



**Modelación ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la
quebrada Chimiadó en el Municipio de Dabeiba (Antioquia)**

Yajaris Paola Herrera Carrascal

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Sanitario

Asesor

Darío Naranjo Fernández

PhD. Ingeniería Hidráulica y Saneamiento

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Ingeniería Sanitaria-Civil
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Herrera Carrascal, 2024)
Referencia	Herrera Carrascal, Y.P. (2024). <i>Modelación Ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó en el municipio de Dabeiba (Antioquia). [Semestre de industria]</i> . Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano /Director: Julio Cesar Saldarriaga molina.

Jefe departamento: Lina María Berrouët Cadavid.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y familia.

Este trabajo de grado es el resultado de un esfuerzo colectivo, un reflejo del amor, el apoyo y la inspiración que cada uno de ustedes ha brindado a lo largo de mi vida. A mis padres, hermanos, abuelos y demás familiares, les dedico este logro con profundo agradecimiento.

A mis amados padres, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios a lo largo de este camino, han sido mi mayor fortaleza. Sin su aliento y respaldo, no habría sido posible llegar hasta aquí. Gracias por estar siempre a mi lado, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por inspirarme a perseguir mis sueños.

A mis hermanos, por su presencia, complicidad y ánimo han sido un pilar fundamental en mi vida. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi corazón. Gracias por ser mi fuente constante de alegría, por compartir conmigo este viaje y por ser mi más grande apoyo en todas las etapas de mi vida.

Cada palabra escrita en estas páginas lleva consigo el eco de sus palabras de aliento, el respaldo de sus abrazos y el ejemplo de su constancia. En cada desafío, ustedes han sido mi fortaleza y en cada triunfo, mis mayores admiradores.

A toda mi familia, este trabajo no solo es mío, sino también de ustedes, quienes han sido mi soporte incondicional y mi fuente inagotable de amor. Que este logro sea un tributo a nuestra unión, a nuestros lazos familiares que trascienden el tiempo y las distancias.

Con todo mi amor y gratitud,

Yajaris Paola Herrera Carrascal

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a Ingeniería Ambiental Especializada por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas en su organización, por abrirme las puertas y formar parte de su equipo. Estoy profundamente agradecida por la oportunidad, por todas las enseñanzas adquiridas, tuve el privilegio de aprender de profesionales ejemplares, que siempre tuvieron la disposición de atender a mis preguntas y guiarme en todos los proyectos que emprendimos, gracias a ellas por brindarme su apoyo, guiarme y ser las mejores compañeras.

A mi asesor el Prof. Darío Naranjo Fernández, le agradezco por su invaluable orientación, apoyo y dedicación. Su experiencia, paciencia y motivación fueron fundamentales para alcanzar este logro. Estoy profundamente agradecida por compartir sus conocimientos y por inspirarme a superar desafíos académicos. Su guía ha sido fundamental en mi desarrollo profesional y personal. Gracias por su inquebrantable compromiso y por creer en mí

Estimados compañeros y amigos, quiero agradecerles por convertirse en mi apoyo emocional, por ser un escape en los momentos más difíciles de este proceso, gracias por brindarme grandes experiencias y por permitirme aprender juntos. Cada experiencia vivida ha dejado una huella imborrable en mi memoria, agradezco a la vida por haberme permitido contar con su amistad y apoyo incondicional.

Tabla de contenido

Resumen	12
Abstract	13
1. Introducción	14
2. Planteamiento del problema.....	16
3. Justificación	17
4. Objetivos	18
4.1. Objetivo general	18
4.2. Objetivos específicos.....	18
5. Marco teórico	19
5.1. Caudal ambiental.....	20
5.2. Caudal mínimo	21
5.3. Tramo de influencia del vertimiento	21
5.4. Dispersión lateral.....	22
5.5. Velocidad de corte.....	22
5.6. Variables de la calidad del agua	23
5.6.1. DBO	23
5.6.2. DBO ₅ rápida y lentamente degradable	24
5.6.3. Sólidos suspendidos inorgánicos (SSI)	24
5.6.4. Detritus (MOP).....	25
6. Metodología	26
7. Generalidades del sistema de vertimiento.....	28
7.1. Descripción.....	28
7.2. Localización general	28
7.3. Características del sistema de tratamiento.....	29

7.4.	Vertimiento del sistema de tratamiento.....	29
7.5.	Descripción de la cuenca.....	29
7.6.	Esquema simplificado del segmento de la quebrada a modelar	30
8.	Alimentación del modelo.....	32
8.1.	Cálculo de caudales medio y mínimo	32
8.1.1.	Cálculo de caudal medio	32
8.1.2.	Cálculo de caudal mínimo.....	32
8.1.3.	Tramo de influencia del vertimiento	32
8.2.	Parámetros fisicoquímicos a simular de la quebrada y efluente del proyecto	33
8.2.1.	Parámetros de calidad por analizar.....	34
8.3.	Datos de entrada	35
8.3.1.	Variables de calidad de agua en la cabecera de la fuente hídrica.....	35
8.4.	Características hidráulicas.....	37
8.5.	Características fisicoquímicas del efluente	38
8.5.1.	Parámetros biocinéticos.....	39
8.6.	Entrada de datos al modelo	39
9.	Escenarios de modelación.....	44
9.1.	Escenario 1 (E1). Evaluación del vertimiento general con tratamiento y caudal medio en el segmento hidráulico estudiado	45
9.2.	Escenario 2 (E2). Evaluación del vertimiento general sin tratamiento y caudal medio en el segmento hidráulico estudiado	45
9.3.	Escenario 3 (E3).....	46
9.4.	Escenario 4 (E4). Evaluación del vertimiento general sin tratamiento y caudal mínimo en el segmento hidráulico estudiado	47
10.	Construcción de una línea base para el proceso de modelación del vertimiento general sobre el la quebrada Chimiadó.....	48

10.1.	Línea base de modelación quebrada Chimiadó.....	48
11.	Resultados de simulación de los diferentes escenarios propuestos en las descargas	54
11.1.	Escenario de modelación 1.....	54
11.2.	Escenario de modelación 2.....	58
11.3.	Escenario de modelación 3.....	62
11.4.	Escenario de modelación 4.....	66
12.	Resultados del proceso de modelación de escenarios con una descarga del proyecto AETCR Llano Grande.....	70
13.	Factor de dilución.....	74
14.	Conclusiones	75
15.	Referencias	77

Lista de tablas

Tabla 1. Coordenadas punto de vertimiento.....	30
Tabla 2. Resultados caracterización fisicoquímica quebrada Chimiadó.....	34
Tabla 3. Resultados caracterización fisicoquímica agua residual doméstica con y sin tratamiento.	34
Tabla 4. Parámetros de entrada hoja Headwater.	35
Tabla 5. Datos de entrada de calidad de la quebrada Chimiadó.....	38
Tabla 6. Características hidráulicas por tramo.	38
Tabla 7. Datos de entrada del vertimiento general de las aguas residuales domésticas con tratamiento y sin tratamiento.	39
Tabla 8. Constantes cinéticas.	40
Tabla 9. Calidad del agua residual del vertimiento con tratamiento.	45
Tabla 10. Calidad del agua residual del vertimiento sin tratamiento.	46
Tabla 11. Resultados determinantes convencionales línea base quebrada Chimiadó.....	71
Tabla 12. Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 1.	71
Tabla 13. Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 2.	72
Tabla 14. Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 3.	72
Tabla 15. Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 1.	73
Tabla 16. Factor de dilución quebrada Chimiadó - Vertimiento doméstico	74

Lista de figuras

Figura 1. Localización del proyecto AETCR Llano Grande.....	28
Figura 2. Cuenca Río Sucio.	30
Figura 3. Esquema simplificado – Modelo quebrada Chimiadó.....	31
Figura 4. Hoja de información general para el QUAL2Kw.....	41
Figura 5. Datos Fisicoquímicos de la quebrada Chimiadó.	41
Figura 6. Variables hidráulicas de los tramos de la segmentación.	41
Figura 7. Constantes biocinéticas.....	42
Figura 8. Datos Fisicoquímicos de la fuente puntual.....	43
Figura 9. Datos hidráulicos de la fuente puntual.....	43
Figura 10. Datos de temperatura.	43
Figura 11. Caudal simulado - Línea base.....	49
Figura 12. Velocidad media simulada - Línea base.	49
Figura 13. Profundidad media simulada - Línea base.....	50
Figura 14. Ancho medio simulado - Línea base.	50
Figura 15. Temperatura simulada - Línea base.....	51
Figura 16. Conductividad simulada - Línea base.....	51
Figura 17. Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Línea base.	52
Figura 18. Detritus simulados - Línea base.....	52
Figura 19. Oxígeno disuelto simulado - Línea base.....	53
Figura 20. DBO rápida simulada - Línea base.....	53
Figura 21. Temperatura Simulada - Escenario 1.....	54
Figura 22. Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 1.....	55
Figura 23. Oxígeno disuelto simulado - Escenario 1.	55
Figura 24. DBO rápida simulada - Escenario 1.	56
Figura 25. Detritos simulados - Escenario 1.	56
Figura 26. Alcalinidad simulada - Escenario 1.	57
Figura 27. pH simulado - Escenario 1.....	57
Figura 28. Temperatura Simulada - Escenario 2.....	58
Figura 29. Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 2.....	59

Figura 30. Oxígeno disuelto simulado - Escenario 2.	59
Figura 31. DBO rápida simulada - Escenario 2.	60
Figura 32. Detritos simulados - Escenario 2.	60
Figura 33. Alcalinidad simulada - Escenario 2.	61
Figura 34. pH simulado - Escenario 2.	61
Figura 35. Temperatura Simulada - Escenario 3.	62
Figura 36. Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 3.	63
Figura 37. Oxígeno disuelto simulado - Escenario 3.	63
Figura 38. DBO rápida simulada - Escenario 3.	64
Figura 39. Detritos simulados - Escenario 3.	64
Figura 40. Alcalinidad simulada - Escenario 3.	65
Figura 41. pH simulado – Escenario 3.	65
Figura 42. Temperatura Simulada - Escenario 4.	66
Figura 43. Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 4.	67
Figura 44. Oxígeno disuelto simulado - Escenario 4.	67
Figura 45. DBO rápida simulada - Escenario 4.	68
Figura 46. Detritos simulados - Escenario 4.	68
Figura 47. Alcalinidad simulado - Escenario 4.	69
Figura 48. pH simulada - Escenario 4.	69

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AETCR	Antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
CORPOURABÁ	Corporación Para el Desarrollo Sostenible del Urabá
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
FAFA	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
OD	Oxígeno Disuelto
PVC	Policloruro de vinilo
SSI	Solidos Suspendidos Inorgánicos
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

Los modelos de calidad del agua son herramientas fundamentales para analizar el estado ambiental de los sistemas hídricos y anticipar sus respuestas ante distintos escenarios ambientales, además, es un instrumento para la planeación del recurso y dar soluciones frente a las condiciones propias de los cuerpos de agua que son receptores de vertimientos. En este contexto, el estudio presenta la aplicación del programa de modelado de calidad de agua QUAL2Kw en la quebrada Chimiadó, fuente de alta montaña, afectada por actividades humanas, la cual está ubicada en la vereda Llano Grande del municipio de Dabeiba (Antioquia). El empleo de QUAL2Kw permitió evaluar de manera cualitativa y cuantitativa el comportamiento de las variables hidráulicas y fisicoquímicas de la fuente y su capacidad de asimilación frente a los contaminantes que le serán vertidos con el proyecto AETCR Llano Grande. En el presente informe se simulan las condiciones actuales de la fuente con base en la información recolectada e información secundaria, que permitieron la calibración del modelo; como resultado se obtuvieron los cuatro escenarios simulados que muestran la dinámica del vertimiento y la capacidad de asimilación que tiene la quebrada frente a estos, con el fin de conocer las posibles afectaciones al ecosistema relacionadas con un vertido inapropiado.

Palabras clave: aguas residuales, vertimiento, QUAL2Kw, uso del agua, modelación, calidad del agua, contaminación, impacto ambiental.

Abstract

Water quality models are fundamental tools to analyze the environmental state of water systems and anticipate their responses to different environmental scenarios, in addition to being an instrument for resource planning and providing solutions to the conditions of the bodies of water that are recipients of discharges. In this context, the study presents the application of the QUAL2Kw water quality modeling program in the Chimiadó stream, a high mountain source, affected by human activities, which is in the Llano Grande village of the municipality of Dabeiba (Antioquia). The use of QUAL2Kw has made it possible to evaluate the behavior of the hydraulic and physicochemical variables of the source and its assimilation capacity qualitatively and quantitatively against the contaminants that will be discharged with the AETCR Llano Grande project. In this report, the current conditions of the source are simulated based on the information collected and secondary information, which allowed the calibration of the model; As a result, four simulated scenarios were obtained that show the dynamics of the discharge and the assimilation capacity of the stream in front of them, to know the possible effects on the ecosystem related to an inappropriate discharge.

Keywords: wastewater, discharge, QUAL2Kw, water use, modeling, water quality, pollution, environmental impact.

1. Introducción

Los vertimientos de aguas residuales domésticas representan una preocupación ambiental significativa en todo el mundo a su potencial impacto negativo en la calidad del agua y la salud humana. A medida que las poblaciones urbanas crecen y las infraestructuras de saneamiento se enfrentan a desafíos cada vez mayores, la gestión adecuada de los vertimientos de aguas residuales domésticas se vuelve clave para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos.

La modelación del vertimiento de aguas residuales en cuerpos de agua superficiales es crucial para comprender y predecir el impacto ambiental de estos. Este proceso implica la implementación de modelos matemáticos que simulan el impacto de las descargas sobre la calidad del agua, lo cual es un requisito para el trámite del permiso de vertimiento y la evaluación ambiental. Además, la modelación permite caracterizar los cambios que ocurren en las corrientes de agua, analizar dichos cambios en zonas con escasa información y orientar la toma de decisiones para garantizar un buen estado de salud de los cuerpos de agua y sus ecosistemas asociados.

Con el fin de dar cumplimiento a los requerimientos establecidos en la normatividad para la obtención de permisos ambientales, la solicitud del permiso de vertimiento según el Decreto 1076 de 2015 (Artículo 2.2.3.3.5.3, modificado por el Artículo 9 ítem 4 del Decreto 050 de enero de 2018; Evaluación Ambiental del Vertimiento) y siguiendo los lineamientos establecidos en la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas Superficiales, reglamentada por la Resolución 0959 de 2018, se realizará la modelación de un vertimiento de agua residual doméstica para predecir y valorar los impactos que puedan derivarse del vertimiento en el cuerpo de agua superficial.

Este informe se centra en la aplicación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw y pretende predecir el transporte y la dispersión de contaminantes debido al vertimiento de aguas residuales domésticas a la quebrada Chimiadó, ubicada en el municipio de Dabeiba (Antioquia).

El modelo de calidad de agua QUAL2Kw se estudiará en el segmento hidráulico que va desde 5 m aguas arriba de la descarga sobre la quebrada Chimiadó hasta 5 m aguas abajo

de esta, en medio de estos puntos existirá un vertimiento de aguas residuales domésticas provenientes del sistema de tratamiento de aguas residuales del proyecto AETCR Llano Grande sobre la cuenca de la quebrada Chimiadó. Adicionalmente, se cuenta con una caracterización fisicoquímica realizada en punto proyectado de vertimiento el día 30 de noviembre de 2023, además, los valores teóricos de la calidad de agua de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, los cuales serán simulados dependiendo de la información que requiera el modelo en QUAL2Kw.

Se espera con la implementación del modelo, realizar un acercamiento a la calidad de la quebrada Chimiadó y su respuesta ante los posibles escenarios que se planteen.

2. Planteamiento del problema

La solicitud de autorización de permiso de vertimientos es un paso fundamental para todo aquel generador de aguas residuales, ya sean domésticas o industriales, destinadas a ser vertidas en cuerpos de agua superficiales. La modelación del vertimiento se presenta como una herramienta indispensable para evaluar el impacto ambiental de dichos vertimientos y un requisito para que las autoridades ambientales los concedan.

El AETCR Llano Grande es un proyecto de vivienda para brindar solución permanente a los excombatientes que decidieron dejar la ilegalidad, ubicado en zona rural de alta montaña del municipio de Dabeiba (Antioquia). Brindarles solución sanitaria hace parte necesaria para mantener las condiciones ambientales de la fuente a la cual se hará el vertimiento, además de preservar el ecosistema aguas debajo de este.

Para el análisis exhaustivo de la fuente, es imperativo el empleo de *software* especializado para la interpretación de series de datos recopiladas tanto en ambientes de campo como en entornos de laboratorio. Este *software* posibilita la simulación precisa del impacto ocasionado por cargas contaminantes, así como la evaluación de los factores de asimilación asociados a dichos contaminantes. La utilización de esta herramienta proporciona una comprensión más profunda y detallada de los procesos involucrados en el vertimiento, permitiendo una toma de decisiones informada y eficaz en el diseño de estrategias de mitigación y gestión ambiental.

La modelación ambiental, empleando la herramienta de modelación QUAL2Kw, ofrece una perspectiva rigurosa y fundamentada del comportamiento de fuentes hídricas, como la quebrada Chimiadó, en entornos de alta montaña. Esta metodología se apoya en constantes cinéticas reconocidas por expertos y utilizadas en estudios previos, proporcionando una representación más confiable del comportamiento de la fuente incluso en períodos donde la disponibilidad de datos es limitada debido a la falta de información o al seguimiento insuficiente de fuentes hídricas superficiales en Colombia. La aplicación de esta herramienta no solo permite comprender las dinámicas de la fuente, sino también evaluar sus capacidades de asimilación de contaminantes, lo cual resulta fundamental para la planificación a nivel nacional, regional o local en materia de gestión ambiental.

3. Justificación

El presente informe interpreta y fundamenta la capacidad de recuperación del cuerpo de agua mediante la construcción de un modelo ambiental que permita analizar y describir las dinámicas del recurso hídrico y gestionar los impactos ambientales y sanitarios asociados con la descarga de aguas residuales domésticas a cuerpos de aguas superficial, mediante el uso de constantes cinéticas, tasas de reacción, condiciones físicas, hidráulicas e hidrológicas levantadas en campo para el adecuado planteamiento del modelo QUAL2Kw, que permite generar planes, programas y acciones requeridas para la mitigación o compensación de los impactos ambientales desarrollados en el cuerpo de agua receptor. A continuación, se detallan algunas razones que justifican la importancia de esta modelación de vertimientos de aguas residuales domésticas:

- Evaluación de la calidad del agua: proporciona una herramienta para evaluar la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales afectados por vertimientos de aguas residuales domésticas.
- Gestión de riesgos para la salud: también se utiliza para evaluar los riesgos para la salud humana asociados con la exposición a contaminantes presentes en el agua.
- Cumplimiento normativo: es esencial para evaluar el cumplimiento de las regulaciones ambientales y sanitarias.
- Optimización de la gestión de recursos hídricos: también se utiliza para optimizar la gestión de recursos hídricos y diseñar estrategias de mitigación de la contaminación.

Así, la modelación de vertimientos de aguas residuales domésticas en fuentes de agua superficial es una herramienta crucial para evaluar la calidad del agua, gestionar los riesgos para la salud, garantizar el cumplimiento normativo y optimizar la gestión de recursos hídricos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Aplicar el modelo QUAL2Kw para determinar el comportamiento, transformación, transporte y destino de contaminantes producto del vertimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del proyecto AETCR Llano Grande en la quebrada Chimiadó.

4.2. Objetivos específicos

- Plantear cuatro escenarios probables para el modelo de simulación QUAL2Kw, para la identificación de afectaciones de la quebrada Chimiadó.
- Determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables de la quebrada Chimiadó.
- Predecir, a través del modelo QUAL2Kw, los impactos que causa el vertimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes del proyecto AETCR Llano Grande, en función de la capacidad de asimilación del cuerpo hídrico.

5. Marco teórico

La calidad del agua se caracteriza por las condiciones necesarias que deben darse para preservar la estabilidad del ecosistema y cumplir con estándares específicos de calidad. Este criterio se fundamenta en las propiedades físicas, químicas, biológicas y ecológicas del agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Los modelos de simulación de la calidad del agua para una corriente superficial permiten reproducir las condiciones hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas que ocurren en los cuerpos de agua mediante expresiones matemáticas que representen los diferentes procesos e indicadores de calidad hídrica. Estos modelos suelen ser una representación aproximada del cuerpo de agua objeto de estudio, contiene el mayor número de aspectos y variables importantes, sin que estas proporcionen una dificultad en su implementación y comprensión (Camacho y Díaz, 2003).

Según la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018), no existe una regla específica para seleccionar un modelo de calidad del agua, esta depende de los objetivos y particularidades del caso de estudio. En ese sentido, el modelo de calidad del agua seleccionado para evaluar el vertimiento general del proyecto fue el modelo QUAL2Kw.

El modelo de calidad QUAL2Kw es reconocido como uno de los modelos de uso común en el medio colombiano, que ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios de calidad del agua. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). Este modelo, representa las condiciones actuales del cuerpo de agua receptor del vertimiento general y predice las posibles futuras alteraciones, debido a la amplia variedad de determinantes convencionales que pueden simular los parámetros de la calidad del agua, integrar todas aquellas características hidráulicas importantes que influyen en los procesos internos de una corriente y permite que sobre una misma corriente de longitud determinada puedan ubicarse varios tramos sobre los cuales pueden desarrollarse estudios específicos de ingreso de fuentes continuas, difusas o instantáneas según sea el caso; asimismo, combina las condiciones climáticas dominantes presentadas durante la toma de muestras. Todo lo anterior por medio de modelos de algoritmos genéticos de programación que permiten estabilizar el modelo en

un periodo de tiempo definido por el usuario y calibrarlo para asegurar la veracidad de la información contenida en su línea base (Camacho y Díaz, 2003).

El modelo QUAL2Kw ha sido ampliamente utilizado para modelar la calidad del agua y se basa en ecuaciones diferenciales para flujos unidimensionales bajo condiciones estacionarias. Este *software* posibilita la representación de la contaminación proveniente tanto de fuentes puntuales como difusas. Además, incorpora un algoritmo genético para ajustar automáticamente los resultados simulados a partir de datos de campo, utilizando el método de Euler para la integración. La relación entre la profundidad, pendiente, radio hidráulico, rugosidad, velocidad y caudal se expresa mediante la ecuación y el coeficiente de Manning (Formica *et al.*, 2015). El balance hidrológico se representa a través del flujo; el balance de calor, a través de la temperatura, y el balance de material, a través de la concentración de especies constituyentes. El modelo QUAL2Kw simula el transporte de la temperatura, la demanda de oxígeno carbonácea (DBOC rápida), el oxígeno disuelto (OD), la alcalinidad y los sólidos suspendidos inorgánicos (SSI) (Arroyave *et al.*, 2013).

La estimación de la disponibilidad de agua en una cuenca hidrográfica es importante para la captación y gestión del recurso hídrico (Zhang y Chiew, 2012).

La estimación de los caudales en una cuenca sin registros constituye uno de los problemas principales de la ingeniería hidrológica. Existen varios modelos para determinar caudales en cuencas no aforadas, entre los cuales el balance hídrico superficial ofrece la ventaja que involucra variables exclusivamente climáticas, tales como precipitación y temperatura (Marini y Piccolo, 2000).

5.1. Caudal ambiental

De acuerdo con el Decreto 1076 de 2015, el caudal ambiental se define como el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas debajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

5.2. Caudal mínimo

El caudal mínimo, podría definirse como el flujo de agua requerido para mantener las necesidades mínimas de los ecosistemas acuáticos existentes en un área de influencia antrópica que modificará los caudales naturales de un río o quebrada (Ecuación 1).

$$Q_{\text{mínimo}} = Q_{\text{medio}} - (Q_{\text{medio}} * 0.25)$$

Ecuación 1. Cálculo de caudal mínimo.

Donde:

Q_{medio}: Caudal medio de la fuente receptora del vertimiento (m³/s)

Q_{mínimo}: Caudal mínimo de la fuente receptora del vertimiento (m³/s)

5.3. Tramo de influencia del vertimiento

De acuerdo con el numeral 38 del Artículo 2.2.3.3.1.3. del Decreto 1076 de 2015: “La zona de mezcla es la zona técnicamente determinada a partir del sitio de vertimiento, indispensable para que se produzca mezcla homogénea de éste con el cuerpo receptor; en la zona de mezcla se permite sobrepasar los criterios de calidad de agua para el uso asignado, siempre y cuando se cumplan las normas de vertimiento.” Por lo anterior, la estimación de la extensión de la zona de mezcla es necesaria para delimitar el punto a partir del cual las autoridades deben realizar el control de los criterios de calidad y, a su vez, al punto hasta el que se deben extender las limitaciones de uso del agua. La extensión de la zona de mezcla depende de la hidráulica y geometría del cuerpo receptor, así como de la forma y localización de la descarga de las aguas residuales domésticas. De esta forma el orden de magnitud de la zona de mezcla se determinó aplicando aproximaciones empíricas como la Ecuación 2.

$$L_m = k * \frac{UB^2}{D_{\text{lateral}}}$$

Ecuación 2. Longitud de mezcla.

Donde:

L_m: Longitud de mezcla (m)

K: (0.1 para descargas en el centro del canal y 0.4 para descargas a la orilla del río)

U: Velocidad media de la corriente (m/s) (1,17 m/s)

B: Ancho medio de la fuente (m) (1,616 m)

D_{lateral}: Dispersión lateral (0,17 m²/s)

5.4. Dispersión lateral

La dispersión lateral puede estimarse mediante la Ecuación 3.

$$D_{lateral} = \emptyset * H * U^*$$

Ecuación 3. *Dispersión lateral del vertimiento sobre la fuente receptora.*

Donde:

D_{lateral}: Dispersión lateral del vertimiento sobre la fuente receptora (m² /s)

∅: Coeficiente de dispersión lateral – adimensional (varía entre 0,17 – 10 tomándose valores mayores para corrientes rápidas y meandros), para este caso de estudio se toma 5

H: Profundidad media de la fuente de agua (m) (0,25 m)

U: Velocidad de corte (m/s)*

5.5. Velocidad de corte

La dispersión velocidad de corte puede estimarse mediante la Ecuación 4.

$$U^* = \sqrt{gHs}$$

Ecuación 4. *Velocidad de corte.*

Donde:

*U**: Velocidad de corte (m/s)

G: Fuerza de atracción de la gravedad (9,81 m/s²)

H: Profundidad media de la fuente de agua (m) (0,25 m)

S: Pendiente del tramo de estudio (m/m) (0,2)

5.6. Variables de la calidad del agua

5.6.1. DBO

Esta medida, que se viene utilizando desde hace unos cincuenta años, es prácticamente la única conocida para determinar la contaminación del carbono biodegradable. Aun así, su cálculo presenta algunos problemas, por lo que la interpretación de los resultados debe utilizarse con mucho cuidado. Para evitar equivocaciones, conviene realizarla en paralelo con otras determinaciones tales como DQO, TOC, DOT.

Generalmente se considera que la DBO varía con el tiempo según una ecuación de primer orden (Ecuación 5).

$$DBO_t = DBO_U (1 - 10^{-kt})$$

Ecuación 5. DBO total.

DBO_t: DBO a *t* días

DBO_u: DBO última

t: tiempo de incubación en días

k: constante cinética medida en d⁻¹

Un agua residual bruta presenta un valor de *k* que puede variar entre 0,07 y 0,12 d⁻¹. Normalmente se admite como valor medio: 0,10 d⁻¹. Un agua que sale de un tratamiento de alta calidad puede presentar valores de *k* comprendidos entre 0,03 y 0,04 d⁻¹.

Debido a la presencia de algunos componentes en las aguas residuales industriales, el factor *k* puede presentar grandes variaciones.

Con $k = 0,10 \text{ d}^{-1}$ tenemos: $\text{DBO}_5/\text{DBO}_u = 0,68$; $\text{DBO}_u/\text{DBO}_5 = 1,46$.

Se puede considerar que la DBO_{21} o la DBO_{28} representan la DBO última, con un margen de error de un 1 %. $\text{DBO}_{21}/\text{DBO}_u = 0,99$.

La base de cualquier cálculo biológico es la DBO_u , pero 21 días de incubación es un espacio de tiempo demasiado largo para medidas de rutina. Incluso muchas veces resulta difícil esperar tanto tiempo. En la práctica se utiliza una incubación de 5 días. Para pasar de DBO_5 a DBO_u se toma un valor de k de $0,10 \text{ d}^{-1}$, que es prácticamente un valor normalizado (Ronzano y Dapena, s.f.).

5.6.2. *DBO₅ rápida y lentamente degradable*

Las aguas residuales urbanas contienen dos grupos de componentes químicos degradables fundamentalmente diferentes:

- El primero está compuesto esencialmente por ácidos volátiles y azúcares. Su velocidad de degradación es muy rápida. Queda representada por la DBO rápidamente biodegradable o DBO rápida.
- El segundo, que está compuesto por el resto de la materia orgánica degradable, corresponde, en su mayor parte, a partículas y coloides. Su degradabilidad tiene una cinética del orden de diez veces menor que la anterior. Es la DBO lentamente degradable o DBO lenta (Ronzano y Dapena, s.f.).

5.6.3. *Sólidos suspendidos inorgánicos (SSI)*

Son los sólidos no disueltos que se mantienen dispersos en el fluido y que no decantan debido a su carga eléctrica (material coloidal); están constituidos por gravas, arcillas, arenas, metales (moléculas no orgánicas), no se degradan por la acción de las bacterias y permanecen como cenizas después de una calcinación (GEDAR, 2011). Se pueden estimar como presenta la Ecuación 6.

$$SSI = 0,2 * SST$$

Ecuación 6. Sólidos Suspendidos inorgánicos.

5.6.4. Detritus (MOP)

La materia orgánica muerta o detritus, representa la mayor parte de la energía química presente en los ecosistemas. En cualquier eslabón de la cadena trófica, la biomasa que no es consumida tarde o temprano muere y pasa a formar parte del detritus, un conjunto de restos vegetales animales, microbianos y productos de su metabolismo, en grado variable de descomposición; la descomposición de la materia orgánica representa, pues, la vía de mineralización en los ecosistemas hídricos (Pozo *et al.*, 2009).

Para el caso de los detritus, se supone que los sólidos suspendidos volátiles (SSV) son iguales a los detritus. Los sólidos suspendidos volátiles se hallaron por medio de la Ecuación 7.

$$SSV = SST - SSI$$

Ecuación 7. Sólidos suspendidos volátiles.

6. Metodología

Para dar inicio con el desarrollo de este proyecto, se realizó una visita el día 30 de noviembre de 2023 al predio sobre el que se desarrollaría la obra, ubicado en la vereda Llanogrande del municipio de Dabeiba (Antioquia), con el objetivo de tomar las muestras necesarias para realizar la caracterización de la fuente en la cual se va a hacer el vertimiento las cuales servirán para alimentar el modelo, medir caudal medio de la quebrada, realizar el levantamiento topográfico de la fuente receptora y la hidráulica del canal y así comenzar a recolectar la información necesaria para la generación de modelo.

Se realizó la caracterización de la fuente aguas arriba y aguas abajo del lugar donde se prevé realizar el vertimiento.

Se realizaron aforos de caudal y medición de parámetros *in situ*: pH, conductividad, OD y temperatura, los cuales fueron tomados en la quebrada Chimiadó con el fin de observar el comportamiento del modelo seleccionado. Acorde a la teoría disponible, se seleccionan las variables y constantes cinéticas que mejor representan la fuente en su estado actual o escenario de calibración y generación de hojas de resultado.

Para realizar la caracterización de las muestras de la Quebrada que fueron recolectadas, se realizó su análisis por el laboratorio ACUAZUL, entidad acreditada por el IDEAM, requisito para otorgar el permiso de vertimiento por parte de la autoridad ambiental (CORPOURABA). Los análisis de laboratorio se realizaron de acuerdo a los métodos normalizados por la AWWA y APHA a través del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* y de acuerdo a métodos normalizados por el EPA.

Para la selección de los determinantes a medir en el laboratorio era necesario conocer los factores contaminantes y la evaluación de los mismos, de acuerdo a las actividades desarrolladas. En este caso se tienen sustancias orgánicas biodegradables: organismos en descomposición, heces humanas y de animales, solidos en suspensión y agentes patógenos, por lo que el vertimiento debe cumplir los términos contemplados en la Resolución 0631 de 2015.

Con la información recolectada se alimenta el modelo, se realizan los cálculos, se determinan las tasas cinéticas y finalmente se implementó el modelo seleccionado.

Para calibrar los parámetros del modelo de calidad del agua se utilizaron datos de monitoreo de la calidad del agua en el cuerpo receptor con el fin de asegurar que la simulación refleje adecuadamente la concentración y dispersión de contaminantes.

Habiendo realizado el análisis de la información se realiza la evaluación escenarios planteados en el desarrollo de los objetivos propuestos en el presente estudio, utilizando el modelo calibrado y validado para evaluar diferentes escenarios de gestión, como cambios en el volumen o composición del vertimiento, permitiendo así conocer los limitantes y ventajas del modelo seleccionado.

Finalmente se realizan los análisis de los efectos potenciales del vertimiento en la calidad del agua y el medio ambiente, bajo diferentes escenarios de gestión.

Se preparó un informe técnico que documente el proceso de modelación, incluyendo la recopilación de datos, la selección del modelo, los resultados de la simulación y las conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis, además de comunicar los hallazgos y las implicaciones de la modelación a las partes interesadas relevantes, en este caso la Autoridad Ambiental, la cual otorga el permiso de vertimiento.

7. Generalidades del sistema de vertimiento

7.1. Descripción

El proyecto AETCR Llano Grande cuenta con un área de 100.000 m² de construcciones dispersas. Como resultado del uso de las unidades sanitarias, de operaciones de limpieza, y otras actividades, se generan aguas residuales domésticas, por lo que el AETCR Llano Grande contará con un sistema de tratamiento de aguas residuales y el efluente será vertido sobre la quebrada Chimiadó.

7.2. Localización general

El proyecto AETCR Llano Grande, se encuentran ubicado en la vereda Llanogrande, municipio de Dabeiba (Antioquia) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 1.

Localización del proyecto AETCR Llano Grande.



Fuente. MapGis CORANTIOQUIA.

7.3. Características del sistema de tratamiento

El agua residual generada en el proyecto AETCR Llano Grande es de tipo doméstico, la cual proviene de las unidades sanitarias y zonas de lavado comunes.

Para la gestión del vertimiento se instalará un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas conformado por los siguientes componentes:

- Tratamiento preliminar: canal de entrada, canaleta Parshall, desarenador, disipadores de energía, rejilla de cribado.
- Tratamiento primario, secundario: dos tanques sépticos y un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).
- Manejo de lodos, se realizará por medio de un camión vector con una frecuencia de extracción que dependerá de las características propias del sistema.

7.4. Vertimiento del sistema de tratamiento

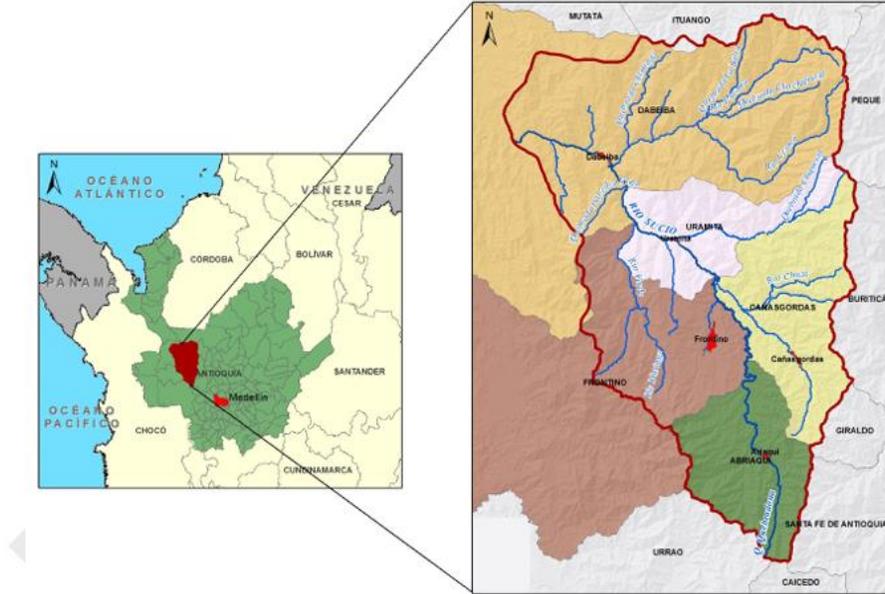
El vertimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas se realizará mediante una tubería PVC-S 8" (ocho pulgadas) en la quebrada Chimiadó. El efluente de la planta es de 0,008 m³/s, este se realiza continuamente, 24 horas al día, 365 días al año.

7.5. Descripción de la cuenca

La quebrada Chimiadó hace parte de la cuenca del río Sucio (Figura 2); la extensión de la cuenca es de 217.850 ha de las cuales el 41% se encuentran en el municipio de Dabeiba, en jurisdicción de la Corporación Para el Desarrollo Sostenible del Urabá, CORPOURABÁ.; sus principales afluentes son las quebradas La López, La Colmena, Pitones o Chorrerón, El Vivito y Relumbrante. Está conformada por los municipios de Abriaquí, Cañasgordas, Frontino, Uramita y Dabeiba.

Figura 2.

Cuenca Río Sucio.



Fuente. POMCAS Río Sucio alto, 2019.

7.6. Esquema simplificado del segmento de la quebrada a modelar

En la Chimiadó.

Tabla 1 se encuentran las coordenadas del vertimiento del proyecto AETCR Llano Grande sobre la quebrada Chimiadó.

Tabla 1.

Coordenadas punto de vertimiento.

Punto	Latitud	Longitud
Descarga	7° 04'12.92"N	76°14'19.75"O

La esquematización del modelo hace referencia a la representación de las características del sistema que va a modelar (Figura 3). A continuación, se presentan los tramos a modelar sobre la quebrada con la ubicación.

Figura 3.

Esquema simplificado – Modelo quebrada Chimiadó.



Fuente. Google Earth Pro, 2023.

8. Alimentación del modelo

Para alimentar el modelo, fue necesario conocer los caudales medio y mínimo que presenta la quebrada Chimiadó.

8.1. Cálculo de caudales medio y mínimo

8.1.1. Cálculo de caudal medio

Se realizaron 10 aforos a la quebrada Chimiadó entre los meses de octubre y noviembre para determinar el caudal medio de la quebrada (fuente receptora del vertimiento) el cual resultó de 0,0336 m³/s.

8.1.2. Cálculo de caudal mínimo

Una vez determinado el caudal medio se puede determinar que el caudal mínimo por medio de la Ecuación 1, el cual corresponde a una reducción del 25% del caudal medio obtenido anteriormente.

$$Q_{\text{mínimo}} = 0.0336 \text{ m}^3/\text{s} - (0.0336 * 0,25) = 0.0252 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{mínimo}} = 0.0252 \text{ m}^3/\text{s}$$

8.1.3. Tramo de influencia del vertimiento

Como tramo de influencia del vertimiento, se toma la distancia desde 50 m aguas arriba del vertimiento hasta 50 m aguas abajo de la quebrada Chimiadó. La longitud de mezcla se halla aplicando la ecuación de Fischer (1979) (Ecuación 2).

De acuerdo con la ecuación de longitud de mezcla se debe hallar la dispersión lateral, utilizando la Ecuación 3.

Igualmente, para hallar la dispersión lateral se debe hallar la velocidad de corte con la Ecuación 4.

Ahora bien, reemplazando la Ecuación 4 en la Ecuación 3, se tiene:

$$D_{lateral} = 5 * 0,25 * \sqrt{(9,81) * (0,25)(0,2)}$$
$$D_{lateral} = 0,875 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Haciendo uso del valor para la dispersión lateral se procede a realizar el cálculo de la longitud de mezcla del vertimiento sobre la quebrada.

$$L_m = 0,4 * \frac{(1,17)(1,62)^2}{0,875} = 1,4 \text{ m}$$

De esta forma se obtiene que la longitud de mezcla corresponde a 1,4 m, tramo donde el vertimiento distribuye su concentración igual o similar a lo ancho de la quebrada.

8.2. Parámetros fisicoquímicos a simular de la quebrada y efluente del proyecto

Es necesario conocer las características fisicoquímicas de la quebrada, por lo que en la Tabla 2 se encuentra la caracterización efectuada y analizada por un laboratorio acreditado por el IDEAM, esto con el fin de conocer el estado del cuerpo de agua receptor antes de la descarga del predio (anexo a este informe se dan los resultados entregados por el laboratorio).

En la Tabla 3 se encuentran los valores típicos de las características de un agua residual doméstica sin tratamiento y los valores en el efluente de la PTAR del proyecto AETCR Llano Grande.

Tabla 2.

Resultados caracterización fisicoquímica quebrada Chimiadó.

Parámetro	Unidades	Quebrada Chimiadó
Temperatura	°C	21
pH	-	7.5
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	6,85
Conductividad	μS/cm	53
DBO ₅ Total	mg O ₂ /L	3,3
DQO Total	mg O ₂ /L	<25
Grasas y Aceites	mg/L	1,48
Sólidos Suspendidos Totales	mg SST/L	<10,0
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	21,9

Tabla 3.

Resultados caracterización fisicoquímica agua residual doméstica con y sin tratamiento.

Parámetro	Unidades	Agua residual doméstica sin tratamiento	Efluente PTAR AETCR Llano Grande
Temperatura	°C	22	22
pH	-	7.43	7,43
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	0.7	2.5
Conductividad	μS/cm	480	350
DBO ₅ Total	mg O ₂ /L	350	20
DQO Total	mg O ₂ /L	450	90
Grasas y Aceites	mg/L	25	<1,00
Sólidos Suspendidos Totales	mg SST/L	70	2,4
Sólidos Sedimentables	mL/L	<0,3	<0,1
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	20	12

8.2.1. Parámetros de calidad por analizar

En el segmento hidráulico estudiado en la quebrada Chimiadó se seleccionaron las siguientes variables para simular en el Modelo QUAL2Kw: Caudal, Temperatura, Conductividad, Sólidos Inorgánicos, Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica Rápida, Alcalinidad, Detritus y pH.

8.3. Datos de entrada

Para la implementación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw en el segmento hidráulico estudiado en la quebrada, inicialmente se realizó una revisión de los datos requeridos por el modelo y los disponibles.

8.3.1. Variables de calidad de agua en la cabecera de la fuente hídrica

Los primeros datos que pide el modelo corresponden a la calidad del agua en la cabecera de la quebrada. En la Tabla 2 se presenta la caracterización fisicoquímica de la cabecera de la fuente y en la Tabla 4 se muestra las variables de entrada para la cabecera que pide el modelo aplicado.

Tabla 4.

Parámetros de entrada hoja Headwater.

Parámetro	Unidad
Temperatura	°C
Conductividad	µS/cm
Sólidos Inorgánicos	mg D/L
Oxígeno Disuelto	mg/L
DBO lento	mg O ₂ /L
DBO rápida	mg O ₂ /L
Nitrógeno Orgánico	µg N/L
Nitrógeno – NH ₄	µg N/L
Nitrógeno – NO ₃	µg N/L
Fosforo Orgánico	µg P/L
Fosforo Inorgánico (SRP)	µg P/L
Fitoplancton	µg A/L
Internal Nitrogen (INP)	µg N/L
Internal Phosphorus (IPP)	µg P/L
Detritus (POM)	mg D/L
Pathogen	CFU/100 mL
Alkalinity	mg CaCO ₃ /L
pH	-

Comparando los datos de entrada de la Tabla 4 y la caracterización mostrada en la Tabla 2, se observa que falta información requerida para el modelo de calidad del agua, como: Sólidos Inorgánicos, DBO rápida y Detritus, por lo que se deben hacer relaciones de acuerdo con los parámetros obtenidos en la caracterización.

8.3.1.1. DBO rápida

El programa requiere que la DBO₅ debe ser filtrada, como no se obtuvo en la caracterización, se supone que es el 80% de la DBO₅ reportada por el laboratorio (DBO_{5 total}) (Ecuación 8).

$$DBO_{filtrada} = 0,8 * DBO_{5 total}$$

Ecuación 8. DBO filtrada.

$$DBO_{filtrada} = 0,8 * 3,3 \frac{mg}{L} = 2,64 \frac{mg}{L}$$

Y esta DBO_{filtrada} debe pasarse a la DBO_{última filtrada} por medio de la Ecuación 5 y por último se supone que la DBO_{última filtrada} es la DBO_{rápida}, la cual es la que debe ser ingresada al modelo.

$$DBO_{ultima filtrada} = \frac{DBO_{5,filtrada}}{1 - e^{-k*5}} = \frac{2,64 \frac{mg}{L}}{1 - e^{-0,23*5}} = 3,86 \frac{mg}{L}$$

$$DBO_{filtrada} = 3.86 \frac{mg}{L} \quad DBO_{rápida} = DBO_{filtrada}$$

Se supuso una constante cinética para la DBO (K) igual a 0,23 d⁻¹, escogido entre el intervalo de 0,05 a 0,3 d⁻¹ según la literatura (Pelletier *et. al.*, 2004).

8.3.1.2. Sólidos suspendidos inorgánicos (SSI)

Debido a que en la caracterización no se midieron los sólidos suspendidos inorgánicos (SSI) se suponen por literatura que estos son el 20% de los sólidos suspendidos totales (SST) (Ecuación 6).

$$SSI = 0,2 * 10.0 \frac{mg}{L} = 2.0 \frac{mg}{L} \quad SSI = 2.0 \frac{mg}{L}$$

8.3.1.3. Detritus (MOP)

De la Ecuación 7 se tiene que:

$$SSV = 10.0 \frac{mg}{L} - 2.0 \frac{mg}{L} = 8.0 \frac{mg}{L}$$

$$Detritus = SSV \quad Detritus = 8.0 \frac{mg}{L}$$

En la Tabla 5 se encuentran el caudal y los parámetros fisicoquímicos en la frontera aguas arriba del segmento estudiado en la quebrada.

8.4. Características hidráulicas

Como se mencionó anteriormente, el segmento estudiado de la quebrada se dividió en tramos de características hidráulicas similares. En la Tabla 6 se muestran las constantes hidráulicas de cada tramo que se deben ingresar al modelo por el método de Manning.

Tabla 5.

Datos de entrada de calidad de la quebrada Chimiadó.

Parámetro	Unidades	Cabecera
Caudal medio	m ³ /s	0,0336
Caudal mínimo	m ³ /s	0,004725
Temperatura	°C	22,0
Conductividad	μS/cm	53
Sólidos inorgánicos	mg D/L	2,0
Oxígeno Disuelto	mg/L	6,85
DBO rápida	mg O ₂ /L	3,86
Detritus	mg D/L	8,0
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	21,9
pH	-	7,50

Tabla 6.

Características hidráulicas por tramo.

Distancia (km)	Descripción	Pendiente	Coefficiente de Manning	Ancho (m)
0	Cabecera	0.2	0.035	0.5
0,05	Aguas arriba quebradas Chimiadó -Descarga	0.2	0.035	0.5
0,04	Descarga - Aguas abajo la quebrada Chimiadó	0.2	0.035	0.5

8.5. Características fisicoquímicas del efluente

Las fuentes puntuales del segmento hidráulico estudiado corresponden a la descarga de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del proyecto AETCR Llano Grande. A continuación, se presentan las características fisicoquímicas del efluente doméstico con tratamiento y sin tratamiento (Tabla 7).

Tabla 7.

Datos de entrada del vertimiento general de las aguas residuales domésticas con tratamiento y sin tratamiento.

Parámetro	Unidades	Vertimiento con tratamiento	Vertimiento sin tratamiento
Caudal	m ³ /s	0.003069	0.003069
Temperatura	°C	22,0	22,0
Conductividad	μS/cm	350,0	480,0
Sólidos inorgánicos	mg D/L	5,0	8,0
Oxígeno Disuelto	mg/L	2,5	0,7
DBO rápida	mg O ₂ /L	20	450
Detritus	mg D/L	10,0	15,0
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	10,0	20,0
pH	-	7,43	7,43

8.5.1. Parámetros biocinéticos

El proceso de calibración se inicia con la asignación de unos valores iniciales a los parámetros a calibrar, los cuales se suponen con base en recomendaciones de la literatura técnica asociada (e.g., Bowie *et al.*, 1985) y/o de estudios de modelación realizados en cuerpos de agua de características similares (e.g., Camacho *et al.*, 2012; entre otros).

Los valores de entrada adoptados son los establecidos en la literatura y a partir de dichos valores se realiza la calibración automática del modelo. La Tabla 8 presenta las constantes biocinéticas que permiten calibrar el programa QUAL2Kw con los intervalos encontrados en la bibliografía (Chapra *et al.*, 2008).

8.6. Entrada de datos al modelo

La alimentación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw se realizó con la entrada de los datos mencionados anteriormente en cada hoja del modelo, comenzado con la caracterización fisicoquímica de la quebrada Chimiadó, continuando con la descripción de los tramos con sus respectivas variables hidráulicas, las constantes biocinéticas y, por último,

los parámetros del efluente con y sin tratamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del proyecto.

Tabla 8.

Constantes cinéticas.

Parámetros de calibración	Unidades	Intervalo de calibración
Velocidad de sedimentación de S.S inorgánicos.	m/d	0-2
Tasa de reaireación, descrita por la ecuación de reaireación.	1/d	Autoselección
Tasa de oxidación de la M.O de rápida degradación.	1/d	0 - 5
Hidrolisis de nitrógeno orgánico.	1/d	0 - 5
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico.	m/d	0,001 – 0,1
Tasa de nitrificación de amonio.	1/d	0 - 10
Tasa de desnitrificación de nitratos.	1/d	0-2
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos.	m/d	0-1
Hidrolisis de fosforo orgánico.	m/d	0,001 - 0,7
Velocidad de sedimentación del Fosforo orgánico.	1/d	0-2
Velocidad de sedimentación del Fosforo Inorgánico.	m/d	0-2
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	m/d	0-5
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	1/d	0-5
Velocidad de sedimentación de los patógenos.	m/d	0-2
Constante α para mortalidad de los patógenos por luz solar.	1/d	0-1

Fuente. Chapra et al., 2008.

Antes de ingresar los datos anteriores, se debió alimentar con la información general sobre la solicitud del modelo en particular (Figura 4).

En la Figura 5 se muestra la hoja del modelo “Headwater”, que corresponde a la entrada de los datos de la caracterización fisicoquímica de la quebrada.

En la Figura 6 se presenta la hoja del modelo “Reach”, en la cual se ingresaron las constantes hidráulicas de cada uno de los tramos en los que se segmentó la corriente de agua.

En la Figura 7 se presenta la hoja de trabajo “Rates”, en la cual se definieron las constantes cinéticas a calibrar.

Modelación ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó en el Municipio de Dabeiba (Antioquia)

Figura 4.

Hoja de información general para el QUAL2Kw.

System ID:		
River name	QUEBRADA CHIMIADÓ	
Saved file name	LB_QUEBRADA_CHIMIADÓ	
Directory where the input/output files are saved	C:\Users\INTEL CORE I5\Desktop\IAE-VALENTINA\INMUNIZADORA SERYE\MODELACIÓN\LB_QUEBRADA_CHIMIADÓ	
Month	1	
Day	15	
Year	2024	
Local standard time zone relative to UTC	-5 hours	
Daylight savings time	No	
Simulation and output options:		
Calculation step	0.021972656	minutes
Number of days for the simulation period	3	days
Simulation mode	Repeating diel	
Selected date for output of longitudinal and 24-hr diel plots	15/1/2024	
Solution method (integration)	Euler	
Solution method (pH)	Brent	
Simulate hyporheic transient storage zone (HTS)	No	
Simulate surface transient storage zone (STS)	No	
Option for conduction to deep sediments in heat budget	Lumped	
Display dynamic diel output for selected date	No	
State variables for simulation	All	
Simulate sediment diagenesis	Option 1	
Simulate alkalinity change due to nutrient change	No	
Write dynamic output of water quality for entire simulation	No	
Print interval for dynamic output (multiple of time steps)	4	
Program determined calc step	0.021972656	minutes
Time elapsed during last model run	0.15	minutes

Figura 5.

Datos Físicoquímicos de la quebrada Chimiadó.

Prescribed downstream boundary?	No	Day 1				
Headwater Flow and Water Quality	Units	12:00 a.m.	1:00 a.m.	2:00 a.m.	3:00 a.m.	4:00 a.m.
Flow	m ³ /sec	0.03360	0.03360	0.03360	0.03360	0.03360
Temperature	C	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50
Conductivity	uS/cm 25C	74.30	74.30	74.30	74.30	74.30
Inorganic Solids	mgD/L	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Dissolved Oxygen	mg/L	6.85	6.85	6.85	6.85	6.85
CBODfast	mgO2/L	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
Detritus (POM)	mgD/L	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Alkalinity	mgCaCO3/L	20.80	20.80	20.80	20.80	20.80
pH	s.u.	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50

Figura 6.

Variables hidráulicas de los tramos de la segmentación.

Reach	Downstream	Reach length	Downstream	Downstream	Elevation	
Label	end of reach label	Number	Latitude	Longitude	Upstream	Downstream
			(km)	(km)	(m)	(m)
Aguas_Arriba	Aguas_Arriba	0	7.07	76.24	0.000	1463.000
Aguas_Arriba	Descarga	1	0.050	7.07	0.050	1463.000
Descarga	Aguas_Abajo	2	0.050	7.07	0.100	1452.000
						1442.000

Modelación ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó en el Municipio de Dabeiba (Antioquia)

Downstream						Manning Formula				
Latitude (positive north)			Longitude (positive west)			Channel	Manning	Bot Width	Side	Side
Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	Slope	n	m	Slope	Slope
7.00	4	14.81	76.00	14	20.02	0.2000	0.0400	1.25	0.00	0.00
7.00	4	12.92	76.00	14	19.75	0.2000	0.0400	2.00	0.00	0.00
7.00	4	11.41	76.00	14	18.89	0.2000	0.0400	1.60	0.00	0.00

Figura 7.

Constantes biocinéticas.

Parameter	Value	Units	Symbol	Auto-cal	Min value	Max value
Stoichiometry:						
Carbon	40	gC	gC	No	30	60
Nitrogen	7.2	gN	gN	No	5	9
Phosphorus	1	gP	gP	No	0.5	2
Dry weight	100	gD	gD	No	100	100
Chlorophyll	1	gA	gA	No	0.5	2
Inorganic suspended solids:						
Settling velocity	0.25874	m/d	v_i	Yes	0	2
Oxygen:						
Reaeration model	USGS(channel-control)			f(u h)		
User reaeration model parameter A	3.25374				3	6
User reaeration model parameter B	0.535525				0.5	1
User reaeration model parameter C	-1.525284				-1.85	-1.5
Temp correction for reaeration	1.024		θ_a			
Reaeration wind effect	None					
O2 for carbon oxidation	2.67	gO ₂ /gC	r_{oc}			
O2 for NH ₄ 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_{soef}	No	0.60	0.60
Oxygen inhib model nitrification	Exponential					
Oxygen inhib parameter nitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sona}	No	0.60	0.60
Oxygen enhance model denitrification	Exponential					
Oxygen enhance parameter denitrification	0.60	L/mgO ₂	K_{sodn}	No	0.60	0.60
Oxygen inhib model phyto resp	Exponential					
Oxygen inhib parameter phyto resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sop}	No	0.60	0.60
Oxygen enhance model bot alg resp	Exponential					
Oxygen enhance parameter bot alg resp	0.60	L/mgO ₂	K_{sob}	No	0.60	0.60
Fast CBOD:						
Oxidation rate	5	/d	k_{dc}	Yes	0	5
Temp correction	2.5		θ_{dc}	No	1	1.07
Detritus (POM):						
Dissolution rate	0.1668335	/d	k_{dt}	Yes	0.05	0.5
Temp correction	1.07		θ_{dt}	No	1.07	1.07
Settling velocity	4.2	m/d	v_{dt}	Yes	0.05	2

En la Figura 8 se presenta la hoja de modelo “Point Sources”, en donde se ingresaron los caudales y las caracterizaciones fisicoquímicas correspondiente a una descarga de agua residual domestica tratada presentados en la Tabla 8.

En la Figura 9 se presenta la hoja de trabajo “Hidraulics Data”, en la cual se ingresó la información de las características hidráulicas de los tramos.

Figura 8.

Datos Fisicoquímicos de la fuente puntual.

		Point Inflow	Temperature	Conductivity	lic Suspended	ssolved Oxyge	Fast CBOD	Detritus	Alkalinity	pH
		mean	mean	mean	mean	mean	mean	mean	mean	mean
Name	Location (km)	m ³ /s	°C	uS/cm 25C	mg/L	mg/L	mgO ₂ /L	mgD/L	mgCaCO ₃ /L	s.u.
DESCARGA	0.055	0.0031	22.00	350.00	5.00	2.50	20.00	10.00	10.00	7.43

Figura 9.

Datos hidráulicos de la fuente puntual.

Distance	Flow (m ³ /sec)	Depth (m)	Velocity (m/s)	Width (m)	Travel time (d)
(km)	obs	obs	obs	obs	obs
0.000	0.0336	0.350	0.446	1.250	0.000
0.050	0.0336	0.120	0.447	2.000	0.000
0.100	0.0336	0.280	0.448	1.600	0.001

En la Figura 10 se presenta la hoja de trabajo “Temperature Data”, en la cual se ingresó la información de los datos de temperatura.

Figura 10.

Datos de temperatura.

Distance	Temperature (degC)	Temperature (degC)	Temperature (degC)
(km)	obs avg	obs min	obs max
0.000	21.500	21.50	21.50
0.050	21.500	21.48	21.54
0.100	21.500	21.46	21.59

9. Escenarios de modelación

El modelo QUAL2Kw representa las condiciones de calidad del agua de una fuente superficial cuando sobre ésta se generan descargas de aguas residuales de tipo domésticas. Por esta razón, con la finalidad de evaluar la capacidad de asimilación del segmento hidráulico estudiado en la quebrada Chimiadó, se formularon cuatro escenarios con diferentes condiciones de calidad del vertimiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas generadas, y adicionalmente del caudal de la fuente receptora.

Las consideraciones generales del modelo de calidad para la descarga de las aguas residuales domésticas del proyecto AETCR Llano Grande son:

- **Escenario 1 (E1).** Evaluación del vertimiento general con tratamiento y caudal medio en el segmento hidráulico estudiado: Se realiza la modelación del vertimiento general con tratamiento y con un caudal medio en la fuente receptora.
- **Escenario 2 (E2).** Evaluación del vertimiento general sin tratamiento y caudal medio en el segmento hidráulico estudiado: Se realiza la modelación del cuerpo de agua con el vertimiento general sin tratamiento, es decir que la planta de tratamiento este por fuera de servicio y con un caudal medio en la fuente receptora.
- **Escenario 3 (E3).** Evaluación del vertimiento general con tratamiento y caudal mínimo en el segmento hidráulico estudiado: Se realiza la modelación del vertimiento general tratado y con un caudal mínimo en la fuente receptora.
- **Escenario 4 (E4).** Evaluación del vertimiento general sin tratamiento y caudal mínimo en el segmento hidráulico estudiado: Se realiza la modelación del cuerpo de agua con el vertimiento general, es decir que la planta de tratamiento este por fuera de servicio y con un caudal mínimo en la fuente receptora.

9.1. Escenario 1 (E1). Evaluación del vertimiento general con tratamiento y caudal medio en el segmento hidráulico estudiado

En este escenario se evalúan las condiciones en las cuales el caudal de la fuente hídrica alcanza un valor medio de 0,0336 m³/s. Se toma como insumo para la implementación del modelo el vertimiento sobre la quebrada Chimiadó con un caudal de 0,00029 m³/s correspondiente al aporte de la planta de tratamiento, según información proyectada del vertimiento en las memorias de cálculo.

Los valores de los parámetros proyectados de calidad del agua del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas fueron tomados considerando la caracterización presuntiva del vertimiento, los cuales se especifican en la Tabla 9.

Tabla 9.

Calidad del agua residual del vertimiento con tratamiento.

Parámetro	Unidades	Vertimiento Doméstico con tratamiento
Caudal	m ³ /s	0,00029
Temperatura	°C	22,0
Conductividad	µS/cm	350,0
Sólidos inorgánicos	mg D/L	5,0
Oxígeno Disuelto	mg/L	2,5
DBO rápida	mg O ₂ /L	20,0
Detritus	mg D/L	10,0
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	10,0
pH	-	7,43

9.2. Escenario 2 (E2). Evaluación del vertimiento general sin tratamiento y caudal medio en el segmento hidráulico estudiado

En este escenario se considera el caudal promedio de la fuente hídrica de 0,00336 m³/s en el segmento hidráulico estudiado, no obstante, se supone la situación crítica de que la planta de tratamiento no pueda cumplir su funcionalidad y hagan un vertimiento directo a la fuente, es decir, sin previo tratamiento. Igualmente se toma como insumo el caudal de

0,00029 m³/s correspondiente al aporte de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas.

Para los vertimientos sin tratamiento se tomaron los parámetros típicos de un agua residual doméstica sin tratamiento, los cuales se encuentran en la

Tabla 10.

Tabla 10.

Calidad del agua residual del vertimiento sin tratamiento.

Parámetro	Unidades	Vertimiento Doméstico sin tratamiento
Caudal	m ³ /s	0,00029
Temperatura	°C	22,0
Conductividad	μS/cm	480,0
Sólidos inorgánicos	mg D/L	8,0
Oxígeno Disuelto	mg/L	0,7
DBO rápida	mg O ₂ /L	450,0
Detritus	mg D/L	15,0
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	20,0
pH	-	7,43

9.3. Escenario 3 (E3). Evaluación del vertimiento general con tratamiento y caudal mínimo en el segmento hidráulico estudiado

En este escenario se evalúan las condiciones en las cuales el caudal de la fuente hídrica alcanza un caudal mínimo a 0,0252 m³/s. También se toma como insumo el caudal general de 0,00029 m³/s correspondiente al aporte de la de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas.

Los valores de los parámetros proyectados de calidad del agua del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Doméstica fueron tomados considerando la caracterización presuntiva del vertimiento, los cuales se especifican en la Tabla 9.

9.4. Escenario 4 (E4). Evaluación del vertimiento general sin tratamiento y caudal mínimo en el segmento hidráulico estudiado

En este escenario se evalúan las condiciones en las cuales el caudal de la fuente hídrica alcanza un valor mínimo de $0,0252 \text{ m}^3/\text{s}$. Aquí también se toma como insumo para la implementación del modelo un vertimiento general sobre la fuente con un caudal de $0,00029 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente al aporte de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas.

Para los vertimientos sin tratamiento se tomaron los parámetros típicos de un agua residual doméstica, los cuales se encuentran en la Tabla 10.

En este escenario se hace una simulación basada en condiciones extremas, que puede ser de gran utilidad para evaluar la calidad de la fuente hídrica y su capacidad de autodepuración en el momento de la descarga.

10. Construcción de una línea base para el proceso de modelación del vertimiento general sobre el la quebrada Chimiadó

Como parte fundamental en el proceso de simulación para una corriente superficial bajo el modelo numérico unidimensional QUAL2Kw, es importante la generación de una línea base, la cual permita generar los diferentes escenarios e ingresar la información necesaria sobre la cual se fundamentará el proceso. Para ello durante el transcurso metodológico de determinación del impacto de una descarga general de aguas residuales domésticas sobre un cuerpo de agua, en este caso la quebrada Chimiadó; se generó una línea base la cual reúne las características fisicoquímicas actuales en las que se haya dicho cuerpo de agua sin intervención del vertimiento generado dentro del proyecto.

10.1. Línea base de modelación quebrada Chimiadó

La línea base corresponde a las características presentadas por la corriente aguas arriba del proyecto. Los parámetros fisicoquímicos de calidad de la fuente fueron tomados de los resultados de laboratorio y de los datos recolectados en campo.

Las consideraciones bajo las cuales se realizó el proceso de modelación de la corriente se presentan en la Tabla 5, estos corresponden a los parámetros fisicoquímicos de la cabecera de la quebrada en mención.

Los resultados de la modelación de la línea base para la quebrada se presentan de manera gráfica en las Figuras 11 a 20.

Figura 11.

Caudal simulado - Línea base.

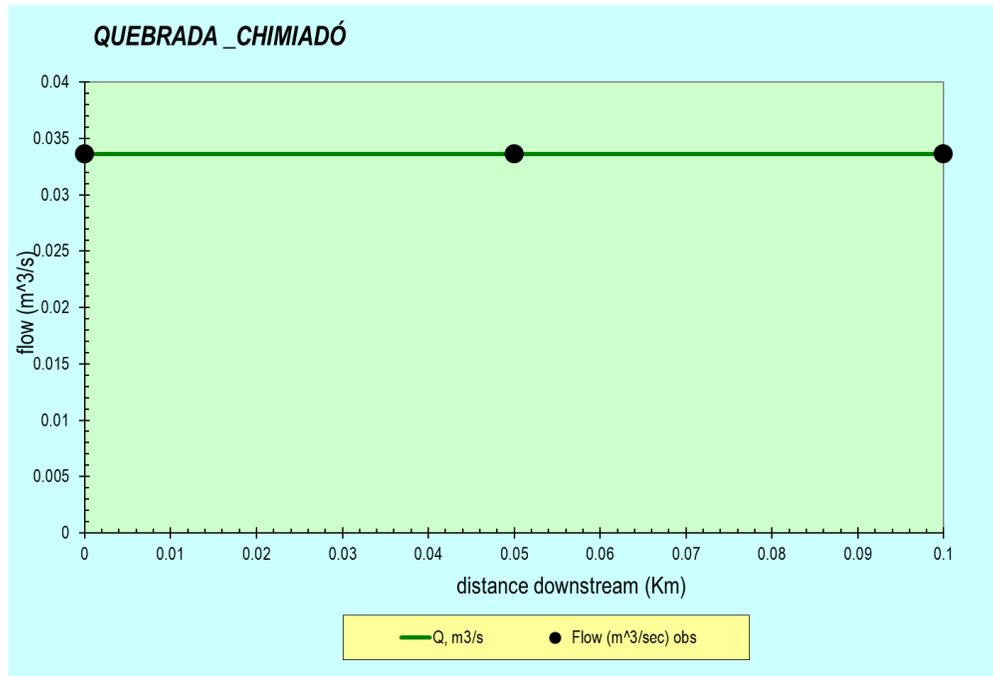


Figura 12.

Velocidad media simulada - Línea base.

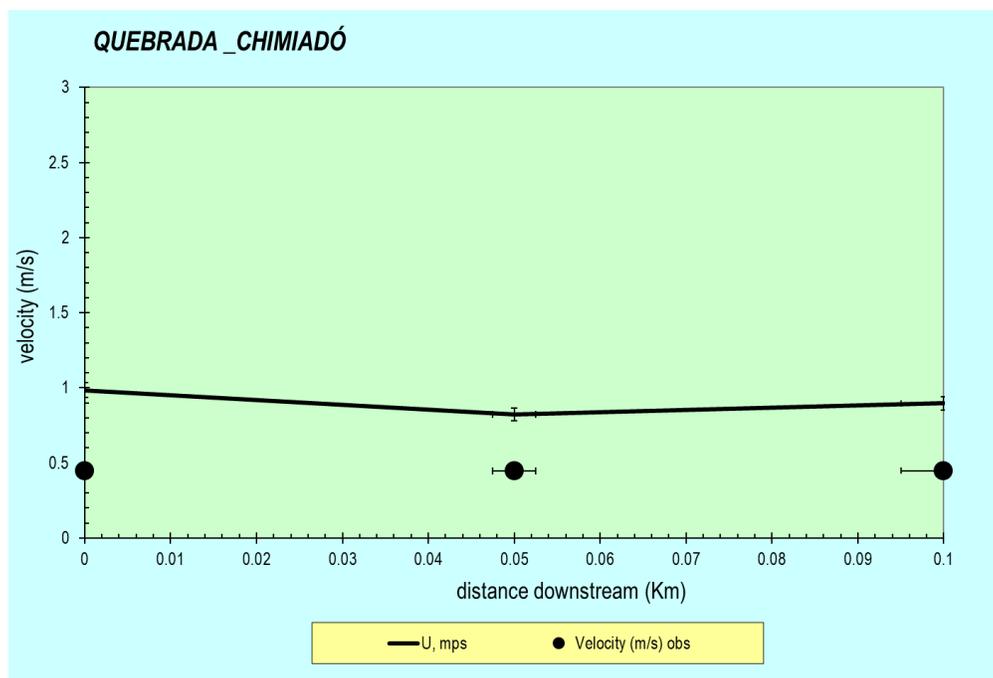


Figura 13.

Profundidad media simulada - Línea base.

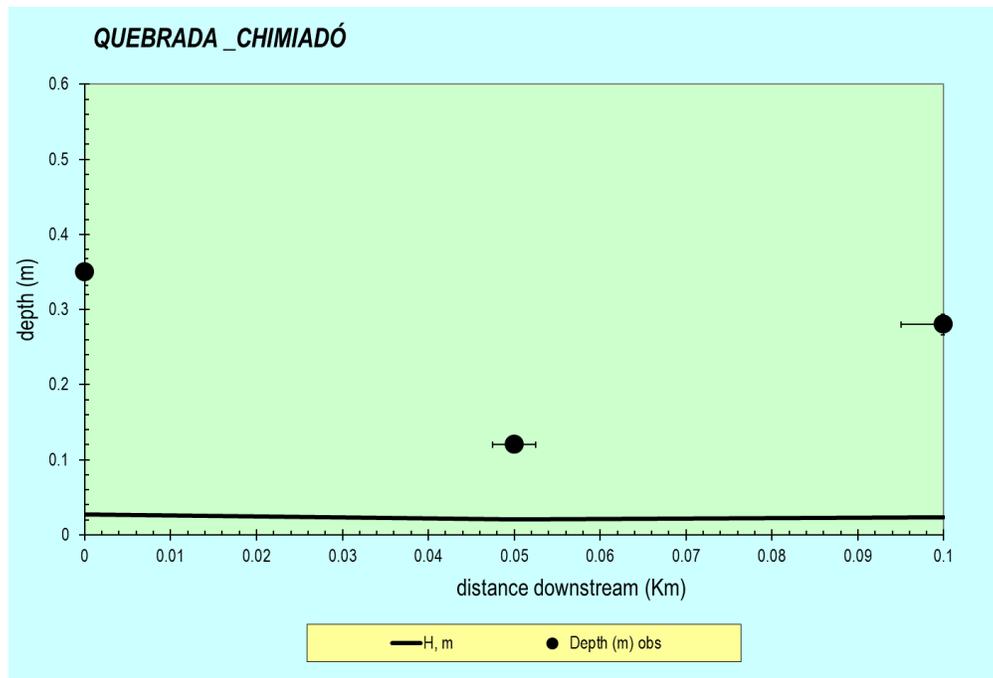


Figura 14.

Ancho medio simulado - Línea base.

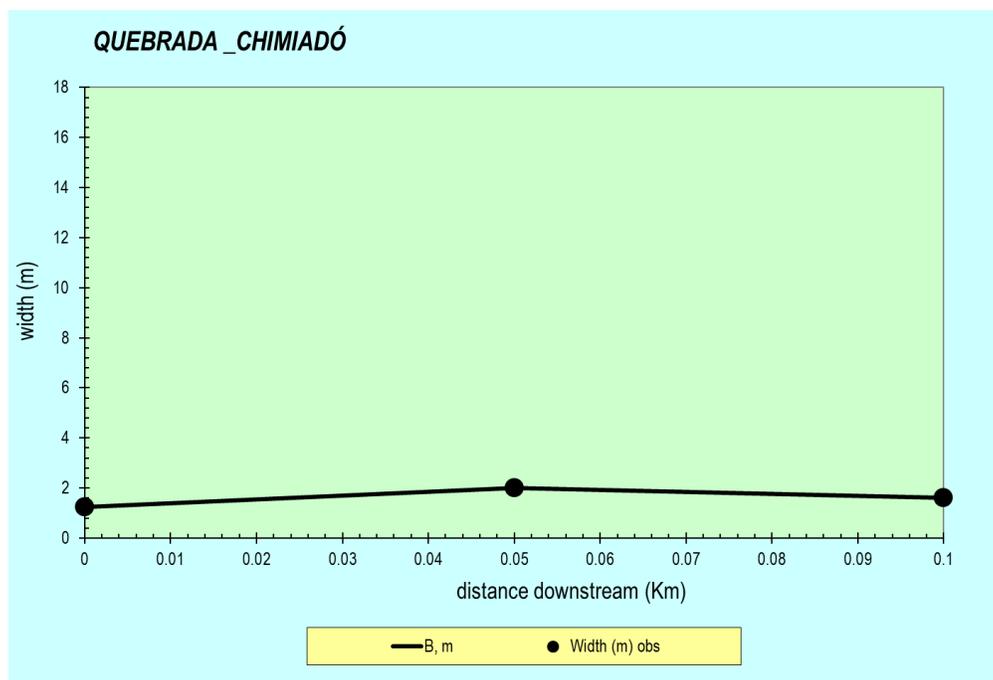


Figura 15.

Temperatura simulada - Línea base.

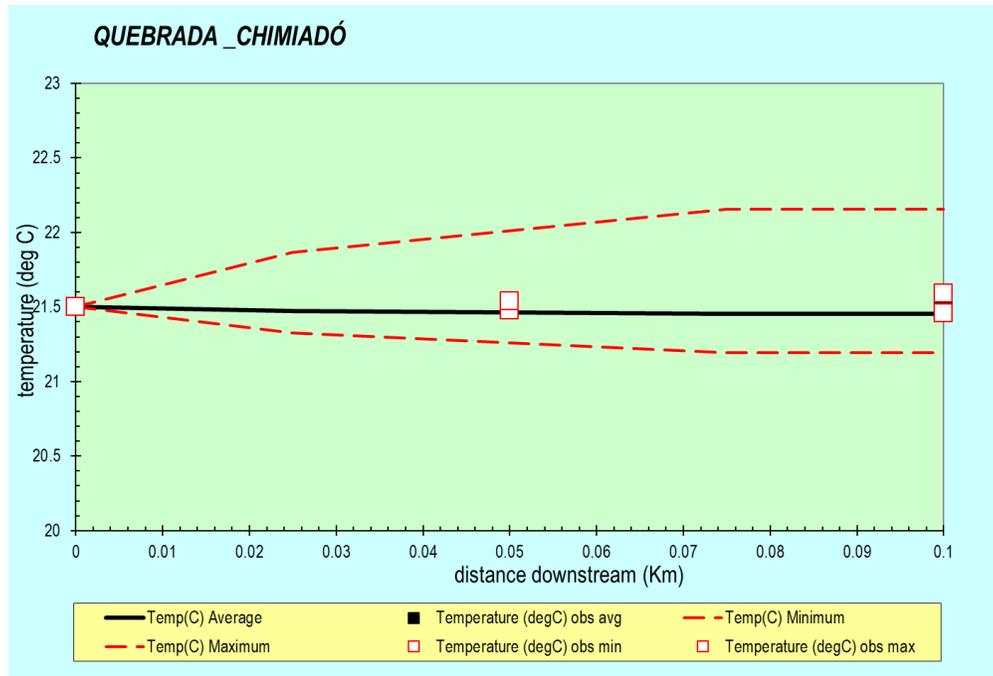


Figura 16.

Conductividad simulada - Línea base.

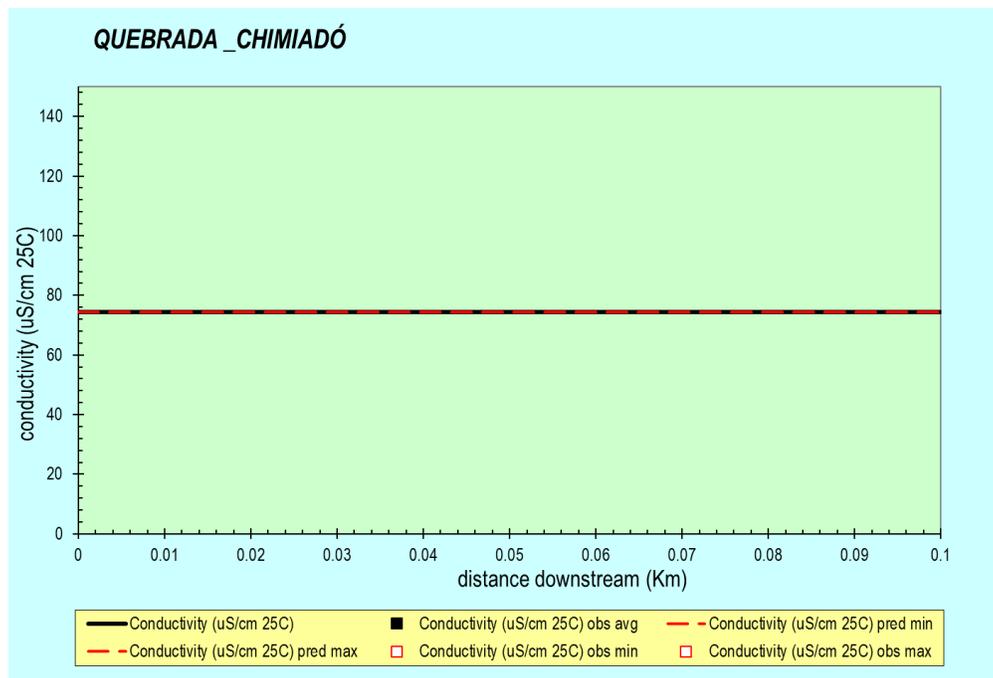


Figura 17.

Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Línea base.

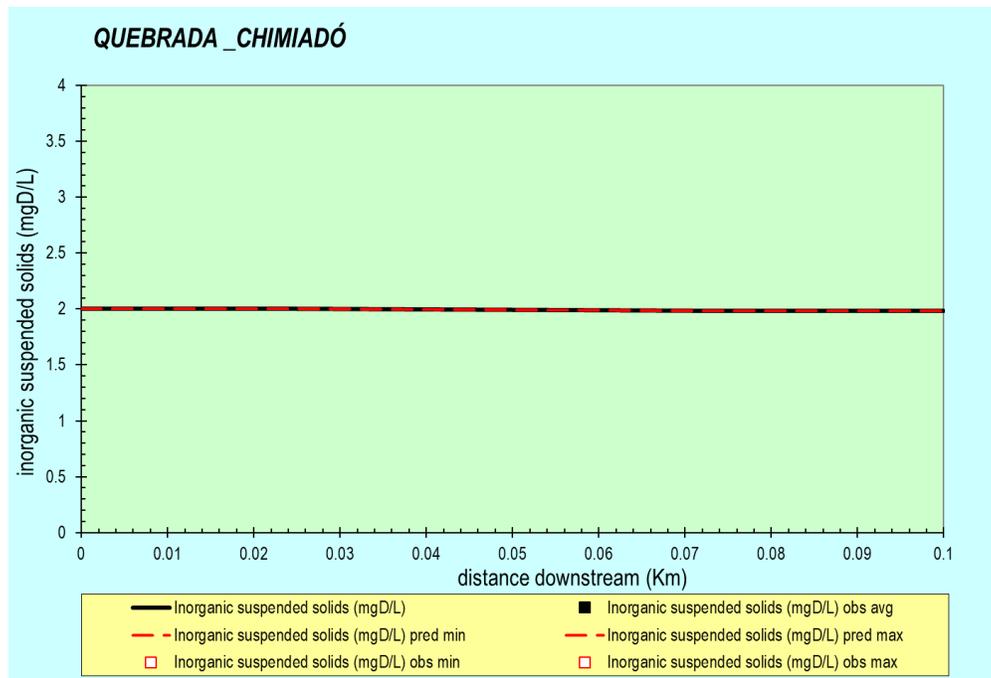


Figura 18.

Detritus simulados - Línea base.

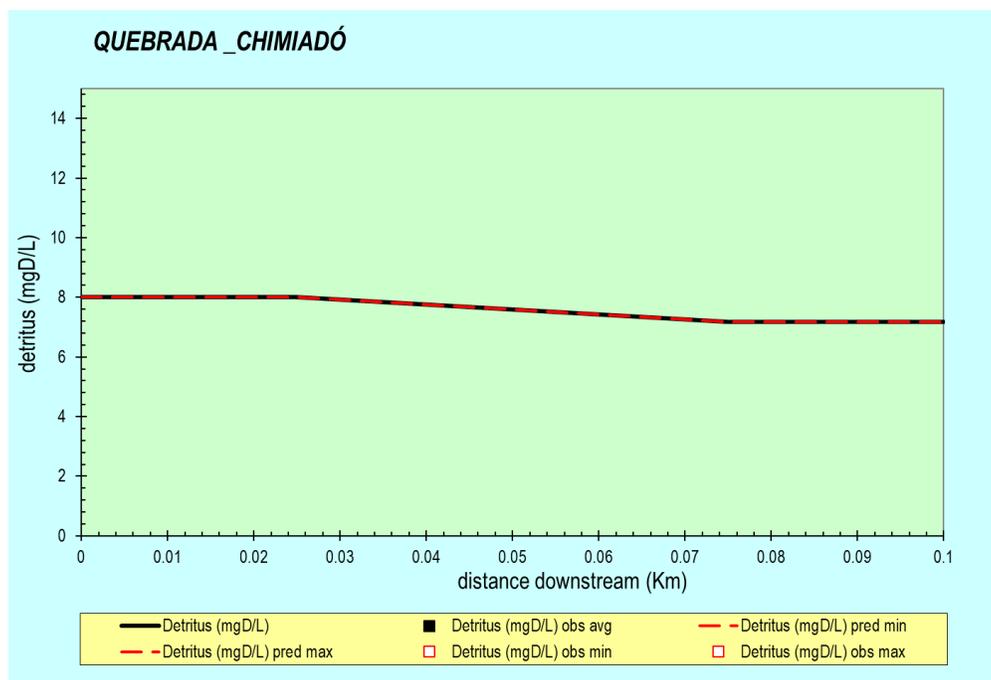


Figura 19.

Oxígeno disuelto simulado - Línea base.

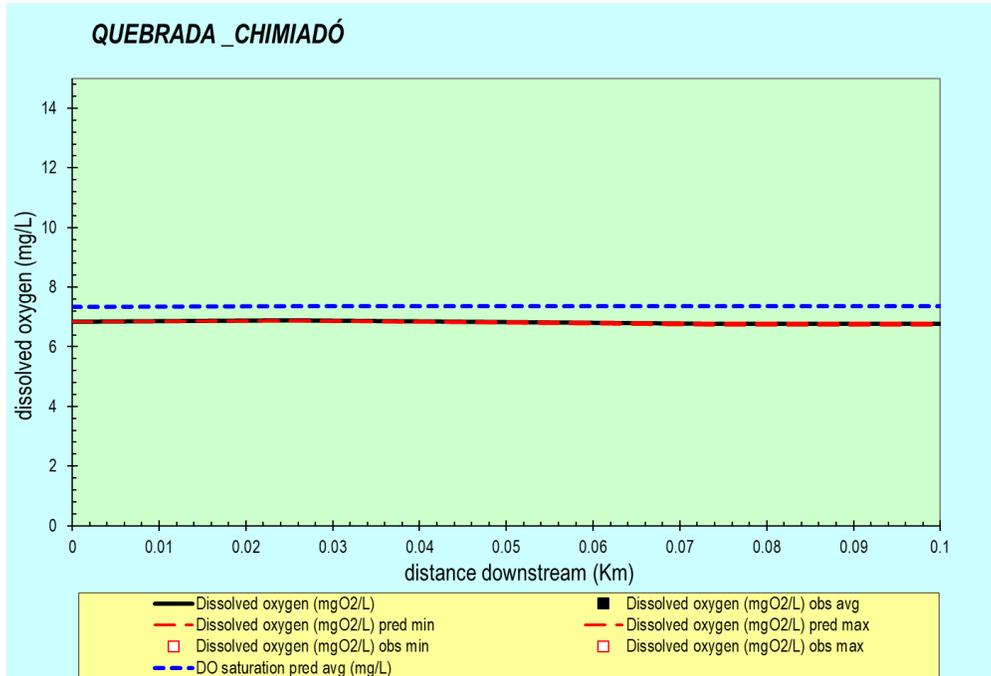
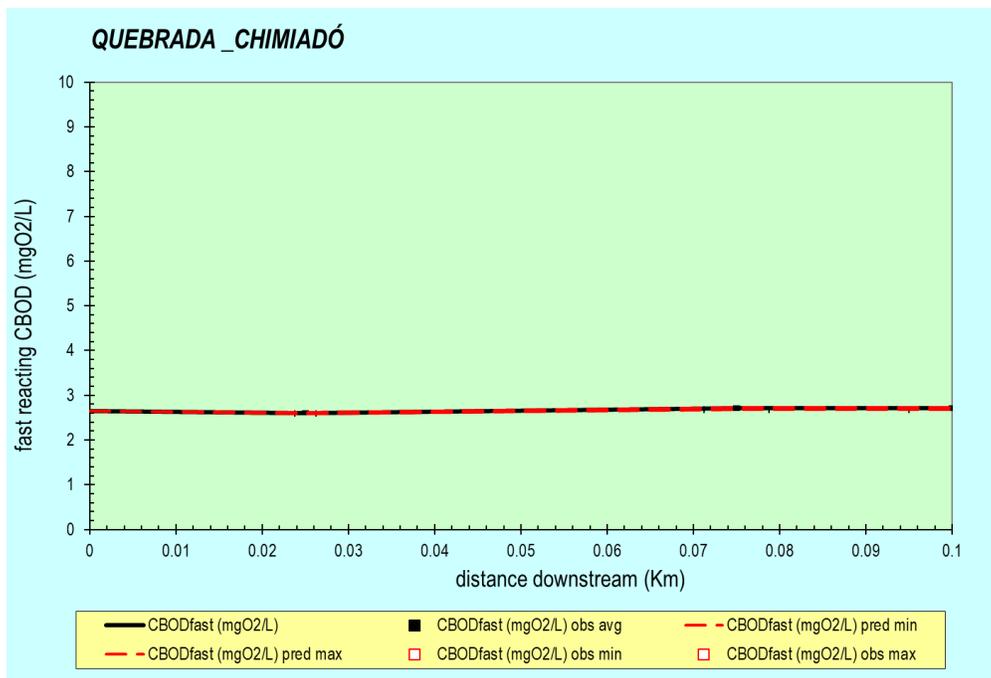


Figura 20.

DBO rápida simulada - Línea base.



11. Resultados de simulación de los diferentes escenarios propuestos en las descargas

11.1. Escenario de modelación 1

Los diferentes valores simulados por el modelo numérico de calidad del agua QUAL2Kw para los diferentes indicadores se presentan en las Figuras 21 a 27.

Figura 21.

Temperatura Simulada - Escenario 1.

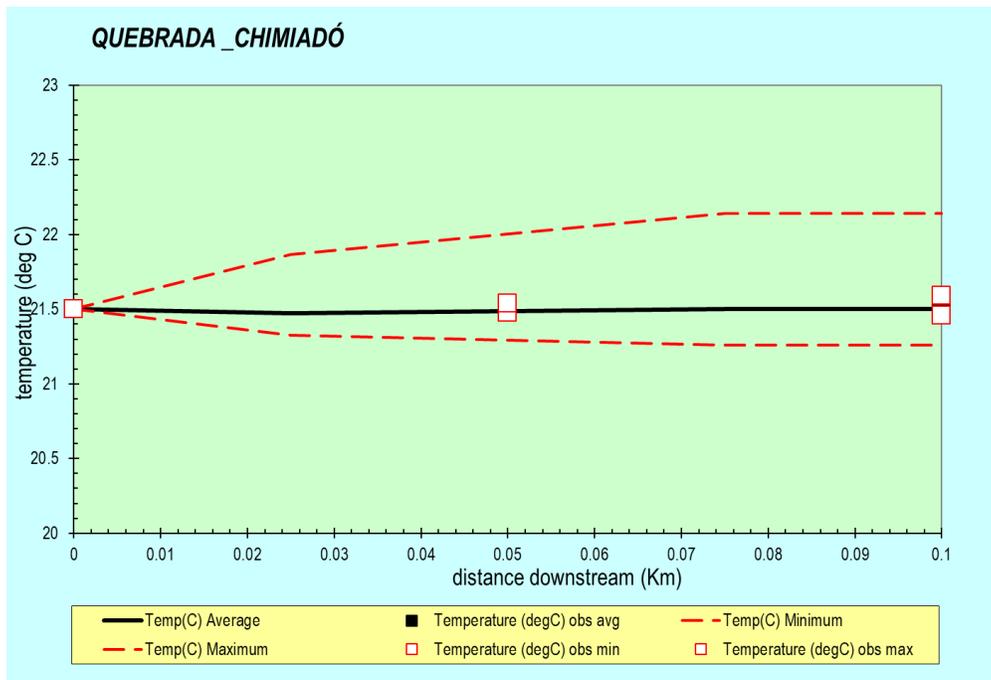


Figura 22.

Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 1.

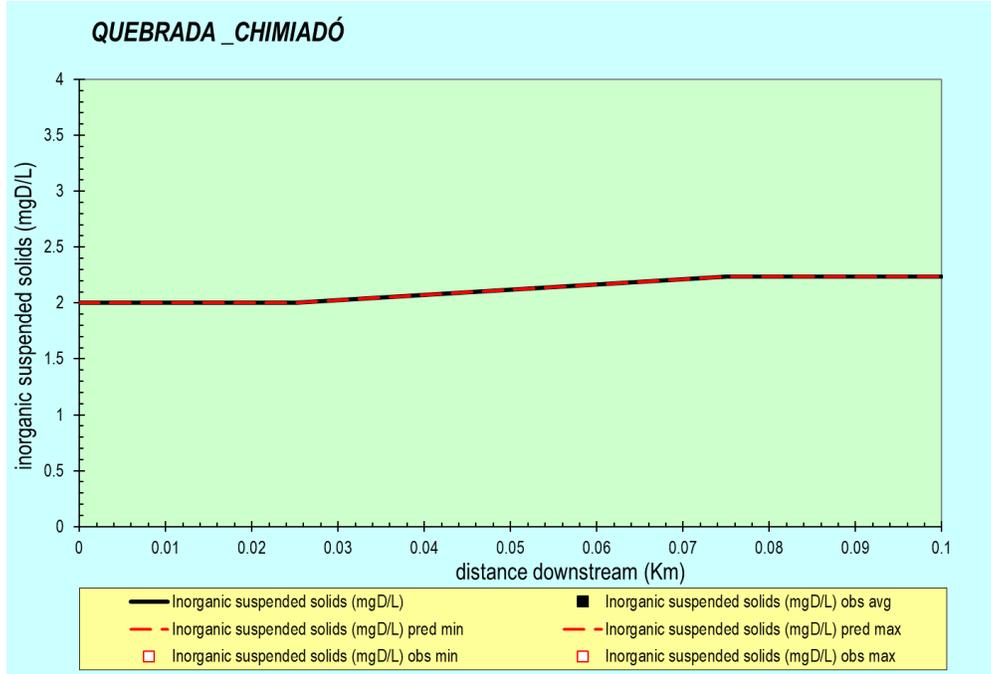


Figura 23.

Oxígeno disuelto simulado - Escenario 1.

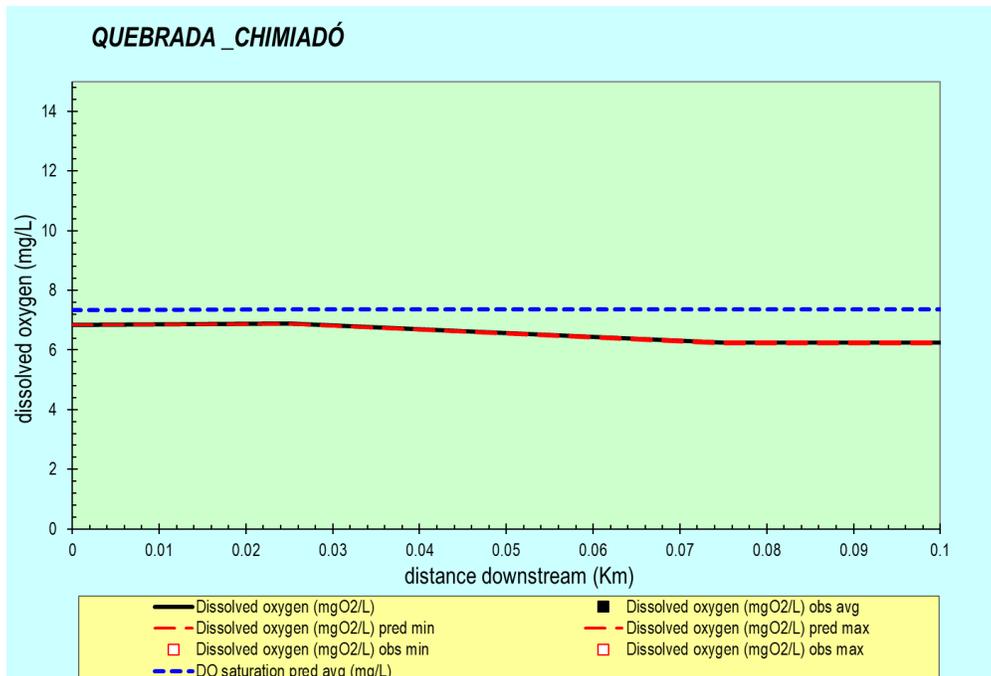


Figura 24.

DBO rápida simulada - Escenario 1.

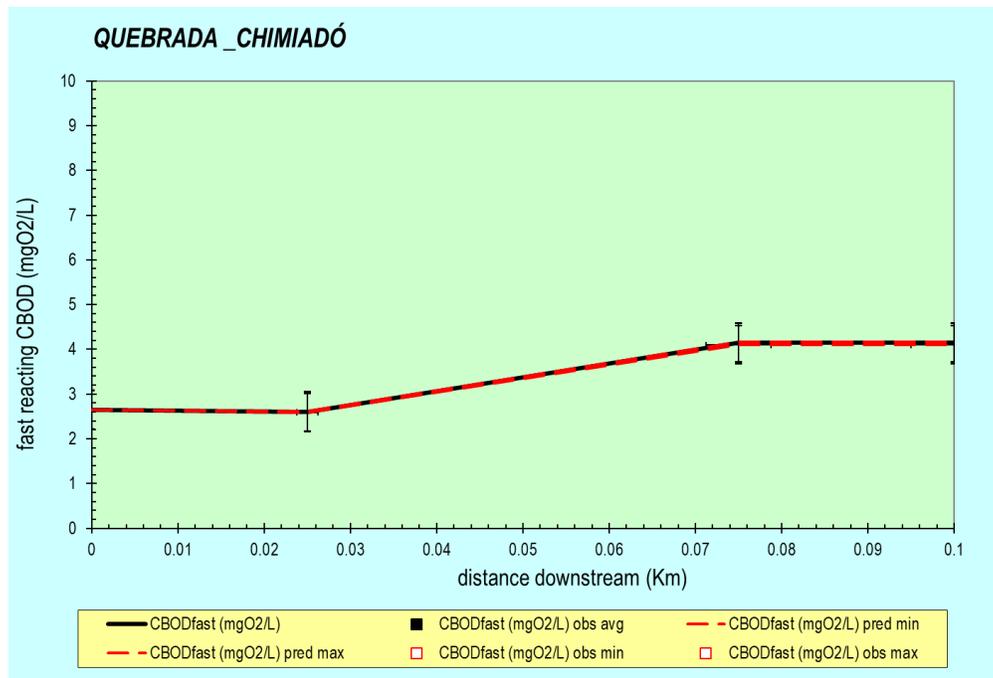


Figura 25.

Detritos simulados - Escenario 1.

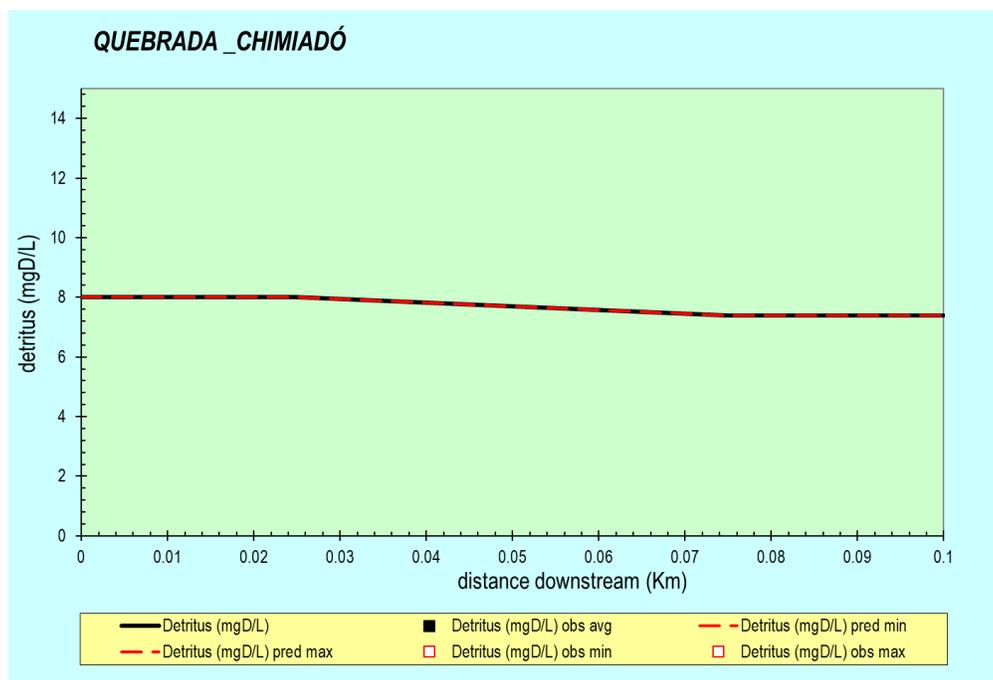


Figura 26.

Alcalinidad simulada - Escenario 1.

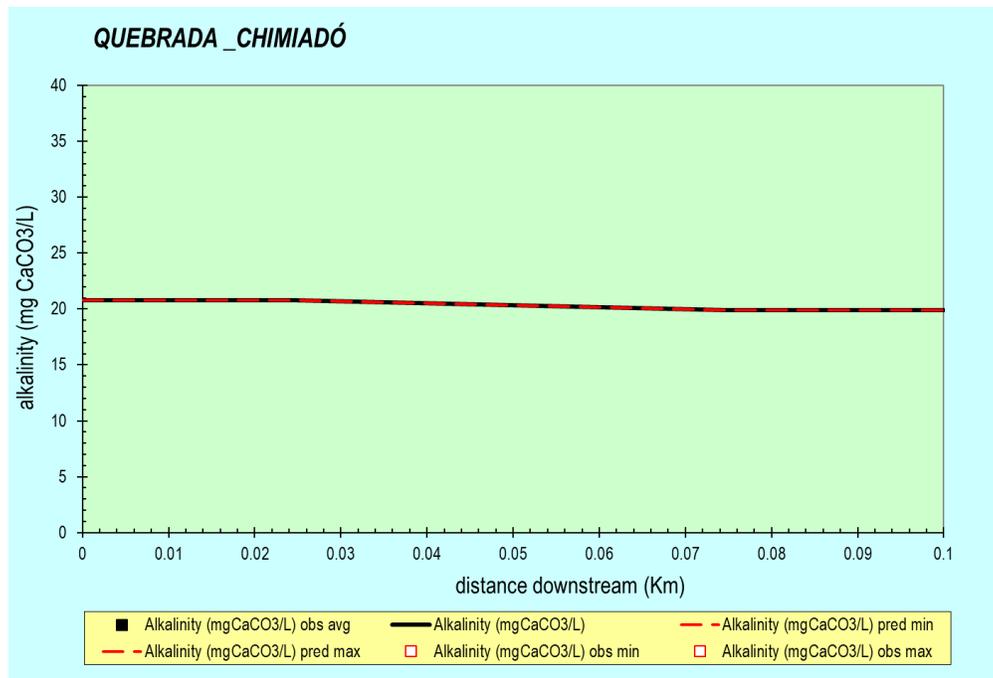
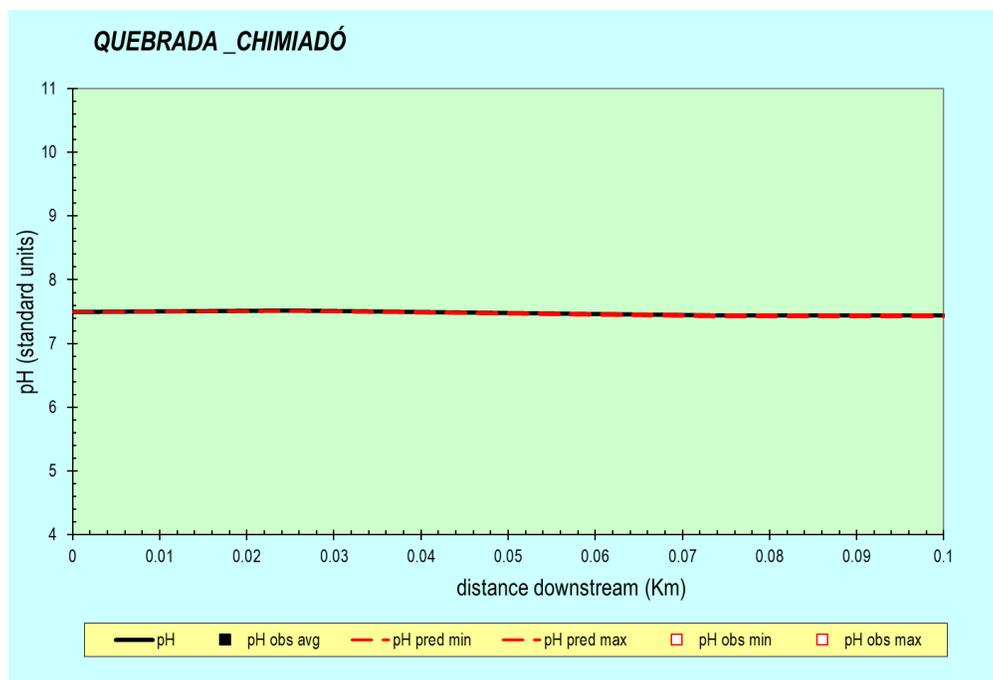


Figura 27.

pH simulado - Escenario 1.



11.2. Escenario de modelación 2

Los diferentes valores simulados por el modelo numérico de calidad del agua QUAL2Kw para los diferentes indicadores se presentan en las Figuras 28 a 34.

Figura 28.

Temperatura Simulada - Escenario 2.

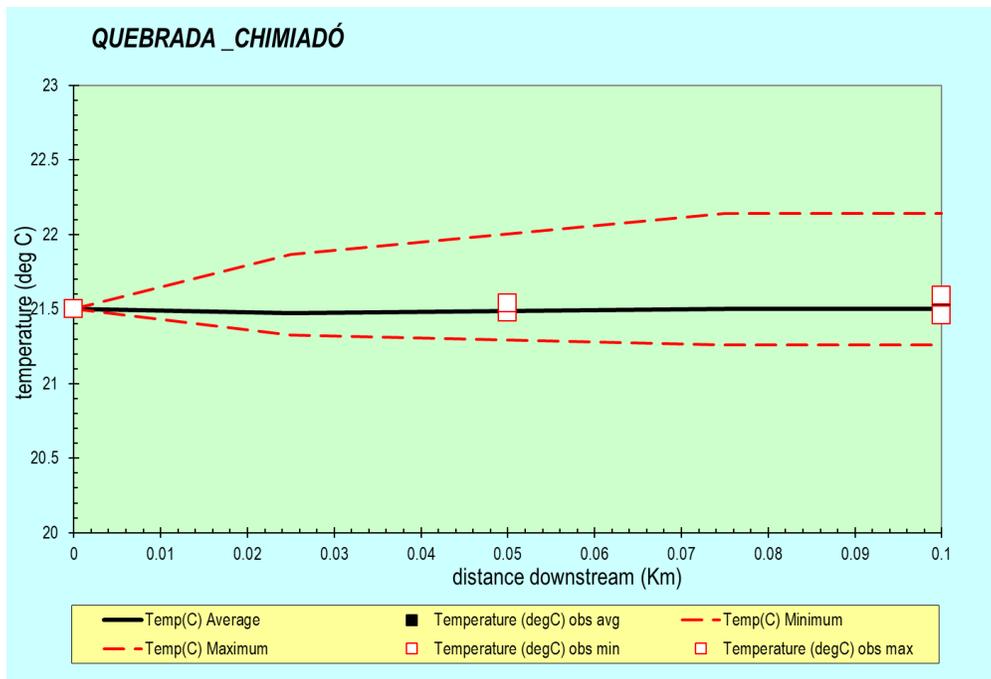


Figura 29.

Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 2.

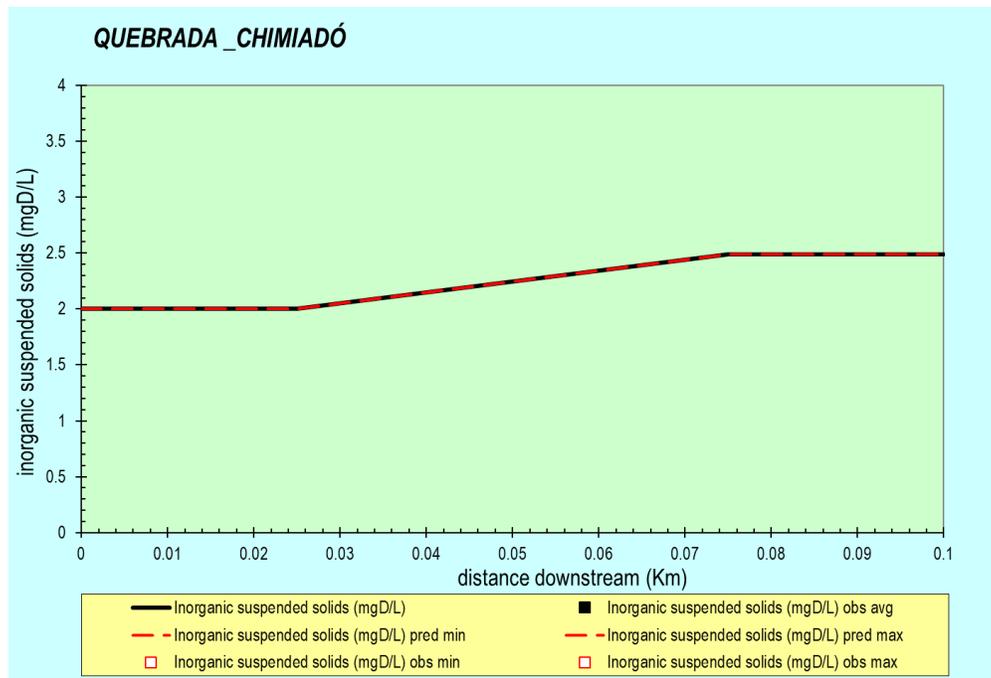


Figura 30.

Oxígeno disuelto simulado - Escenario 2.

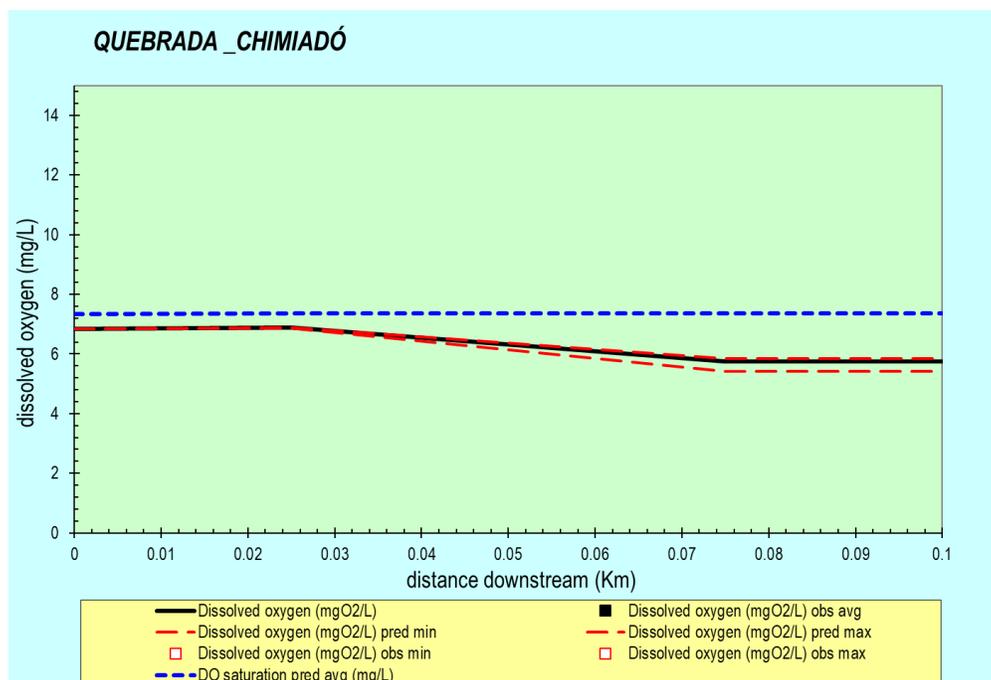


Figura 31.

DBO rápida simulada - Escenario 2.

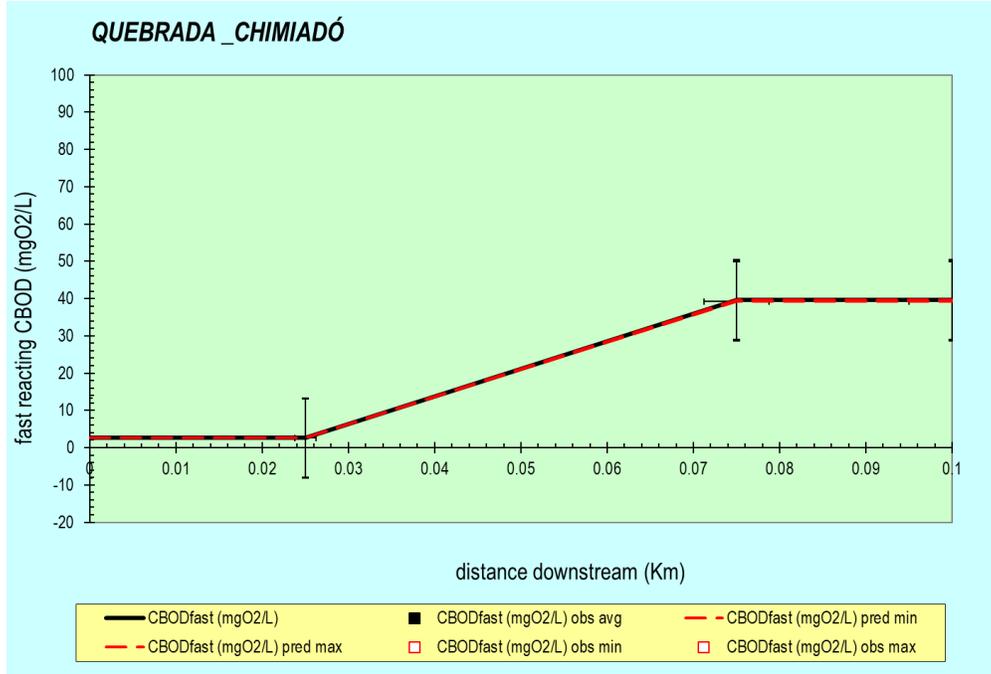


Figura 32.

Detritos simulados - Escenario 2.

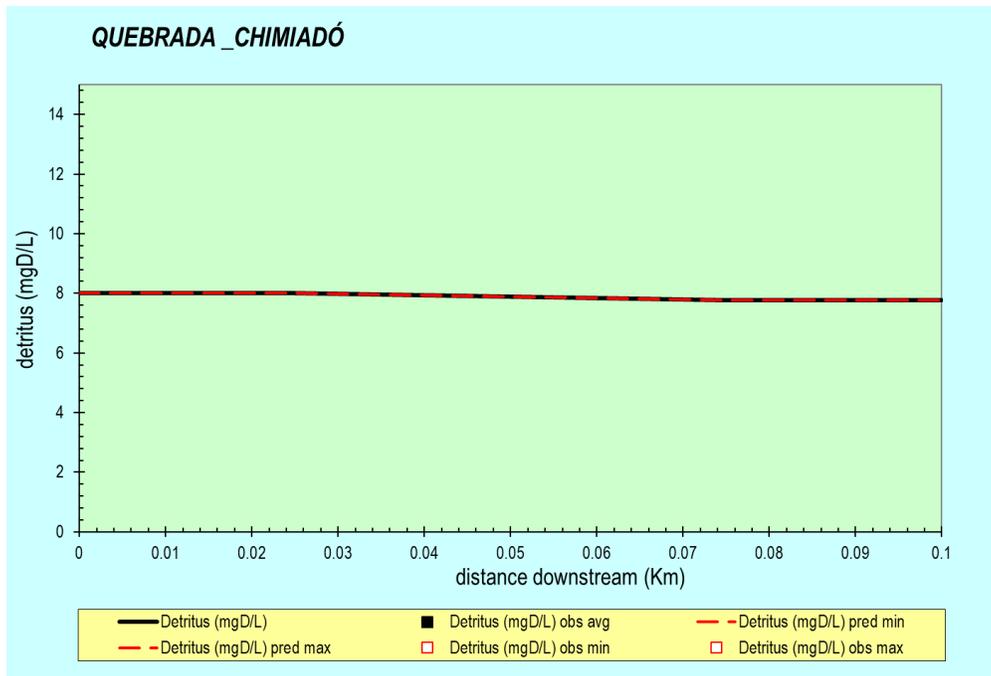


Figura 33.

Alcalinidad simulada - Escenario 2.

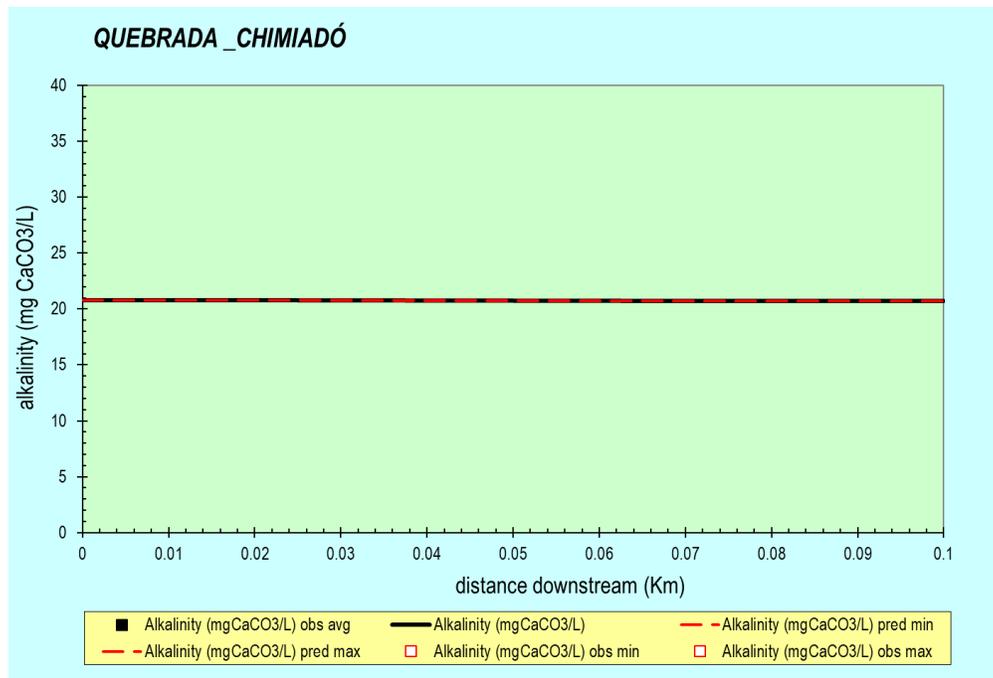
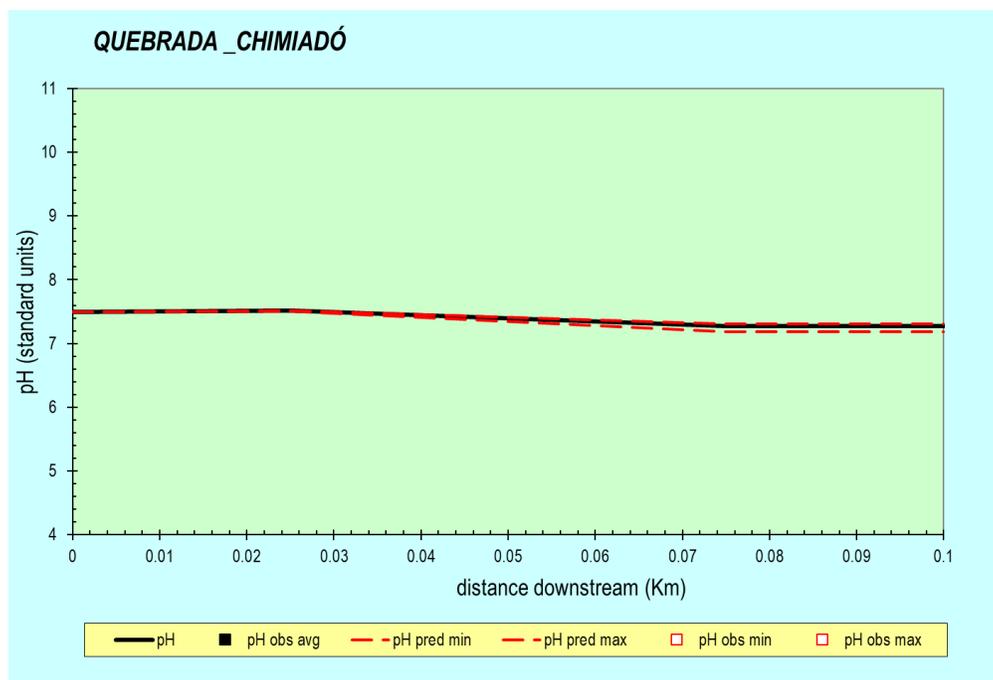


Figura 34.

pH simulado - Escenario 2.



11.3. Escenario de modelación 3

Los diferentes valores simulados por el modelo numérico de calidad del agua QUAL2Kw para los diferentes indicadores se presentan en las Figuras 35 a 41.

Figura 35.

Temperatura Simulada - Escenario 3.

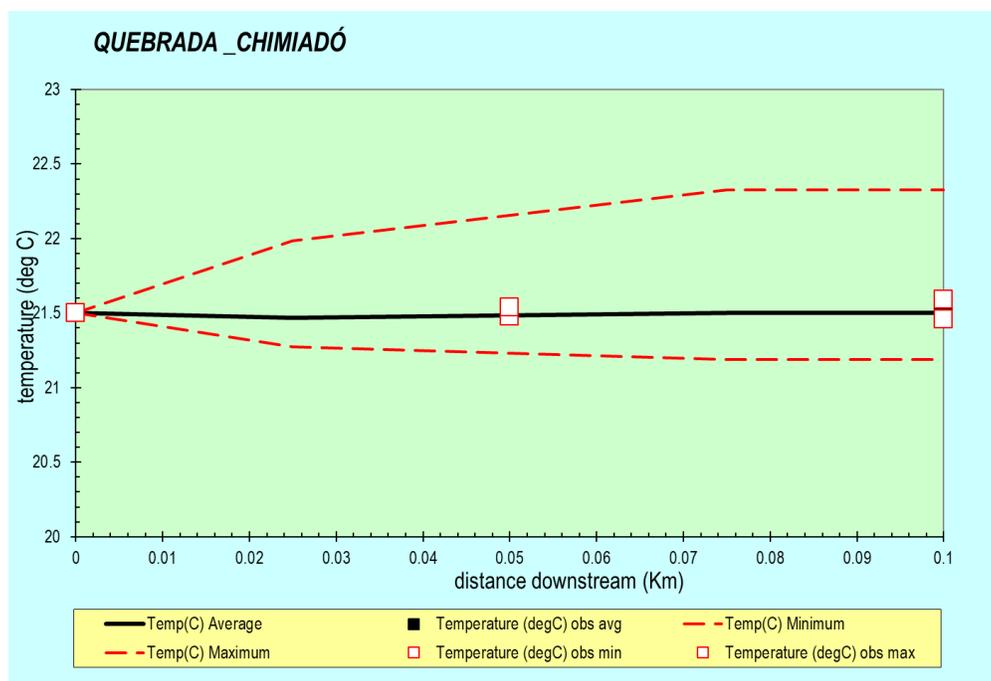


Figura 36.

Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 3.

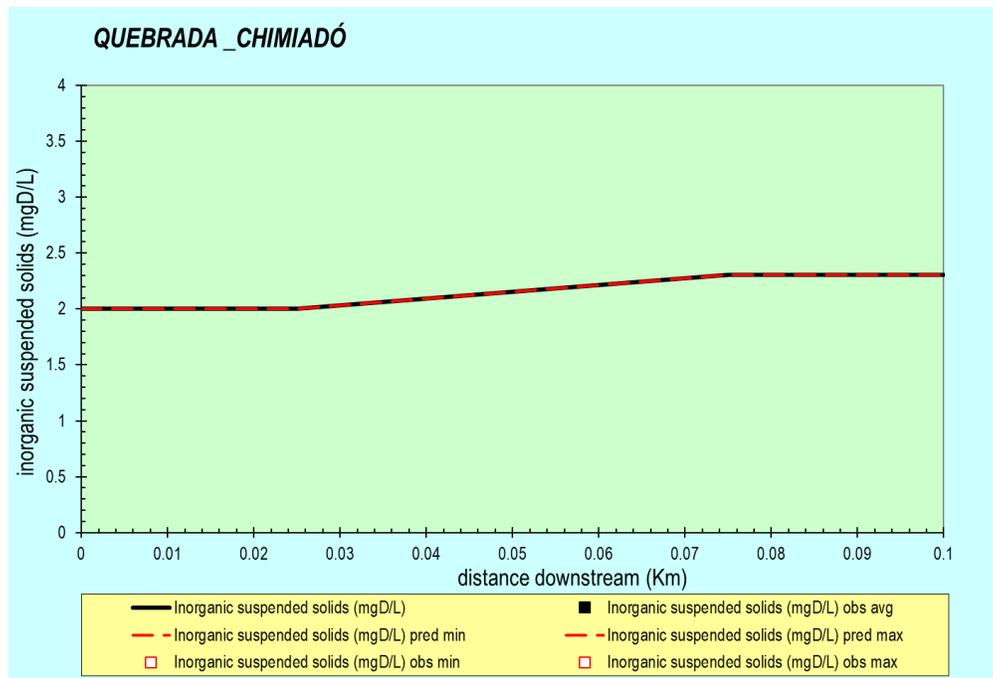


Figura 37.

Oxígeno disuelto simulado - Escenario 3.

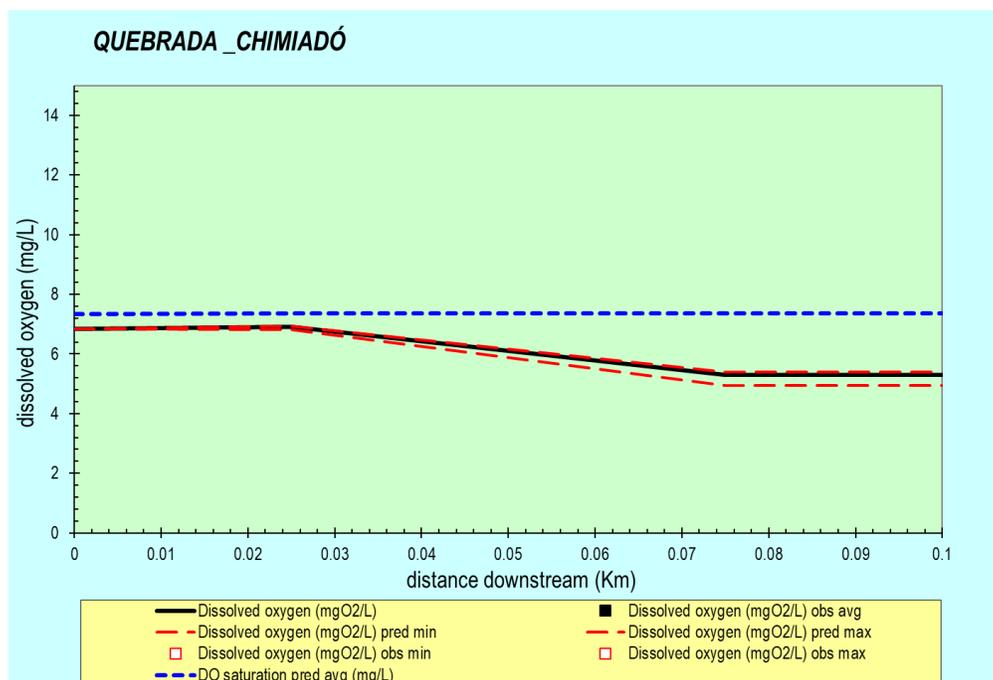


Figura 38.

DBO rápida simulada - Escenario 3.

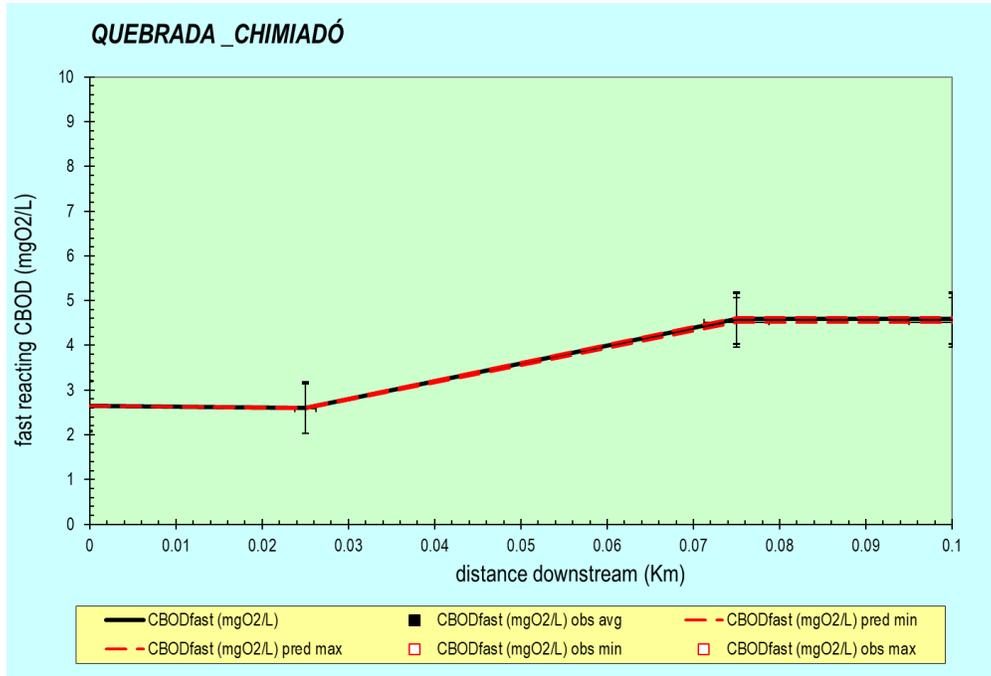


Figura 39.

Detritos simulados - Escenario 3.

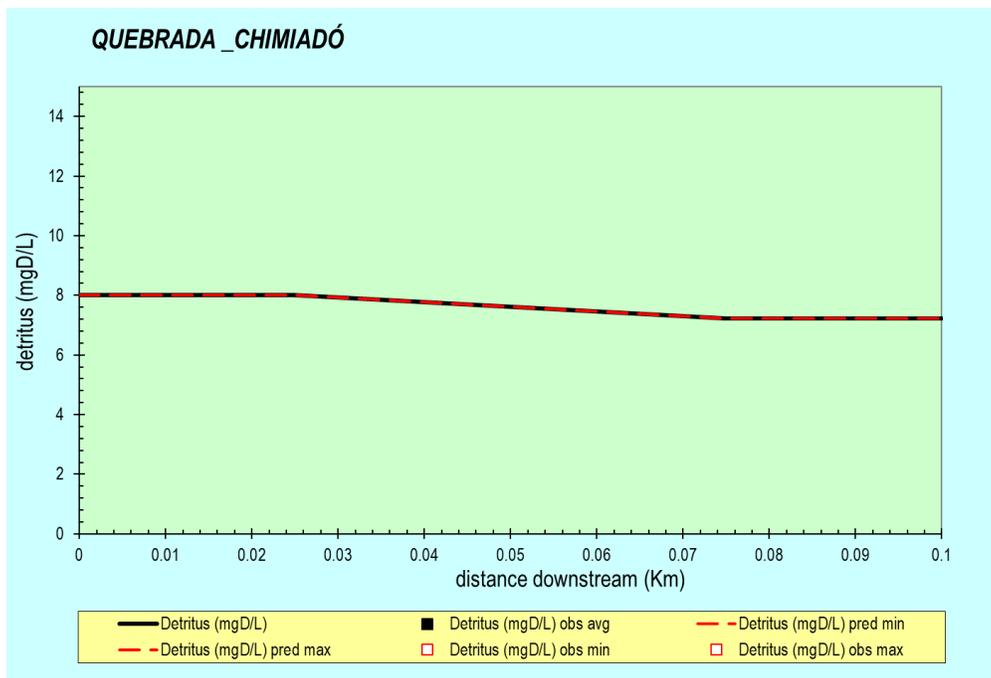


Figura 40.

Alcalinidad simulada - Escenario 3.

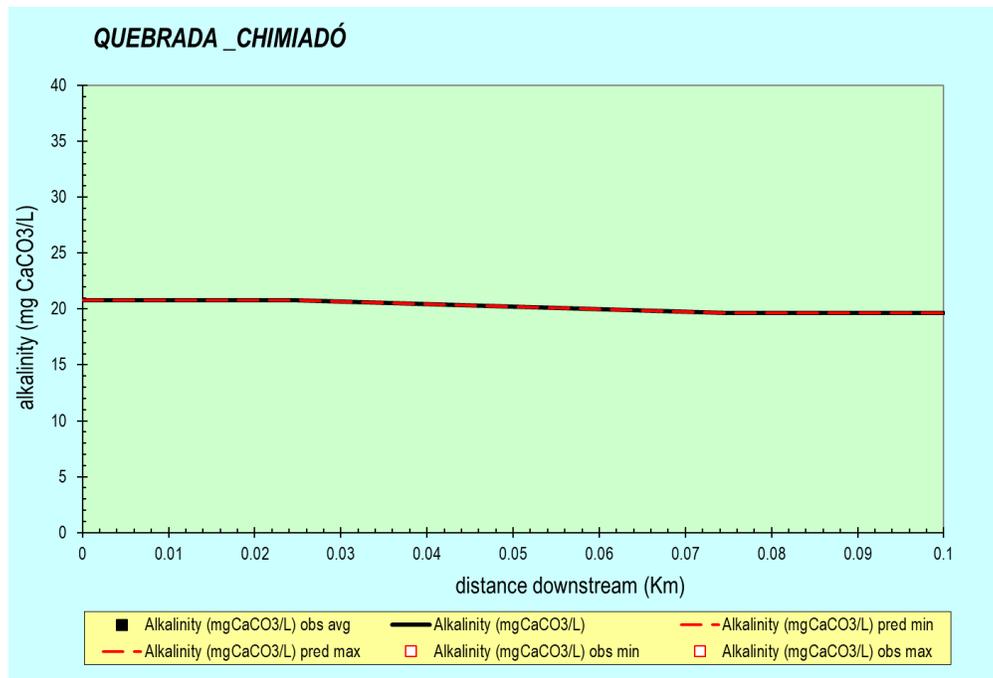
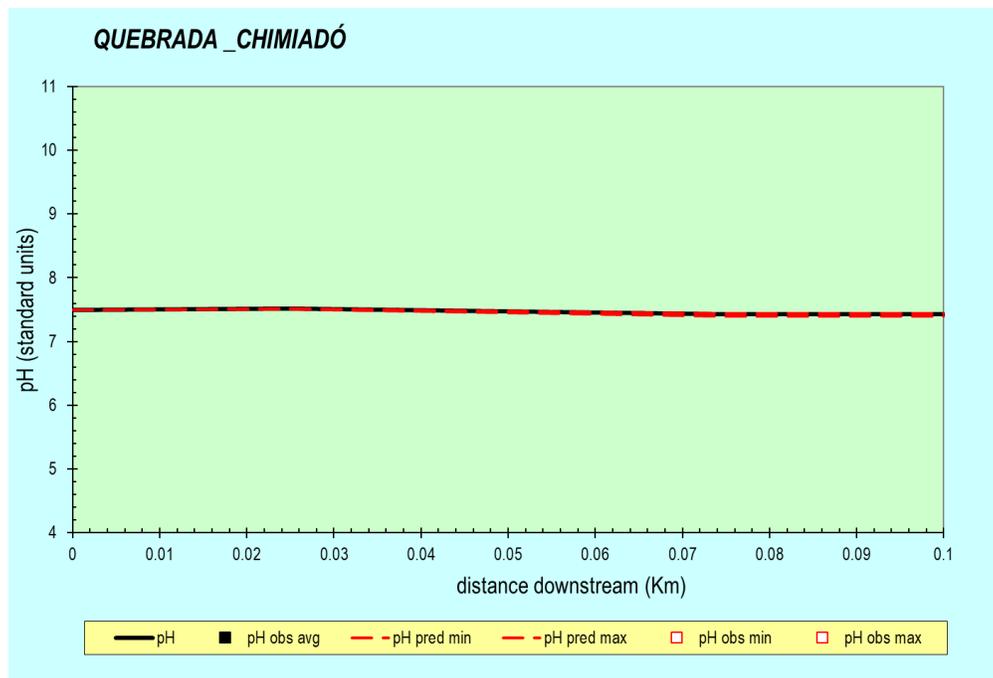


Figura 41.

pH simulado - Escenario 3.



11.4. Escenario de modelación 4

Los diferentes valores simulados por el modelo numérico de calidad del agua QUAL2Kw para los diferentes indicadores se presentan en las Figuras 42 a 48.

Figura 42.

Temperatura Simulada - Escenario 4.

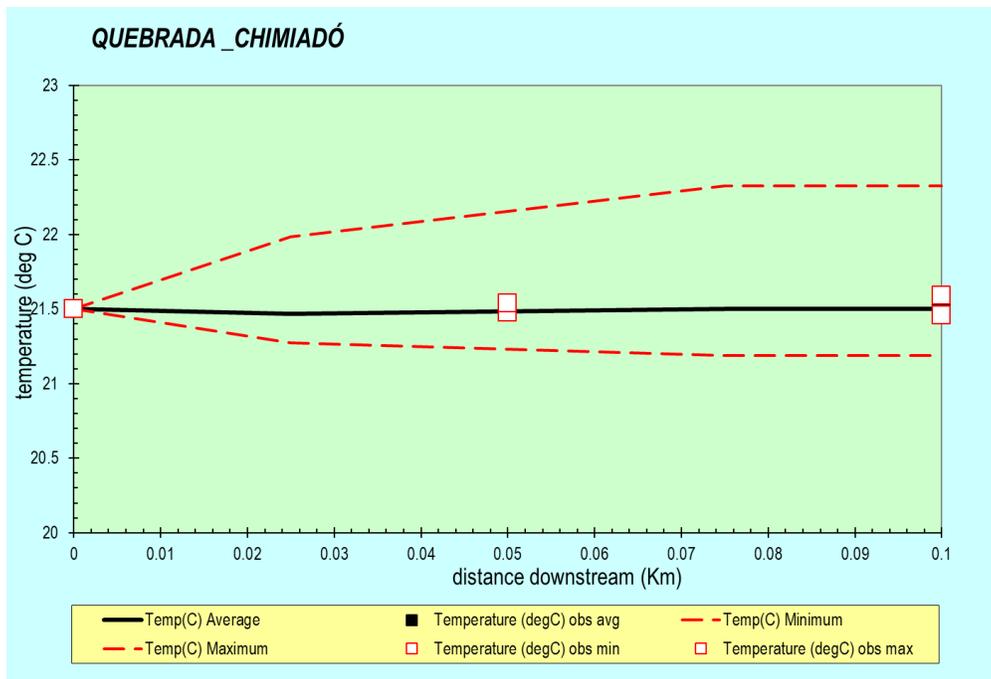


Figura 43.

Sólidos suspendidos inorgánicos simulados - Escenario 4.

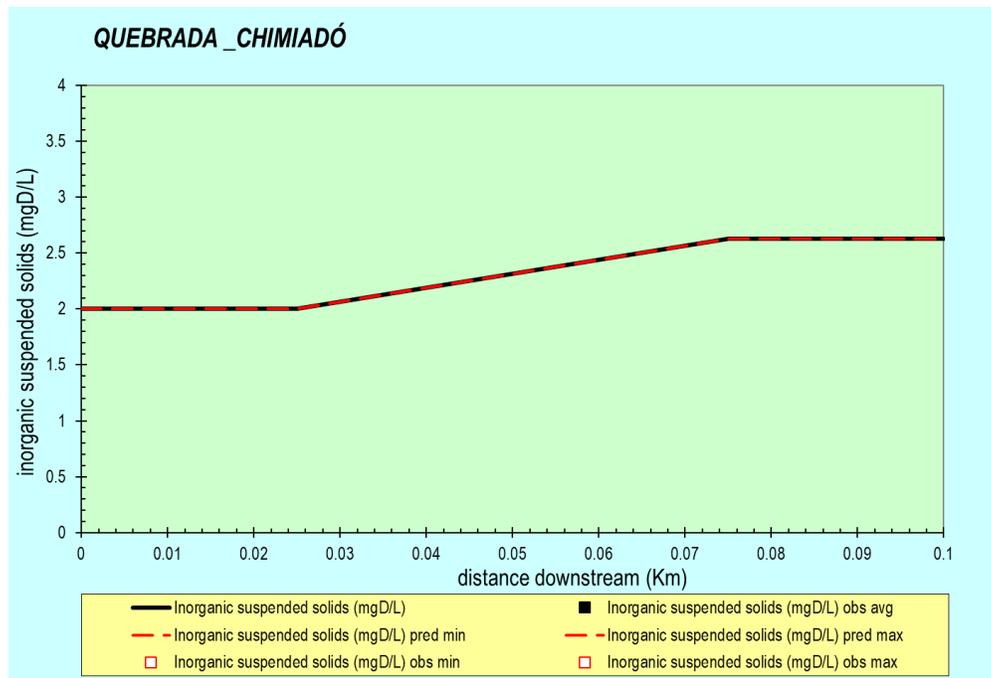


Figura 44.

Oxígeno disuelto simulado - Escenario 4.

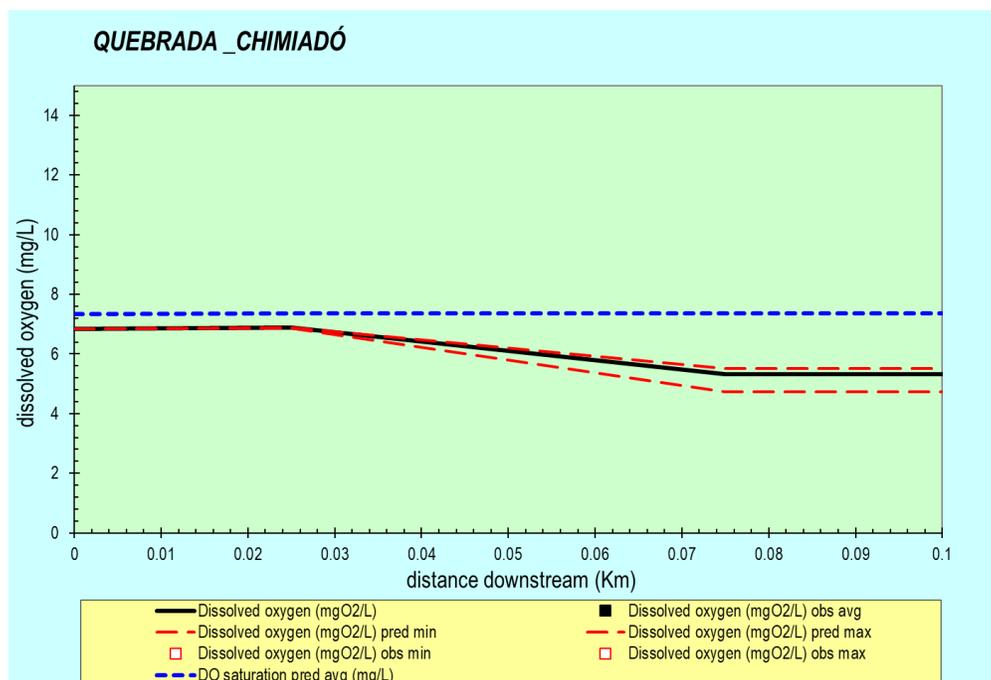


Figura 45.

DBO rápida simulada - Escenario 4.

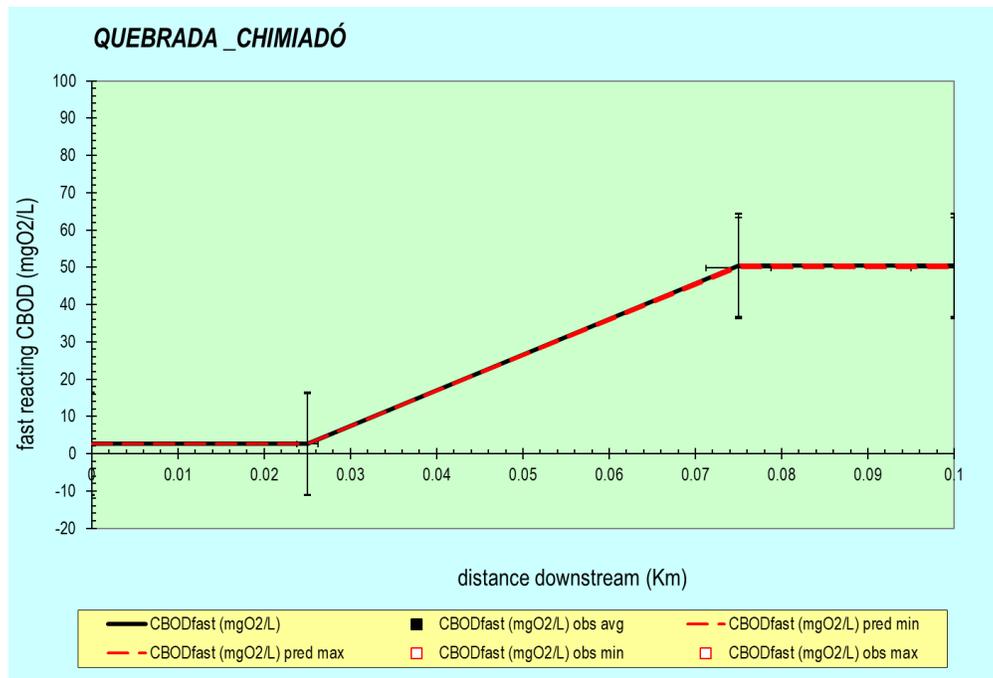


Figura 46.

Detritos simulados - Escenario 4.

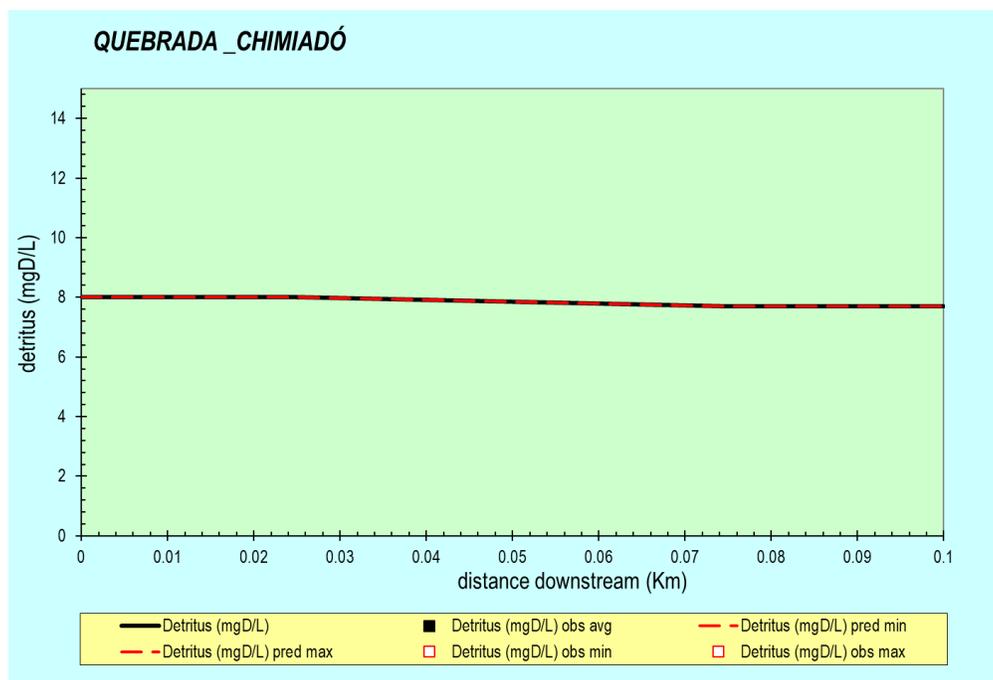


Figura 47.

Alcalinidad simulado - Escenario 4.

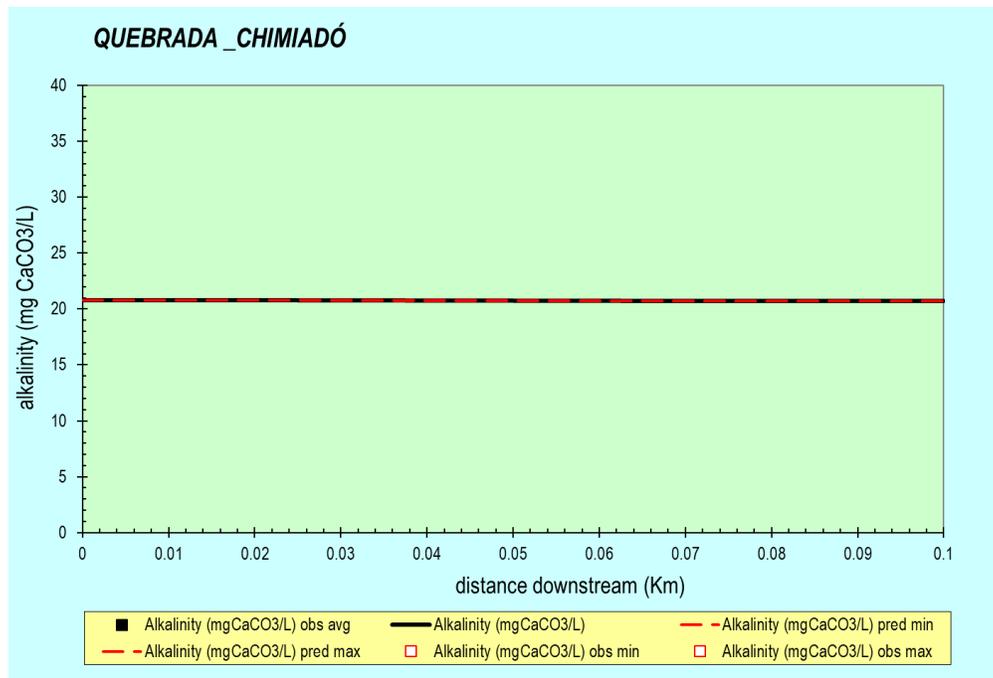
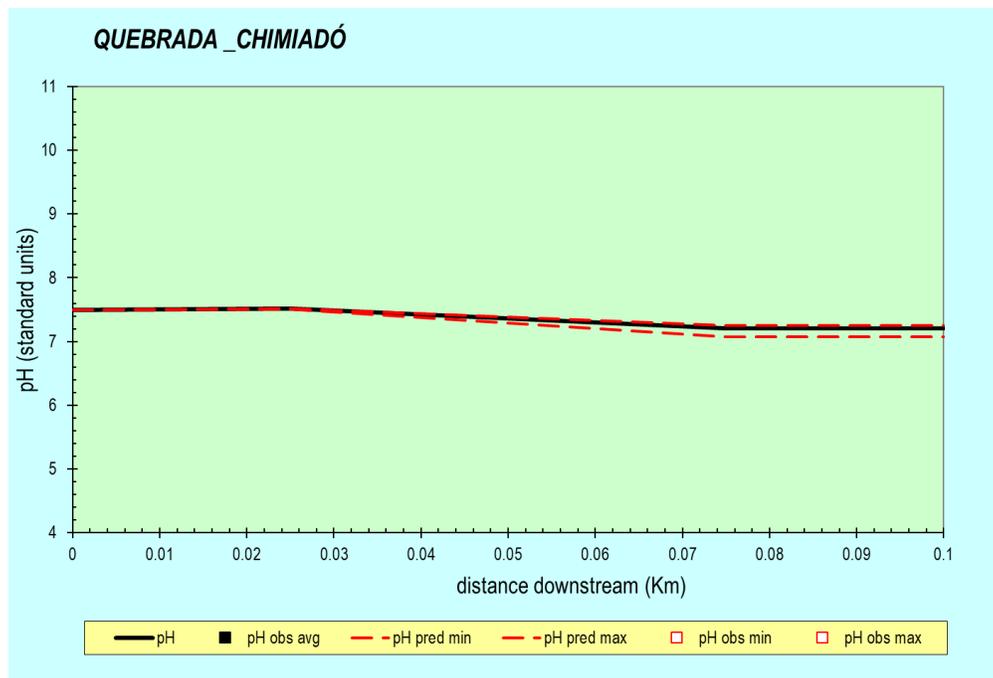


Figura 48.

pH simulada - Escenario 4.



12. Resultados del proceso de modelación de escenarios con una descarga del proyecto AETCR Llano Grande

En las Tablas 14 a 16 se presentan los resultados de proceso de modelación con la descarga correspondiente al aporte de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas.

Modelación ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó en el Municipio de Dabeiba (Antioquia)

Tabla 11.

Resultados determinantes convencionales línea base quebrada Chimiadó.

LINEA BASE DE MODELACIÓN									
Tramo	Distancia (km)	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos inorgánicos (mg D/L)	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	DBO ₅ Rápida (mg O ₂ /L)	Detritus (mg D/L)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	pH
Headwater	0.00	21.50	74.3	2.00	6.85	2.64	8.00	20.8	7.50
1	0.03	21.47	74.3	2.00	6.88	2.60	8.00	20.8	7.51
2	0.08	21.45	74.3	1.99	6.77	2.71	7.17	20.8	7.46
Terminus	0.10	21.45	74.3	1.99	6.77	2.71	7.17	20.8	7.46

Tabla 12.

Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 1.

DESCARGA PTAR ESCENARIO 1									
Tramo	Distancia (km)	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos inorgánicos (mg D/L)	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	DBO ₅ Rápida (mg O ₂ /L)	Detritus (mg D/L)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	pH
Headwater	0.00	21.50	74.30	2.00	6.85	2.64	8.00	20.8	7.50
1	0.03	21.47	74.30	2.00	6.88	2.60	8.00	20.8	7.51
2	0.08	21.50	97.37	2.24	6.25	4.14	7.38	19.9	7.44
Terminus	0.10	21.50	97.37	2.24	6.25	4.14	7.38	19.9	7.44

Modelación ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó en el Municipio de Dabeiba (Antioquia)

Tabla 13.

Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 2.

DESCARGA PTAR ESCENARIO 2									
Tramo	Distancia (km)	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos inorgánicos (mg D/L)	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	DBO ₅ Rápida (mg O ₂ /L)	Detritus (mg D/L)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	pH
Headwater	0.00	21.50	74.30	2.00	6.85	2.64	8.00	20.80	7.50
1	0.03	21.47	74.30	2.00	6.88	2.60	8.00	20.80	7.51
2	0.08	21.50	108.25	2.49	5.74	39.57	7.76	20.73	7.27
Terminus	0.10	21.50	108.25	2.49	5.74	39.57	7.76	20.73	7.27

Tabla 14.

Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 3.

DESCARGA PTAR ESCENARIO 3									
Tramo	Distancia (km)	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos inorgánicos (mg D/L)	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	DBO ₅ Rápida (mg O ₂ /L)	Detritus (mg D/L)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	pH
Headwater	0.00	21.50	74.30	2.00	6.85	2.64	8.00	20.80	7.50
1	0.03	21.42	74.30	2.00	6.90	2.58	8.00	20.80	7.52
2	0.08	21.50	134.44	2.61	5.29	6.54	6.61	18.44	7.33
Terminus	0.10	21.50	134.44	2.61	5.29	6.54	6.61	18.44	7.33

Modelación ambiental del vertimiento generado por el AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó en el Municipio de Dabeiba (Antioquia)

Tabla 15.

Resultados determinantes convencionales simulados bajo el modelo numérico - Escenario 1.

DESCARGA PTAR ESCENARIO 4									
Tramo	Distancia (km)	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	Sólidos inorgánicos (mg D/L)	Oxígeno Disuelto (mg O ₂ /L)	DBO ₅ Rápida (mg O ₂ /L)	Detritus (mg D/L)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	pH
Headwater	0.00	21.50	74.30	2.00	6.85	2.64	8.00	20.80	7.50
1	0.03	21.47	74.30	2.00	6.89	2.60	8.00	20.80	7.51
2	0.08	21.50	118.34	2.63	5.33	50.44	7.7	20.71	7.20
Terminus	0.10	21.50	118.34	2.63	5.33	50.44	7.7	20.71	7.20

13. Factor de dilución

El factor de dilución (S) de la fuente superficial es tomado del documento Modelo Conceptual de Selección de Tecnologías para el Control de la Contaminación por Aguas Residuales (CINARA, 2005). Para la determinación de éste se hizo uso de los datos recolectados en campo a fin de realizar el estimativo de reducción o aumento en el caudal de la fuente (Ecuación 9).

$$S1 = \frac{\text{Caudal de la fuente}}{\text{caudal vertimiento doméstico}}$$

Ecuación 9. Factor de dilución.

Tabla 16.

Factor de dilución quebrada Chimiadó - Vertimiento doméstico

ÉPOCA	Caudal quebrada Chimiadó (m ³ /s)	Caudal vertimiento general doméstico (m ³ /s)	Factor de dilución	Unidad
Lluvias	0.0336	0,003069	10.95	PTARD
Estiaje	0.0252	0,003069	8.21	

El factor de dilución del vertimiento doméstico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del proyecto AETCR Llano Grande a la quebrada Chimiadó, según la verificación efectuada, mostró que en épocas con eventos de lluvia la relación es de 1 a 10,95 veces y de 1 en 8,21 veces en aquellos meses donde se presenta el caudal de estiaje. Por tanto, la fuente receptora tiene una buena capacidad de dilución.

14. Conclusiones

- La aplicación del modelo de simulación QUAL2Kw, utilizando cuatro escenarios con diferentes condiciones de calidad del vertimiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del proyecto AETCR Llano Grande y adicionalmente del caudal de la fuente receptora, se pudo identificar las afectaciones de dicho vertimiento sobre la quebrada Chimiadó.
- A partir de los resultados obtenidos en la campaña de caracterización aguas arriba de la quebrada Chimiadó, se puede afirmar que el cuerpo de agua posee una buena calidad en términos de los parámetros evaluados. Dicha condición influye positivamente al momento de realizar el vertimiento del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del proyecto AETCR Llano Grande.
- Debido a que la quebrada no transporta una carga contaminante importante desde la parte alta, esta podrá asimilar el vertimiento de las aguas residuales domésticas provenientes del proyecto.
- A través del modelo de simulación QUAL2Kw se pudo predecir los impactos que genera el vertimiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas sobre la quebrada:
 - ✓ Para el parámetro de temperatura, las variaciones son insignificantes en los diferentes escenarios evaluados, ya que los rangos mostrados en la modelación no afectan la calidad del agua de la fuente.
 - ✓ Los resultados de la modelación sobre la conductividad eléctrica de la quebrada arrojaron un aumento de hasta 118,34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el escenario más desfavorable (E4), mostrando así una disminución en la calidad del agua en términos de conductividad en la quebrada evaluada.
 - ✓ La simulación arroja que los sólidos inorgánicos sobre la quebrada presentan un leve aumento en cada uno de los escenarios con respecto a la línea base, evidenciando la capacidad de asimilación al vertimiento en la quebrada.

- ✓ Referente al oxígeno disuelto en la quebrada se encontró que el vertimiento del proyecto afecta negativamente el cuerpo de agua debido a que se evidencia una disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto a lo largo del tramo de estudio de la corriente para los diferentes escenarios, esto se podría deber a que el sistema de tratamiento de las aguas es anaerobio, sin embargo, en ningún escenario se llega a tener un corriente con comportamiento anóxico.
 - ✓ Concerniente a la DBO₅, se encontró que el vertimiento del proyecto afecta negativamente el cuerpo de agua debido a que se evidencia un aumento en todos los escenarios siendo el Escenario 4 el más crítico con una concentración de DBO₅ de 50,44 mg O₂/L.
 - ✓ Las variaciones presentadas en el pH y la alcalinidad cuando sobre la fuente receptora se descargan las aguas residuales domésticas del proyecto, no representaron fluctuaciones significativas entre las condiciones actuales y las simuladas para los escenarios más críticos con bajas eficiencias de remoción del sistema de tratamiento y reducción del caudal.
-
- El análisis matemático a través del modelo de simulación permitió determinar que para el caso de los vertimientos de aguas residuales sin tratamiento trabajado en los Escenarios 2 y 4 se ve afectada la capacidad de amortiguación de la quebrada someramente, esto debido a que la fuente cuenta con la capacidad de asimilación y dilución de dicho vertimiento; sin embargo, es de vital importancia generar todas las medidas preventivas y correctivas necesarias para evitar la posible presencia de los escenarios de vertimiento de las aguas residuales sin tratamiento (Escenarios 2 y 4) con el fin de mitigar toda posible alteración de la calidad de la quebrada.

15. Referencias

- Arroyave Gómez, Diana Marcela, Moreno Tovar, Agustín Alejandro, Toro Botero, Francisco Mauricio, Gallego Suárez, Darío de Jesús, & Carvajal Serna, Luis Fernando. (2013). Estudio del Modelamiento de la Calidad del Agua del Río Sinú, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(22), 33-44. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242013000100004&lng=en&tlng=es.
- Bowie, L. G., Mills, W. B., Porcella, D. B., Campbell, C. L., Pagenkopf, J. R., Rupp, G. L. (1985). Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling. Athens, Georgia: Environmental Protection Agency.
- Camacho, L. & Díaz-Granados, M. (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de soluto y de la calidad de agua en ríos- Caso río Bogotá. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos Universidad del Valle/Instituto Cinara.
- Camacho, L., Rodríguez, E., & Hernández, S. (2012). Metodología y resultados de la modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá - Colombia. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.
- GEDAR. (2011). Clasificación de los Sólidos del Agua Residual. GEDAR: Equipos y Productos para el AGUA. <https://www.gedar.es/clasificacion-de-los-solidos-del-agua-residual/>
- Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. (2008) QUAL2Kw: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11. USA: Documentation and User's Manual. Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University, Medford.
- CINARA. (2005). Modelo Conceptual de Selección de Tecnologías para el control de la contaminación por Aguas residuales.
- Decreto 1076 de 2015. (26 de mayo de 2015). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario de Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
- Formica, Stella Maris, Sacchi, Gabriela Andrea, Campodonico, Verena Agustina, Pasquini, Andrea Inés, & Cioccale, Marcela Alejandra. (2015). Modelado de calidad de agua en ríos de montaña

- con impacto antrópico. Caso de estudio: Sierra Chica de Córdoba, Argentina. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(4), 327-341. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000400001&lng=es&tlng=es
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía Nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Calidad*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/calidad/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). *Caracterización de la cuenca del Río la Vieja, Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río la vieja*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Marini, M., & Píccolo, MC. (2000). El balance hídrico en la Cuenca del Río Quequén Salado, Argentina. *Papeles de Geografía*, (31), 39-53.
- Pelletier, L. G., Sharp, E. C., Blanchard, C. M., Otis, N., L'évesque, C., & Amyot, C. (2004). The general Self-Determination Scale (SMS): Its validity and usefulness in predicting success and failure at self-regulation. Manuscript submitted for publication, University of Ottawa.
- Pozo, Jesús, Elosegí, Arturo, Díez, Joserra & Molinero, Jon. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial: Dinámica y relevancia de la materia orgánica*.
- Zhang, Y. & Chiew, H.H.S. (2012). Estimation of mean annual runoff across southeast Australia by incorporating vegetation types into Budyko framework. *Australian Journal of water resources*, 15(2).

MODELACIÓN AMBIENTAL DEL VERTIMIENTO GENERADO POR EL AETCR LLANO GRANDE A LA QUEBRADA CHIMIADÓ EN EL MUNICIPIO DE DABEIBA (ANTIOQUIA)

Jornada de Prácticas Académicas: Escuela Ambiental

Objetivos

Objetivo general

- ✓ Aplicar el modelo QUAL2Kw para determinar el comportamiento, transformación, transporte y destino de contaminantes producto del vertimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del proyecto AETCR Llano Grande en la quebrada Chimiadó

Objetivos específicos

- ✓ Plantear cuatro escenarios probables para el modelo de simulación QUAL2Kw, para la identificación de afectaciones de la quebrada Chimiadó.
- ✓ Determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables de la quebrada Chimiadó.
- ✓ Predecir, a través del modelo QUAL2Kw, los impactos que causa el vertimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes del proyecto AETCR Llano Grande, en función de la capacidad de asimilación del cuerpo hídrico.

Metodología

ETAPA 1: Visita técnica



ETAPA 2: Caracterización de la fuente

Parámetro	Unidades	Quebrada Chimiadó
Temperatura	°C	21
pH	-	7.5
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	6,85
Conductividad	µS/cm	53
DBO ₅ Total	mg O ₂ /L	3,3
DQO Total	mg O ₂ /L	<25
Grasas y Aceites	mg/L	1,48
Sólidos Suspendedos Totales	mg SST/L	<10,0
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	21,9

Parámetro	Unidades	Agua residual doméstica sin tratamiento	Efluente PTAR AETCR Llano Grande
Temperatura	°C	22	22
pH	-	7,43	7,43
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	0,7	2,5
Conductividad	µS/cm	480	350
DBO ₅ Total	mg O ₂ /L	350	20
DQO Total	mg O ₂ /L	450	90
Grasas y Aceites	mg/L	25	<1,00
Sólidos Suspendedos Totales	mg SST/L	70	2,4
Sólidos Sedimentables	mg/L	<0,3	<0,1
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	20	12

ETAPA 5: Análisis de resultados

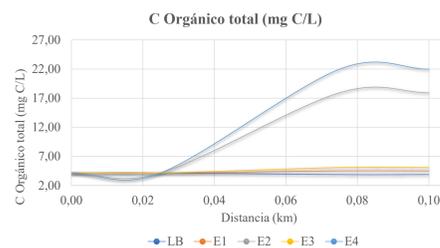
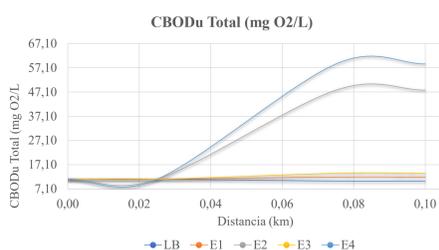
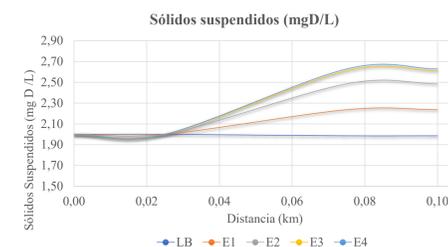
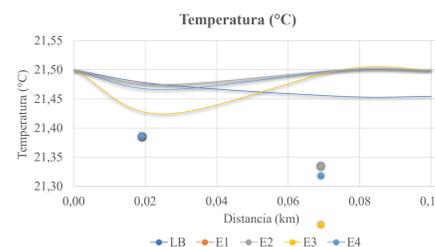
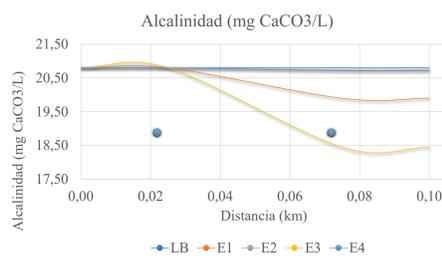
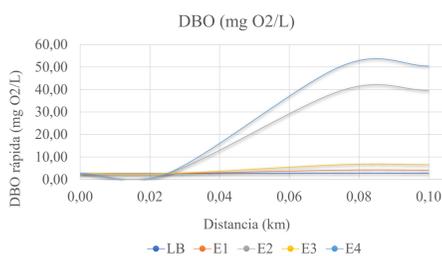
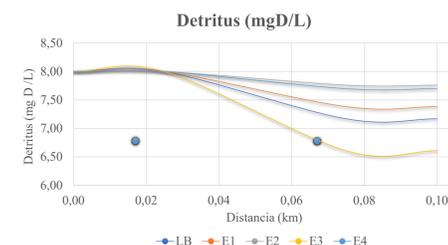
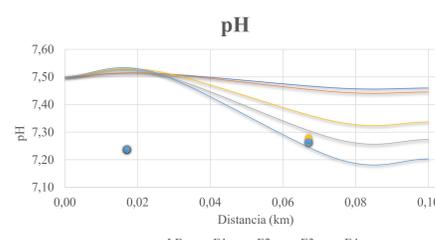
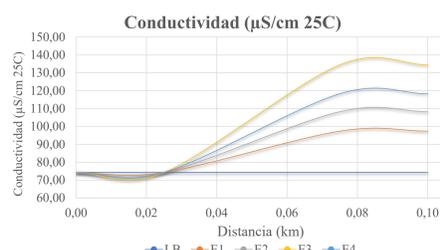
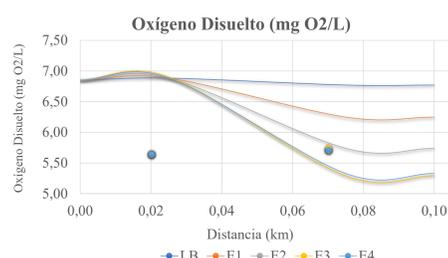
ETAPA 3: Alimentación del modelo

Parámetro	Unidad
Temperatura	°C
Conductividad	µS/cm
Sólidos Inorgánicos	mg D/L
Oxígeno Disuelto	mg/L
DBO lento	mg O ₂ /L
DBO rápida	mg O ₂ /L
Nitrógeno Orgánico	µg N/L
Nitrógeno - NH ₄	µg N/L
Nitrógeno - NO ₃	µg N/L
Fosforo Orgánico	µg P/L
Fosforo Inorgánico (SRP)	µg P/L
Fitoplancton	µg A/L
Internal Nitrogen (INP)	µg N/L
Internal Phosphorus (IPP)	µg P/L
Detritus (POM)	mg D/L
Pathogen	CFU/100 mL
Alkalinity	mg CaCO ₃ /L
pH	-

ETAPA 4: Escenarios de modelación

- Escenario 1
- Escenario 2
- Escenario 3
- Escenario 4

Resultados del modelo QUAL2Kw



Objetivos de calidad del agua para la cuenca el río SUCIO

Parámetro	Índice			Objetivo de calidad
	Actual	Nivel técnico o normativo	Deseado	
OD (mg/L)	7.4	≥ 4.0	≥ 4.0	≥ 4.0
DBO ₅ (mg/L)	1.94	DBO ₅ ≤ 5.0	DBO ₅ ≤ 5.0	DBO ₅ ≤ 5.0
SST (mg/L)	292	0 ≤ SST ≤ 20	0 ≤ SST ≤ 20	200
pH (unidad pH)	7.66	4.5 - 9.0	4.5 - 9.0	4.5 - 9.0
T (°C)	22.4	± 5°C temp. Ambiente	± 5°C temp. Ambiente	± 5°C temp. Ambiente
Olores ofensivos	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes

Conclusiones

- ✓ Debido a que la quebrada no transporta una carga contaminante importante desde la parte alta, esta podrá asimilar el vertimiento de las aguas residuales domésticas provenientes del proyecto.
- ✓ El modelo de simulación QUAL2Kw se empleó para analizar cuatro escenarios distintos que representan diversas condiciones de calidad del vertimiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del proyecto AETCR Llano Grande, así como variaciones en el caudal de la fuente receptora. Esto permitió detectar los impactos del vertimiento en la quebrada Chimiadó.
- ✓ A través del modelo de simulación QUAL2Kw se pudo predecir los impactos que genera el vertimiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas sobre la quebrada

Referencias

