá, 2023).

Figura 16: Mapa de Riobamba con sus parroquias.



Fuente: Autor

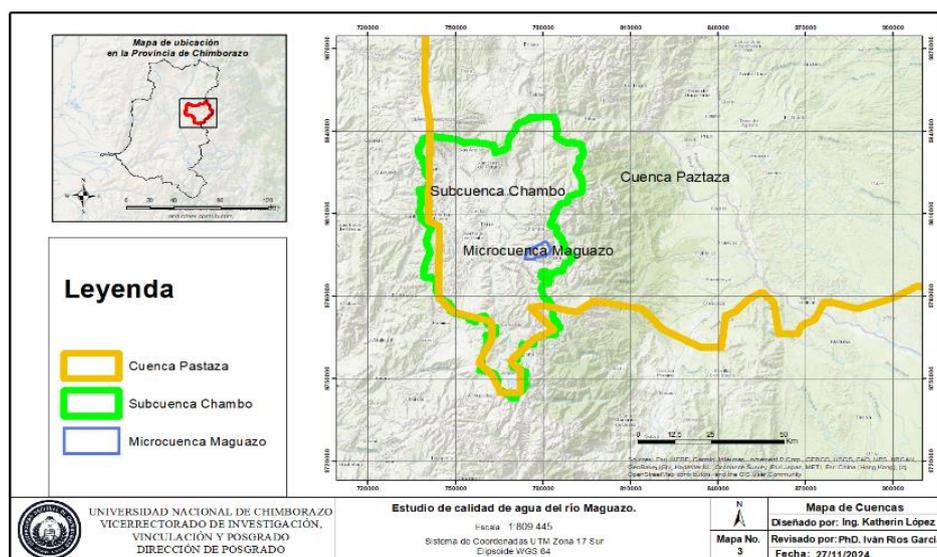
4.1.2 Ubicación geográfica e hidrográfica

El río Maguazo está clasificado dentro de la Demarcación Hidrográfica de Pastaza según la División Hidrográfica del Ecuador. Pertenece a la cuenca 28 76 (río Pastaza), subcuenca 28 76 04 (río Chambo) y a la microcuenca 28 76 04 11 (río Alao), cuyas aguas finalmente desembocan en el río Chambo.

El área de estudio abarca las comunidades de Peltetec y Alao, dentro de la parroquia Pungalá, donde se localizan los principales puntos de interés hídrico. Estas zonas poseen una alta importancia estratégica debido a la convergencia de sistemas fluviales que contribuyen significativamente al desarrollo económico y social de la región. Además, las características geográficas del área, enmarcadas en las estribaciones de los Andes, influyen directamente en la calidad y disponibilidad del agua. (MAATE, 2023; Herrera et al., 2022).

El contexto hidrográfico del río Maguazo es clave para entender su dinámica y la interacción con los factores ambientales y antrópicos en la zona de estudio. Su ubicación estratégica en la subcuenca del río Chambo refuerza su importancia como recurso hídrico, tanto en términos de cantidad como de calidad, frente a escenarios de presión climática y uso intensivo del recurso (GAD Riobamba, 2023).

Figura 17: Mapa de la cuenca, Subcuenca y la microcuenca del río Maguazo.



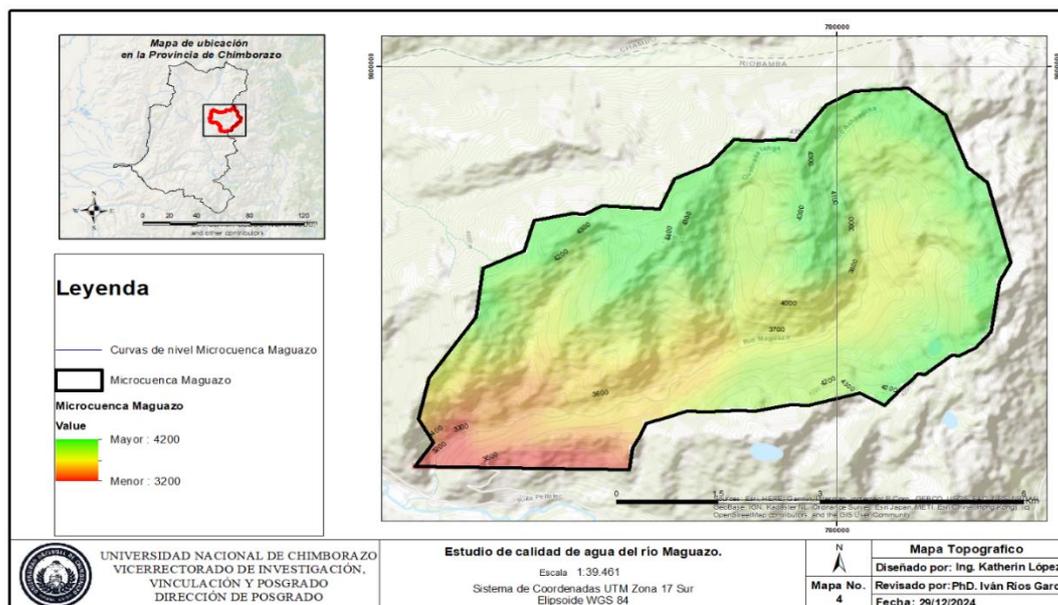
Fuente: Autor

4.1.3 Información Ambiental Básica

4.1.3.1 Topografía

La microcuenca del río Maguazo presenta un relieve montañoso, característico de las estribaciones andinas, con una altitud que varía entre los 3028 y 4472 metros sobre el nivel del mar. Estas variaciones topográficas generan una red de riachuelos y caídas de agua que nutren la parte baja de la cuenca, favoreciendo el desarrollo de una flora y fauna adaptada al ecosistema de páramo. Los suelos predominantes son ricos en materia orgánica, altamente permeables, y desempeñan un papel clave en la regulación hídrica de la cuenca (Herrera et al., 2022; MAATE, 2023).

Figura 18: Mapa de Topografía COTA Máx. y Min.

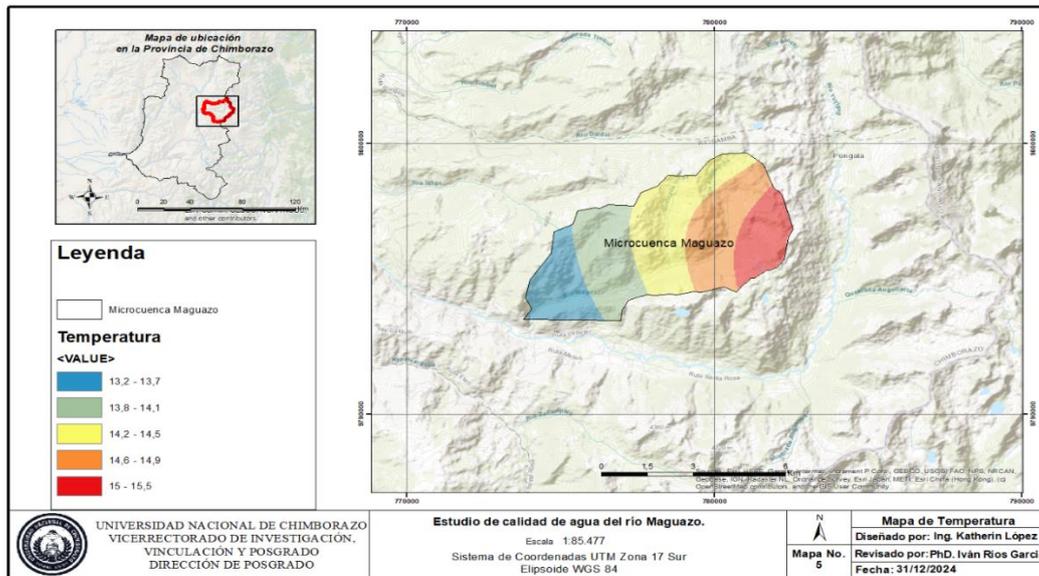


Fuente: Autor

4.1.3.2 Temperatura

El clima de la microcuenca se clasifica como ecuatorial frío de alta montaña, con temperaturas promedio que oscilan entre los 2 °C y 8 °C. Durante las temporadas cálidas, las temperaturas pueden alcanzar hasta 18 °C (Anexo 1), lo que genera un gradiente térmico que permite la coexistencia de climas fríos en las zonas altas y templados en las zonas bajas. Este régimen térmico influye directamente en los procesos ecológicos y en la disponibilidad de recursos hídricos (INAMHI, 2023; GAD Pungalá, 2023).

Figura 19: Mapa de temperatura de la microcuenca.

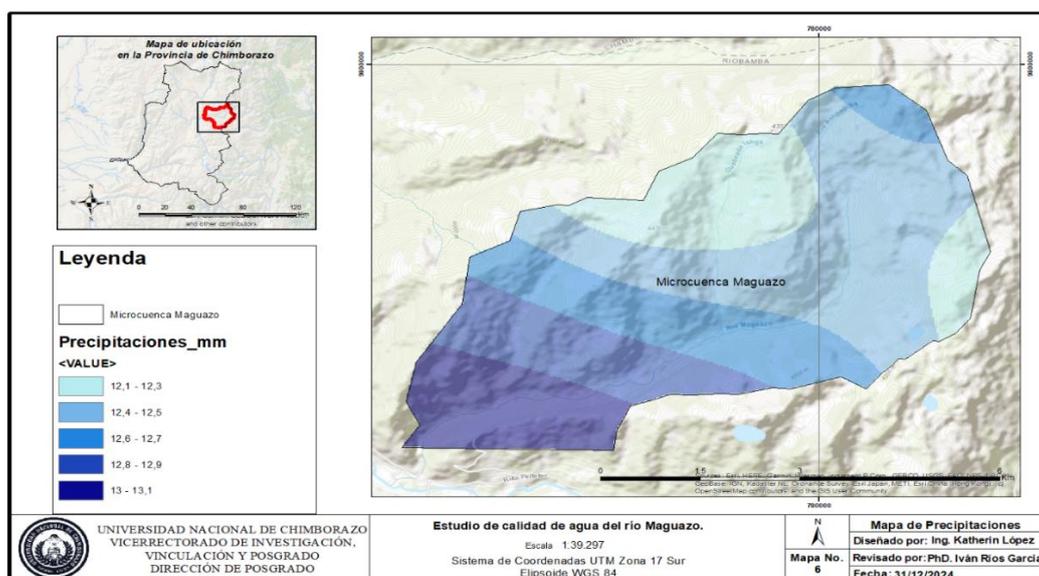


Fuente: Autor

4.1.3.3 Precipitación

Las precipitaciones anuales en la microcuenca fluctúan entre 750 y 1500 mm, con una marcada estacionalidad. Los meses más secos corresponden a julio y agosto, mientras que los periodos más lluviosos se concentran entre marzo y mayo. Este patrón pluviométrico condiciona tanto la dinámica hidrológica de la cuenca como los usos del suelo (INAMHI, 2023; Herrera et al., 2022).

Figura 20: Mapa de Precipitación de la Microcuenca.

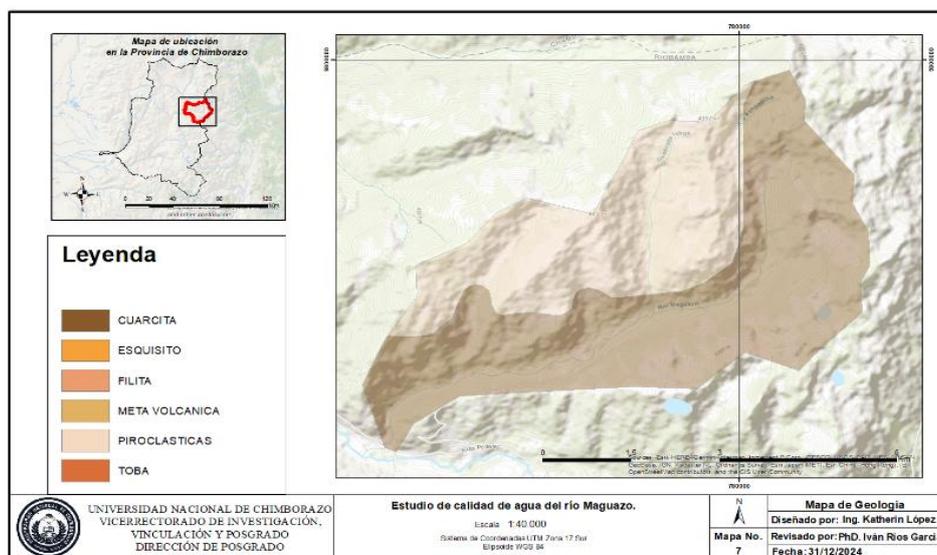


Fuente: Autor

4.1.3.4 Geología

La geología de la microcuenca está dominada por paisajes de origen volcánico y glacial. En las zonas altas predominan circos y cubetas glaciares, mientras que en las zonas medias y bajas se observan afloramientos rocosos y valles formados por coluviones aluviales de diferentes edades. La cobertura piroclástica refleja el origen volcánico de la región, que aporta características únicas al suelo, como su alta capacidad de retención hídrica y fertilidad (MAATE, 2023; GAD Riobamba, 2023).

Figura 21: Mapa de Geología de la microcuenca.



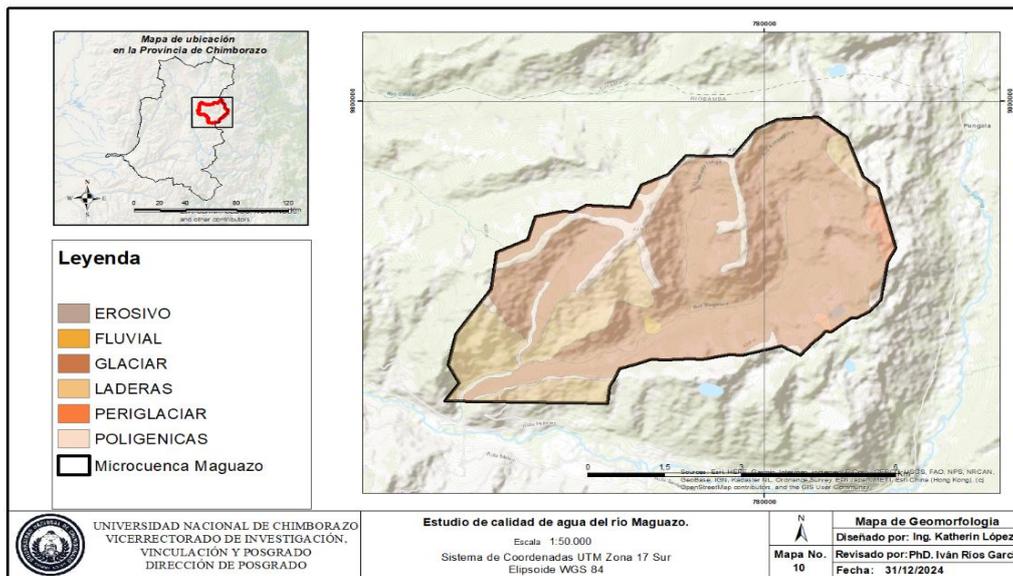
Fuente: Autor

4.1.3.5 Geomorfología

La geomorfología del área de estudio comprende dos unidades principales:

1. **Unidad volcánica El Altar:** Incluye los cerros Shucchibuc y Shulalapungu, con predominancia de metalvolcánicas y rocas de débil metamorfismo, como filitas verdes, cuarcitas y mármoles.
2. **Unidad Alao Paute:** Caracterizada por lavas intermedias y básicas, así como tobas andesíticas y piedra pómez. Estas litologías son representativas del modelado volcánico que ha definido el relieve de la microcuenca (Herrera et al., 2022).

Figura 22: Mapa de Geomorfología de la microcuenca.

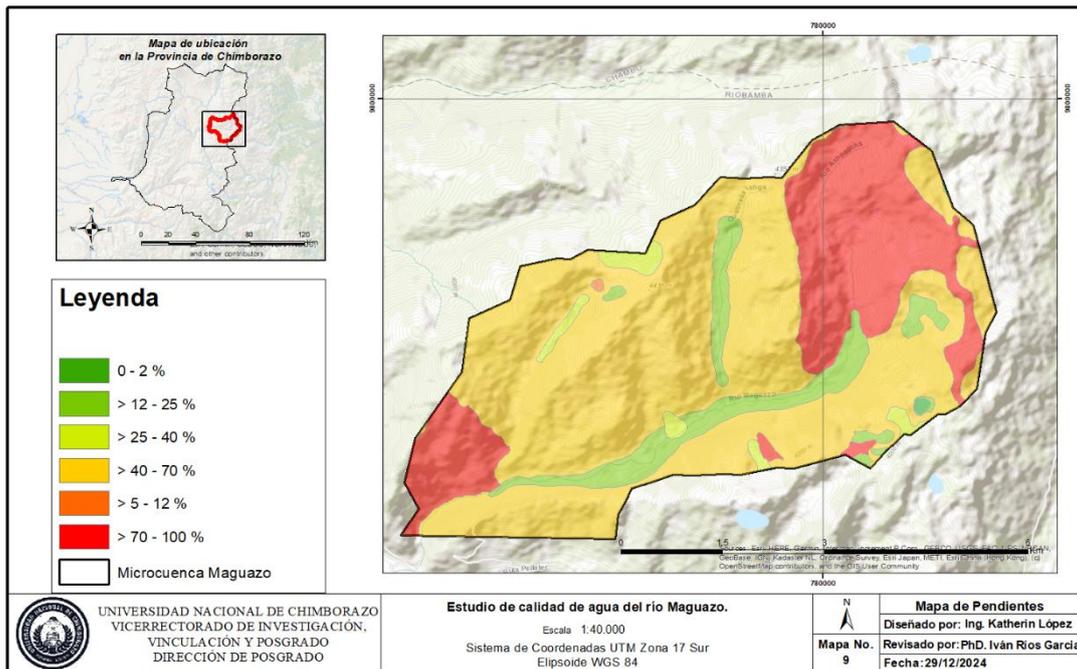


Fuente: Autor

4.1.3.6 Pendientes

El área presenta mayoritariamente pendientes fuertes (40-70%) y muy fuertes (70-100%), localizadas en cerros como Fondo Cocha, Llanta Huma y Mishga Pungo. Las pendientes suaves (5-12%) predominan en las riberas del río Maguazo, mientras que las áreas planas, aunque limitadas, se encuentran al sur de la microcuenca. Estas zonas planas corresponden a valles pequeños formados por coluviones aluviales de origen volcánico, que ofrecen condiciones aptas para usos agrícolas y poblacionales (MAATE, 2023).

Figura 23: Mapa de Pendientes de la microcuenca.

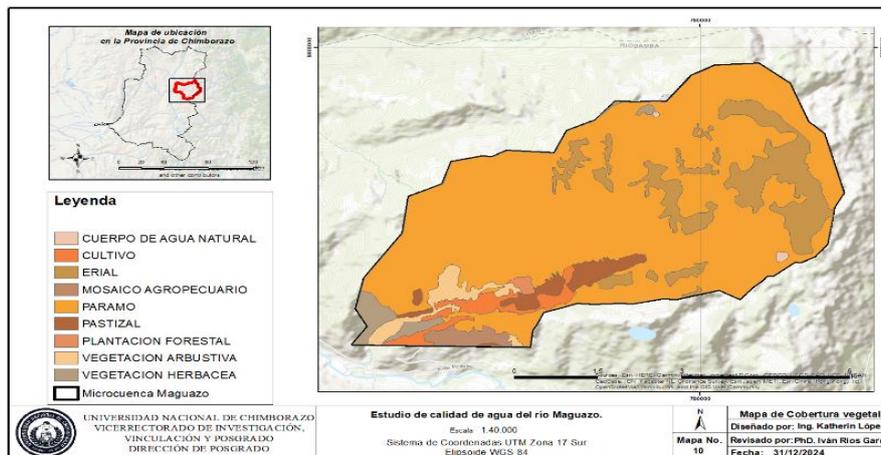


Fuente: Autor

4.1.3.7 Cobertura vegetal

La cobertura vegetal de la microcuenca está dominada por páramo, que actúa como un ecosistema clave para la regulación hídrica y climática. También se encuentran vegetación herbácea, pastizales y eriales, principalmente en afloramientos rocosos. En menor proporción, existen cuerpos de agua (lagunas y ríos), áreas pobladas, cultivos, bosques nativos y plantaciones forestales (principalmente de pino y eucalipto). Esta diversidad de cobertura refleja una interacción dinámica entre los factores naturales y las actividades humanas en la microcuenca (GAD Pungalá, 2023; INEC, 2022).

Figura 24: Mapa de la cobertura vegetal de la microcuenca Maguazo.

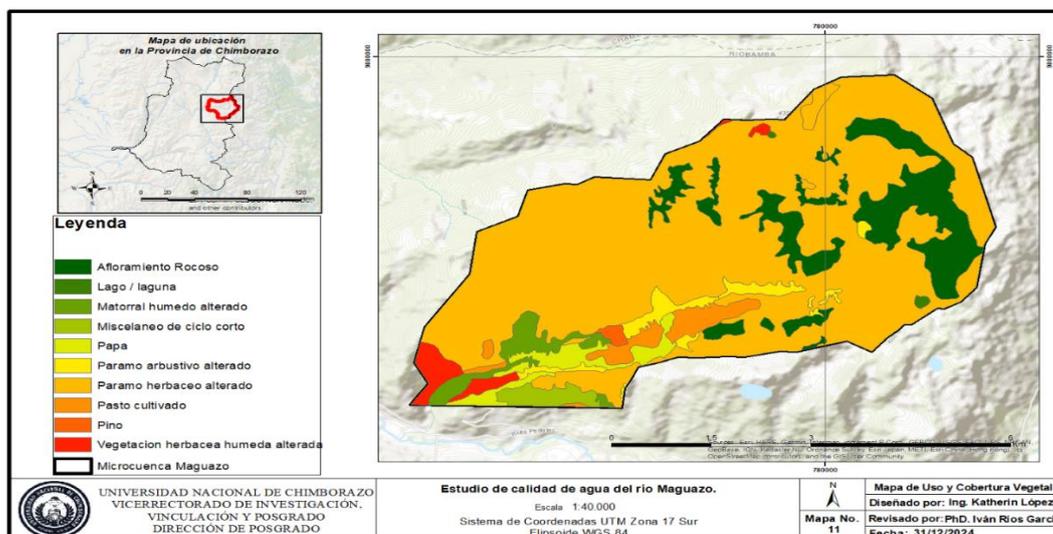


Realizado por: Autor

4.1.3.8 Uso y cobertura de suelo

En la zona de estudio predominan los cultivos de papa, maíz, cebada, trigo y alfalfa. Sin embargo, la expansión agrícola está limitada por la extensa cobertura de páramo, ecosistema que constituye una importante reserva de biodiversidad y fuente de recursos hídricos. Además, se encuentran sectores de bosques nativos que albergan una diversidad significativa de especies arbustivas, que contribuyen a la regulación del clima y a la protección de los suelos frente a la erosión.

Figura 25: Mapa de uso y Cobertura del suelo.



Fuente: Autor

4.1.3.9 Usos del Agua

De acuerdo con el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de Pungalá 2019-2023, el 100% de los asentamientos humanos en la zona estudiada cuenta con agua entubada, aunque sin un tratamiento integral. La comunidad de Shullidis, por ejemplo, utiliza agua proveniente de la captación en la parte alta de Morosel, que es tratada mediante un sistema de cloración convencional que ha estado en operación durante más de 30 años.

Según registros de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), las concesiones de agua en el área están orientadas principalmente al riego agrícola y al consumo humano. No obstante, las concesiones con mayores volúmenes están destinadas a la generación hidroeléctrica y al abastecimiento de agua potable para la ciudad de Riobamba.

Tabla 8: Registro de uso de agua de la microcuenca

Nombre Usuario	Fuente	Uso	Sitio Captación	Caudal (L/S)
Directorio De Aguas De Las Comunidades, San Francisco De Calquis, Y Agua Santa	Quebrada Shulala Y Pequeños Aportes De La Parte Alta/Dren Al Rio Alao	Abrevadero	Quebrada Shulala/Pungala/Riobamba	0,09
Manuel Maza Paguay	Vertiente Mongogche	Abrevadero	Sector Mangogche/Comunidad Shullidies/Pungala/Riobamba/Chimborazo	0,01
Directorio De Aguas De La Comunidad Anguiñay	Quebrada Ishpe / Dren Rio Alao	Abrevadero	Parroquia Pungala / Riobamba	1,8
Asociación De Trabajadores Agrícolas Catorce De Junio	Vertientes Chuspillay / Dren Rio Chambo	Domestico	Parroquia Pungala / Riobamba	0,6
Ponce Parra Carmen Manuela	Vertiente Quishuar Y Quebrada Sumak Yaku/Dren Al Rio Alao	Domestico	Paramos De La Comunidad Peltetec/Pungala	0,03
Ponce Parra Carmen Manuela	Vertiente Quishuar Y Quebrada Sumak Yaku/Dren Al Rio Alao	Abrevadero	Paramos De La Comunidad Peltetec/Pungala	0,01

Fuente: PDOT de Pungalá 2019-2023.

4.1.3.10 Infraestructura hidráulica

Las principales obras hidráulicas en la microcuenca de los ríos Maguazo y Alao incluyen sistemas de captación para riego y consumo humano, así como infraestructuras significativas como el trasvase Maguazo-Alao y la central hidroeléctrica Alao.

A continuación, se detallan las características más relevantes de estas estructuras:

Trasvase del Río Maguazo - Alao

La captación principal del trasvase se encuentra a una altitud aproximada de 3205 m s.n.m. El proyecto tiene como objetivo abastecer de agua potable a parte de la ciudad de Riobamba, cuya creciente población ha superado la capacidad de los sistemas subterráneos actuales. Este sistema permite la captación de hasta 500 litros por segundo, garantizando el suministro hídrico para la ciudad hasta el año 2040 (Chagñay & Ricaurte, 2018).

Figura 26: *Trasvase del Río Maguazo*



Fuente: Autor



Central Hidroeléctrica Alao

La central hidroeléctrica Alao aprovecha los caudales de los ríos Alao y Maguazo para la generación de energía. Su infraestructura incluye una bocatoma ubicada en las

coordenadas 774049,9 E y 9792776,7 S, diseñada para regular el ingreso de agua mediante compuertas y desarenadores, con una superficie aproximada de 651,84 m². El agua captada es conducida hacia un tanque de presión a través de un canal de desfogue que optimiza la regulación del caudal requerido para la operación eficiente de la central (Horta & Quiña, 2021).

Estas obras representan una infraestructura estratégica para la región, tanto en el abastecimiento de agua potable como en la generación de energía hidroeléctrica, contribuyendo significativamente al desarrollo socioeconómico y al manejo de los recursos hídricos.

Figura 27: Central Hidroeléctrica Alao.



Fuente: Autor

4.2 Geomorfología de la microcuenca del río Maguazo

El análisis geomorfológico de la microcuenca del río Maguazo (Tabla 9), permitió caracterizar la morfología del terreno, cobertura vegetal, naturaleza y el uso del suelo, puesto que las propiedades físicas influyen directamente en su comportamiento hidrológico. La caracterización es de gran importancia para determinar la influencia que tiene la conducción hidráulica en las zonas de interés.

La microcuenca está ubicada en las comunidades de Peltetec y Shullidis, con un área total de 30,748 Km². El río principal tiene una orientación norte-sur y una longitud de 11,88

Km, desembocando en la microcuenca del río Alao, cuyas aguas finalmente y drenan en el río Chambo.

Tabla 9: *Parámetros morfométricos de la microcuenca del río Maguazo.*

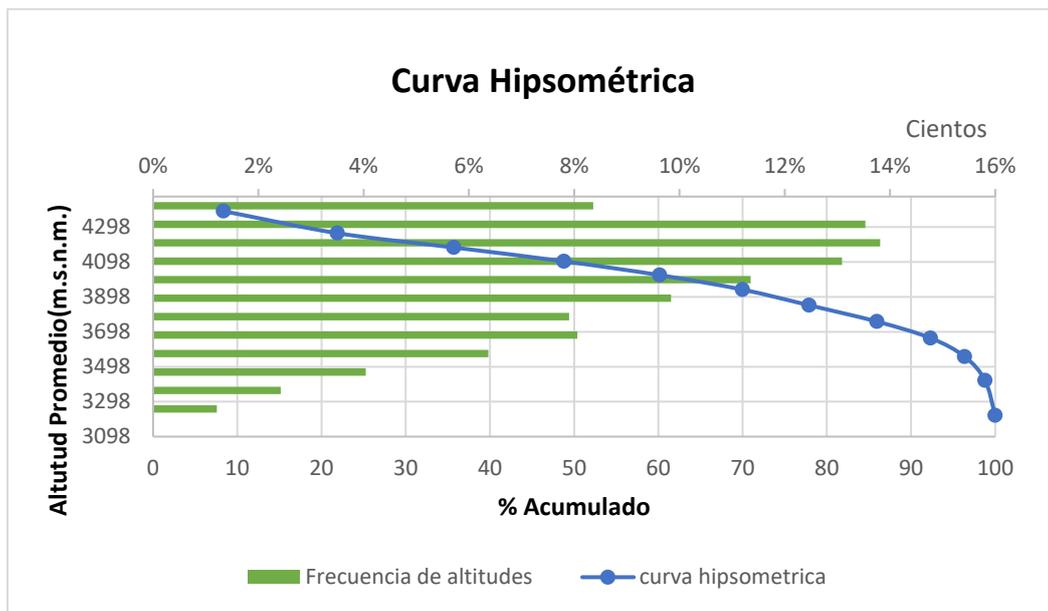
Descripción	Siglas	Unidad	Valores
Parámetros de forma			
Área	A	Km ²	30,748
Perímetro	P	km	27,199
Índice de compacidad	Ic	Adimensional	1,3832
Cota máxima	Cmax	m.s.n.m.	4472
cota mínima	Cmin	m.s.n.m.	3098
Relieve			
X centroide	Cx	m	778359,48
Y centroide	Cy	m	9796185,82
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	52,8954
Red Hídrica			
Longitud de curso Principal	Lcp	km	11,88
Orden de la red	Or	und	3
Tiempo de Concentración	Tc	horas	1,33755

Fuente: Autor

4.2.1 Curva Hipsométrico.

La curva hipsométrica (Figura 28) muestra que la cuenca hidrográfica se encuentra en una etapa de desequilibrio, curva tipo A en fase de juventud, que refleja una cuenca con un gran potencial erosivo, denominada cuenca de maceta.

Figura 28: Curva Hipsométrica de la microcuenca Maguazo

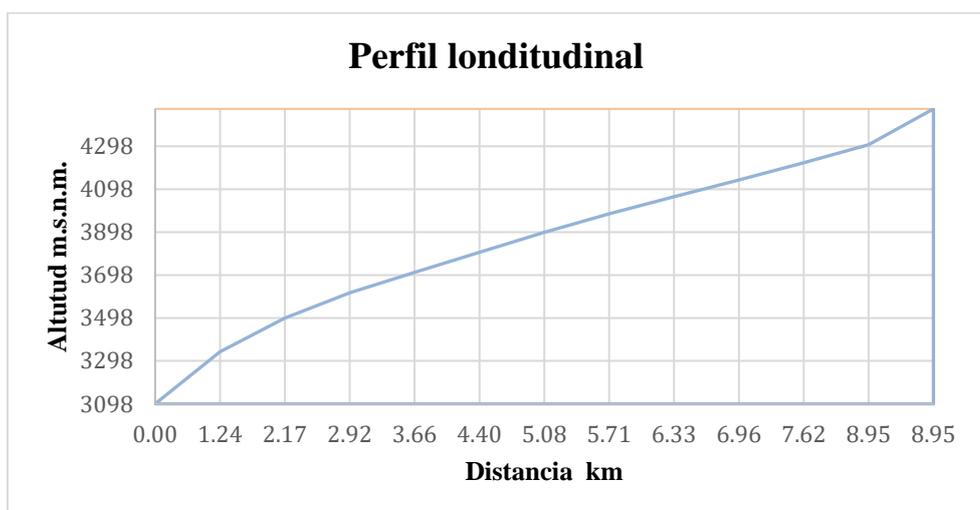


Fuente: Autor

4.2.2 Perfil Longitudinal

El perfil longitudinal (Figura 29) se muestra la línea que traza el cauce determinado por las diferentes cotas desde su punto de origen, hasta su punto de cierre. Por lo que se observa un perfil cóncavo sugiriendo un perfil en equilibrio.

Figura 29: Perfil Longitudinal de la microcuenca del río Maguazo



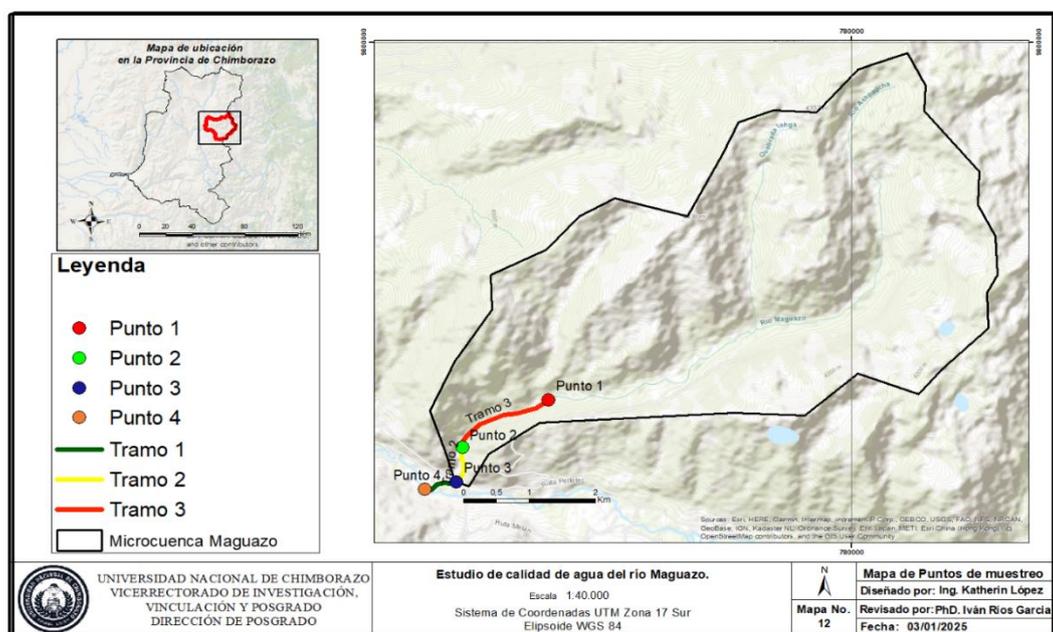
Fuente: Autor

4.3 Descripción geográfica del tramo seleccionado

Una vez realizada la visita de campo y la georreferenciación de la zona de estudio, se procedió a la elección de los puntos de monitoreo, por lo que se elige un punto en el tramo alto, uno en el punto medio y uno en la parte baja, cada uno responde a diferentes características y estrategias de la microcuenca del río Maguazo.

4.3.1 Descripción de los puntos de muestreo

Figura 30: Mapas de puntos de monitoreo de la Microcuenca Maguazo.



Fuente: Autor

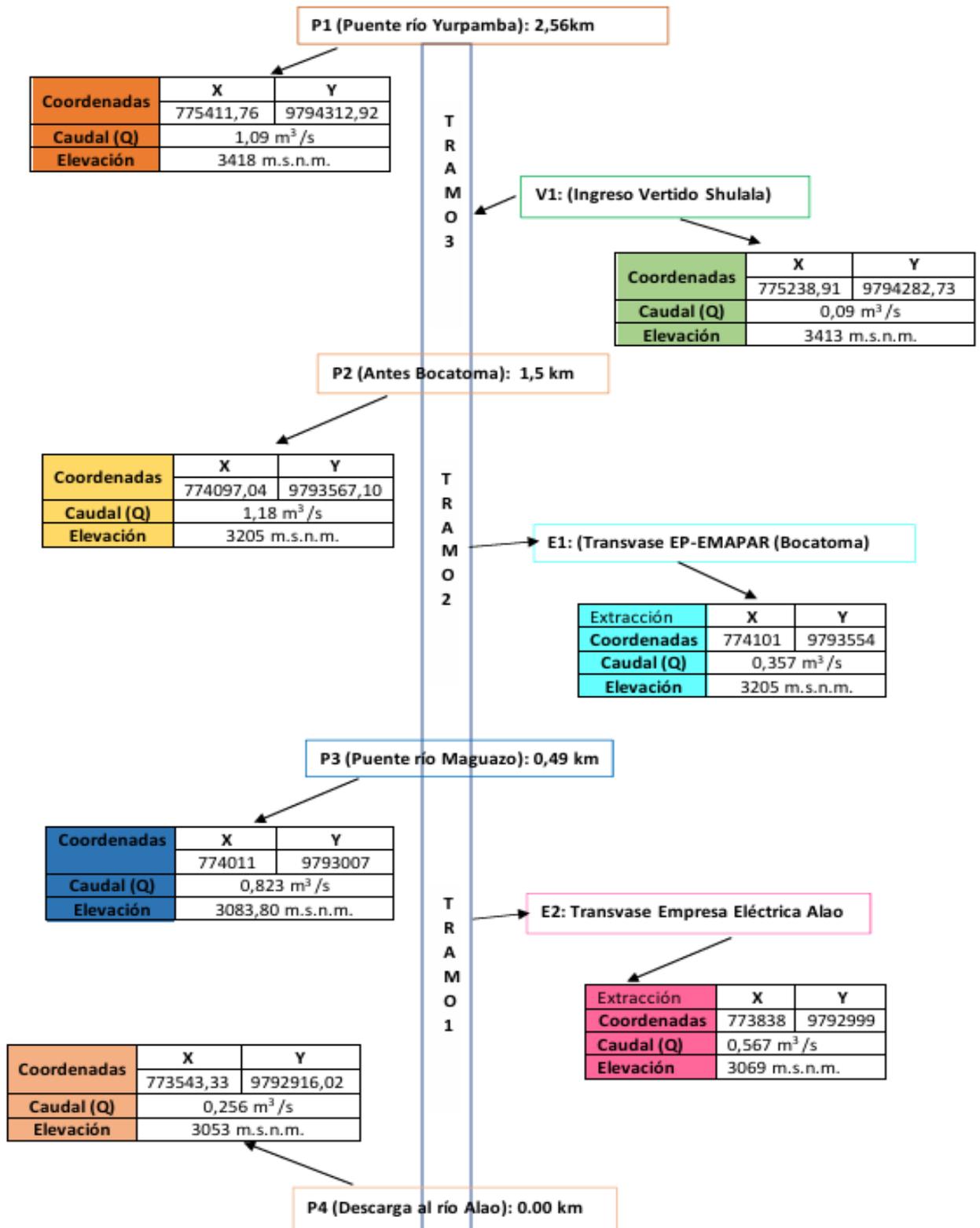
Tabla 10: Descripción de los puntos de muestro del río Maguazo.

MICROCUCNENCA DEL RÍO MAGUAZO		
PUNTOS	COORDENADAS	FOTOGRAFÍA
<p>P1 (Puente Yurispamba)</p> <p>Se tomó este punto puesto que se encuentra, a una altura de 3418 m.s.n.m, presentando un ecosistema de páramo, donde se observó un puente que conecta con la comunidad Yurispamba, el sitio cuenta con la presencia de ganado y no se encuentra la intervención directa de poblaciones y/o agricultura.</p>	<p>Latitud (X): 775411,76</p> <p>Longitud (Y): 9794312,92</p>	
<p>P2 (Antes Bocatoma)</p> <p>Se tomó este punto puesto que en el trayecto del P1 al P2 se observa la presencia de ganado, y pastizales, pero aún no se observa poblaciones cercanas, en este punto de referencia se encuentra el transvase de agua potable de la EP-EMAPAR (Bocatoma), a una altura de 3205 m.s.n.m.</p>	<p>Latitud (X): 774101</p> <p>Longitud (Y): 9793554</p>	
<p>P3 (Puente río Maguazo)</p> <p>Se tomó este punto puesto que en el trayecto del P2 al P3 se observa la presencia de poblaciones cercanas, en este punto se encuentra el puente de la vía que comunica a la comunidad de PELTEC con la comunidad de Alao (puente río Maguazo), a una altura de 3083,80 m.s.n.m.</p>	<p>Latitud (X): 774011</p> <p>Longitud (Y): 9793007</p>	
<p>P4 (Descarga al río Alao)</p> <p>Se tomó este punto puesto que en el trayecto del P3 al P4 se encuentra la comunidad de PELTEC, se observa la presencia de cultivos y animales domésticos a orillas del río Maguazo, este punto es la unión del río Maguazo con el río Alao, se encuentra a una altura de 3053 m.s.n.m.</p>	<p>Latitud (X): 774011</p> <p>Longitud (Y): 9793007</p>	

4.3.2 Esquematización del tramo de estudio seleccionado

A continuación (Figura 31), se muestra la selección del tramo a estudiar en donde se encuentra los puntos de estudio, los vertidos y las extracciones que se identificaron, así como sus coordenadas y elevaciones a lo largo del trayecto del río Maguazo.

Figura 31: Flujograma del tramo de estudio seleccionado.



Fuente: Autor

Tabla 11: *Tabla de puntos que ingresan y extraen agua del río Maguazo.*

Punto	Coordenadas	Descripción	Fotografía
Vertido	X: 775238,91 Y: 9794282,73	A 0,22 km del P1 se encuentra la descarga Shulala, rodeado de una densa vegetación, aportando con caudal al río Maguazo.	
Extracción	X: 774101 Y: 9793554	transvase de agua potable de la EP-EMAPAR (Bocatoma), la cual conduce un porcentaje del agua del río Maguazo, con el fin de abastecer de agua potable a la ciudad de Riobamba.	
Extracción	X: 773838 Y: 9792999	A 0,19 km del P3 se encuentra el transvase de la central Hidroeléctrica Alao, que conduce un porcentaje de agua del río Maguazo.	

4.3.3 Segmentación del tramo monitoreado

Los puntos monitoreados se segmentaron en tres tramos los cuales son:

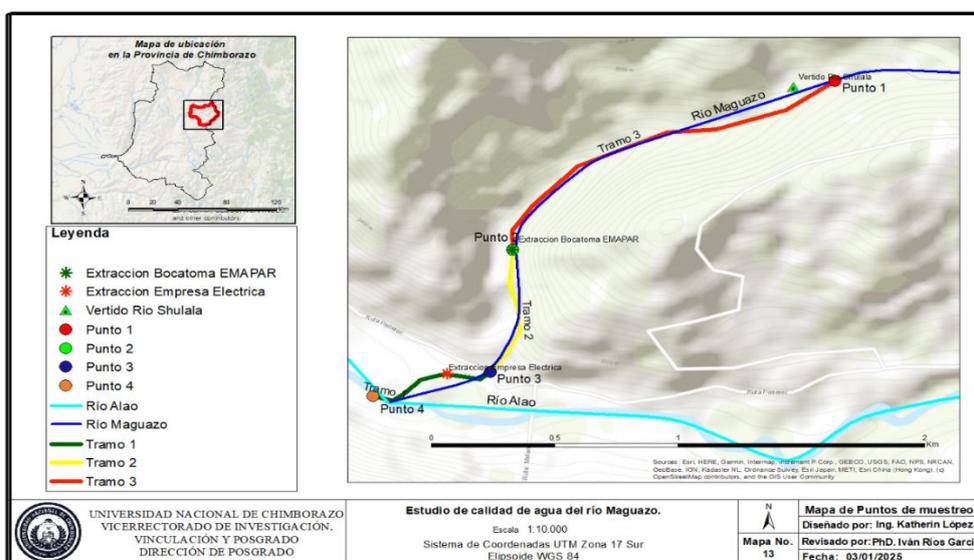
- **Tramo 3:** Desde el Punto 1 denominado puente de Yurspanna hasta el Punto 2 que se encuentra antes del transvase de la EP-EMAPAR B (Bocatoma). Dentro de este tramo se encuentra la descarga del Shulala.

- **Tramo 2:** desde el Punto 2 (Antes Bocatoma), hasta el Punto 3 denominado (Puente río Alao), puente de ingreso que conecta a las comunidades de PELTEC y Alao. Dentro de este tramo se encuentra la extracción del transvase de la EP-EMAPAR (Bocatoma).
- **Tramo 1:** desde el Punto 3 hasta el Punto 4 que es la unión del río Maguazo con el Alao. Dentro de este tramo se encuentra la extracción del transvase de la central Hidroeléctrica Alao.

4.4 Puntos seleccionados de toma de muestras y medición de caudales

A continuación, se muestran los puntos seleccionados para realizar el estudio de la microcuenca del río Maguazo.

Figura 32: Mapa de puntos seleccionados.



Fuente: Autor

4.5 Caudales del río Maguazo.

Para determinar los caudales del río Maguazo se realizó el aforo de caudales en los puntos de monitoreo, vertidos y extracciones identificados en los tramos de estudio (Anexo 2). En la tabla 12 se describen los caudales, y cotas de los puntos de estudio, así como sus vertidos y extracciones identificadas.

Tabla 12: *Aforo del área de estudio del río Maguazo.*

Puntos	Nombre	Q m³/s	Cota (m.s.n.m.)
P1	Puente Yurspamba	1,09	3418
P2	Antes Bocatoma	1,18	3205
P3	Puente Rio Maguazo	0,823	3083,8
P4	Unión río Alao	0,256	3053
Vertido y Extracciones			
V1	Vertido Shulala	0,09	3413
E1	EP EMAPAR (Bocatoma)	0,357	3205
E2	Empresa Eléctrica	0,567	3069

Fuente: Autor

4.6 Análisis de resultados de muestras.

A continuación, se muestran los resultados de los análisis físico-químicos, de las muestras obtenidas en los puntos de estudio para los parámetros seleccionados los cuales se encuentra dentro de los límites permisibles del TULSMA, Libro VI, Anexo 3

Tabla 13: Resultados de análisis de muestras tomadas en los puntos de estudio.

Muestra	pH	Conduct (uS)	SSD (ppm)	DBO (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Fosforo Total (mg/L)	OD (mg/L)
P1M1	6,60	232,8	135,5	0,5	0,6	0,14	6,82
P1M2	6,70	181,2	105,7	<1	0,6	0,21	6,98
P1M3	6,82	183,9	107,0	0,8	0,4	0,21	7,36
P2M1	7,31	225,2	131,2	0,9	0,7	0,17	7,57
P2M2	7,20	182,3	106,3	<1	0,5	0,74	7,92
P2M3	7,22	181,8	106,1	<1	0,6	1,02	7,57
P3M1	7,05	226,6	132,1	<1	0,9	0,38	8,11
P3M2	7,21	185,8	108,0	0,4	1,0	0,24	6,23
P3M3	7,29	184,4	107,6	0,3	0,6	0,78	7,57
P4M1	6,92	122,3	71,23	0,3	0,1	0,33	-
P4M2	6,83	88,43	51,62	1,2	0,4	0,09	8,38
P4M3	6,99	103,9	60,23	<1	0,1	0,64	6,89

Fuente: Autor

4.6.1 Información Hidráulica

Información hidráulica de los datos analizados en el software QUAL2K los cuales muestran los siguientes resultados Anexo 4.

Tabla 14: Información Hidráulica.

Puntos	Distance	Q-data	H-data	U-data	Travel time
	x(km)	m ³ /s	m	m/s	data (d)
Puente Yurispamba	2,56	1,09	0,38	0,425	0
Antes Bocatoma	1,05	1,18	0,272	0,519	0,03
Puente Rio Maguazo	0,49	0,823	0,32	0,5	0,045
Unión río Alao	0	0,256	0,16	0,25	0,07

Fuente: Autor

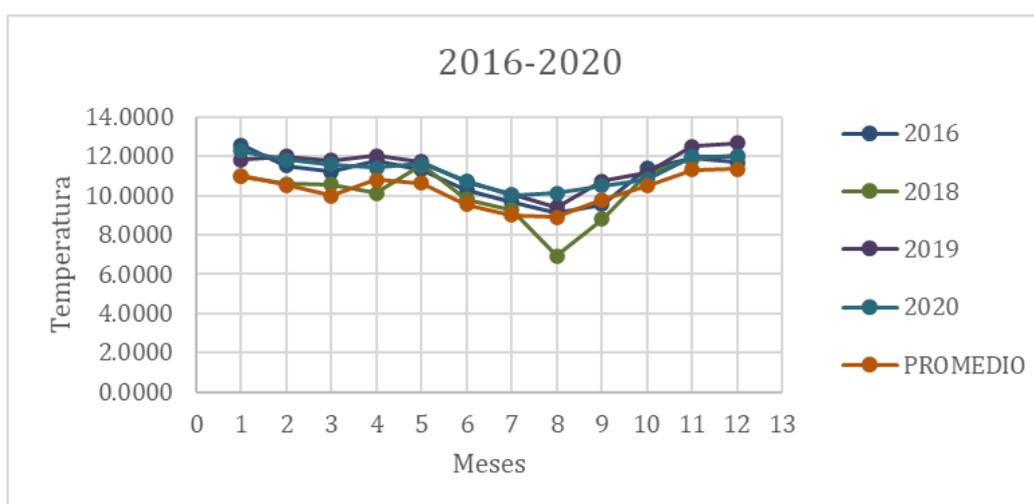
Tabla 15: *Parámetros Físico químico del software QUAL2K.*

Puntos	ISS (mgD/L)	DO (mgO2/L)	CBODs (mgO2/L)	CBODf (mgO2/L)	Norg (ugN/L)	NH4 (ugN/L)	NO3 (ugN/L)	Porg (ugN/L)	Inorg P (ugP/L)	pH
Puente Yurspamba	0,15	7,36	0,35	0,77	36	0,4	0,2	0,28	0,21	6,6
Antes Bocatoma	0,5	9	0,4	0,81	33	1	0,22	0,2	0,23	6,65
Puente Rio Maguazo	0,49	9,5	0,38	0,8	33	1	0,25	0,25	0,28	6,7
Unión río Alao	0,48	10,1	0,42	0,82	33,5	1	0,2	0,2	0,25	6,75

Fuente: Autor

4.6.2 Temperatura:

Los datos de temperatura fueron obtenidos mediante la base de datos del programa TerraClimate, que proporcionó datos desde el mes de julio 1990 a diciembre 2020 (Anexo 1). Para el estudio se tomó los datos más recientes desde el año 2016 al 2020, como se observa en la figura 33, en los que se registra un promedio de 10,28 °C en la micro cuenca del río Maguazo.

Figura 33: *Temperatura de la microcuenca Maguazo.*

Fuente: Autor

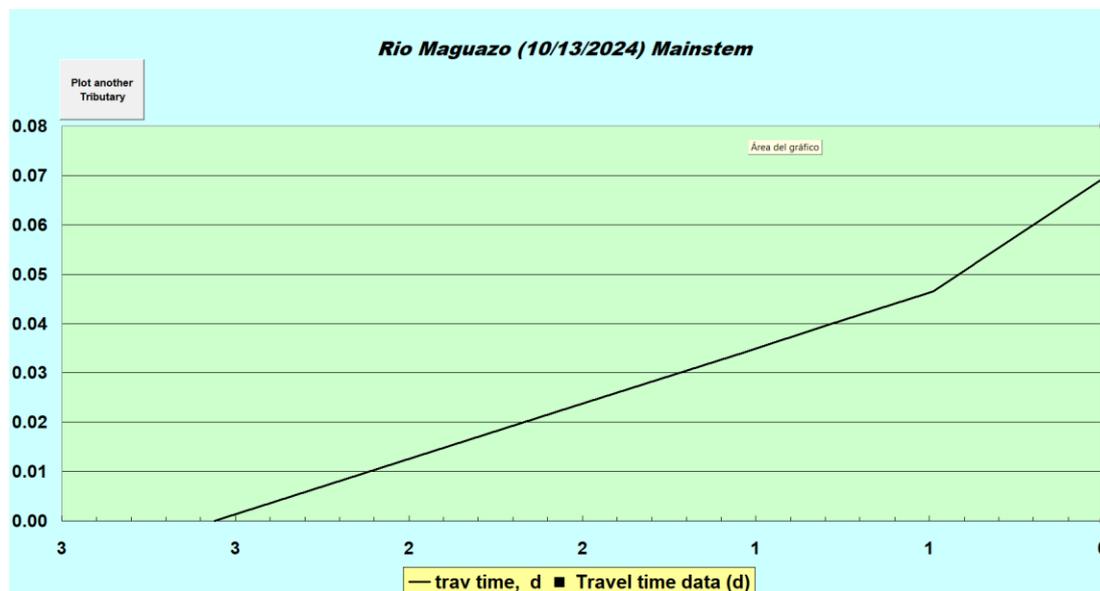
4.7 Modelado inicial parámetros hidráulicos

El análisis inicial de los parámetros hidráulicos en la zona baja del río Maguazo permitió identificar características del flujo, esenciales para comprender el transporte y dispersión de partículas o contaminantes.

4.7.1 Tiempo de viaje:

El cálculo del tiempo de viaje, definido como el período que tarda una partícula en desplazarse desde el Puente Yurspamba (2,56 km) hasta la desembocadura del río Maguazo en el río Alao (0,00 km). Los cálculos indicaron que el tiempo total fue de 0,07 días (100,8 minutos).

Figura 34: *Tiempo de viaje del río Maguazo.*



Fuente: Autor

En la Figura 34, se observa un incremento lineal del tiempo de viaje en función de la distancia recorrida, indicando una velocidad media constante. La velocidad media calculada para este tramo fue de 0,424 m/s, reflejando condiciones hidráulicas estables, un flujo uniforme,

con una geometría regular del cauce, con pendiente estable de 1,17 m/km y una rugosidad sin cambios significativos.

El comportamiento lineal del tiempo de viaje respalda la hipótesis de un flujo uniforme. La constante hidráulica obtenida sugiere una velocidad media estable a lo largo del tramo, con mínimas variaciones:

- Velocidad mínima registrada: 0,25 m/s.
- Velocidad máxima registrada: 0,52 m/s.

Esta estabilidad se debe a la ausencia de interrupciones o irregularidades en la pendiente y rugosidad del río, y permite que el transporte de contaminantes se mantenga predecible, facilitando la modelación de procesos bioquímicos.

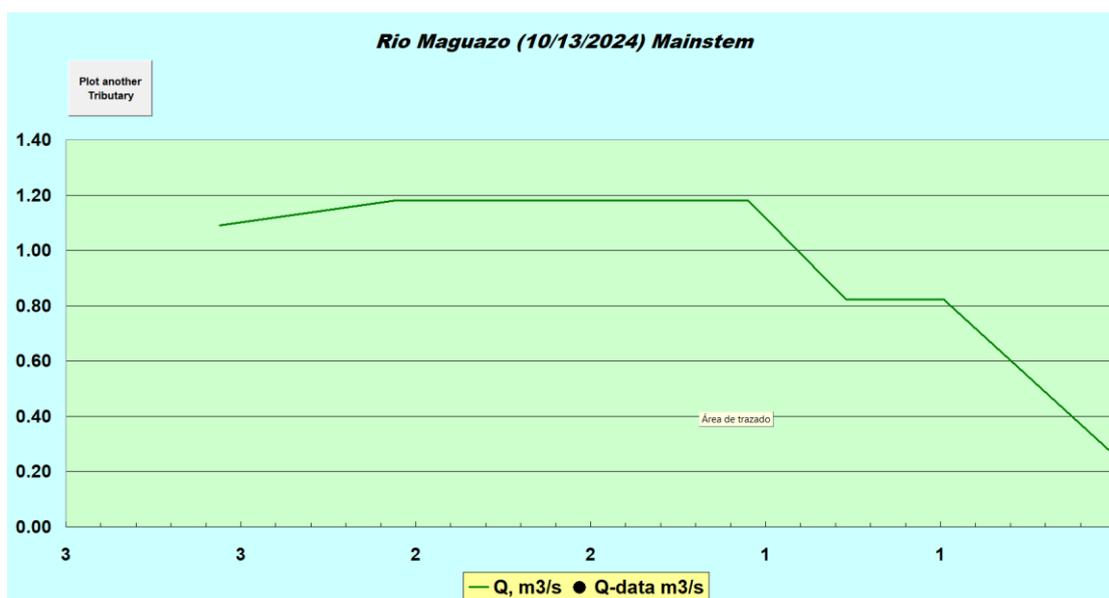
El flujo constante identificado en la parte baja del río Maguazo tiene implicaciones en el transporte y dilución de contaminantes:

- **Dispersión de contaminantes:** Los contaminantes son transportados longitudinalmente sin acumulaciones significativas, dado que las variaciones en velocidad son mínimas.
- **Tiempos de residencia:** La velocidad uniforme permite predecir con exactitud el tiempo de tránsito de los contaminantes en cada tramo:
 - Del Puente Yurispamba al punto Antes Bocatoma (1,51 km): Tiempo de viaje = 43,20 minutos.
 - Del punto Antes Bocatoma a la desembocadura al río Alao (2,56 km): Tiempo de viaje = 57,60 minutos.

4.7.2 Caudal:

El análisis de los caudales en la parte baja del río Maguazo permitió identificar la variación del flujo a lo largo de las distancias analizadas, comprendidas entre el Puente Yurspamba (2,56 km) y la desembocadura del río en el río Alao (0,00 km).

Figura 35: Variación de Caudal.



Fuente: Autor

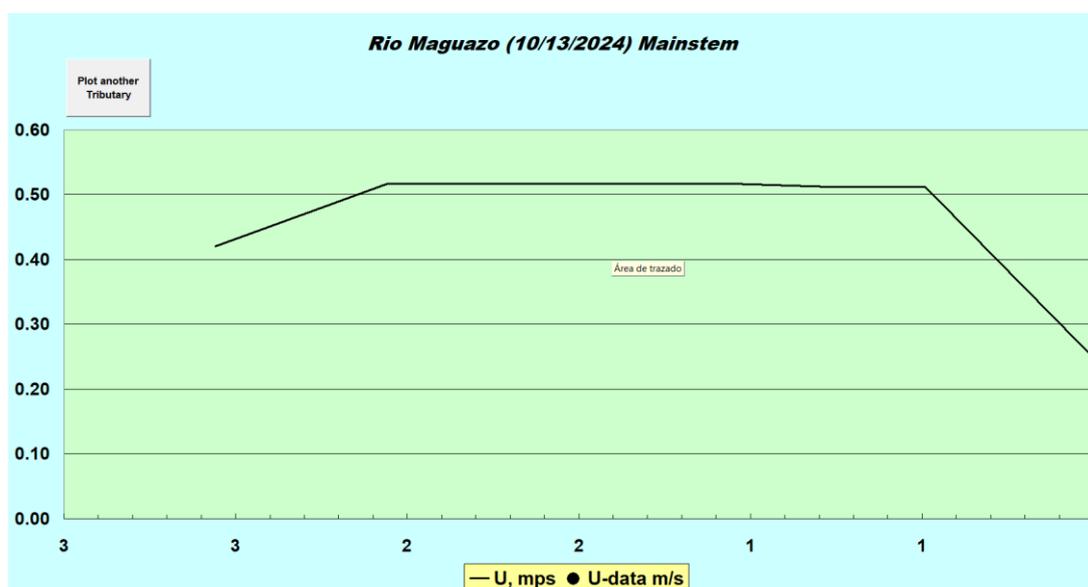
En la Figura 35, se puede observar la variación del caudal a lo largo de los tres tramos principales:

- **Tramo 3:** (Puente Yurspamba-Antes Bocatoma), con un caudal promedio de 1,09 m³/s, representando las condiciones de entrada al sistema de estudio.
- **Tramo 2:** (Antes Bocatoma-Puente Río Maguazo), con un incremento de caudal a 1,18 m³/s, lo que indica un adicional de 0,09 m³/s, relacionado con los vertidos del Shulala
- **Tramo 1:** (Puente Río Maguazo-Descarga río Alao), el caudal promedio final de 0,256 m³/s, en este tramo se observa una disminución de 0,357 m³/s, de la abstracción para consumo humano para la ciudad de Riobamba y una reducción de 0,567 m³/s, de la abstracción para generación eléctrica.

4.7.3 Velocidad:

El análisis de la velocidad del flujo en la parte baja del río Maguazo, representado en la Figura 36, permite observar el comportamiento de la velocidad media en tres tramos principales, considerando las distancias desde el Puente Yurspamba (2,56 km) hasta la desembocadura en el río Alao (0,00 km).

Figura 36: Varianza de velocidad de los tres tramos del río Maguazo.



Fuente: Autor

La variación de la velocidad a lo largo de los tres tramos principales es la siguiente:

- **Tramo 3:** (Puente Yurspamba - Antes Bocatoma), con una velocidad inicial de 0,425 m/s, se observa un incremento sostenido hasta alcanzar 0,519 m/s, debido al flujo regular en esta sección.
- **Tramo 2:** (Antes Bocatoma - Puente Río Maguazo), en este tramo la velocidad inicial de 0,519 m/s muestra una ligera disminución hasta 0,50 m/s, debido a la topografía del terreno.

- **Tramo 1:** (Puente Río Maguazo - Desembocadura en el río), este tramo refleja una disminución significativa de la velocidad de 0,50 m/s a 0,25 m/s. Este comportamiento se debe principalmente a las intervenciones antropogénicas, como las abstracciones de agua para consumo humano y generación eléctrica.

4.7.4 Profundidad:

El análisis de la profundidad en los tres tramos principales del río Maguazo, representado en la figura 37, muestra la variación del nivel del agua desde el Puente Yurspamba (2,56 km) hasta la desembocadura en el río Alao (0,00 km).

Figura 37: *Análisis de la profundidad del río Maguazo*



Fuente: Autor

A continuación, se detallan los cambios en cada tramo, considerando los factores que afectan el comportamiento hidráulico:

- **Tramo 3:** (Puente Yurspamba - Antes Bocatoma), En este tramo, la profundidad inicial es de 0,38 m. Se observa una disminución sostenida hasta alcanzar 0,272 m, debido a

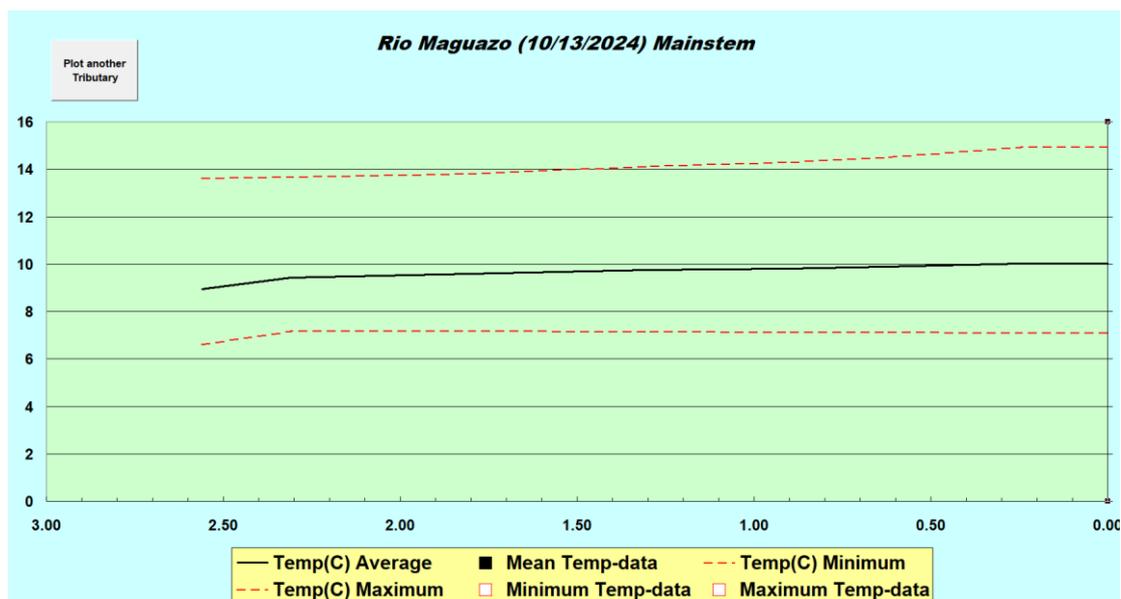
un aumento en la velocidad del flujo asociado a una pendiente más pronunciada en esta sección.

- **Tramo 2:** (Antes Bocatoma - Puente Río Maguazo), la profundidad permanece relativamente constante en aproximadamente 0,30 m, con condiciones hidráulicas estables en este tramo.
- **Tramo 1:** (Puente Río Maguazo - Desembocadura en el río), en este tramo final, la profundidad aumenta inicialmente hasta 0,32 m, debido a la infraestructura instalada generado cambios en el ancho del cauce. Posteriormente, se evidencia una disminución abrupta a 0,16 m en la desembocadura, atribuida a las abstracciones significativas para uso humano y generación eléctrica, lo que reduce el caudal y, por lo tanto, la profundidad.

4.7.5 Temperatura

La Figura 38 muestra la variación de la temperatura del agua simulada con el modelo QUAL2K a lo largo de la corriente principal del río Maguazo, considerando el promedio, mínimo y máximo de los datos registrados en cada tramo

Figura 38: Variación de temperatura del agua en el río Maguazo.



Fuente: Autor

- **Tramo 3:** (Puente Yurspamba - Antes Bocatoma), la temperatura promedio se encuentra cerca de los 9°C, lo cual es característico de aguas del río Maguazo, influenciadas por altitudes elevadas y poca exposición solar directa. Los valores mínimos y máximos oscilan entre aproximadamente 7°C y 14°C, e indican variaciones moderadas que pueden estar asociadas a cambios diarios en la radiación solar o descargas puntuales de afluentes más fríos. Este tramo presenta estabilidad térmica inicial, sin cambios significativos en los primeros kilómetros del modelo.
- **Tramo 2:** (Antes Bocatoma - Puente Río Maguazo), la temperatura promedio muestra una ligera tendencia ascendente, alrededor de los 10°C hacia la mitad del tramo. Los valores máximos y mínimos se separan ligeramente más en este tramo, debido a mayor exposición solar. Este tramo evidencia un leve calentamiento progresivo, coherente con una disminución en la velocidad del flujo y mayor contacto con la atmósfera.
- **Tramo 1:** (Puente Río Maguazo - Desembocadura en el río), Al final del modelo, la temperatura promedio alcanza valores cercanos a los 11°C. Los máximos se acercan a 15°C y los mínimos rondan los 8°C, lo que refleja una mayor variabilidad térmica en

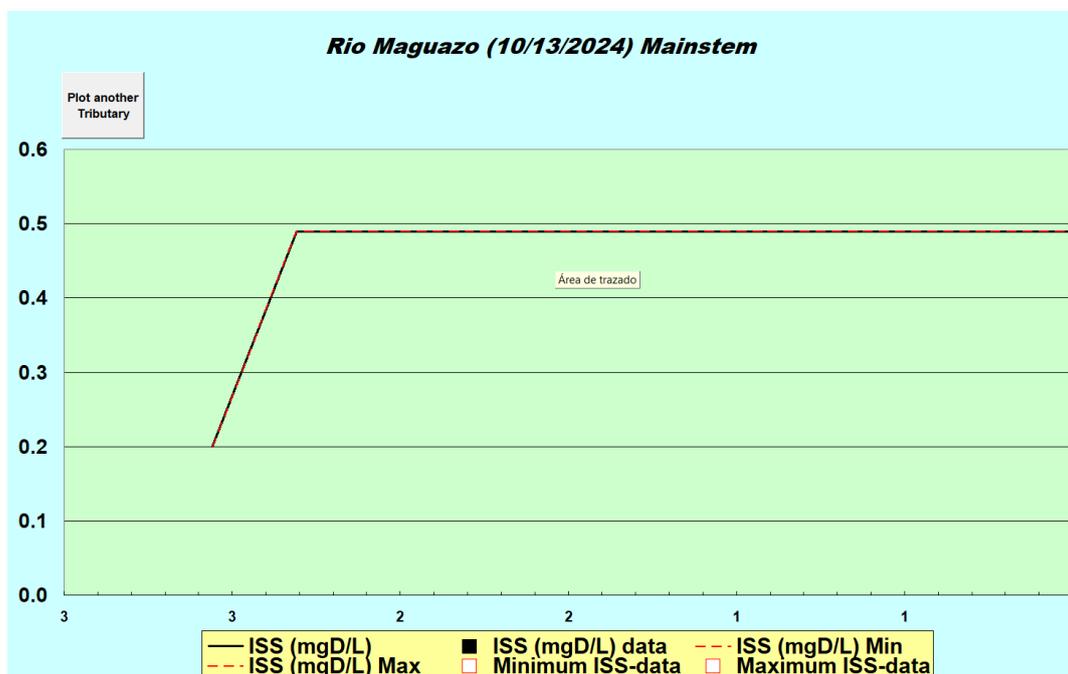
comparación con los tramos anteriores. Este tramo evidencia un mayor calentamiento del agua, a menores pendientes, mayor exposición solar y las abstracciones registradas que provocan pérdida de caudal y velocidad.

4.7.6 Sólidos suspendidos inorgánicos

Los sólidos suspendidos inorgánicos (SSI) en el río Maguazo presentan una variación inicial importante. En los primeros tramos, los valores oscilan entre 0,15 y 0,50 mg/L, lo que indica un incremento progresivo, asociado a la fuente de descarga puntual.

Posteriormente, a partir de cierto punto, los valores se estabilizan en 0,48 mg/L, y se mantienen constantes hasta el final del tramo modelado. Esta estabilidad sugiere que los procesos de sedimentación y suspensión de partículas están en equilibrio en esta sección del río.

Figura 39: Sólidos Suspendidos Inorgánicos (SSI) en el río Maguazo.

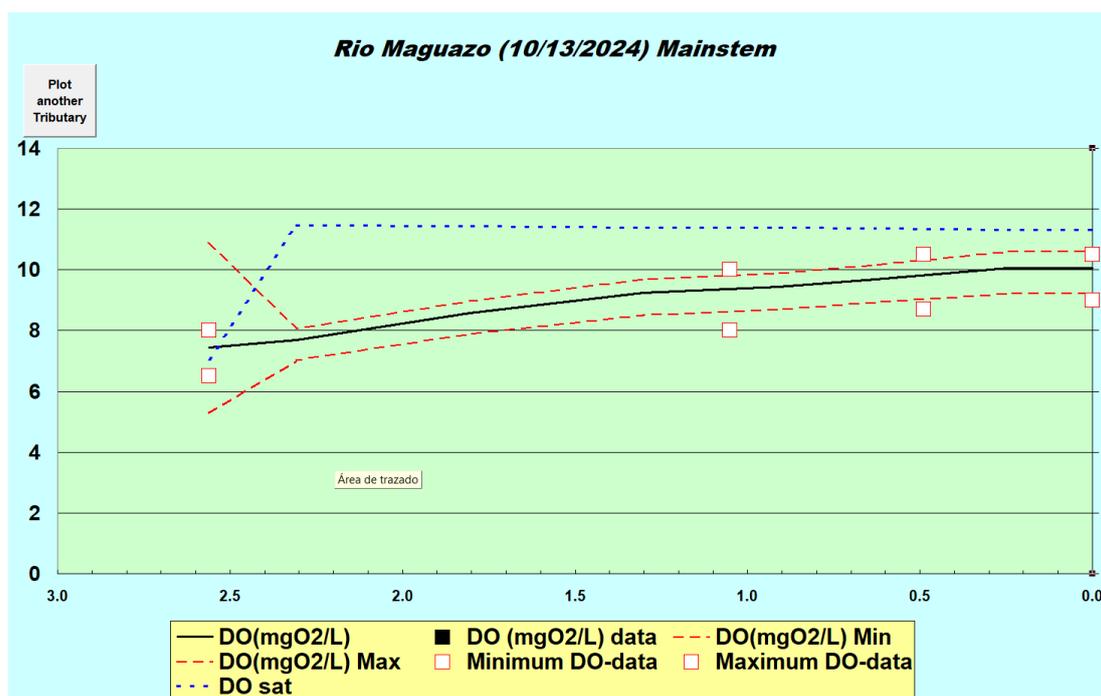


Fuente: Autor

4.7.7 Oxígeno disuelto

El análisis del oxígeno disuelto (OD) en el río Maguazo, basado en los resultados del modelo QUAL2K y las mediciones en campo, evidencia un comportamiento dinámico que varía según los tramos del río.

Figura 40: Oxígeno Disuelto (OD) del río Maguazo



Fuente: Autor

- **Tramo 3:** (Puente Yurspanba - Antes Bocatoma), el oxígeno disuelto presenta valores iniciales cercanos a los 8 mg/L, lo cual refleja un buen estado de calidad del agua. En este tramo no se evidencian pérdidas significativas de oxígeno. La turbulencia del flujo permite mantener un balance positivo entre los procesos de reaireación y consumo. No se alcanza la saturación de oxígeno (aproximadamente 10-12 mg/L según las condiciones de saturación representadas en la línea azul). Esto indica que el agua aún puede incorporar más oxígeno si las condiciones lo permiten.

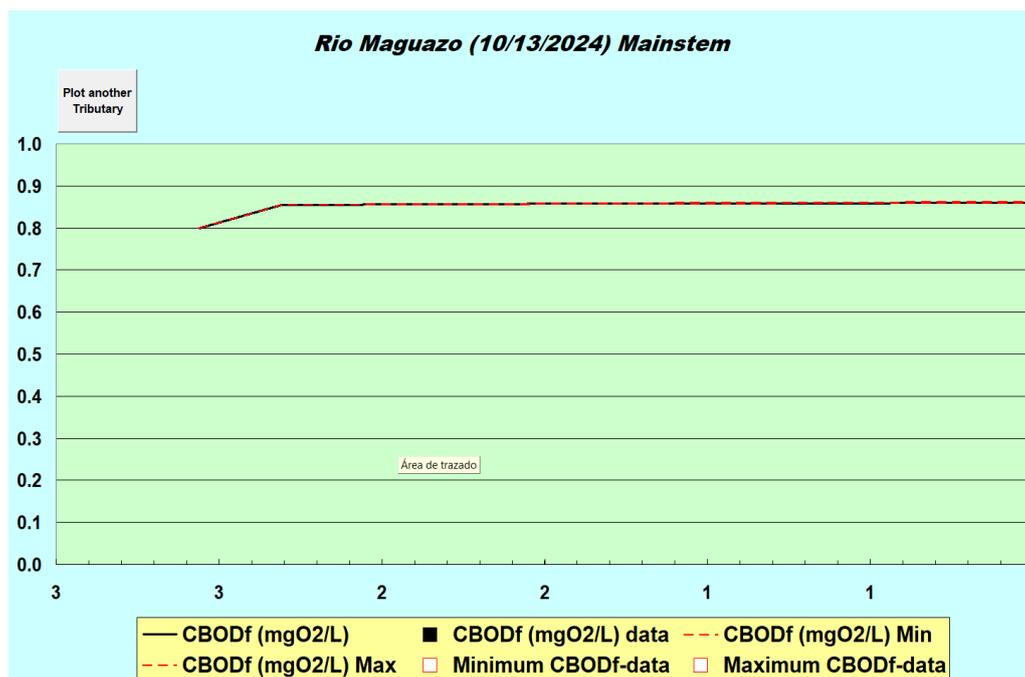
- **Tramo 2:** (Antes Bocatoma - Puente Río Maguazo), en este tramo, el oxígeno disuelto muestra un ligero incremento, que se estabiliza entre 8 y 9 mg/L. Este aumento se debe a la influencia de la reaireación causada por turbulencias o pequeñas cascadas característica del río Maguazo. No se observan signos de pérdida de oxígeno. El equilibrio entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los procesos de reaireación es favorable para mantener los niveles elevados de oxígeno disuelto. Aunque el oxígeno se aproxima al 90% de la saturación, no se alcanza el nivel máximo. Esto indica que el río tiene capacidad para soportar mayores aportes de oxígeno, lo cual es positivo para su calidad ambiental.

- **Tramo 1:** (Puente Río Maguazo - Desembocadura en el río Alao), los valores de oxígeno disuelto se estabilizan entre 9 y 9,5 mg/L, lo que demuestra una mejora gradual hacia el final del tramo estudiado. No hay evidencia de pérdidas en este tramo; por el contrario, la capacidad de autodepuración del río es evidente, lo cual se refleja en el incremento progresivo de los valores de oxígeno disuelto. Al igual que en los tramos anteriores, el oxígeno disuelto no alcanza los niveles de saturación. Esto es un indicador de que el sistema mantiene un balance favorable, sin situaciones de supersaturación que podrían alterar la dinámica de los ecosistemas acuáticos.

4.7.8 Demanda bioquímica de oxígeno rápida

La concentración de demanda bioquímica de oxígeno rápida (CBOD_f) a lo largo de los tramos del río Maguazo muestra las siguientes características:

Figura 41: *Demanda Bioquímica de oxígeno rápido.*



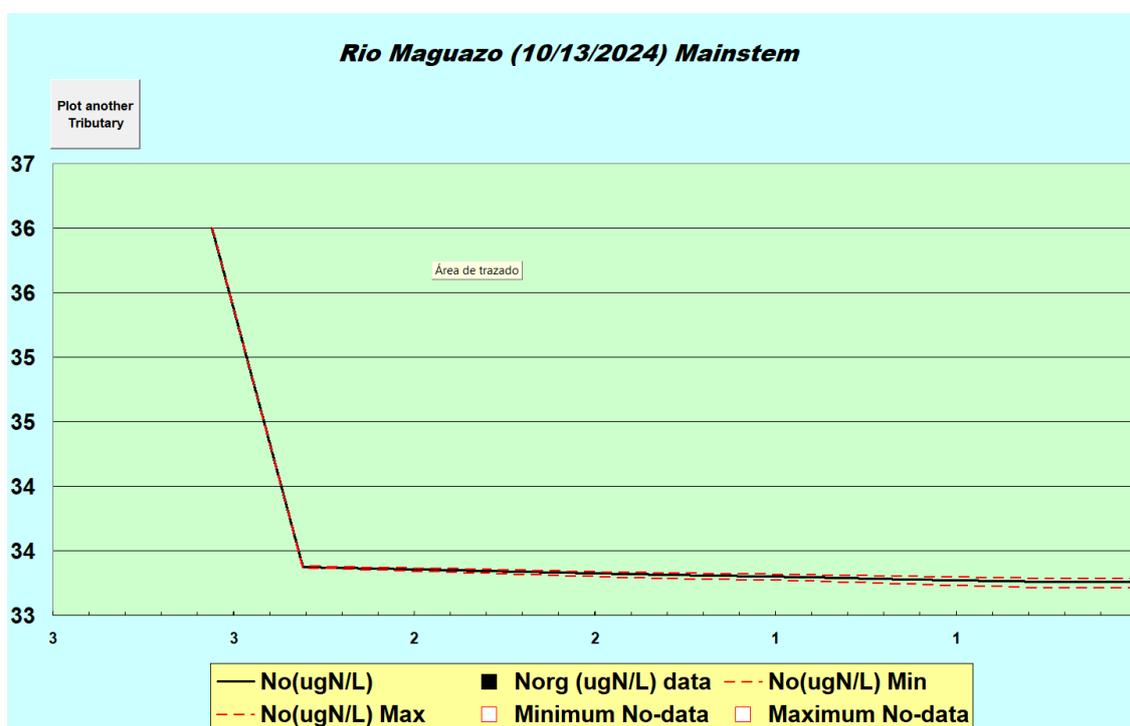
Fuente: Autor

- **Tramo 3:** (Puente Yurspamba - Antes Bocatoma), la CBODf inicia en 0,80 mgO₂/L, representa una carga moderada de materia orgánica fácilmente biodegradable. En este tramo se verificó una influencia limitada de actividades antropogénicas y una capacidad natural del río para autodepurarse mediante procesos biológicos.
- **Tramo 2:** (Antes Bocatoma - Puente Río Maguazo), En este tramo, la CBODf aumenta ligeramente a 0,85 mgO₂/L. Este incremento está asociado a pequeños aportes de materia orgánica, provenientes de descargas difusas y escorrentías superficiales que arrastran material orgánico.
- **Tramo 1:** (Puente Río Maguazo - Desembocadura en el río), en este tramo, la CBODf se estabiliza en 0,86 mgO₂/L, se verifica un equilibrio entre los procesos de aporte y degradación de materia orgánica. La estabilidad se presenta debido a la capacidad de autodepuración del río y la falta de descargas significativas aguas abajo.

4.7.9 Nitrógeno orgánico

Los valores de nitrógeno orgánico (NO) en el agua del río Maguazo presentan una disminución progresiva desde 36,00 $\mu\text{gN/L}$ en el punto inicial hasta estabilizarse en 33,26 $\mu\text{gN/L}$ en los tramos finales. Esta tendencia indica un proceso de transformación y asimilación natural del nitrógeno orgánico en el sistema acuático.

Figura 42: Nitrógeno Orgánico (NO) en el río Maguazo.



Fuente: Autor

- **Tramo 3:** (Puente Yurspamba - Antes Bocatoma), la concentración inicial de 36,00 $\mu\text{gN/L}$ refleja la entrada de materia orgánica debido a actividades humanas
- **Tramo 2:** (Antes Bocatoma - Puente Río Maguazo), en este tramo se observa la disminución gradual de nitrógeno orgánico atribuible a procesos de mineralización y a la actividad microbológica.
- **Tramo 1:** (Puente Río Maguazo - Desembocadura en el río), en este tramo el nitrógeno orgánico se estabiliza en 33,26 $\mu\text{gN/L}$ se verifica un equilibrio entre las entradas y la

transformación del nitrógeno orgánico, indicando una mejora en la calidad del agua aguas abajo.

4.8 Análisis de los resultados del modelado calibrado

Concluido el proceso de calibración y seleccionados los parámetros óptimos del modelo QUAL2K, se realizó una nueva simulación utilizando los datos obtenidos durante la campaña de medición del 13 de octubre de 2024. Los resultados generados con el modelo calibrado se utilizaron para evaluar la calidad del agua del río Maguazo, identificando posibles conflictos entre los usos y la calidad del recurso hídrico en este sistema.

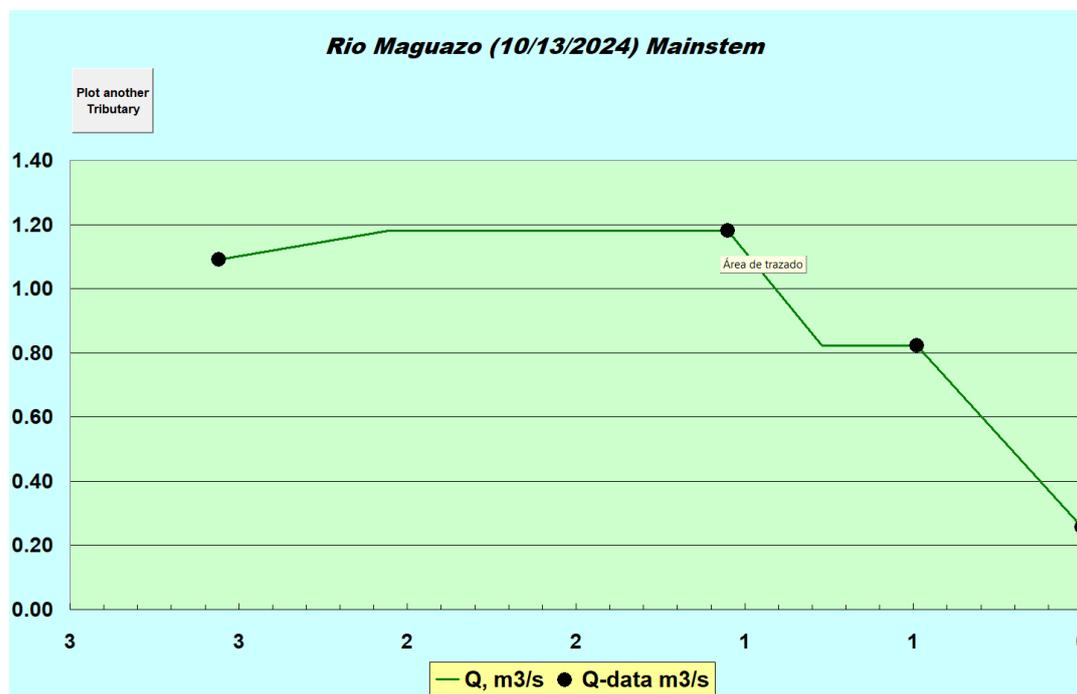
De manera general, el modelo mostró un ajuste moderado entre los valores simulados y los datos medidos en campo para las diferentes variables analizadas, como sólidos suspendidos inorgánicos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y oxígeno disuelto (OD). Este ajuste, aunque no perfecto, proporciona una línea base valiosa para futuras modelaciones, en las cuales se puedan refinar y ajustar las constantes calibradas según nuevas campañas de medición.

A continuación, se describen los principales hallazgos derivados del análisis de los resultados obtenidos con el modelo calibrado:

4.8.1 Caudal

El caudal fue calculado por el modelo mediante balances de flujo, considerando el caudal inicial en la cabecera del tramo del río Maguazo estudiado y los aportes y abstracciones a lo largo de su recorrido.

Figura 43: Análisis de Caudales del tramo de estudio del río Maguazo.



Fuente: Autor

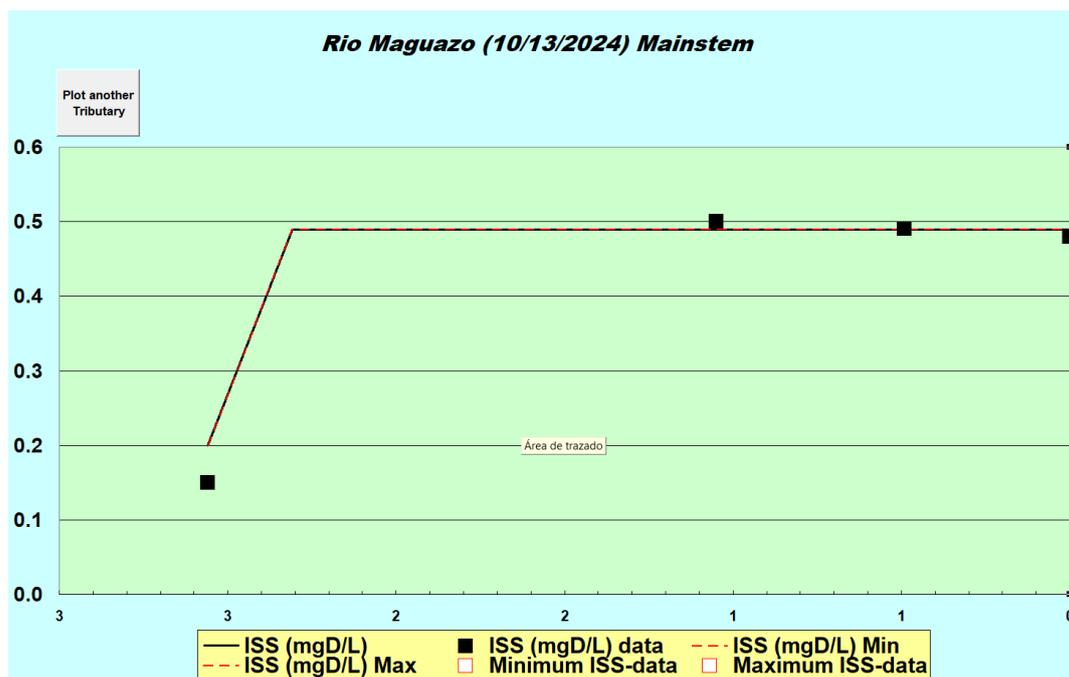
El análisis del caudal refleja una disminución significativa a lo largo del tramo estudiado. En la cabecera, el caudal inicial registrado fue de 1,09 m³/s, mientras que en la descarga hacia el río Alao se redujo a 0,256 m³/s, como se observa en la figura 43. Esta disminución está asociada principalmente a extracciones directas del río para uso de consumo humano, agrícola y energía, además de pérdidas naturales por infiltración.

El comportamiento del caudal, representado en el modelo, es consistente con las observaciones de campo.

4.8.2 Sólidos Suspendidos Inorgánicos

En la siguiente gráfica se expresan los resultados de los sólidos suspendidos inorgánicos, en el tramo de estudio.

Figura 44: *Sólidos suspendido Inorgánicos del tramo de estudio del río Maguazo.*



Fuente: Autor

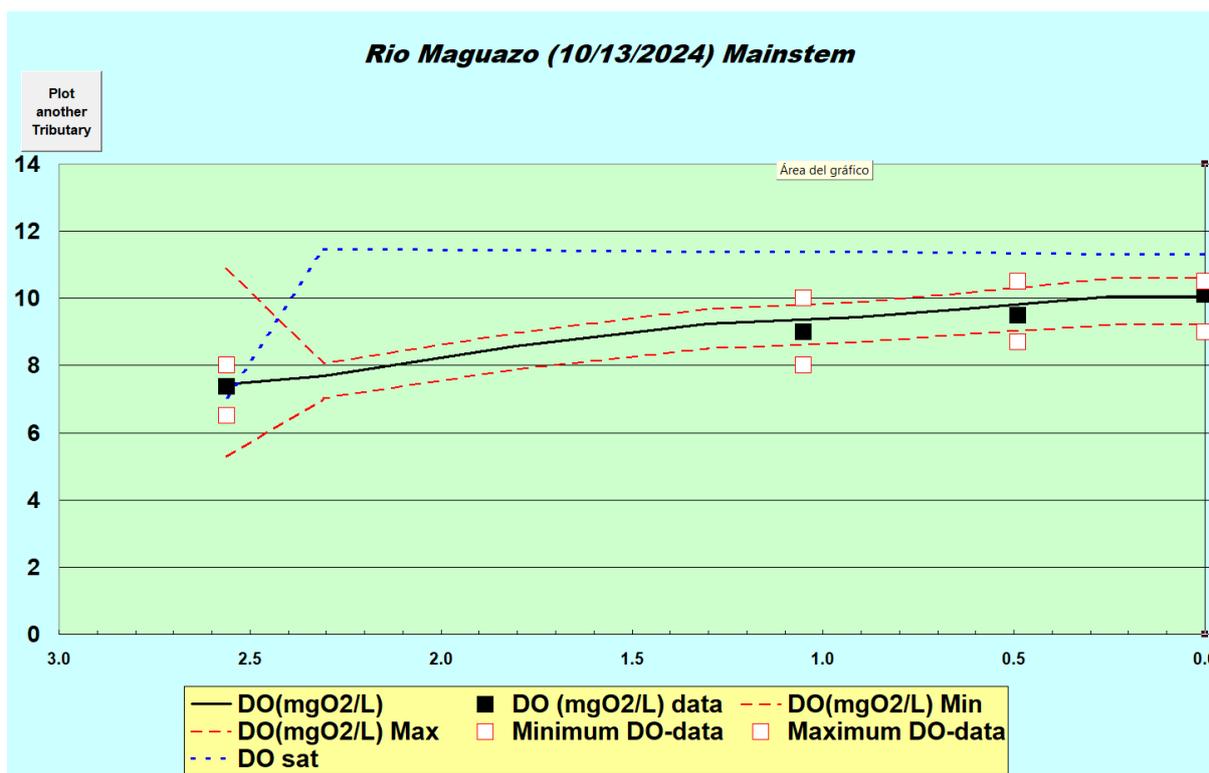
Los valores obtenidos para los sólidos suspendidos inorgánicos (ISS) en el tramo del río Maguazo (figura 44) fueron analizados en el contexto de la normativa ambiental ecuatoriana, específicamente la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua (TULSMA, Libro VI, Anexo 1). Según esta normativa, los límites permisibles para sólidos suspendidos totales (SST) en cuerpos de agua de uso doméstico o recreativo deben ser menores a 30 mg/L, mientras que para descargas de efluentes el límite es de 60 mg/L.

En el caso del tramo analizado del río Maguazo, las concentraciones de ISS oscilaron entre 0,1 y 0,49 mgD/L, valores que están significativamente por debajo de los límites establecidos para SST en ambas categorías de la normativa. Esto sugiere que, desde el punto de vista de los ISS, el río mantiene una calidad aceptable en términos de contaminación inorgánica, incluso en puntos críticos como la descarga del vertido de Shulalá.

4.8.3 Oxígeno Disuelto

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el parámetro de Oxígeno Disuelto luego de la calibración del modelo aplicado al río Maguazo. Este análisis incluye la interpretación de los datos y su comparación con la normativa ambiental ecuatoriana.

Figura 45: Oxígeno Disuelto del tramo de estudio del río Maguazo.



Fuente: Autor

En la figura 45 se observa la representación del oxígeno disuelto máximo o de saturación del tramo del río bajo condiciones de equilibrio, junto con los valores de oxígeno disuelto obtenidos luego de la calibración del modelo. Los resultados indican que las concentraciones de oxígeno disuelto oscilan entre 7,36 y 10 mg/l, lo cual evidencia un buen nivel de oxígeno presente en el agua a lo largo del tramo de estudio. Este rango de valores refleja la capacidad natural del río Maguazo para mantener un equilibrio entre los procesos de consumo y

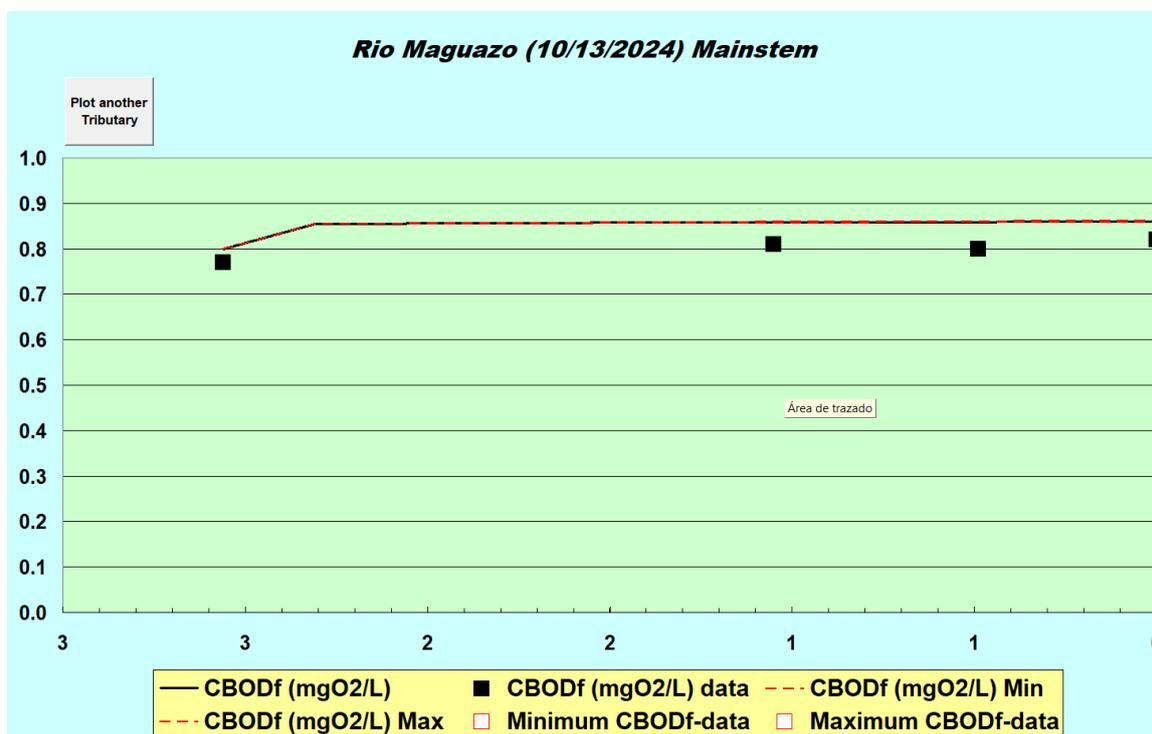
reaireación de oxígeno, una característica típica de ríos de montaña con alta capacidad de autodepuración.

De acuerdo con la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua (TULSMA, Libro VI, Anexo 1), los cuerpos de agua destinados al abastecimiento de agua potable requieren una concentración mínima de oxígeno disuelto de 6 mg/L. Los valores obtenidos en este estudio superan ampliamente este límite, confirmando que el río Maguazo cumple con los estándares ambientales requeridos para este uso.

4.8.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno Rápida

Los resultados de calibración de la DBO rápida (DBO5) en la corriente principal del río Maguazo se encuentran a continuación:

Figura 46: DBO5 del tramo de estudio del río Maguazo.



Fuente: Autor

Los resultados obtenidos para la DBO5 en la corriente principal muestran valores que oscilan entre 0,7 mg/L y 1,0 mg/L en los puntos de control a lo largo del tramo de estudio

(figura 46). Este rango de valores indica una baja presencia de materia orgánica biodegradable en el agua, lo que refleja una buena calidad del agua en el río Maguazo.

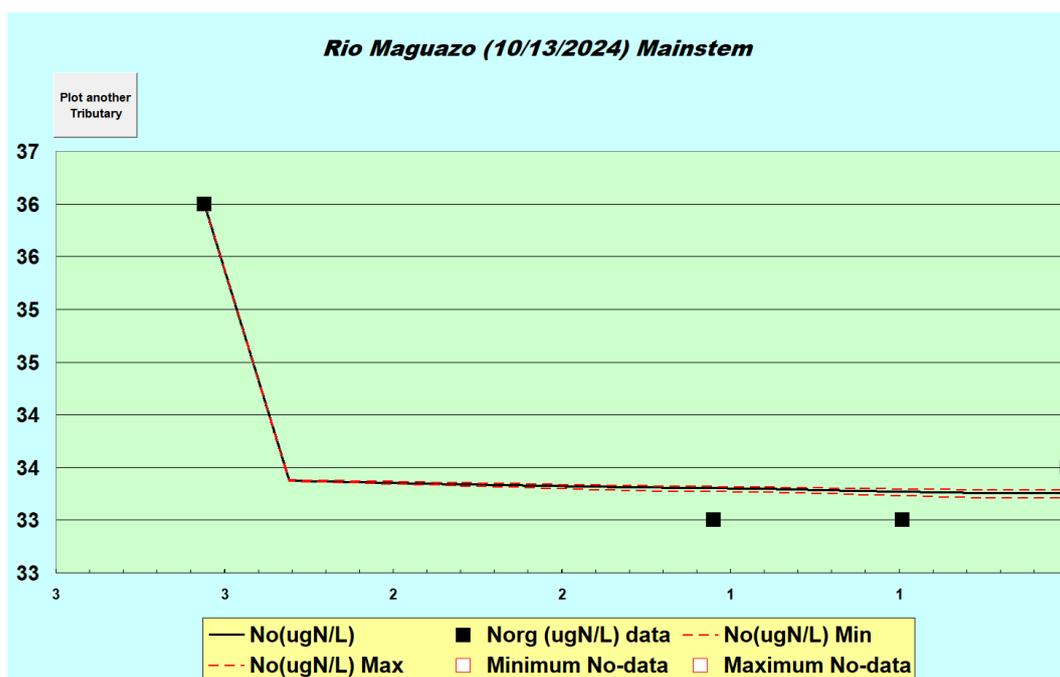
El rango observado cumple con los criterios establecidos en la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua (TULSMA, Libro VI, Anexo 1), que especifica que los cuerpos de agua destinados a usos como abastecimiento de agua potable y conservación de la biodiversidad deben presentar concentraciones de DBO5 inferiores a 5 mg/L.

La baja DBO5 también es coherente con las características de los ríos de montaña, donde la alta turbulencia y las bajas cargas orgánicas contribuyen a una rápida degradación de la materia orgánica y a los procesos de autodepuración eficientes.

4.8.5 Nitrógeno Orgánico

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el parámetro de Nitrógeno Orgánico luego de la calibración del modelo aplicado al río Maguazo (Figura 47). Este análisis incluye la interpretación de los datos y su comparación con la normativa ambiental ecuatoriana.

Figura 47: Nitrógeno Orgánico del tramo de estudio del río Maguazo.



Fuente: Autor

Según la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua del Ecuador, los límites permisibles para diversos parámetros de calidad del agua varían según el uso asignado al cuerpo de agua. Sin embargo, la normativa no especifica un límite máximo permisible para el nitrógeno orgánico en cuerpos de agua destinados al abastecimiento de agua potable o para otros usos.

Los valores de nitrógeno orgánico medidos en el río Maguazo, que oscilan entre 36,00 $\mu\text{gN/L}$ y 33,26 $\mu\text{gN/L}$, equivalen a 0,036 mgN/L y 0,033 mgN/L , respectivamente. Estos niveles son relativamente bajos y se consideran típicos en cuerpos de agua superficiales con baja contaminación orgánica.

4.9 Simulación de escenarios utilizando el modelo QUAL2K

4.9.1 Escenario 1: Incremento de la carga contaminante.

La modelación del río Maguazo mediante el software Qual2K permite proyectar escenarios futuros de calidad del agua bajo diferentes supuestos de carga orgánica y caudal. En este caso, se ha establecido un escenario en el cual el caudal se mantiene constante mientras que la carga orgánica aumenta progresivamente debido a factores antrópicos y naturales. Con base en los resultados obtenidos y considerando el contexto socioambiental del área de influencia, se ha seleccionado un incremento del 8% en la carga de materia orgánica (DBO rápida y lenta) como valor representativo para el año 2030. Este porcentaje se fundamenta en los siguientes aspectos:

4.9.1.1 Dinámica de uso del suelo y actividades humanas

De acuerdo con el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Pungalá (PDOT 2019-2023), la microcuenca del río Maguazo abarca territorios con usos del suelo predominantemente agropecuarios y forestales, así como ecosistemas de páramo y bosques nativos. En el territorio de la microcuenca, los principales usos del suelo incluyen:

- **Páramos (70,1%):** Su función es crítica para la regulación hídrica, pero están sometidos a presión por actividades de pastoreo y cultivo en áreas cercanas. Las prácticas de manejo inapropiado incrementan la erosión y el arrastre de materia orgánica al río.
- **Pastizales (7,71%):** Estas áreas están destinadas al pastoreo, y la intensificación de la actividad ganadera genera un aumento en el aporte de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) y materia orgánica al agua.

- **Cultivos de maíz, papa y otros (2,49%):** Estas actividades agrícolas, si no son manejadas adecuadamente, pueden incrementar los lixiviados de materia orgánica y fertilizantes hacia el sistema hídrico.

El crecimiento poblacional y la intensificación de las actividades agropecuarias proyectadas para el período 2015-2030 representan un incremento potencial en la generación de residuos orgánicos. Esto incluye estiércol, restos de cultivos y residuos agropecuarios que, sin un manejo adecuado, terminan aportando cargas de materia orgánica al río Maguazo.

4.9.1.2 Evidencia de tendencias actuales

Durante los últimos años, la calidad del agua del río Maguazo ha mostrado indicios de alteración, especialmente en los puntos cercanos a asentamientos humanos y zonas agrícolas. Mediciones realizadas en diferentes puntos de muestreo indican una tendencia al aumento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en sus componentes rápida y lenta, lo cual se asocia directamente con las actividades humanas en la microcuenca.

Por ejemplo, los valores actuales de DBO medida en el punto Puente Yurspamba oscilan entre 0,8 mg/L y 0,86 mg/L, con valores de DO que fluctúan entre 7,44 mg/L y 9,25 mg/L. Estos valores reflejan un sistema hídrico moderadamente oxigenado, pero vulnerable a cambios futuros debido al incremento de cargas orgánicas provenientes de los usos del suelo.

4.9.1.3 Proyección del incremento de materia orgánica (2015-2030)

El aumento del 8% en la materia orgánica proyectada para 2030 se justifica mediante:

- **Tendencias poblacionales y agropecuarias:** La población en la parroquia de Pungalá y áreas circundantes continúa en expansión, lo que implica un incremento en la

generación de aguas residuales domésticas y agropecuarias. Estas descargas tienen un impacto directo sobre los cuerpos de agua.

- ***Cambio en la intensidad del uso del suelo:*** El uso de pastizales y áreas agrícolas podría intensificarse debido a la demanda de productos agrícolas y ganaderos. Esto generaría un aumento proporcional en las cargas difusas de materia orgánica hacia los ríos de la cuenca.
- ***Presión ambiental en los ecosistemas de páramo:*** Aunque el páramo tiene una alta capacidad de regulación hídrica, la presión del pastoreo y la erosión de suelos podría alterar la carga de nutrientes y materia orgánica transportada por escorrentía al río.

4.9.1.4 Consideraciones técnicas del modelo

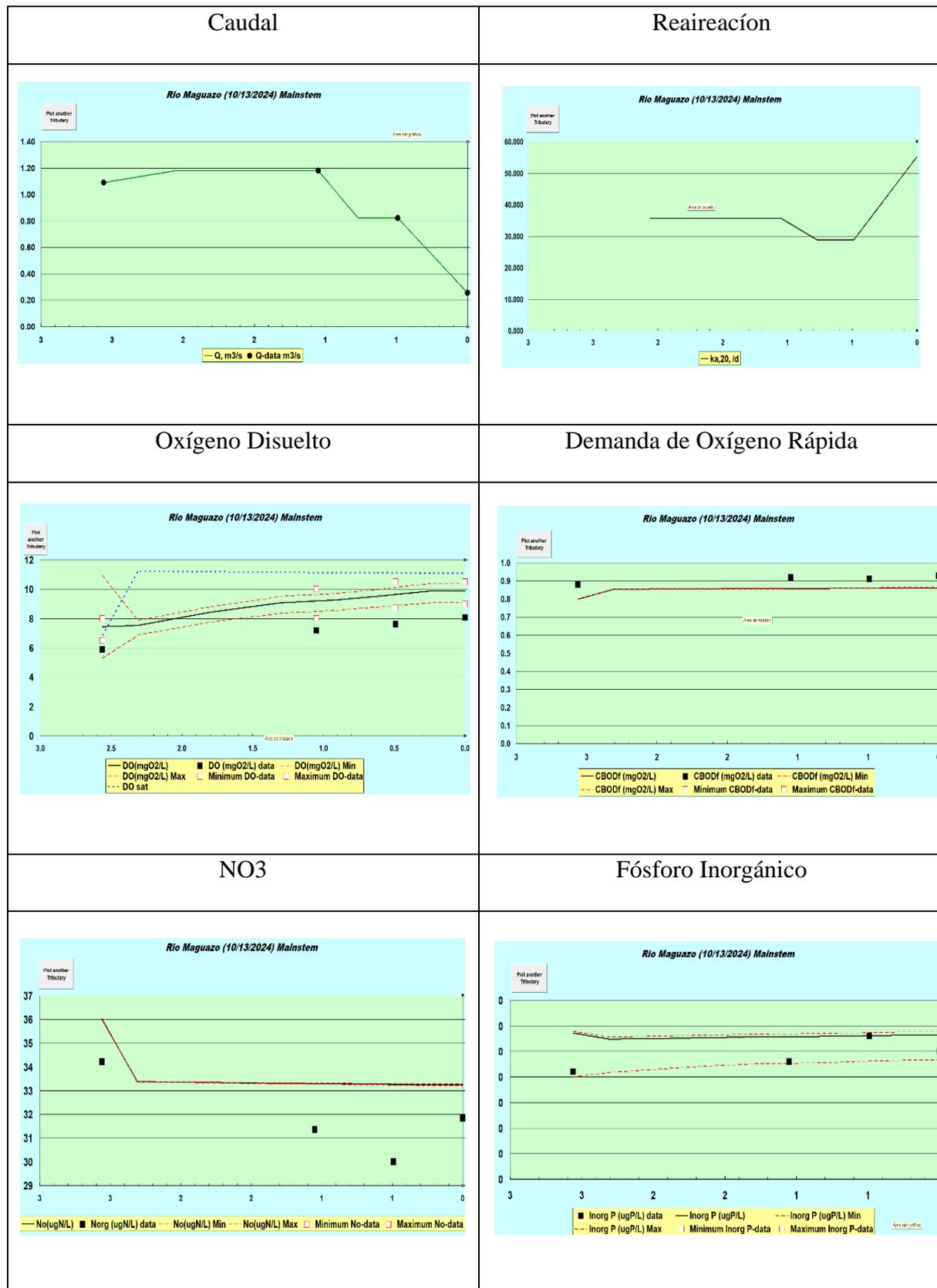
El software Qual2K permite simular escenarios con incrementos en las cargas orgánicas para evaluar su impacto en la calidad del agua. En este caso, el incremento del 8% fue seleccionado como un valor conservador dentro del rango estimado (8-10%), atendiendo a:

- ***Datos actuales de calidad del agua:*** El análisis de las condiciones actuales refleja que el sistema aún tiene capacidad de asimilación de carga orgánica, pero un incremento mayor al 8% podría resultar en efectos más críticos, como una reducción significativa del oxígeno disuelto (DO) y un deterioro en las condiciones ecológicas.
- ***Margen de sostenibilidad del sistema:*** Este porcentaje permite proyectar un escenario manejable dentro de los límites aceptables para la gestión sostenible del recurso hídrico.

4.9.1.5 Impacto esperado del incremento del 8% en los parámetros clave

Con el incremento proyectado (Anexo 5), se esperan cambios en los valores de calidad del agua para los principales puntos de monitoreo en el río Maguazo:

Tabla 16: Incremento de la carga contaminante de los parámetros claves del río Maguazo.



Fuente: Autor

Posterior al modelamiento realizado para el escenario 1, en la cual se incrementó la carga contaminante se obtuvo como resultados que: en comparación al escenario original los parámetros que presentan un mayor cambio son: Oxígeno disuelto, puesto que muestra cómo se reduce su concentración, lo cual afecta de manera directa a los organismos presentes dentro del cuerpo hídrico, por el contrario los nitritos incrementan su concentración, lo cual puede afectar al cuerpo hídrico puesto que favorece el crecimiento de algas y rompe el equilibrio del ecosistema, lo que podría ocasionar a futuro procesos de eutrofización en zonas específicas del recorrido en las cuales el caudal tiende a disminuir.

4.9.2 Escenario 2: Disminución de Caudales

Este escenario simula una reducción del 20% anual en las precipitaciones, lo que implica una disminución del 17,14% en el caudal promedio anual del río Maguazo. Adicionalmente, se contempla un incremento de 1 °C en la temperatura del aire, representando condiciones severas que se derivan del cambio climático (Raga & Artaxo, 2018).

Los resultados modelados mediante el software Qual2K permiten evaluar las implicaciones sobre la calidad y cantidad de agua, así como los efectos ecológicos en el sistema fluvial.

4.9.2.1 Reducción del Caudal (17,14%):

Efectos en el régimen hidrológico:

Disponibilidad hídrica: La reducción en el caudal limita los usos del agua, incluyendo el suministro para consumo humano, generación eléctrica y riego agrícola, afectando directamente la economía y la seguridad hídrica en la región.

Capacidad de dilución de contaminantes: La disminución de caudal incrementa la concentración de nutrientes y contaminantes orgánicos e inorgánicos, favoreciendo el

deterioro de la calidad del agua. Esto se refleja en aumentos en parámetros como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) y la concentración de nitrógeno amoniacal (NH₃).

4.9.2.2 Relación con la calidad del agua:

DBO5: Una menor capacidad de dilución incrementa la acumulación de materia orgánica y nutrientes en el agua. Se estima que la DBO5 promedio en el tramo modelado podría aumentar entre un 15% y 20%, lo que indica un mayor esfuerzo del sistema para la degradación de la materia orgánica.

Oxígeno disuelto (OD): Los valores de OD tienden a reducirse en zonas de bajo caudal debido a la menor reoxigenación, que podría llevar a condiciones críticas en tramos específicos durante períodos de sequía prolongada. Aunque el modelo muestra que los valores no caen por debajo de 4 mg/L.

4.9.2.3 Efectos en la ecología del río:

Alteración de hábitats acuáticos: La reducción de caudal impacta la biodiversidad, limitando el transporte de nutrientes, sedimentos y oxígeno disuelto esenciales para los ecosistemas acuáticos.

Especies dependientes de caudales mínimos: Las especies que requieren refugios con flujos adecuados enfrentan un mayor estrés, reduciendo la resiliencia ecológica del sistema fluvial.

4.9.2.4 Aumento de 1 °C en la Temperatura del Aire:

- **Efectos sobre la temperatura del agua:**

Un aumento en la temperatura del aire influye directamente en la temperatura del agua, puesto que existe una correlación entre ambas variables. Se estima que la temperatura del agua podría incrementarse entre 0,5 y 0,8 °C.

Este aumento reduce la capacidad del agua para disolver oxígeno, lo que lleva a una disminución en el oxígeno disuelto (OD), con impactos negativos en la fauna acuática.

- **Aceleración de procesos biológicos y químicos:**

Temperaturas más altas intensifican los procesos de descomposición de materia orgánica, incrementando la DBO5 y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el sistema.

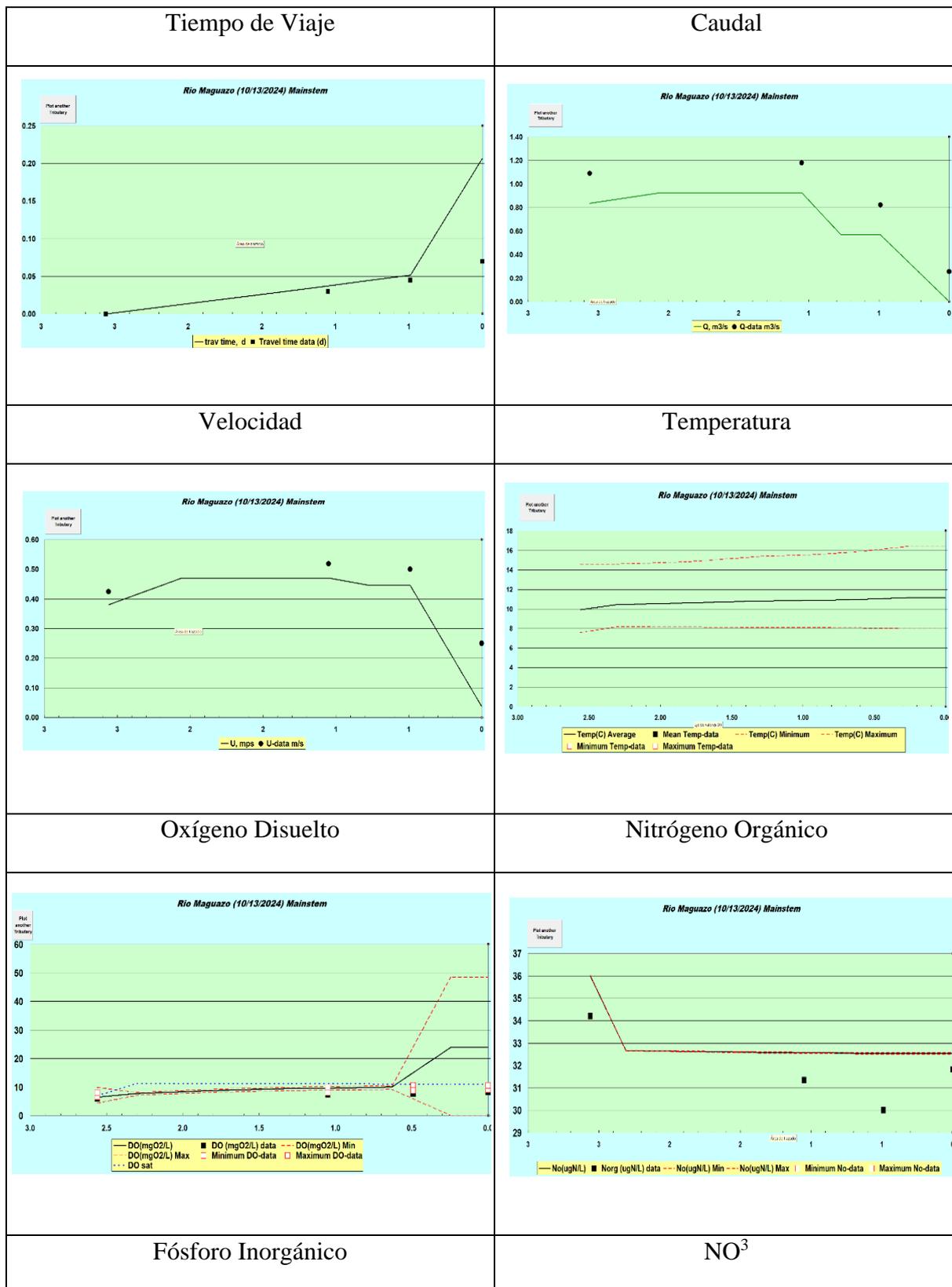
Además, el nitrógeno amoniacal (NH_3) se vuelve más tóxico para los organismos acuáticos, puesto que su forma no ionizada (NH_3) aumenta con temperaturas más altas.

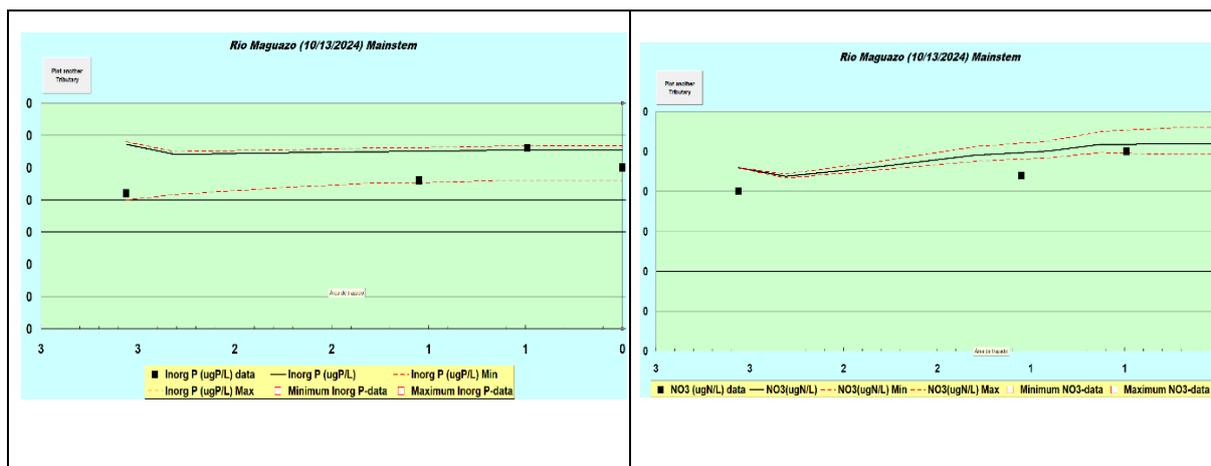
- **Cambios en la estructura del ecosistema:**

Especies sensibles al calor son desplazadas o eliminadas, favoreciendo el crecimiento de especies más tolerantes a altas temperaturas, como ciertas algas o bacterias. Esto incrementa el riesgo de eutrofización y floraciones algales.

El modelo Qual2K se utilizó para simular los efectos combinados de la reducción del caudal y el aumento de la temperatura. A continuación, se presentan los principales resultados proyectados:

Tabla 17: Disminución de Caudales.





Fuente: Autor

Al modificar aspectos como la temperatura y caudal se obtuvo el escenario 2 donde se identificó que los cambios se producen de manera general en varios aspectos, siendo el más alarmante el oxígeno disuelto pues como se logra observar en Tabla (17), éste tiende a disminuir, lo que implica que los procesos de eutrofización han llegado a una etapa en la cual la autodepuración del río es insuficiente y por lo tanto pierde gran parte de su calidad para consumo humano, y se convierte en inadecuada para los procesos de captación realizados en la bocatoma Trasbase del río Maguazo y pone en riesgo el ecosistema donde se encuentra, así como a las actividades agrícolas y ganaderas de las comunidades aledañas.

4.10 Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la calidad del agua de la microcuenca Maguazo es adecuada para el consumo humano. Este es un hallazgo importante, puesto que garantiza que el agua cumple con los estándares establecidos tanto a nivel nacional como internacional, lo cual es fundamental para la salud de las comunidades locales y el desarrollo sostenible de la región.

En cuanto a la microcuenca Maguazo, los resultados obtenidos mediante el Software QUAL2K, llevan a una conclusión similar a la presentada por Chagñay & Ricaurte (2018), en su investigación “Plan de protección de las microcuencas Maguazo y bocatoma como fuentes de captación de agua potable para la ciudad de Riobamba” que identificaron la calidad de agua en función de diversos parámetros, que afirman que en general, el agua cumplía con los estándares para consumo humano. En nuestro caso, al incorporar datos más recientes, confirmamos que incluso en los períodos de mayor estrés hídrico los parámetros de calidad del agua permanecen dentro de los límites aceptables, lo que la califican como apta para consumo humano.

El incremento del 8% en la carga de materia orgánica (DBO rápida y lenta) en los caudales evidencia el impacto de las actividades humanas y el uso del suelo en la región, donde los páramos (70,1%), como principales reguladores hídricos, han disminuido su capacidad de retención debido a las prácticas de manejo inapropiado que incrementan la erosión y el arrastre de materia orgánica al río, concuerda con el estudio previo de Guallin (2022), señalan que la degradación de estos ecosistemas lleva a una disminución en la capacidad de retención de agua y al aumento de la escorrentía superficial contaminada. De igual manera los pastizales (7,71%) que están destinadas al pastoreo, y la intensificación de la actividad ganadera genera un aumento en el aporte de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) y materia orgánica al

agua, lo que coincide con observaciones de Vallejo M, Carolina A (2022), quien destacó la relación entre la compactación del suelo y el deterioro de los recursos hídricos.

La reducción del 17,14% en el caudal promedio anual del río Maguazo, fusionado con un incremento de 1 °C en la temperatura del aire representa condiciones severas que se derivan del cambio climático. Conforme al modelo Qual2K, estas condiciones agravan el deterioro hidrológico y ecológico del sistema fluvial. La disminución del caudal limita la capacidad de dilución de contaminantes, elevando parámetros como la DBO_5 y reduciendo el oxígeno disuelto (OD) a niveles críticos en ciertas zonas, lo que amenaza la biodiversidad acuática y su resiliencia. Por su parte, el aumento de la temperatura del agua intensifica procesos biológicos y químicos, incrementando la toxicidad del nitrógeno amoniacal (NH_3) y favoreciendo la eutrofización. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas, como de (Rosero & Alexandra, 2019), quien destaca la necesidad de implementar estrategias de manejo integral del recurso hídrico y acciones de mitigación climática para proteger los ecosistemas acuáticos y garantizar la sostenibilidad de los servicios eco sistémicos asociados.

Capítulo 5

Conclusiones

- La investigación realizada a la parte baja de la microcuenca del río Maguazo permitió caracterizar las unidades hidrográficas estratégicas del área de estudio, los análisis geomorfológicos de la red hidrográfica evidenciaron la relevancia de la cobertura vegetal y las características edáficas, lo cual permite entender la dinámica y la interacción con los factores ambientales y antrópicos en la zona de estudio donde se puede evidenciar que presenta un índice de compacidad de 1,3832, por lo que se clasifica en una cuenca ovalada redonda a ovalada- alargada, de igual manera presenta una curva hipsométrica en fase de juventud, determinando una microcuenca del río Maguazo con tendencia a inundaciones y un alto grado de erosión.
- La aplicación del software QUAL2K en la parte baja del río Maguazo demostró ser una herramienta efectiva para simular y analizar las condiciones de auto depuración del agua del río Maguazo. Los parámetros analizados fueron, sólidos suspendidos inorgánicos presentaron concentraciones entre 0,1 y 0,49 mgD/L, (DBO5) muestran valores que oscilan entre 0,7 mg/L y 1,0 mg/L, siendo el límite máximo permisible: 2,0 mg/l: oxígeno disuelto (OD) oscilan entre 7,36 y 10 mg/l, el límite máximo permisible no menor a 6 mg/l: lo que evidenciando un buen nivel de oxígeno presente en el agua, el Nitrógeno Orgánico presenta valores entre los 0,036 mgN/L y 0,033 mgN/L, siendo el límite máximo permisible de 1,0 mg/l, los análisis realizados permitieron determinar que los parámetros evaluados se encuentran dentro de los límites aceptables para consumo humano.
- El software Qual2K permite proyectar escenarios futuros de calidad donde la carga contaminante incrementó, mientras que el caudal del río Maguazo se mantiene

constante. Esto produce alteraciones como un aumento considerable en la concentración de nitritos y fósforos, que favorecen a los procesos de eutrofización en los cuerpos de agua, lo que dificulta, en amplia medida, la capacidad de supervivencia de diversos organismos, razón por la cual se identifica una disminución en la DBO simulada y por lo tanto, se reduce la calidad del cuerpo hídrico y se hace necesario la aplicación de procesos de potabilización de agua.

- Por otro lado, al modificar aspectos en un posible escenario ocasionado por el cambio climático, como la reducción de la precipitación y el caudal, además de un ligero incremento en la temperatura, se aprecia como los efectos negativos sobresalen, siendo el más relevante la disminución de la DBO, puesto que indica que los procesos de autodepuración, propios del cuerpo hídrico, no son suficientes, lo cual limita su capacidad de uso como fuente de agua para consumo humano y agrícola.

Recomendaciones

- Se considera necesario realizar un análisis de calidad de agua de manera periódica en intervalos de 3 meses, con el fin de facilitar una respuesta rápida y a su vez evitar posibles afectaciones a la salud de la población cercana. Los resultados obtenidos se deben comparar con la normativa vigente correspondiente.
- En consideración a la relevancia de la bocatoma ubicada en el río Maguazo es pertinente la instalación de estaciones meteorológicas que permitan mantener un registro sobre el comportamiento de las condiciones climáticas que afectan directamente al sector, lo que facilita la ejecución de futuras investigación y toma de decisiones.
- Es necesario realizar investigaciones similares a la presentada, considerando un período de tiempo distinto, con la finalidad de entender cómo el cambio de temporada puede afectar la calidad del agua del río Maguazo y a su vez identificar qué parámetros se ven más afectados en función a la época del año.
- Promover campañas de educación y acción comunitaria a través de la EP-EMAPAR que permitan regular del uso y la calidad del agua para la agricultura, la ganadería y consumo humano, realizar campañas de reforestación con especies nativas de la zona que permitan cuidar las riberas del río Maguazo para evitar la erosión, así mantener la calidad de agua apta para consumo.
- Mejorar las rutas de acceso al río Maguazo para garantizar un monitoreo constante y efectivo de las condiciones del ecosistema.

Referencias Bibliográficas

- Alvarado, E. (2017). Manual de Medición de Caudales. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2023/03/064.pdf>
- Amezquita, D. N. (2020). Implementación del modelo de calidad de agua Q2K sobre un tramo del río Pamplonita para simulación de escenarios. *BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA.*
- ANA (2021). Guía para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas hidrográficas. Autoridad Nacional del Agua, Perú.
- ANA (2021). Sistematización de la localización de puntos de monitoreo. Codificación Otto. Autoridad Nacional del Agua, Perú. Disponible en: ANA.
- Arango, J., Roser, A., Sierra, C., Prieto, L., & Ramírez, L. (2020). CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CALDAS-CORPOCALDAS.
- ASFE. (2018). Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente para el Estado de Oaxaca. Auditoría superior de fiscalización del estado de Oaxaca.
- Aza, A., Carolina, J., Sandoval, N., & Gabriela, L. (2018). Elaboración de la base de información hidrometeorológica de la cuenca del río Guayas para el procesamiento con el modelo hydraccess ante inundaciones.
- Baeza, E. (2016). Calidad del Agua.
- Balcorta, C., & Arenas, R. (2010). Eutrofización: abundancia que mata.
- Bracho, V., Angulo, A., & Díaz, M. (2016). Evaluación del software qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar (Colombia) impactados por actividad minera. vol.16, 5–13.
- Barreto, P., & Espinoza, G. (2011). INSTRUCTIVO_DE_MEDICIÓN_DE_CAUDAL.
- Brown, L., & Barnwell, T. (1987). Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Model.

- Basantes, C. L., & Andrade, J. C. (2022). Evaluación de la calidad del agua del río Chibunga por medio del Índice EPT. *Dominio de las Ciencias*, 8(4), 707-725.
- Caballero Ivanna, Zavala Aldo, & Perdomo Maria. (2023). DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR THE ANALYSIS OF WATER QUALITY IN RIVERS. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1306>
- Cabezas Damián, Andrade Diego, & Torres Johana. (2018). Introducción a la metodología de la investigación científica. www.repositorio.espe.edu.ec.
- Caiza, J., & Meléndez, J. (2020). "Modelamiento de la Autodepuración de la Acequia PUMAMAQU, cantón Cayambe".
- Cañibano, A., Sastre, P., & Dándrea, R. (2016). Área y perímetro para la caracterización de formas. *Sumat*, 25–32.
- Carrillo, P. (2013). Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la columna de agua de las estaciones fijas ecuatorianas 1988-2013.
- Castillo, M. (2024). Evaluación de la calidad del agua del río Zamora en el tramo Las Pitás - Florencia, mediante modelación matemática para periodos de estiaje. *Universidad Nacional de Loja Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables*.
- Castro, R., Gómez, A., y Delgado, J. (2021). Caracterización integral de cuencas hidrográficas mediante SIG y monitoreo de calidad de agua. *Revista de Gestión Ambiental*, 18(3), 25-42.
- CIMCOOL. (2011). Porque es importante el oxígeno disuelto.
- Cirelli, A. F., & Volpedo, A. V. (2020). INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS: ¿QUÉ, ¿CÓMO Y CUÁNTO REFLEJAN LA CALIDAD DEL AGUA?
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. In Registro Oficial (Vol. 449, Issue 20). www.lexis.com.ec

- Chapra, S., & Pelletier, G. (2003). A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality Documentation and Users Manual The Mystic River at Medford, MA.
- Chapra, S. C., Pelletier, G. J., & Tao, H. (2022). QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality. *Environmental Modelling & Software*.
- Chagñay, V., & Ricaurte, P. (2018). Plan de Protección de la Microcuencas Maguazo y Bocatoma como Fuentes de Captación de Agua Potable para la ciudad de Riobamba.
- David, C., Larrea, M., Luis, J., & Ordóñez, T. (2024). Evaluación de la calidad del agua de los ríos Matadero, Llaviuco y Tomebamba mediante la aplicación de ICA-NSF. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>
- Dahan, S., & Kashiwase, H. (7 de Julio de 2016). El ODS 6 sobre agua y saneamiento es esencial para el desarrollo sostenible. Obtenido de Banco Mundial : <https://blogs.worldbank.org/es/opendata/el-ods-6-sobre-agua-y-saneamiento-es-esencial-para-el-desarrollo-sostenible>
- Díaz, S., & González, J. (2022). La importancia de la temperatura del agua en las redes de abastecimiento. *Ingeniería Del Agua*, 26(2), 107–123. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17366>
- Domínguez, J., Portela, J., & Hernández, A. (2005). Empleo del Modelo de Streeter y Phelps modificado para la planificación de estrategias de saneamiento del Río Almendares. In *Revista CENIC Ciencias Químicas* (Vol. 36).
- EMAPAR. (2020). Empresa Pública Municipal de Ahua Potable y Alcantarillado de Riobamba.
- EPA (2024). QUAL2K Manual. Disponible en: www.epa.gov/athens.

- Escobar, Jairo. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura.
- Escudero, C. L., Liliana, S., & Cortez Suárez, A. (2018). Técnicas y métodos cualitativos para la investigación científica.
- Foro de los Recursos Hídricos. (2013). La gestión comunitaria del agua para consumo humano y el saneamiento en el Ecuador: DIAGNÓSTICO Y PROPUESTAS.
- GAD Pungalá. (2023). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial 2022-2026. Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Pungalá.
- GAD Riobamba. (2023). Gestión hídrica en el cantón Riobamba: desafíos y avances. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Riobamba.
- Gallego Andrés, Gómez Diego, Bautista Gabriela, & Pardo Juan. (2024). Informe Agua potable y saneamiento comentarios AJUST.
- Gómez-Delgado, F., Espinoza, R., y Ramírez, L. (2022). Evaluación del cambio en el uso del suelo y su impacto en los recursos hídricos. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(4), 1013–1030.
- Gómez-Martínez, G., Galiano, L., Rubio, T., Prado-López, C., Redolat, D., Paradinas Blázquez, C., Gaitán, E., Pedro-Monzonís, M., Ferriz-Sánchez, S., Añó Soto, M., Monjo, R., Pérez-Martín, M. Á., Llorens, P. A., & Cervera, J. M. (2021). Effects of climate change on water quality in the jucar river basin (Spain). *Water (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/w13172424>
- Greenpeace. (2022). AMENAZA INVISIBLE: la contaminación del Agua por Nitratos.
- Guadarrama-Tejas, R., Kido-Miranda, J., Roldan-Antunez, G., & Salas-salgado, M. (2016). Contaminación del agua (Vol. 2). www.ecorfan.org/spain
- Gualin, L. (2022). Valoración Económica y Ambiental de las Microcuencas de los Ríos Alao y Maguazo de la parroquia Pungalá, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo.

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., María del Pilar Baptista Lucio, D., & Méndez Valencia Christian Paulina Mendoza Torres, S. (2014). Metodología de la Investigación.
- Herrera, J., Vásquez, P., & Torres, E. (2022). Evaluación hidrográfica de las cuencas de la Sierra Centro del Ecuador. *Revista Científica Hidroandes*, 15(3), 45-56.
- Herrera, L., & Carol, V. (2024). Aplicación del modelo QUAL2KW en la evaluación de la calidad del agua en la cuenca del río Chillón, Perú.
- IDEAM (2021). Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Disponible en: Guía IDEAM.
- INAMHI. (2023). Boletín PREDICCIÓN CLIMÁTICA.
- INEN. (2013b). Norma Técnica Ecuatoriana 2169.
- INEN. (2020). Norma Técnica Ecuatoriana 1108, Agua para consumo humano.
- INEC. (2022). CPV NACIONAL DENSIDAD POBLACIONAL.
- IPCC. (2021). Bases físicas Resumen para responsables de políticas.
- Liu, H., Zhao, X., & Li, Y. (2022). Advances in water quality modeling for river systems. *Environmental Modeling & Assessment*, 27(1), 89-102.
- Lozano-Rivas, A. (2012). FUNDAMENTOS DE DISEÑO DE PLANTAS DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES.
- López, D., García, M., & Rodríguez, A. (2021). Análisis morfométrico en cuencas hidrográficas: Aplicaciones y técnicas avanzadas. *Journal of Geographical Sciences*, 15(3), 45-62.
- MAE. (2015). REGLAMENTO LEY RECURSOS HÍDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA. www.lexis.com.ec

- MAATE. (2023). Actualización de la Demarcación Hidrográfica Nacional. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.
- Martin, C., Santhi, C., & Arnold, J. G. (2021). Calibration strategies for watershed modeling. *Journal of Hydrology*, 596, 125774
- Mahato, S., & Karmakar, S. (2020). Application of QUAL2K model in assessing river water quality. *Water Resources Management*, 34(2), 307-320.
- Melching, C. S., & Yoon, C. G. (1996, March). Key Sources of Uncertainty in QUAL2E Model of Passaic River. *Journal of Water Resources Planning and Management*; American Society of Civil Engineers (ASCE). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:2\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:2(105))
- Mamani, A. (2023). Modelamiento de la calidad del agua aplicando Qual2k para la evaluación de impactos ambientales y propuestas de medidas de mitigación en el canal Vista alegre de Chorrillos, Lima. <https://repositorio.untels.edu.pe>
- Monjarás, M., & Kimberly, N. (2021). Modelamiento de la Calidad de Agua Superficial en la cuenca Quilca-Chili en el periodo 2016-2021. 0000-0002-6645-0050
- Montesdeoca, A., & Granja, A. (2013). Análisis Del Impacto Socioambiental En Las Playas Del Ecuador, Mediante La Creación De Una Empresa De Servicios Para Limpieza De Playas.
- Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. (2015). Análisis de Agua - Medición De Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas – Método De Prueba.
- NTE INEN 2176:2013. (2013). AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO INEN 2176: 2013.

- O'Dell, C. and Grayson, C. (1998) If Only We Knew What We Know: Identification and Transfer of Internal Best Practices. *California Management Review*, 40, 154-174.
<https://doi.org/10.2307/41165948>
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable.
- OMS. (2018). WHO GLOBAL WATER, SANITATION AND HYGIENE ANNUAL REPORT.
- ONU. (2018). WATER QUALITY AND WASTEWATER.
- Orellana, M. (2022). El agua en la naturaleza. En *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable* (pp. 15-24). Editorial Abya-Yala.
<https://doi.org/10.7476/9789978108208.0002>.
- Horta, K., & Quiña, E. (2021). Diseño de la planta de tratamiento, tanque de Almacenamiento y Red de distribución de agua potable para la comunidad Santa Clara de San Millán perteneciente al Distrito Metropolitano de Quito.
- Ortiz, P. (2023). Contaminación Microbiológica del Agua para consumo humano.
- Osorio, M., Carrillo, W., Negrete, J., Loor, X., & Riera, E. (2021). *La calidad de las aguas residuales domésticas The quality of domestic waste water A qualidade das águas residuais domésticas*. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21(3), 419–425.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2005.07.002>
- Pomca, Q. (2010). PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO LA VIEJA.
- Párraga, C., & Galarza, J. (2009). Análisis de la Actividad Agrícola Como Contaminante Del Agua, Alternativas Tecnológicas para la Desinfección del Agua Para Consumo

Humano En Comunidades Rurales y Recursos Legislativos para la Prevención y Su Conservación.

Pérez, L., Morales, R., & Vega, C. (2022). Impacto del relieve en el régimen hidrológico: Caso de estudio en microcuencas andinas. *Environmental Research*, 28(2), 103-117.

Raga, G., & Artaxo, P. (2018). Short-lived Climate Pollutants.

Ricce, M., & Robles, K. (2014). Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Superficiales y Estrategias de Gestión Sostenible en la Microcuenca Río Negro - SATIPO.

Rosero, B., & Alexandra, Y. (2 de diciembre de 2019). *Gestión ambiental en la escombrera Puninhuaco – parroquia Pungalá, del proyecto “Trasvase de agua Maguazo-Alao”*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13625>

Ruiz, G., Martínez, J., y Andrade, C. (2023). Validación de datos climáticos globales con estaciones locales en cuencas de los Andes. *Journal of Hydrometeorology*, 24(2), 321–334.

SENAGUA. (2016). ESTRATEGIA NACIONAL DE CALIDAD DEL AGUA.

Serrano, A., & Martínez, R. (2015). GUÍA BÁSICA DE CONTROL DE CALIDAD DE AGUA. <http://palintest.com><http://delagua.org><https://maps.arcgis.com>

Tacusi, C., & Hacha, E. (2015). Modelación Hidrológica en la Subcuenca de Pitumarca con la Aplicación del Modelo Weap (Sistema de Evaluación y Planeación de Agua) Canchis - Cusco.

Terán, C., Argüello, J., Cando, C., Salazar, D., & Muñoz, J. (2020). Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. www.ecuadorencifras.gob.ec

Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente. (2015). TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE.

https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf

- Torre-Marín, C., Granados, S., Herrera, R., & Martínez, R. (2009). Ecología industrial y desarrollo sustentable.
- UNESCO. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021. www.unwater.org.
- UNESCO. (2024). Agua para la prosperidad y la paz Agua para la prosperidad y la paz Datos, cifras y planes de acción Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024.
- Vallejo Melena, Carolina Andrea. (5 de julio de 2022). *Análisis del riesgo climático para la protección de las fuentes hídricas de la microcuenca hidrográfica del río Maguazo, parroquia Pungalá, cantón Riobamba*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/19614>
- Velásquez, J. (2017). Contaminación de suelos y aguas por Hidrocarburos en Colombia-6285716.
- Xu, Z., Tang, Y., & Wang, J. (2021). Impact of cloud cover on river temperature dynamics. *Journal of Environmental Management*, 290, 112545.
- Zambrano-Bigiarini, M., Bellin, A., & Martínez, F. (2020). Parameter sensitivity analysis in water quality models. *Water Resources Management*, 34(4), 1289–1303.
- Zhang, R., Qian, X., Yuan, X., Ye, R., Xia, B., & Wang, Y. (2012). Simulation of water environmental capacity and pollution load reduction using QUAL2K for water environmental management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(12), 4504–4521. <https://doi.org/10.3390/ijerph9124504>
- Zhicay, J. (2020). Caracterización Morfométrica y Estudio Hidrológico de la Microcuenca del Río San Francisco.

Anexos

Anexo 1: Temperatura (TerraClimate) Jan 1990 to Dec 2020

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	PROMEDIO
1990	11.6619	10.4165	10.312	10.2887	10.9666	10.2165	9.2711	9.2216	10.8171	10.8386	12.2891	11.9885	10.6907
1991	11.3887	11.4392	10.7619	11.3887	11.1165	9.867	8.6445	8.3452	9.8666	11.9893	11.7159	12.3893	10.7427
1992	11.9885	11.4165	11.2113	11.6887	11.4899	10.667	7.8445	7.9216	9.5165	11.2386	11.3885	10.612	10.5820
1993	10.5887	10.0165	10.112	11.0386	11.2664	10.3165	9.7711	9.3452	10.4171	11.112	11.3891	11.8885	10.6051
1994	11.1392	10.8165	10.4619	10.8887	11.0165	9.7664	8.9437	8.9452	10.2165	11.212	11.9159	12.3893	10.6427
1995	11.1885	10.5165	10.1619	11.1379	10.7664	9.8165	9.5711	9.7216	10.0165	10.712	11.3159	11.1386	10.5053
1996	10.5885	10.1165	9.8619	10.0379	10.4893	9.0936	7.2445	9.1216	9.1171	8.412	10.5891	10.412	9.5903
1997	9.7885	9.9165	8.812	9.9887	10.1165	9.7936	9.0711	8.7225	10.1165	9.9386	11.9664	11.7887	10.0016
1998	10.7893	11.5165	9.1619	11.8386	11.2165	9.5165	8.9443	9.0216	9.8165	10.8893	11.1159	10.5887	10.3680
1999	10.2893	10.0165	9.7885	9.8388	9.1899	8.8165	7.621	8.1216	9.3165	9.7113	10.8159	10.6850	9.5176
2000	9.9619	9.7392	9.7619	10.1887	10.0165	9.2165	8.4711	8.8718	9.5171	10.312	10.7885	11.112	9.8298
2001	10.6885	10.6165	10.3619	10.7113	10.5893	8.593	9.1711	8.8452	9.7173	10.812	11.4885	11.6386	10.2694
2002	10.6885	10.8165	10.5887	10.5887	10.6666	8.7664	8.721	8.2718	9.2165	9.912	10.3891	10.5885	9.9345
2003	11.2159	11.0392	9.8113	10.3388	9.7893	8.8936	8.1711	7.9718	8.94	10.0386	11.0891	11.1386	9.8698
2004	9.2885	9.3165	8.6619	10.6887	9.9899	7.9165	8.3216	8.1225	8.2171	10.2886	11.1159	11.0386	9.4139
2005	10.7885	8.8899	7.712	10.5388	9.6893	8.4664	9.9437	8.1223	9.6165	8.6893	11.1885	10.612	9.5214
2006	10.5159	10.7394	8.7619	10.2887	9.4165	8.8936	7.7445	8.8216	9.1165	9.5893	11.1159	11.1893	9.6828
2007	11.4159	10.8165	8.6113	10.5887	9.8165	8.1165	8.2711	8.1216	8.9165	8.7893	10.7891	10.3885	9.5535
2008	10.3887	10.3899	9.9887	10.1887	9.4666	8.7936	9.2445	8.9452	9.3171	10.4386	10.4885	10.3885	9.8366
2009	10.2885	10.2165	8.9619	10.0388	10.9899	10.1165	9.2711	9.2225	10.0666	12.0893	12.2891	12.5885	10.5116
2010	12.9893	12.1899	10.9619	11.1887	10.9883	9.5165	9.3445	8.8223	9.8165	10.712	10.3885	10.1386	10.5881
2011	10.6893	9.7899	9.512	11.0887	10.7666	9.967	9.9437	9.7452	10.1400	10.1893	10.3885	10.8885	10.2591
2012	9.7893	9.2165	10.0887	11.2386	10.4666	10.2936	9.9445	9.7225	10.4171	10.812	11.3891	10.9893	10.3640
2013	11.2887	9.2165	9.7113	11.1113	9.5165	9.1165	8.4445	9.6718	10.5165	10.9893	10.9159	11.0885	10.1323
2014	11.0392	10.0165	9.9113	10.1887	11.0165	10.1165	9.4445	9.7452	10.5173	11.112	11.5159	11.6887	10.5260
2015	11.2885	10.0392	9.9113	11.0388	11.6165	10.0165	9.4711	10.5225	11.7165	12.5893	12.2891	13.2386	11.1448
2016	12.5885	11.5165	11.212	11.7887	11.3165	10.3165	9.6711	9.1452	9.5666	11.3887	11.8891	11.6885	11.0073
2017	11.5893	11.2899	11.1619	11.2887	11.2165	10.1165	9.3445	8.1951	8.5165	8.1113	10.2885	11.3885	10.2089
2018	10.9885	10.5899	10.5621	10.1388	11.5664	9.8165	9.2711	6.9443	8.8165	11.112	11.8885	12.0386	10.3111
2019	11.8159	12.0171	11.7887	12.0388	11.7165	10.7165	10.0711	9.4225	10.7439	11.1394	12.5165	12.6893	11.3897
2020	12.2885	11.8392	11.5887	11.4113	11.6165	10.7394	10.0171	10.1452	10.4893	10.8386	12.0159	11.9885	11.2482
PROMEDIO	11	11	10	11	11	10	9	9	10	11	11	11	10.2854

Fuente: Auto

Anexo 2: Aforo de los puntos de monitoreo

Anexo 3: Toma y Análisis de muestras tomadas de los puntos seleccionados.



Anexo 5: Simulación de escenarios con Incremento de la carga contaminante (Escenario 1).

Reach	Downstream	Downstream	Hydraulics								Reaeration
Label	Label	Distance	Q, m ³ /s	E, m ³ /s	H, m	B, m	Ac, m ²	U, mps	trav time, d	Slope	ka ₂₀ , /d
Puente Yurspamba		2.56	1.09	0.00	0.39	6.84	2.60	0.42	0.00	0.143000	
Puente Yurspamba		2.06	1.18	0.59	0.28	8.21	2.28	0.52	0.01	0.141100	35.67
Puente Yurspamba		1.55	1.18	0.59	0.28	8.21	2.28	0.52	0.02	0.141100	35.67
Puente Yurspamba		1.05	1.18	0.76	0.28	8.21	2.28	0.52	0.03	0.141100	35.67
Antes Bocatoma		0.77	0.82	0.41	0.31	5.22	1.61	0.51	0.04	0.126400	28.82
Antes Bocatoma		0.49	0.82	0.30	0.31	5.22	1.61	0.51	0.05	0.126400	28.82
Puente Río Maguazo		0.00	0.26	0.13	0.17	6.09	1.03	0.25	0.07	0.062900	55.30

Reach Label	x(km)	cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO(mgO ₂ /L)	BODs (mgO ₂ /L)	BODf (mgO ₂ /L)	NO _x (ugN/L)	NH ₄ (ugN/L)	NO ₃ (ugN/L)	Po (ugP/L)	org P (ugP/L)	Phyto (ugA/L)	Leitritus (mgD/L)	Pathogen	Alk	pH	tot Alg (gD/m ²)	TOC	TN	TP	TKN	TSS (mgD/L)	CBOD _u	Bot Algae (mgA/m ²)	NH ₃	DO sat	pHsat
Puente Yurspamb	2.56	0.00	0.20	7.44	0.37	0.80	36.00	0.40	0.23	0.20	0.29	2.00	0.80	0.00	20.00	6.67	0.00	0.83	51.03	2.49	50.80	1.20	2.25	0.00	0.00	6.89	7.79
Puente Yurspamb	2.31	0.00	0.49	7.53	0.41	0.85	33.37	0.58	0.22	0.20	0.27	1.84	0.75	0.00	26.10	7.48	0.00	0.84	47.44	2.32	47.22	1.43	2.27	0.00	0.00	11.22	7.91
Puente Yurspamb	1.81	0.00	0.49	8.42	0.41	0.86	33.34	0.63	0.23	0.20	0.28	1.84	0.75	0.00	26.10	7.54	0.00	0.84	47.44	2.32	47.21	1.42	2.27	0.00	0.00	11.19	7.91
Puente Yurspamb	1.30	0.00	0.49	9.08	0.41	0.86	33.30	0.68	0.24	0.21	0.28	1.84	0.75	0.00	26.10	7.60	0.00	0.84	47.44	2.32	47.20	1.42	2.27	0.00	0.01	11.15	7.91
Antes Bocatoma	0.91	0.00	0.49	9.27	0.41	0.86	33.29	0.70	0.25	0.21	0.28	1.83	0.75	0.00	26.10	7.62	0.00	0.84	47.44	2.32	47.19	1.42	2.27	0.00	0.01	11.14	7.91
Antes Bocatoma	0.63	0.00	0.49	9.50	0.41	0.86	33.27	0.73	0.26	0.21	0.28	1.83	0.75	0.00	26.10	7.65	0.00	0.84	47.44	2.32	47.19	1.42	2.27	0.00	0.01	11.13	7.91
Puente Río Magu	0.25	0.00	0.49	9.88	0.41	0.86	33.25	0.76	0.26	0.21	0.28	1.83	0.74	0.00	26.10	7.69	0.00	0.84	47.44	2.32	47.18	1.42	2.27	0.00	0.01	11.09	7.91
Terminus	0.00	0.00	0.49	9.88	0.41	0.86	33.25	0.76	0.26	0.21	0.28	1.83	0.74	0.00	26.10	7.69	0.00	0.84	47.44	2.32	47.18	1.42	2.27	0.00	0.01	11.09	7.91

Reach	Distance	SOD	Sed Flux CH ₄	Sed Flux NH ₄	Sed Flux Inorg	Sed Flux NO ₃
Label	x(km)	gO ₂ /m ² /d	gO ₂ /m ² /d	mgN/m ² /d	mgP/m ² /d	mgN/m ² /d
Puente Yurspamb	2.31	0.18	-0.02	1.08	0.01	0.85
Puente Yurspamb	1.81	0.18	-0.02	0.85	0.01	0.71
Puente Yurspamb	1.30	0.18	-0.02	0.72	0.01	0.62
Antes Bocatoma	0.91	0.18	-0.02	0.69	0.01	0.59
Antes Bocatoma	0.63	0.18	-0.02	0.65	0.01	0.56
Puente Río Magu	0.25	0.18	-0.01	0.59	0.01	0.52

Fuente: Autor

Anexo 6: Simulación de escenarios con disminución de Caudal (Escenario 2).

Reach	Downstream	Downstream	Hydraulics							Reaeration	
Label	Label	Distance	Q, m ³ /s	E, m ³ /s	H, m	B, m	Ac, m ²	U, mps	trav time, d	Slope	ka ₂₀ /d
Puente Yurispamba		2.56	0.84	0.00	0.33	6.79	2.20	0.38	0.00	0.143000	
Puente Yurispamba		2.06	0.93	0.46	0.24	8.18	1.97	0.47	0.01	0.141100	44.03
Puente Yurispamba		1.55	0.93	0.46	0.24	8.18	1.97	0.47	0.02	0.141100	44.03
Puente Yurispamba		1.05	0.93	0.60	0.24	8.18	1.97	0.47	0.04	0.141100	44.03
Antes Bocatoma		0.77	0.57	0.28	0.25	5.17	1.28	0.45	0.04	0.126400	39.97
Antes Bocatoma		0.49	0.57	0.21	0.25	5.17	1.28	0.45	0.05	0.126400	39.97
Puente Rio Maguazo		0.00	0.00	0.00	0.01	6.00	0.05	0.04	0.21	0.062900	34.27

Reach Label	x(km)	cond(umhos)	TSS(mgDL)	DO(mgO2/L)	BOD5(mgO2/L)	BOD1(mgO2/L)	No(ugN/L)	NH4(ugN/L)	NO3(ugN/L)	Po(ugP/L)	org P(ugP/L)	Phyto(ugA/L)	eritus(mgDL)	Pathogen	Alk	pH	ot Alg(gD/m ²)	TOC	TN	TP	TKN	TSS(mgDL)	CBODu	Bot Algae(mgA/m ²)	NH3	DO sat	pHsat
Puente Yurispamb	2.56	0.00	0.20	6.36	0.37	0.80	36.00	0.40	0.23	0.20	0.29	2.00	0.80	0.00	20.00	6.67	0.00	0.83	51.03	2.49	50.80	1.20	2.25	0.00	0.00	6.89	7.79
Puente Yurispamb	2.31	0.00	0.57	7.72	0.42	0.87	32.66	0.61	0.22	0.20	0.27	1.80	0.74	0.00	27.78	7.46	0.00	0.85	46.46	2.27	46.24	1.49	2.28	0.00	0.00	11.19	7.94
Puente Yurispamb	1.81	0.00	0.57	8.76	0.42	0.87	32.62	0.67	0.23	0.20	0.27	1.80	0.74	0.00	27.78	7.55	0.00	0.85	46.46	2.27	46.23	1.49	2.28	0.00	0.00	11.15	7.94
Puente Yurispamb	1.30	0.00	0.57	9.47	0.42	0.87	32.58	0.72	0.25	0.21	0.27	1.79	0.74	0.00	27.78	7.63	0.00	0.85	46.46	2.27	46.21	1.48	2.28	0.00	0.01	11.11	7.94
Antes Bocatoma	0.91	0.00	0.57	9.67	0.42	0.87	32.57	0.74	0.25	0.21	0.28	1.79	0.73	0.00	27.78	7.65	0.00	0.85	46.46	2.27	46.21	1.48	2.28	0.00	0.01	11.10	7.94
Antes Bocatoma	0.63	0.00	0.57	9.93	0.42	0.87	32.55	0.77	0.26	0.21	0.28	1.79	0.73	0.00	27.78	7.69	0.00	0.85	46.46	2.27	46.20	1.48	2.27	0.00	0.01	11.07	7.94
Puente Rio Magu	0.25	0.00	0.57	23.81	0.42	0.87	32.55	0.78	0.26	0.21	0.28	1.79	0.73	0.00	27.78	8.85	0.00	0.85	46.46	2.27	46.20	1.48	2.27	0.00	0.38	11.03	7.94
Terminus	0.00	0.00	0.57	23.81	0.42	0.87	32.55	0.78	0.26	0.21	0.28	1.79	0.73	0.00	27.78	8.85	0.00	0.85	46.46	2.27	46.20	1.48	2.27	0.00	0.38	11.03	7.94

Reach	Distance	SOD	Sed Flux CH4	Sed Flux NH4	Sed Flux Inorg	Sed Flux NO3
Label	x(km)	gO2/m ² /d	gO2/m ² /d	mgN/m ² /d	mgP/m ² /d	mgN/m ² /d
Puente Yurispamb	2.31	0.18	-0.02	0.96	0.01	0.78
Puente Yurispamb	1.81	0.18	-0.02	0.73	0.01	0.62
Puente Yurispamb	1.30	0.17	-0.02	0.61	0.01	0.54
Antes Bocatoma	0.91	0.17	-0.01	0.58	0.01	0.51
Antes Bocatoma	0.63	0.17	-0.01	0.54	0.01	0.48
Puente Rio Magu	0.25	0.16	0.00	0.02	0.00	0.02

Fuente: Autor