

**MODELACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE ASIMILACIÓN DE
CONTAMINANTES DE LA QUEBRADA CHAGUANI POR VERTIMIENTOS DE
AGUAS DE UNA ESTACIÓN DE SERVICIO EN SILVANIA (CUNDINAMARCA)**

SONIA MAYERLY RODRIGUEZ TORRES

LUZ JANET GARCÍA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2017

**MODELACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE ASIMILACIÓN DE
CONTAMINANTES DE LA QUEBRADA CHAGUANI POR VERTIMIENTOS DE
AGUAS DE UNA ESTACIÓN DE SERVICIO EN SILVANIA (CUNDINAMARCA)**

SONIA MAYERLY RODRIGUEZ TORRES

LUZ JANET GARCÍA

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.

ASESOR: CARLOS DANIEL MONTES

INGENIERO CIVIL, M.SC.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2017



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., diciembre 02 de 2017

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo de grado con todo nuestro amor y cariño a nuestras familias por su sacrificio y esfuerzo, por apoyar nuestro futuro y por creer en nuestras capacidades

Agradecimientos

Agradecemos a los maestros que han dedicado su tiempo, su esfuerzo y su experiencia personal para que los recursos hídricos sean vistos con un asunto técnico y sensible, agradecemos a nuestras familiar, compañeros y amigos por la imperturbabilidad durante el tiempo que dedicamos a este posgrado.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1.1 Antecedentes del problema.....	15
1.1.2 Pregunta de investigación	15
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3 HIPÓTESIS.....	17
1.4 OBJETIVOS.....	17
1.4.1 Objetivo general.....	17
1.4.2 Objetivos específicos	17
2 MARCOS DE REFERENCIA	18
2.1 MARCO TEÓRICO	18
2.1.1 Generalidades del modelo.....	20
2.1.2 Información de entrada al modelo	26
2.2 MARCO JURÍDICO.....	27
2.3 MARCO GEOGRÁFICO.....	28
2.4 MARCO DEMOGRÁFICO	29
3 METODOLOGÍA.....	32
3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO	32
3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS	35
4 MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	36
4.1 DEFINICIÓN DEL MODELO HIDRAULICO CON HECRAS	36
4.2 CALIDAD ACTUAL DEL AGUA.....	38
4.3 CÁLCULO DE LOS CAUDALES MÍNIMOS, MEDIOS Y MÁXIMOS DE LA QUEBRADA.....	39
5 PROCESAMIENTO DE DATOS	40
5.1 CAMPAÑA DE CAMPO	40
5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	44
5.2.1 Pre-procesamiento de las variables modeladas	44

5.2.2	<i>Sólidos Suspendidos Inorgánicos (ISS)</i>	44
5.2.3	<i>Modelación de la materia orgánica carbonácea</i>	45
5.2.4	<i>Modelación del ciclo de nitrógeno</i>	48
5.2.5	<i>Modelación del ciclo de fósforo</i>	49
5.2.6	<i>Modelación del oxígeno disuelto, la alcalinidad, el pH, conductividad y la temperatura del</i>	
<i>agua</i>	51	
5.3	DATOS REQUERIDOS POR EL MODELO	51
5.3.1	<i>QUAL2K</i>	51
5.3.2	<i>Headwater</i>	52
5.3.3	<i>Reach</i>	53
5.3.4	<i>Variables climáticas</i>	54
5.3.5	<i>Luz y calor</i>	54
5.3.6	<i>Point sources</i>	55
5.4	CALIBRACIÓN DEL MODELO	55
5.4.1	<i>Parámetros ajustados</i>	57
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELO	60
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
8	BIBLIOGRAFÍA	69

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 ESQUEMA GENERAL DE QUAL2KW.....	25
FIGURA 2-2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	29
FIGURA 4-1 PERFILES DE AFORO.....	37
FIGURA 4-2 CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA EL SECTOR ESTUDIADO.....	37
FIGURA 5-1. RECONOCIMIENTO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	42
FIGURA 5-2 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL.....	43
FIGURA 5-3. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PARA TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	56
FIGURA 5-4 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PARA TIEMPO DE VIAJE Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS.....	56
FIGURA 5-5 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PARA OXÍGENO DISUELTO Y DETRITOS.....	56
FIGURA 5-6 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PARA DBO RÁPIDA Y NITRÓGENO ORGÁNICO.....	57
FIGURA 5-7 TASAS DE REACCIÓN DEL MODELO CALIBRADO.....	58
FIGURA 6-1. SIMULACIÓN DE TEMPERATURA.....	60

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL PROYECTO.....	22
TABLA 2-2. POBLACIÓN SISBEN 2011	30
TABLA 2-3. ZONA.....	30
TABLA 2-4. DISTRIBUCIÓN POR CICLO VITAL	30
TABLA 2-5. POBLACIÓN CICLO VITAL SEGÚN GENERO	31
TABLA 4-1 RESULTADOS DE MONITOREOS SOBRE LA QUEBRADA CHAGUANI.....	38
TABLA 5-1 PUNTOS DE MONITOREO SOBRE EL CUERPO DE AGUA.	41
TABLA 5-2. TIEMPOS DE TOMA DE MUESTRAS.....	41
TABLA 5-3 CONVERSIÓN DE LOS REPORTES DE CLOROFILA A.	46
TABLA 5-4 CÁLCULOS REALIZADOS A PARTIR DE LA DBO Y LA DQO	48
TABLA 5-5 VALORES RELACIONADOS CON COMPUESTOS NITROGENADOS.	49
TABLA 5-6. CÁLCULOS RELACIONADOS CON EL FÓSFORO.....	50
TABLA 5-7 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MONITOREO	53
TABLA 5-8 VARIABLES CLIMÁTICAS USADAS EN EL MODELO.....	54
TABLA 5-9 INGRESO DE FUENTES PUNTUALES.	55
TABLA 5-10 TASAS DE REACCIÓN CALCULADAS CON ECUACIONES EMPÍRICAS.	59

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a la modelación del vertimiento de aguas residuales no domesticas de la estación de servicio de combustibles Silvania sobre la quebrada Chaguani ubicada en Silvania, Cundinamarca.

Este proyecto se desarrolló a fin de conocer la incidencia del vertimiento sobre la quebrada Chaguani y ampliar el conocimiento sobre las fuentes hídricas del departamento de Cundinamarca. Se utilizó como software modelador de la calidad del agua, el modelo Qual2kw, ya que se ajustaba a las condiciones del vertimiento y de la quebrada por su tamaño y caudal. Durante la calibración se tuvieron en cuenta los resultados de calidad del agua tanto de la fuente como del cauce, los caudales, parámetros meteorológicos y las tasas de reacción. Igualmente, se compararon algunos escenarios simulados que representan diversas alternativas de saneamiento sobre la quebrada

Una vez realizado el análisis se observa que tanto los caudales del vertimiento como los de la quebrada son muy bajos y la carga contaminante también. Al modelar la inyección de los contaminantes al cauce natural no se encuentra mayor afectación y se concluye que el agua de la quebrada no causara daños significativos en los cultivos o abducciones aguas abajo.

Palabras clave: Modelación, Qual2k, calibración, simulación, vertimiento

ABSTRACT

The current work corresponds to the modeling of the discharge of non-domestic wastewater from the Sylvania fuel service station on the Chaguani stream located in Sylvania, Cundinamarca.

This project was developed in order to know the incidence of the discharge on the Chaguani stream and expand the knowledge on the water sources of the department of Cundinamarca. The Qual2kw model was used as a modeling program for water quality, since it was adapted to the conditions of the discharge and the stream due to its size and flow. During the calibration, the water quality results were taken into account, both the source and the channel, the flow rates, meteorological parameters and the reaction rates. In the same way, some simulated scenarios that represent various sanitation alternatives on the stream were compared.

Once the analysis was carried out, it was observed that both, the discharges flow and those of the stream, are very low and the pollutant load also. When modeling the injection of pollutants into the natural channel there is no greater affectation and it is concluded that the water in the stream will not cause significant damage to crops or abductions downstream.

Keywords: Modeling, Qual2kw, calibration, simulation, wastewater discharge.

INTRODUCCIÓN

La gestión del recurso hídrico en el departamento de Cundinamarca ha tomado un papel fundamental en el planeamiento y desarrollo de comunidades. Los vertimientos generados por actividades antrópicas de gran impacto logran declinar el estado ideal de los ecosistemas haciéndose evidente una necesidad de fundamento legal y técnico para la toma de decisiones.

Este estudio analiza la capacidad de asimilación del vertimiento de aguas residuales no domesticas provenientes de una estación de servicio a la quebrada Chaguani. Esta quebrada nace a 2183 msnm y luego de recorrer cerca de 4 km desemboca en el río Subía que a su vez se une con el río Blanco para finalmente abastecer el rio Chocho definido como patrimonio ecológico.

En un reconocimiento inicial de la quebrada Chaguani, no se evidencia afectación por actividades económicas aguas arriba de la zona de estudio, aunque se destacan actividades domésticas cercanas. El mayor impacto proviene de la estación de servicio ubicada al margen de la carretera que comunica la ciudad de Bogotá con Fusagasuga

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La quebrada Chaguani siendo una de las fuentes hídricas más importantes del municipio de Silvania recibe descargas orgánicas e inorgánicas. Es responsabilidad de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, controlar los vertimientos bajo los estándares establecidos en el Decreto 3910 de 2010 y la Resolución 631 de 2015.

Actualmente, sobre la fuente hídrica, aunque se evidencian vertimientos con aportes orgánicos de los asentamientos ubicados aguas abajo de la zona de estudio, el único vertimiento no doméstico evidenciado corresponde a la estación de servicio ubicada en el km 48 sobre la vía que conduce de Bogotá hacia Fusagasugá.

A pesar de la intención de las autoridades, solamente las fuentes hídricas principales son objeto de seguimiento y monitoreo constante. Las fuentes hídricas secundarias no cuentan con monitoreos o seguimiento por parte de ninguna entidad

El alcance de este estudio hace un acercamiento inicial al cálculo de la capacidad de asimilación de contaminantes biodegradables en la quebrada Chaguani, mediante modelos matemáticos hidrológicos y de calidad del agua, que demuestran en forma sintetizada los procesos físicos, químicos y biológicos del cuerpo receptor considerando un vertimiento de aguas residuales no domésticas.

1.1.1 Antecedentes del problema

Con el fin de establecer la calidad del agua de los cuerpos de agua que reciben aportes de agua residuales domésticas y no domésticas, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible obtuvo un gran avance al legislar bajo el Decreto 3930 de 2010 y requerir que todo aquel que realice este tipo de vertimientos, tramite ante la autoridad ambiental competente el permiso de vertimientos incluyendo dentro de sus requisitos la modelación de los contaminantes al cuerpo de agua receptor. Bajo este escenario, la quebrada Chaguani se ve afectada por el vertimiento de agua residual no domestica proveniente de una estación de servicio desde hace aproximadamente 4 años.

Las aguas de la quebrada Chaguani en predios aguas abajo del vertimiento son utilizadas en procesos de riego de cultivos y ganadería.

1.1.2 Pregunta de investigación

¿Los vertimientos de aguas residuales no domesticas afectan la calidad hídrica de la quebrada Chaguani y las actividades antrópicas desarrolladas aguas abajo?

1.2 JUSTIFICACIÓN

El municipio de Sylvania tiene una cobertura del 54,71% de acueducto en la zona urbana y en el centro poblado de Subia. En el sector rural existen acueductos veredales que suministran agua sin ser tratada, los cuales son abastecidos por ríos, quebradas, manantiales y nacimientos. En cuanto a la cobertura de alcantarillado solo el 28% de la población urbana tiene conexión; el 61% de la población urbana y rural utiliza pozos sépticos

La quebrada Chaguani recibe en su trayecto, de no más de 5 km, vertimientos domésticos en su mayoría y un vertimiento no domestico proveniente de la estación de servicio Terpel Sylvania La función principal de la quebrada es proveer servicios ambientales a los pobladores a lo largo de su trayecto y es posible que debido a los vertimientos la calidad del agua desmejore.

En el reconocimiento de la zona de estudio se observa que aguas arriba del punto de vertimiento el flujo de la quebrada Chaguani transita por un canal natural con bajo caudal y pocas afectaciones antrópicas. En la zona cercana, y aguas abajo de esta, se destaca la presencia de residuos sólidos debido su cercanía con zonas de transito continua y actividades agrícolas marcadas en pasos veredales, donde se observan actividades de engorde y cultivo de diferentes especies. Se destaca como las crecientes de caudal permite el arrastre de vegetación, sedimentos y rocas de gran tamaño.

Debido a la actividad económica de la vereda y a la diversidad de fuentes hídricas se presentan captaciones directas por medio de mangueras en zonas de corriente continua. El almacenamiento de agua se realiza por medio de tanques elevados y la eventual descarga de residuos líquidos se realiza por medio de pozos sépticos o directamente sobre las fuentes de agua superficiales.

El análisis del comportamiento de contaminantes en movimiento a través de un cuerpo de aguas aporta al país nuevas herramientas científicas que guíen las políticas sobre el manejo de nuestros recursos hídricos. El desarrollo de este tipo de modelos genera oportunidades para mejorar la calidad de vida de los habitantes y escala el interés partículas a una comunidad productiva.

1.3 HIPÓTESIS

La concentración de contaminantes por el vertimiento de aguas residuales no domésticas de una estación de servicio y su dilución a través del cuerpo de agua pueden generar afectaciones a la comunidad asentada aguas abajo alterando el ciclo y calidad de sus cultivos, lo cual afecta la calidad de vida de los habitantes.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Determinar el impacto del vertimiento del agua residual doméstica y no doméstica de la estación de servicio Terpel Sylvania sobre la calidad del agua de la quebrada Chaguani, a partir de simulaciones realizadas en el modelo Qual2kw.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el estado actual de la calidad del agua del tramo de estudio de la quebrada Chaguani con base en análisis de laboratorio de las muestras de agua.
- Estimar las tasas de reacción de los determinantes típicos de calidad de agua de forma teórica y compararlas con los resultados del proceso de calibración del modelo Qual2kw.
- Determinar la magnitud de la alteración de las condiciones de calidad del agua de la quebrada Chaguani debido al efecto de la descarga de las aguas residuales, bajo distintas condiciones de caudal de la fuente receptora.

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO

El comportamiento de los contaminantes en el agua es esencialmente dinámico, pues los contaminantes están en permanente movimiento, ya sea por efecto del propio movimiento del agua, o por la movilidad natural de las moléculas y partículas coloidales. Los fenómenos de transporte de contaminantes en cuerpos de agua han sido ampliamente estudiados y han dado origen a numerosas formulaciones matemáticas que describen su comportamiento (Castillo G., 2008). En la actualidad existe un sin número de modelos matemáticos, desarrollados con la finalidad de estudiar el comportamiento de un determinado contaminante o un grupo de estos a lo largo de una corriente natural (García Q., 2008). Por este motivo, ha sido necesario clasificar los diferentes modelos de calidad del agua existentes de acuerdo a sus características para una mejor comprensión y selección de los mismos como puede verse a continuación (Lozano G. et al., 2003):

- Tipos de procesos: Físicos, químicos, biológicos
- Tipo de método de solución: Métodos empíricos, soluciones aproximadas, análisis simplificado, modelos matemáticos con diferencias finitas.

- Tipo de cuerpo de agua: Río, lago, reservorio.
- Dimensión: 1, 2 o 3 dimensiones.
- Estado: Estacionario, dinámico, cuasi-dinámico.
- Tipo de transporte: Advección, dispersión, intercambio béntico.
- Tipo de cuenca: Urbanas, no urbanas.

Comúnmente, la selección del modelo a implementar depende de la disponibilidad de información con que se cuenta, el propósito de la modelación y los procesos a modelar. Esta condición implica que no siempre un modelo puede aplicarse en el estudio de la calidad del agua en una corriente en particular. Sin embargo, se espera que un modelo de calidad del agua cuente con las siguientes características generales (Lozano G. et al., 2003):

- Simulación de los parámetros básicos de calidad de agua como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno y fósforo, principalmente. Además, el modelo debe considerar la reducción de la concentración de contaminantes por el efecto de entradas de flujo adicionales.

- Flexibilidad. Es decir, que pueda adaptarse a las condiciones de diferentes corrientes, puesto que sería algo inviable económica y técnicamente utilizar un modelo de simulación diferente para cada corriente.

- Aplicabilidad. Se prefieren los programas que hayan sido empleados en otras regiones similares a la de aplicación del modelo.

- Simplicidad en su ejecución y precisión en sus resultados. Un modelo con entradas de datos o procesos más complejos necesariamente no es más exacto ni más preciso.

- Articulación de información existente de calidad del agua, hidrométrica e información meteorológica. El proceso general de simulación de una corriente hídrica superficial inicia con la identificación de las necesidades de la corriente a modelar y sigue con la etapa de selección del modelo. En esta etapa se puede elegir uno de los modelos existentes o se puede desarrollar uno nuevo. Posteriormente se inician las etapas de implementación, calibración y validación del

modelo, las cuales permitirán finalmente predecir la calidad del agua de la corriente y tomar las medidas pertinentes, contando con una herramienta de planificación futura. (Mayra C, 2015).

Entidades como la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés: Environmental Protection Agency), perteneciente al Gobierno de los Estados Unidos, han desarrollado una serie de modelos matemáticos mediante los cuales se puede estudiar el comportamiento de la calidad del agua en una fuente natural. Entre los modelos desarrollados por esta entidad se pueden mencionar: WASP (Water Quality Analysis Simulation Program), QUAL2K y QUAL2Kw (Water Quality Model), entre otros. Otras instituciones de reconocimiento internacional también se han preocupado por el estudio y desarrollo de este tipo de herramientas, tal es el caso del Instituto de Hidráulica Danés, (DHI por sus siglas en inglés: Danish Hydraulic Institute), quien en 1999 desarrolló el modelo MIKE11; el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), a través de su División de Salud y Ambiente (HEP), desarrolló el modelo de calidad del agua RIOS en 1995 (García Q., 2008). Finalmente, otro software muy utilizado para modelar la calidad del agua en corrientes superficiales es el modelo Quality Simulation Along River Systems (QUASAR) (Whitehead et al., 1997).

2.1.1 Generalidades del modelo

El modelo de calidad del agua QUAL2K fue desarrollado para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos por Steven Chapra y Greg Pelletier en el año 2003, posteriormente fue mejorado en el año 2008 y recibió por nombre QUAL2Kw. La nueva versión del modelo tiene

la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias, las cuales pueden ser manejadas de manera independiente o integrarse a la corriente principal dependiendo de las necesidades del usuario. Algunas de las características más representativas del modelo se describen a continuación (Chapra et.al., 2008):

- Tipo de software e interface gráfica: El modelo se ejecuta en ambiente Windows mediante el lenguaje Visual Basic. La interfaz gráfica funciona bajo el software Excel, lo que hace el modelo muy amigable y de fácil uso.
- Segmentación del Modelo: El modelo no presenta limitaciones en la especificación del número y longitud de tramos que se pueden modelar, por lo cual se pueden incluir múltiples fuentes puntuales o dispersas en cualquier tramo.
- Dimensionalidad: El QUAL2Kw es un modelo unidimensional en la dirección del flujo, esto es debido a que en la mayoría de los ríos las dimensiones de la longitud son mucho mayores a las profundidades y anchos. Adicionalmente se asume que el río o canal se encuentra bien mezclado tanto vertical como horizontalmente.
- Hidrodinámica: El flujo de agua se simula en condiciones hidráulicas estables, esto quiere decir en condiciones de flujo permanente, simulando periodos de caudal y cargas constantes en el tiempo. Para el desarrollo de este proyecto se tomaran caudales en campo empleando metodologías avaladas por el IDEAM y las simulaciones hidráulicas se realizaran con el modelo HEC-RAS.
- Modelación de sistemas hídricos de tipo dendrítico: El modelo permite realizar simulaciones en casos donde la modelación se extiende no solo a la corriente principal, sino también a tributarios. El modelo tiene capacidad de simular en total cuatro (4) corrientes superficiales de manera independiente o integrada al ramal principal dependiendo de las necesidades del usuario.

Para el caso de estudio se utilizará cartografía a la escala más aproximada tomada de las planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

- Variación diurna del calor: El calor del volumen de agua y la temperatura son simulados como función de aspectos meteorológicos en una escala de variación diurna. La información meteorológica se tomará de la siguiente estación:

Tabla 2-1. Estación Meteorológica del Proyecto.

Código de la Estación	Nombre de la Estación	Tipo	Coordenadas		Departamento	Municipio	Elevación (m.s.n.m)	Periodo de Análisis	
			Latitud	Longitud					
21195120	ITA VALSALICE	CP	04,23 N	74,23 W	Cundinamarca	Fusagasugá	1460	1990	2013

Cp: Climatológica Principal

- Cinética diurna de la calidad del agua: Todas las variables de la calidad del agua son simuladas en escala de tiempo diurna, aunque el modelo funciona en flujo permanente, tiene la opción de trabajo en la modalidad de un modelo cuasi-dinámico.

- Entradas de masa y calor al sistema: Se simulan vertimientos y extracciones tanto puntuales como dispersas.

- Parámetros modelados: Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritos, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.

- Especies de DBO carbonácea: El modelo QUAL2Kw usa dos formas de DBO carbonácea para representar el carbono orgánico. Estas formas son: la DBO de rápida oxidación (DBO fast) y la DBO de lenta oxidación (DBO slow). Adicionalmente, se simula la materia orgánica particulada

(Detritus), este material está compuesto por partículas de carbón, nitrógeno y fósforo en una estequiometría fija.

- Patógenos: Se modela un patógeno genérico (coliformes fecales o coliformes totales). La remoción de patógenos está determinada como función de la temperatura, la luz y la sedimentación.

- Algas en el fondo (periphyton o plantas radiculadas fijas): El QUAL2Kw tiene un módulo completo de modelación de crecimiento de phytoplankton (plantas flotantes) y de periphyton y macrófitas (plantas radiculadas fijas) y simula explícitamente las formaciones de algas en el fondo. Los modelos de crecimiento son función de la disponibilidad de nutrientes (fósforo y nitrógeno), de la temperatura, y de la intensidad de luz que penetra en el cuerpo de agua. Esta última a su vez es función de la radiación solar incidente y de la turbidez del agua.

- Interacciones agua-sedimento: Los flujos en la interface agua-sedimento de oxígeno disuelto y nutrientes se simulan internamente en el modelo. De esta forma el flujo de demanda béntica (SOD) y de nutrientes son simulados como función de la sedimentación de materia orgánica particulada, reacciones dentro de los sedimentos, y de concentraciones de las formas solubles en la columna de agua.

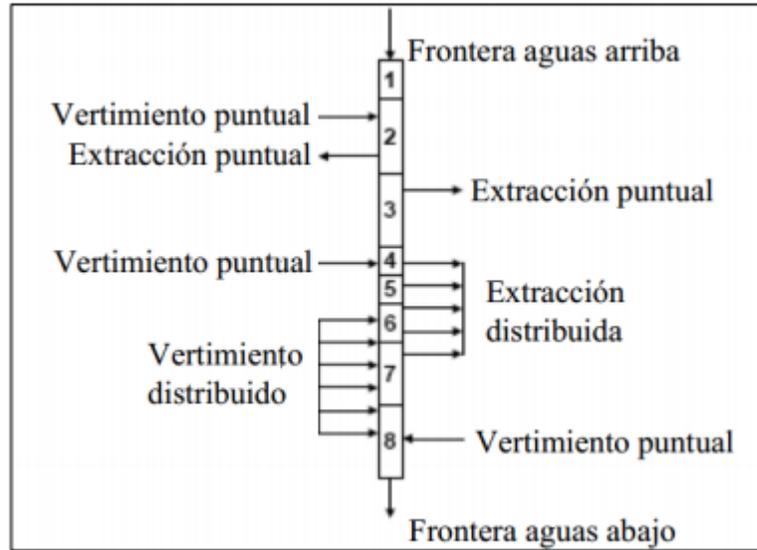
Como se describió anteriormente, el modelo tiene unas características que le conceden muchas ventajas frente a otros modelos, sin embargo, el QUAL2Kw también presenta algunas limitaciones que se mencionan a continuación (Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, 2011):

- El modelo es unidimensional y por tanto asume que el río tiene una mezcla perfecta lateral y vertical. Esta es una suposición razonable para la mayoría de los ríos, excepto cuando estos son

particularmente anchos, profundos o tienen un movimiento lento. En estos casos debería considerarse un modelo bidimensional.

La esquematización del modelo matemático de simulación QUAL2Kw corresponde a la representación de las características del sistema que se requiere modelar. En el caso de la modelación en corrientes superficiales dicha representación se refiere a las características geométricas y la definición de las fronteras del modelo (fronteras internas y externas). Las fronteras externas corresponden a las estaciones de monitoreo ubicadas aguas arriba y aguas abajo del tramo en estudio, mientras que las fronteras internas corresponden a los ríos tributarios, las extracciones y los vertimientos para los cuales se dispone de información de caudales y calidad del agua. En el momento de seleccionar los tramos entre las estaciones se debe tener en cuenta que las propiedades físicas e hidráulicas (sección transversal, pendiente de la corriente, rugosidad, etc), químicas y biológicas permanecen constantes a lo largo de cada tramo (Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC, 2012). En la Figura 2.1 se puede observar el esquema general del modelo QUAL2Kw con sus fronteras externas e internas.

Figura 2-1 Esquema General de Qual2Kw



Fuente (Chapra et.al., 2008)

En el modelo QUAL2Kw el tramo de la corriente estudiada se divide en una sucesión de pequeños subtramos o elementos computacionales que operan como reactores completamente mezclados. Para cada elemento computacional se realiza un balance hidrológico en términos del caudal, un balance térmico de la temperatura y un balance de masa en términos de la concentración de cada compuesto. Se tienen en cuenta procesos de transporte (advección y dispersión), fuentes externas (descarga de agua residual o extracciones de agua) y fuentes internas (demanda béntica o transformaciones bioquímicas). Las ecuaciones de balance resultante se resuelven para el caso de flujo permanente con un método clásico de diferencias finitas implícito. Los resultados finales se traducen en curvas que muestran la variación de los parámetros modelados a lo largo de la corriente (Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC, 2012).

2.1.2 Información de entrada al modelo

El Modelo QUAL2K emplea Microsoft Excel como interface gráfica y de acceso a datos; el libro de Excel contiene varias hojas electrónicas desde donde se suministran los diferentes datos de entrada del modelo y desde donde este es ejecutado. Cada una de las hojas electrónicas tiene un nombre que identifica el tipo de información que contiene: información general, información de la frontera aguas arriba (cabecera), descripción de los tramos del río, condiciones climatológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), los valores de las tasas de reacción o constantes cinéticas de calibración del modelo, la información correspondiente a los tributarios, captaciones puntuales y distribuidas y la información de las estaciones aguas abajo.

En el modelo QUAL2K se consideran las siguientes formas de carbono: Materia orgánica particulada (sujeta a sedimentación), Carbono de composición rápida (por ejemplo, excretas) y carbono de descomposición lenta (por ejemplo, grasas y aceites). Se asume que los valores de DBO corresponden a la forma de carbono de descomposición rápida. (Área Metropolitana del Valle de Aburra 2011).

Durante la implementación de un modelo de simulación en una corriente superficial es necesario recolectar información sobre 2 aspectos básicos: información sobre calidad, cantidad y ubicación de los tributarios o vertimientos y de las captaciones de agua sobre la corriente que se está modelando.

2.2 MARCO JURÍDICO

Decreto 1076 de 2015

Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible.

Decreto 3930 de 2010

Por el cual se reglamente parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título IV – Parte III- libro II del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

Resolución 631 de 2015

Por el cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Resolución CAR 2833 de 2008

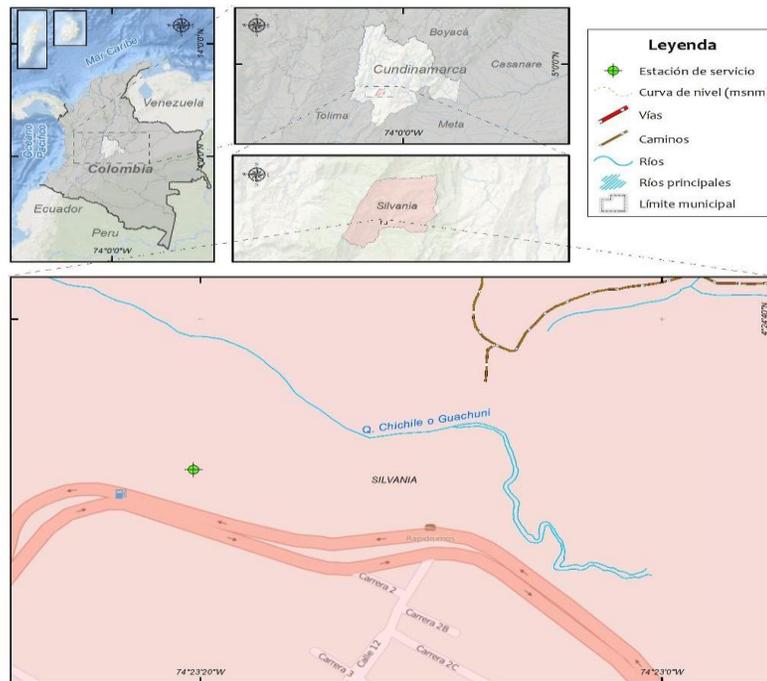
Por la cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Sumapaz a lograr en el año 2020.

2.3 MARCO GEOGRÁFICO

La zona de estudio se encuentra en cercanías al casco urbano del municipio de Silvania, sobre la vía número 40 que comunica a la ciudad de Bogotá con el municipio de Girardot en el departamento de Cundinamarca. El municipio se encuentra ubicado geográficamente en la provincia de Sabana del Sumapaz, a 65 km de Bogotá en dirección a la parte sur del departamento. Los límites del municipio de Silvania son: al norte con el municipio de Granada en la cordillera del Soche o Tequendama; por el sur, con los municipios de Tibacuy y Fusagasugá; por el oriente con los municipios de Fusagasugá y Sibaté; por el occidente, con los municipios de Tibacuy y Fusagasugá. La extensión total del municipio es de 163 km², la extensión del área urbana es de 7,5 km², la extensión del área rural es de 155 km². La altitud de la cabecera municipal es de 1470 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la temperatura media se mantiene cercana a los 20° C.

La ubicación geográfica del municipio de Silvania permite que en este mantenga una riqueza natural reconocida por los paisajes que puede ofrecer, su riqueza hídrica, una variedad de especies en flora y fauna. Figura 2.3; entre otras actividades culturales y artísticas reconocidas. Ambientalmente el municipio se encuentra ubicado en la subcuenca alta del río Chocho que está definido como patrimonio ecológico y económico del municipio y la región. En Silvania se alberga dentro de la jurisdicción gran parte de la cuenca del río Subía, el cual se une con el río Blanco para generar el río Chocho o Panches que desemboca al río Sumapaz. Tanto el río Subía como las quebradas y ríos que lo surten, son parte importante del sistema de abastecimiento veredal del municipio. La quebrada Guachuni nace a los 2183 msnm y luego de recorrer un poco más de 4 km desemboca en el río Subía. (Plan Básico de Ordenamiento Territorial, Silvania Cundinamarca, 2000).

Figura 2-2 Ubicación Geográfica de la zona de estudio



Fuente: Información: Cartografía Base IGAC (2010), Imagen BASEMAP (2015)

2.4 MARCO DEMOGRÁFICO

El municipio de Silvania, cuenta con una población total de veintiún mil setecientos doce (21.712) habitantes según fuente de SISBEN 2011 que se encuentran distribuidos de la siguiente manera: Sisbenizados con la metodología III dieciocho mil ochenta y seis (18.086) habitantes, mil seiscientos veintiséis (1.626) personas en condición de desplazamiento y dos mil (2.000) personas que se encuentran pendientes por aplicar la metodología del SISBEN III, (Tablas 2-4, 2-5, 2-6 Y 2-7) que de acuerdo con la proyección del DANE para el municipio de Silvania Cundinamarca para el año dos mil once (2011) es de veintiún mil ochocientos cuarenta personas. (DANE, 2011)

Tabla 2-2. Población Sisben 2011

Sisbenizados metodología III	18.086
Personas en Condición de desplazamiento	1.626
Personas Pendientes metodología III	2.000
TOTAL	21.712

Fuente: Sisben 2011

Tabla 2-3. Zona

Urbano	Rural
4.812	13.274

Fuente: Sisben III.

Tabla 2-4. Distribución por Ciclo Vital

ETAPAS	CICLO VITAL	TOTAL	%
Primera Infancia	0-5 Años	1739	8
Infancia	6- 11 Años	2192	10.3
Adolescencia	12- 17 Años	2670	12.29
Juventud	18-28 Años	6930	31.91
Adulthood	29-59 Años	6330	29.15
Adulto Mayor	60 y +	1851	8.52
	TOTAL	21712	100

Fuente: Secretaria de Salud del departamento 2009.

Tabla 2-5. Población Ciclo vital según genero

EDAD	HOMBRES	MUJERES	TOTAL	%
0-5 Años	852	887	1.739	8
6- 11 Años	1.074	1.118	2.192	10
12- 17 Años	1.308	1.361	2.669	12
18-28 Años	3.395	3.533	6.928	32
29-59 Años	3.101	3.228	6.329	29
60 y +	907	944	1.851	9
TOTAL	10.637	11.071	21.708	100%

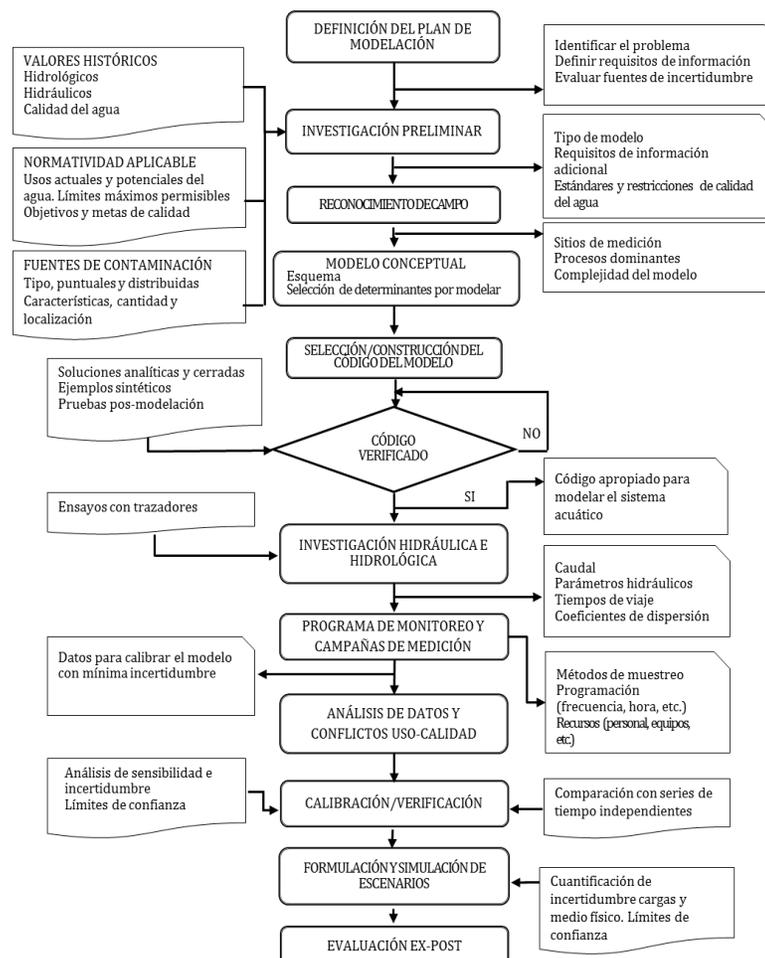
Fuente: Secretaria de Salud departamento 2009

3 METODOLOGÍA

3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

El proceso de modelación se llevará a cabo siguiendo el protocolo presentado como diagrama de flujo en la Figura 3.1, el cual fue adaptado de Camacho y Díaz-Granados (2003), incorporando algunos elementos de Refsgaard et al. (2007).

Figura 3.1 Protocolo de Modelación.



Fuente: (Camacho y Díaz-Granados 2003), (Refsgaard et al. 2007).

La metodología empleada, y que será cubierta en el desarrollo del documento, consistirá en los siguientes pasos, según lo propuesto por Camacho y Diaz-Granados (2003).

Plan de Modelación. En esta etapa se identificará el problema y los objetivos de la modelación. En este caso consistirá en definir un modelo predictivo que permite estimar los impactos sobre la calidad del agua de la quebrada Chaguani debido a la descarga de agua residual de la estación de servicio. Se realizará el levantamiento de calidad y cantidad de agua de la quebrada Chaguani y del vertimiento.

Investigación preliminar. Consistirá en la búsqueda de datos históricos disponibles de la climatología de la zona, análisis hidrológico de las cuencas, características hidráulicas y estado de la calidad del agua; la revisión de la normatividad ambiental aplicable al caso de estudio (Decretos y Resoluciones promulgados por entidades de nivel nacional y regional) en relación a los usos actuales y potenciales en la zona y las restricciones sobre la calidad del vertimiento (Límites Máximos Permisibles); descripción de las fuentes de contaminación, identificando el tipo (doméstico, no domestico), naturaleza (puntual, distribuida o difusa), origen y principales características (cantidad, calidad y localización). Como resultado de esta etapa, se establece el tipo de modelo a utilizar, los requisitos adicionales de información y los estándares y restricciones sobre la calidad del agua.

Reconocimiento en campo. Incluye el reconocimiento visual de las condiciones de la zona de modelación, con el fin de confirmar la información preliminar obtenida e identificar nuevas fuentes de contaminación o características particulares del sistema receptor que puedan incluirse en la modelación y al análisis de resultados. También, a partir del recorrido a lo largo del tramo de

estudio, se definirán los sitios de medición, la logística en el desarrollo de la toma de muestras, los procesos dominantes y la complejidad requerida para representar de forma apropiada la zona.

Modelo conceptual. Para ello se hizo un esquema detallado del sistema a modelar, indicando claramente las entradas, salidas, fuentes y procesos considerados. Igualmente, en esta etapa se definirán los determinantes de la calidad del agua que serán simulados.

Selección del modelo. Se eligió un software existente que permitiera implementar el cuerpo de agua natural. Se optó por utilizar el software Qual2kw v.5.1, desarrollado por el Departamento de Ecología del Estado de Washington. Debido a que este software ha sido extensamente probado y utilizado en diversos casos de estudio y en otros cuerpos de agua (Chapra, Pelletier y Tao, 2008),

Caracterización hidráulica e hidrológica. En esta etapa se contará con los levantamientos de caudales realizados en la campaña de campo. Como resultado de esta revisión, se obtendrán los parámetros hidráulicos, los tiempos de viaje o retención hidráulica y las consideraciones de mezcla (dispersión/difusión).

Programa de monitoreo y campaña de medición. Para esta actividad se incluirá la toma de muestras, distancia entre puntos de muestreo, tiempos de viaje, entre otros. En esta etapa también se definirán los métodos de muestreo. Como resultado, se obtendrán los datos para el desarrollo del modelo.

Análisis de datos de muestreo y relación de conflicto. Los análisis de los datos de calidad de agua permitirán establecer el estado actual del cuerpo de agua receptor y los conflictos existentes con los usos actuales y potenciales del recurso hídrico.

Implementación del modelo. Para la implementación del modelo se realiza el pre-procesamiento de datos y se realiza la introducción de datos en el software.

Calibración. Se definirá la función objetivo (medida de la correspondencia entre los datos medidos y los valores simulados), los parámetros y rangos de calibración. Una vez ejecutada la calibración del modelo, se obtendrá la combinación de parámetros que mejor representan las condiciones existentes.

Formulación y evaluación de escenarios. Se hará la formulación de los escenarios de simulación de acuerdo con la información disponible.

3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Como herramienta principal se utilizarán los siguientes softwares: QUAL2Kw v.5.1, HEC-RAS 4.1.0 y ArcGIS 10.5.

4 MODELACIÓN HIDRÁULICA

4.1 DEFINICIÓN DEL MODELO HIDRAULICO CON HECRAS

La modelación hidráulica de la corriente se realizó con ayuda del software de modelación HEC-RAS v.4.1, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América. La información de entrada utilizada correspondió a dos secciones de aforo obtenidas durante la jornada de toma de muestras de calidad del agua en la quebrada Chaguani el 02 de septiembre de 2017, las cuales se distribuyeron en el tramo de estudio. El ejercicio de modelación consistió en las siguientes etapas:

Calibración del modelo hidráulico: a partir de los resultados de aforo en secciones transversales antes del vertimiento, se obtuvieron los datos de profundidad de la lámina de agua. Se definió iterativamente el valor del coeficiente n de Manning de manera que el nivel del agua medida en ambas secciones de aforo fueran aproximadamente iguales a los resultados arrojados por el modelo implementado en HEC-RAS para el caudal aforado. En el modelo se consideró una pendiente longitudinal de aproximadamente 0,010 m/m de acuerdo con mediciones directas en campo. La condición de frontera establecida aguas abajo fue la de flujo uniforme o profundidad normal. El caudal usado para las dos secciones fue de 13.27 L/s, y 15.82 L/s.

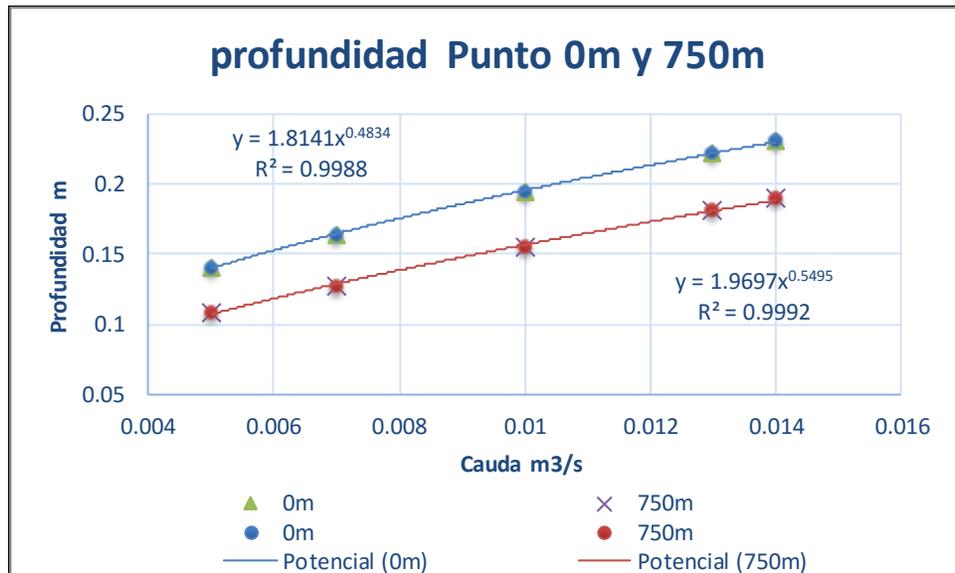
Simulación del modelo: en esta etapa se construyeron las curvas de calibración para un rango de caudales comprendidos entre 0,070 y 0.141 m³/s. Se obtuvieron los caudales característicos del canal a través de cálculos hidrológicos. Los caudales simulados para la obtención de curvas profundidad vs caudal y velocidad vs caudal, son caudales obtenidos mediante análisis hidrológico

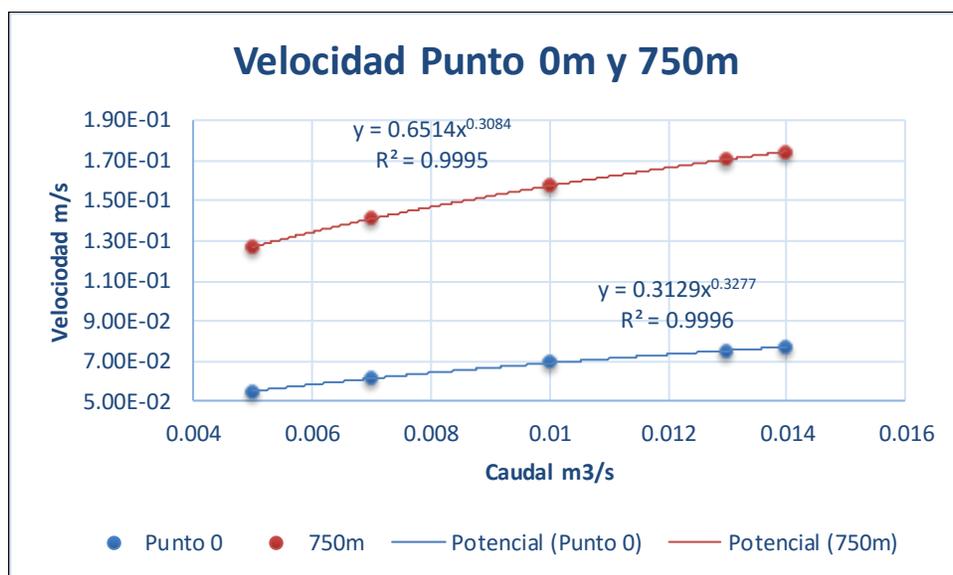
En la figura 4-1 se presentan los perfiles utilizados para la calibración hidráulica y en la figura 4-2 se muestran las curvas de calibración obtenidas para su ingreso en el modelo de calidad del agua,

Figura 4-1 Perfiles de aforo.



Figura 4-2 Curvas de calibración para el sector estudiado.





4.2 CALIDAD ACTUAL DEL AGUA

Las actividades de monitoreo fueron realizadas por personal de laboratorio ambiental acreditado por el IDEAM (R&R Ingeniería y SGI Ltda).

Tabla 4-1 Resultados de Monitoreos sobre la quebrada Chaguani.

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUAS ARRIBA DE DESCARGA	AGUAS ABAJO DE DESCARGA 350 m	AGUAS ABAJO DE DESCARGA 750 m
FECHA	-	02/09/2017	02/09/2017	02/09/2017
Hora	hh:mm	9:30 AM	11:15 PM	12:00 PM
Código		M17-1171	M17-1172	M17-1173
pH	unidad	7,5	7,5	7,42
Conductividad	U/cm	290	300	290
Temperatura	C	18,4	19,1	18,9
Oxígeno Disuelto	mg/l	7,26	6,65	6,3
Alcalinidad	mg/l	31,07	37,05	37,05
DBO 5 días	mg/l	3,92	3,26	3,51
DBO 5 días particulada	mg/l	3,92	3,26	3,51
DBO 10 días	mg/l	7,18	7,84	7,3
DBO 5 días soluble	mg/l	3,4	<3,0	<3
Solidos Suspendidos Totales	mg/l	<10	<10	<10
Solidos Volátiles totales	mg/l	<5	<5	<5
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	<4	<4	<4
DQO	mg/l	<10	<10	<10

Fosforo Total	mg/l	<0,2	<0,2	<0,2
Nitrógeno Total	mg/l	<4	<4	<4
Coliformes Totales	UFC	27	62	40
Coliformes fecales	UFC	27	17	17
Clorofila A	mg/m4	0.37	0.8	0.008
Ortofosfatos	mg/l	<0,2	<0,2	<0,2

4.3 CÁLCULO DE LOS CAUDALES MÍNIMOS, MEDIOS Y MÁXIMOS DE LA QUEBRADA.

Se realizó el cálculo del caudal por el método racional

$$\text{Ecuación 1: } Q = \frac{C * I * A}{360}$$

Utilizando la ecuación de Kirpich se calculó el tiempo de concentración de la cuenca establecido en 489 minutos

$$\text{Ecuación 2: } TC = 0.066 * \left(\frac{L}{\sqrt{5}}\right)^{0.77}$$

Y utilizando ecuación de la curva IDF para la región andina

$$\text{Ecuación 3: } \frac{a * T^b * M^d}{\frac{t^c}{60}}$$

Se definieron tres escenarios:

- El primero se modelo con el caudal racional calculado en un periodo de 2 años con un tiempo de concentración de 489 minutos dando como resultado 0.071m³/s
- El primero se modelo con el caudal racional calculado en un periodo de 100 años con un tiempo de concentración de 489 minutos dando como resultado 0.141m³/s
- El tercero hace referencia las condiciones encontradas en campo el día 02 de septiembre de 2017 con un caudal de 0.013 m³/s

5 PROCESAMIENTO DE DATOS

5.1 CAMPAÑA DE CAMPO

De acuerdo con la visita técnica de reconocimiento realizada el día 2 de septiembre de 2017, la corriente de la quebrada Chaguani es dinámica e incluye procesos de arrastre de sedimentos, gravas y diferentes materiales de forma natural. Muestra una calidad de agua con impactos poco significativos pese a encontrarse en cercanías a zonas de cultivo, tránsito vehicular y la ubicación de población veredal. El agua es incolora con bajos tintes marrón claro debido a la capacidad de transporte de sedimentos y en el lecho puede apreciarse la existencia de gravas y arenas.

En diferentes zonas de monitoreo se presentan características hidráulicas que cambian el perfil del canal, zonas de velocidad variable, vegetación abundante y orillas protegidas con rocas de gran tamaño, se observa abundante vegetación como se presenta en la tabla 5-1. Además, mediante una observación sobre la quebrada se apreció zonas de almacenamiento y materiales como ramas, troncos, llantas y tuberías de gran diámetro.

Teniendo en cuenta la metodología propuesta, se planteó tomar las muestras de calidad de agua en tiempos estratégicos entre los 3 puntos de medición que se fijaron sobre la quebrada Ghaguani teniendo en cuenta que la velocidad de la quebrada es muy baja entre el primer sitio de medición y el último (0,04m/s), los tiempos de viaje entre estaciones fueron muy altos, por ejemplo, entre la primera y última estación el tiempo de viaje estimado a partir de esta velocidad es de 2.63 horas. Por lo que las muestras se tomaron teniendo en cuenta los tiempos de viaje.

La toma de muestras de calidad de agua sobre la quebrada en los tres (3) puntos de medición se realizaron de manera integrada en 3 secciones del ancho, que incluyen cercanía a la orilla derecha, centro de la corriente y cercanía a la orilla izquierda de acuerdo con la dirección del flujo. En la tabla 4-1 se muestran las coordenadas de los puntos de monitoreo.

Tabla 5-1 Puntos de monitoreo sobre el cuerpo de agua.

Código	LUGARES OBSERVADOS	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTA		COORDENADAS GEOGRÁFICAS WGS84		Altura m.s.n.m.
		Este (m)	Norte (m)	Oeste	Norte	
E0	Estación De Servicio	965806,70	978978,91	74°23'20.3"	4°24' 32.0"	1519
E1	Punto ubicación de vertimiento – aguas arriba.	965939,11	979121,15	74°23'16.4"	4°24' 36.0"	1490
E2	Observación Puente 1 – aguas abajo.	966189,75	979054,76	74°23'06.0"	4°24' 34.4"	1490
E3	Punto de Medición de caudal Puente 2 – aguas abajo.	966342,58	978834,42	74°23'02.9"	4°24' 26.9"	1489

Para definir los tiempos de toma de muestras de calidad del agua, se establecieron, en primer lugar, los tiempos en el punto inicial y se estimaron los tiempos de recolección en los sitios aguas abajo, considerando la velocidad media y la distancia entre los puntos. De esta forma se garantiza que, para las muestras de calidad del agua, los valores que se midieron en laboratorio corresponden a la misma masa de agua. En la Tabla 5-2 se indican los tiempos mencionados de medición de muestras.

Tabla 5-2. Tiempos de toma de muestras

PUNTO	DISTANCIA (m)	HORA DE TOMA DE MUESTRAS (24 H)
E1	0	9:30
E2	350	11:15
E3	750	12:00

Figura 5-1. Reconocimiento de la zona de estudio.



a) Aguas arriba al punto de vertimiento. Vista desde aguas abajo hacia aguas arriba.



b) Punto de cierre de modelación. Vista de aguas abajo hacia aguas arriba

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el esquema del modelo conceptual. El sistema monitoreado consistió en un tramo de 750 m con 3 puntos de medición establecidos para el desarrollo adecuado de las actividades de modelación, que incluyen tres (3) mediciones sobre el cuerpo principal.

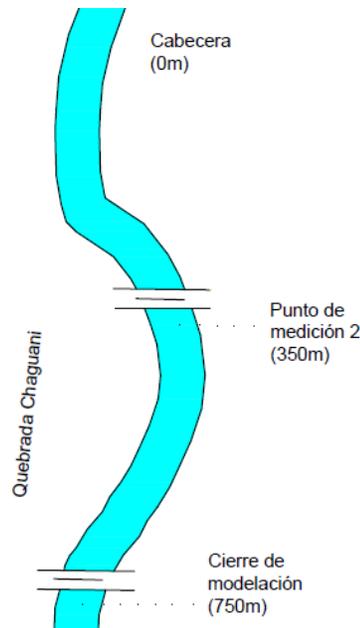
Inicialmente, se reconoció la zona aguas arriba de la ubicación del vertimiento de la estación de servicio, para establecer el punto de cabecera de modelación que se define como punto 0, ubicado 250 m aguas arriba de punto de vertimiento y 350 m aguas arriba del segundo punto de medición sobre la quebrada. Para el acceso al punto 0 se realiza un desplazamiento en sentido sur – occidente desde el lugar de tratamiento de agua residual de la estación de servicio Silvania, hasta la quebrada Chaguani A 250 m de distancia se encuentra el punto de descarga de la estación de servicio Terpel Silvania conduce el agua residual por medio de un canal escalonado que permite la oxigenación del agua tratada antes de su encuentro con la quebrada.

Posteriormente, a 350 m del punto de cabecera se encuentra el segundo punto de muestreo sobre la quebrada. Debido a las condiciones de pendiente y variaciones en la corriente, no se muestra evidencian entradas adicionales o aportantes de caudal significativos en la sección objeto de

modelación. En la toma de muestras para la evaluación de la calidad de agua se buscó realizar el muestro integrado en el ancho de la corriente para contener las características apropiadas del sistema. Este punto se ubica en cercanías a un puente transitable por la población de la vereda.

A 750 metros del punto de cabecera, luego de un segundo puente de la zona, sobre la quebrada Chaguani, se estableció un punto de medición que se encuentra previo a la incidencia de actividades económicas de mayor tamaño en la zona de estudio denominado Mr Criollo, este realiza la cría y distribución de pollos.

Figura 5-2 Esquema del modelo conceptual.



El esquema de modelación incluye 3 mediciones sobre la quebrada Ghaguani, lo cual se puede apreciar en la figura 5-2.

5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo QUAL2Kw fue usado para simular los siguientes determinantes: conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, DBO5, DQO, nitrógeno total, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, fósforo total, fósforo inorgánico, fósforo orgánico, pH y alcalinidad. Adicionalmente el modelo permite incluir sustancias genéricas, que corresponden a otros determinantes definidos por el usuario y en el cual se pueden incluir tasas de decaimiento y sedimentación, independientes de los demás procesos. No se incluyeron determinantes dentro de esta categoría. En los siguientes numerales se detalla la información usada por el modelo QUAL2Kw versión 5.1

5.2.1 Pre-procesamiento de las variables modeladas

Algunas de las variables del modelo no son obtenidas directamente a través de los reportes de laboratorio, sino que requieren transformaciones. Tal es el caso de los sólidos suspendidos inorgánicos, nitrógeno (orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos), fósforo (orgánico e inorgánico), DBO (lenta y rápida) y detritos. En general, las definiciones de las variables y las ecuaciones presentadas, fueron tomadas del documento denominado QUAL2K: Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality Version 2.11 (Pelletier y Chapra, 2008).

5.2.2 Sólidos Suspendidos Inorgánicos (ISS)

De acuerdo con las definiciones planteadas por los autores del modelo, los sólidos suspendidos totales son la suma de los sólidos suspendidos inorgánicos y los sólidos suspendidos volátiles. En el presente monitoreo los sólidos suspendidos totales estuvieron por debajo del límite de detección (10 mg/L), indicando una buena calidad de las aguas. Por lo tanto, se ingresó al modelo este valor de 10 mg/L en las tres estaciones de monitoreo, y los sólidos suspendidos fueron simulados como

el total de estos y no fueron separados en sus fracciones orgánicas e inorgánicas. De esta forma, el decaimiento de los sólidos suspendidos solo se interpreta a través de la tasa de sedimentación.

Ecuación 4:

$$TSS = ISS + VSS$$

$$SSV \rightarrow 0$$

$$ISS = TSS$$

5.2.3 Modelación de la materia orgánica carbonácea

QUAL2Kw separa la fracción soluble y particulada de la materia orgánica carbonácea (CDBO). La fracción soluble se puede modelar mediante dos especies: una de degradación rápida, especificada en el modelo como CBOD Fast (CDBOR) y otra de degradación lenta especificada en el modelo como CBOD Slow (CDBOL), ambas expresadas en equivalentes de oxígeno. La fracción particulada se encuentra separada en dos partes, la primera corresponde a la materia orgánica particulada o detritos (MOP) ingresada al modelo en equivalentes de peso seco (mg/L D) y en fitoplancton, ingresado al modelo en ug/L de clorofila *a*. De acuerdo con Pelletier y Chapra (2008b), la CDBO última (CDBOu) se expresa como:

$$\text{Ecuación 5: } CDBO_U = CDBO_L + CDBO_R + r_{oc}r_{cd}MOP + r_{oc}r_{ca}a_p$$

En la Ecuación 5, r_{oc} es la relación oxígeno-carbono de la descomposición de la materia orgánica (2,69gO/1gC), r_{cd} la constante estequiométrica de conversión de peso seco a peso de carbono (40gC/100 gD), y r_{ca} es la constante estequiométrica para la relación carbono-Clorofila (40gC/1000 mgA). En el presente estudio, el último término de la ecuación, correspondiente a la

clorofila; no es relevante en términos de aporte a la DBO última, teniendo en cuenta que al convertir la clorofila a mg/L O₂ (Ver Tabla 5-3), los valores son inferiores a 0,1 mg/L, mientras que la DBO última alcanza valores entre 8 y 10 mg/L O₂ en el cuerpo receptor.

Tabla 5-3 Conversión de los reportes de clorofila A.

Variable	Unidades	Aguas Arriba	Abajo 350 m	Abajo 600 m
Clorofila - A	mg/m ³	0,37	0,8	0,08
Clorofila	mg/L O ₂	0,04	0,09	0,009

Pelletier y Charpa (2008b), mencionan que para diferenciar entre la DBO rápida y lenta no hay disponible una forma sencilla, simple y económica de hacerlo. En dicho documento el autor presenta algunas opciones para obtener una estimación, basadas en sus fracciones particulada y disuelta. En el presente estudio, se usó la opción en la cual toda la DBO soluble se agrupa en un solo término, que en este caso corresponde a la DBO rápida. A continuación, se presentan los pasos de cálculo:

- Se estimó la DBO última a usando los datos de DBO₅, DBO₁₀ y DQO, como se explica a continuación.
- Primero se supuso un valor de la constante de decaimiento (k) con lo que se estimó la DBO última usando la Ecuación y el valor de la DBO₅ reportada por el laboratorio.

$$\text{Ecuación 6: } DBO_u = \frac{DBO_5}{(1 - e^{-k*5})}$$

- A partir del valor DBO última y la Ecuación 4, se buscó obtener una buena representación de los datos medidos en laboratorio para la DBO₀, DBO₅, y DBO₁₀, modificando el valor de k . Se sabe que el valor de la DBO₀ es cero, ya que cuando no ha transcurrido el tiempo, tampoco se ha consumido la materia orgánica biodegradable. En la ecuación, t hace referencia al tiempo transcurrido en días y k , corresponde a la constante de decaimiento de primer orden.

Ecuación 7: $DBO_t = DBO_u (1 - e^{-k*t})$

- Mediante la representación gráfica, se escogió el mejor valor de k para cada sitio de monitoreo, teniendo en cuenta los valores predichos por la ecuación y los valores medidos en laboratorio para la DBO_5 y DBO_{10} . Inicialmente se encontró que los valores que satisfacen estas condiciones son valores de la constante entre 0,001 y 0,05/día. Sin embargo, usando estas constantes, los valores obtenidos para la DBO última fueron superiores a la DQO , por lo que se optó por usar un valor de la constante de decaimiento de modo que la DBO última fuese igual o inferior al valor de la DQO . En los reportes de laboratorio, la DQO en el vertimiento y en el cuerpo receptor fue menor al límite de detección (10 mg/L). El valor de la constante usado para el cuerpo receptor fue de 0,1/día.

- En la tabla 5-4 se presenta un resumen de los datos medidos por el laboratorio, relacionados con la DBO y la DQO , Los valores de k obtenidos mediante el ajuste y los valores de la DBO última

- Se encontró que la DBO_5 , representa el 39% de la DBO última. Así mismo la fracción disuelta o soluble registrada aguas arriba, representa cerca del 80% de la DBO_5 . Para las demás estaciones debido a que la DBO disuelta fue menor al límite de detección (3 mg/L), se usó este valor para las simulaciones.

- Como se mencionó previamente, el modelo sugiere la separación entre la DBO disuelta (rápida y lenta) y DBO particulada (Materia orgánica particulada y fitoplancton). Para obtener la DBO última disuelta, se multiplicó la DBO última por la relación DBO_5 disuelta/ DBO_5 total, en cada estación de monitoreo. Este valor de la DBO_u disuelta corresponde al valor ingresado al modelo como $CBOD_{fast}$ o DBO rápida. La DBO lenta fue fijada en 0 ya que toda la fracción soluble se agrupó en un solo término.

- Al restar a la DBO_u , la DBO_u disuelta, se obtiene la DBO_u particulada. Esta última corresponde a la suma de los términos definidos en el modelo como materia orgánica particulada (POM en inglés) y el fitoplancton.

- Para conocer la materia orgánica particulada, primero se convierte el fitoplancton a equivalentes de oxígeno y este valor se le resta a la DBOu particulada. Posteriormente la materia orgánica particulada expresada en mg/L O₂, debe convertirse a equivalentes de peso seco (mg/L D), para ingresarse al modelo.

Tabla 5-4 Cálculos realizados a partir de la DBO y la DQO

Variable	Unidades	Aguas Arriba	Abajo 350 m	Abajo 750 m
DBOu total	mg/L O ₂	10,0	8,3	8,9
k total	día ⁻¹	0,1	0,1	0,1
DBO ₅ /DBOu	-	39%	39%	39%
DBO ₅ disuelta/ DBO ₅ total	-	0,87	0,92	0,85
DQO/DBO ₅	-	2,6	3,1	2,8
DBOu disuelta	mg/L O ₂	8,6	7,6	7,6
Detritos	mg/L D	1,2	0,5	1,2

5.2.4 Modelación del ciclo de nitrógeno

El procesamiento preliminar relacionado con las variables de nitrógeno consistió en la preparación de los valores que se deben ingresar al modelo QUAL2Kw de nitrógeno orgánico (NO), nitrógeno amoniacal (NH₄) y nitratos (NO₃). En la Tabla 5-55 se presenta el resumen de los valores usados para los cálculos.

En el laboratorio se midió el NTK (suma de nitrógeno orgánico y amoniacal), nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. La resta de NTK y nitrógeno amoniacal corresponde al nitrógeno orgánico. Se aclara que para los monitoreos realizados no se detectó el nitrógeno amoniacal ni el NTK, ambos con un límite de detección de 4 mg/L. Por lo tanto, en el modelo se ingresó el nitrógeno amoniacal como 4 mg/L y el nitrógeno orgánico como 0 mg/L.

No fue necesario realizar una transformación estequiométrica ya que el laboratorio reportó los valores como concentración de nitrógeno, la cual es la forma requerida por el modelo. Solo fue necesario multiplicar por 1000 para convertir los mg/L a µg/L.

Teniendo en cuenta que los nitritos, son una especie intermedia entre el amonio y los nitratos, que tiende a presentar valores muy bajos de concentración en cuerpos de agua. El modelo incluye un solo grupo denominado nitratos, el cual incluye representa la suma de nitritos y nitratos. No se obtuvo un reporte de estos parámetros, por lo tanto, no fueron incluidos en el modelo.

Qual2kw incluye las siguientes relaciones:

$$\text{Ecuación 8: } NTK = NH_4 + NO$$

$$\text{Ecuación 9: } NO_3 = NO_{3m} + NO_2$$

$$\text{Ecuación 10: } NT = NTK + NO_3 = NH_4 + NO + NO_{3m} + NO_2$$

El subíndice m hace referencia al valor medido en laboratorio. NT es el nitrógeno total.

Tabla 5-5 Valores relacionados con compuestos nitrogenados.

Variable	Unidades	Aguas Arriba	Abajo 350 m	Abajo 750 m
Nitrógeno Total Kjeldhal	mg N/L	4	4	4
Nitrógeno Amoniacal (A)	mg N-NH ₃ /L	4	4	4
Nitrógeno Orgánico	mg N/L	0	0	0

5.2.5 Modelación del ciclo de fósforo

El modelo presenta la separación entre fósforo orgánico e inorgánico. El autor del modelo comenta que el fósforo total puede dividirse de diferentes formas dependiendo del criterio de modelación. Una aproximación es separar la fracción que está fácilmente disponible como

nutriente del resto de compuestos de fósforo. Esta fracción es denominada ortofosfatos o fósforo soluble inorgánico (Chapra, 1997). La metodología empleada es la siguiente:

- Se midieron los ortofosfatos los cuales se tomaron como la fracción inorgánica (INP) del fósforo total (PT).
- Los niveles de fósforo total y ortofosfatos estuvieron por debajo del límite de detección en todas las estaciones (0,2 mg/L), por lo tanto, se usó este valor para el ingreso de los ortofosfatos al modelo.
- No fue necesario convertir los ortofosfatos a equivalentes de fósforo a través de la relación de los pesos de los compuestos (95 g PO₄/31 g P), ya que los reportes de laboratorio presentan los ortofosfatos como mg/L P.
- Teniendo en cuenta la expresión para PT, el fósforo orgánico (PO) se obtuvo restando el fósforo inorgánico expresado en mg/L P, del fósforo total. Teniendo en cuenta que se usó el límite de detección para fósforo total y ortofosfatos como fósforo inorgánico, la concentración asumida de fósforo orgánica sería de 0 mg/L.
- Para el escenario 1, correspondiente a aguas residuales sin tratamiento, se usaron los valores propuestos por Metcalf And Eddy (2003) para aguas residuales domésticas sin tratamiento, siendo el fósforo total de 12 mg/L y los ortofosfatos de 10 mg/L.
- Posteriormente las concentraciones de fósforo inorgánico y orgánico expresadas en mg/L, fueron convertidos a µg/L, multiplicando por 1000.

Ecuación 11: $PT = NP + PO$

Tabla 5-6. Cálculos relacionados con el fósforo

Variable	Unidades	Aguas Arriba	Abajo 350 m	Abajo 750 m
Fósforo Total (A)	mg P/L	0,2	0,2	0,2
Ortofosfatos (fósforo inorgánico)	mg P-PO ₄ /L	0,2	0,2	0,2
Fósforo Orgánico	mg P/L	0	0	0

5.2.6 Modelación del oxígeno disuelto, la alcalinidad, el pH, conductividad y la temperatura del agua

Se ingresaron directamente los valores para oxígeno disuelto, alcalinidad, pH, conductividad y temperatura del agua.

5.3 DATOS REQUERIDOS POR EL MODELO

A continuación, se describe el ingreso de la información al modelo QUAL2Kw. Cada numeral hace referencia a una hoja de Excel.

5.3.1 QUAL2K

En esta pestaña se ingresaron datos básicos como:

- La fecha del monitoreo y el huso horario (UTC-5 para Colombia).
- El delta o paso de tiempo depende del tamaño de cada segmento ingresado en la hoja Reach explicado más adelante. El paso de tiempo usado fue de 5.625 minutos, el cual es apropiado para usar en el modelo para el tamaño definido para los segmentos. Cuando el modelo considera que el delta de tiempo es alto y puede presentar inestabilidad, envía un mensaje de alerta y no permite realizar la simulación. El número de días recomendado por Chapra y Pelletier (2008b) es de al menos el doble del tiempo de viaje en el tramo de estudio y debe ser un número entero mayor o igual que 2. En este caso se escogió 5 días para la calibración, teniendo en cuenta que el tiempo de viaje para el tramo es de 2.63 horas
- El modelo tiene en cuenta las transformaciones relacionadas con la interacción de la columna de agua y el sedimento o el lecho del río. Esta información se ingresa en celdas como

Simulate hyporheic exchange and pore water quality y *Simulate sediment diagenesis*. En el modelo no se tuvo en cuenta el intercambio con la zona hiporreica, lo cual comprende un área de estudio bastante compleja, y que para obtener información representativa y confiable se requieren esfuerzos técnicos y económicos que desbordan los objetivos del presente estudio. Además, teniendo en cuenta que la incertidumbre en estos parámetros puede ser muy amplia, se decidió no incluirlos.

- Los métodos para la solución general del modelo y para la solución de pH fueron dejados los que traen por defecto el software (Euler y Brent).

5.3.2 Headwater

En la hoja Headwater o Cabecera, se incluyó la información de calidad y caudal del agua al inicio del tramo de estudio, que corresponde a la muestra tomada aguas arriba del sitio propuesto para el vertimiento.

- Los datos ingresados de calidad de la quebrada fueron los mismos para los tres escenarios y corresponden a los datos registrados en la campaña de campo en la estación aguas arriba, aguas medias y cierre del modelo. Se ingresó directamente los datos reportados para temperatura, conductividad, alcalinidad y pH.

- Las demás variables que se incluyeron en la Hoja *Headwater*, normalmente no son reportadas directamente por el laboratorio y requieren algún tipo de transformación mediante conversión de unidades, supuestos (como en la definición de la DBO lenta y DBO rápida) y/o uso de relaciones estequiométricas. Estas transformaciones fueron descritas previamente.

- Se incluyó información para una sola hora, teniendo en cuenta que el modelo tiene la opción de ingresar series horarias. Se ingresa una hora debido a que el modelo ha sido concebido en estado

estacionario, con lo cual se puede obtener una estimación del efecto del vertimiento. Para la implementación del modelo en estado dinámico, se requiere incrementar el número de monitoreo por estación ya que se deben tener información para varias horas de la calidad del agua, tanto en el vertimiento como en la fuente receptora.

- En el modelo pueden ingresarse variables adicionales a las definidas en el software, en las casillas denominadas constituyentes genéricos. En este caso no se incluyeron.

5.3.3 Reach

En esta hoja se ingresa la segmentación del tramo, la hidráulica (secciones transversales, pendientes, coordenadas, entre otros).

- Se usaron tramos de 50 m de longitud. Se ingresaron las coordenadas tomadas en campo para los diferentes puntos de monitoreo.
- Para efectos de calibración, se usó un tramo de 750 m, correspondiente a la distancia entre el primer y el último punto de medición.
- Para realizar simulaciones se asume que no existen otros vertimientos al cuerpo de agua en el tramo objeto de estudio.

Tabla 5-7 Ubicación de los puntos de monitoreo

PUNTO DE MEDICIÓN	NOMBRE	COORDENADAS		ALTITUD (m.s.n.m)	Abscisa en Qual2k [m]
		Latitud (N)	Longitud (O)		
1	Aguas Arriba	4° 24'37,0"	74°23'16,3"	1490	0
2	Aguas medias	4°24'31,4"	74°23'06,1"	1490	350
3	Aguas Abajo	4°24'20,8"	74°23'02,1"	1489	750

- A través de la simulación hidráulica en HEC-RAS, se determinaron los parámetros para las curvas velocidad vs caudal y profundidad vs caudal. Esto se realizó para las tres secciones correspondientes al sitio ubicado aguas arriba (ubicación en 0 m), a la sección de las estaciones ubicadas 350 m y 750 m aguas abajo. En el modelo estas secciones fueron replicadas para los demás segmentos.

5.3.4 Variables climáticas

El modelo requiere la inclusión de temperatura del aire, cobertura de nubes, porcentaje de sombras sobre el espejo de agua, temperatura del punto de rocío y velocidad del viento. A través de la estación climatológica del IDEAM, se usó el valor medio de temperatura y humedad relativa. A partir de estos dos valores se estimó la temperatura de punto de rocío. El porcentaje de cobertura de nubes y el porcentaje de sombras sobre el espejo de agua, fueron registrados a partir de observaciones directas en campo.

Tabla 5-8 Variables climáticas usadas en el modelo

Variable	Unidad	Valor
Temperatura del aire	°C	20,4
Punto de rocío	°C	16,74
Humedad relativa	%	81

5.3.5 Luz y calor

En este módulo se ingresan valores requeridos para el cálculo de la temperatura del agua, extinción de la luz al entrar al agua, evaporación, etc., entre otros. Se toman los valores por defecto del modelo.

5.3.6 Point sources

En esta pestaña se ingresa la información de vertimientos puntuales o tributarios del cuerpo receptor

- Para el presente estudio se definió una fuente puntual correspondientes al vertimiento real de la estación de servicio

Tabla 5-9 Ingreso de fuentes puntuales.

Escenarios	Unidades	Vert. medido
Flow	m ³ /s	0,0001
Distancia	km	0.25
Temperature	C	23,4
Conductivity	umhos	2910,0
Inorganic Solids	mgD/L	10,0
Dissolved Oxygen	mg/L	0,0
BODs	mgO ₂ /L	0,0
BODf	mgO ₂ /L	7,8
Organic Nitrogen	ugN/L	0,0
NH ₄ -Nitrogen	ugN/L	4000,0
NO ₃ -Nitrogen	ugN/L	0,0
Organic Phosphorus	ugP/L	0,0
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	200,0
Phytoplankton	ugA/L	0,0
Detritus (POM)	mgD/L	1,1
Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	20,3
pH	s.u.	7,3

- La totalidad de la información ingresada puede verificarse en los archivos digitales del modelo Qual2k que se presentan como anexo. Ya que el modelo implementado se basó en un solo registro de la calidad durante el día, la información se ingresó únicamente en las celdas correspondientes al valor medio.

5.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para realizar la calibración se buscó obtener un grupo de parámetros representativos de las condiciones del cuerpo receptor (tasas de reacción, sedimentación, hidrólisis, etc.), es decir, una

buena correspondencia entre los valores de calidad simulados con respecto a los medidos en campo. Para lo cual se realizaron 100 simulaciones mediante el algoritmo genético del modelo. Posterior a dichas simulaciones, se realizaron ajustes manuales, combinados con más simulaciones automáticas de 100 simulaciones, hasta obtener los resultados satisfactorios.

Figura 5-3. Resultados de calibración para temperatura y conductividad eléctrica.

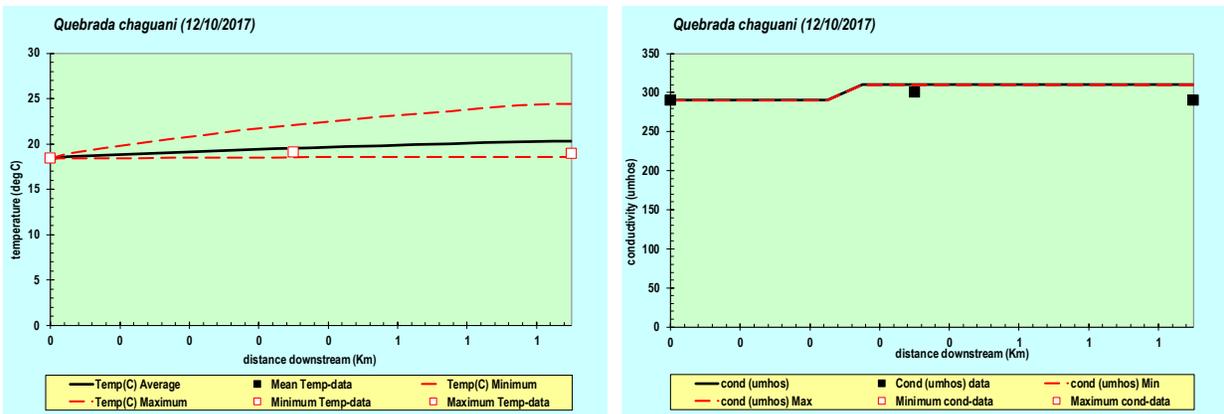


Figura 5-4 Resultados de calibración para tiempo de viaje y solidos suspendidos.

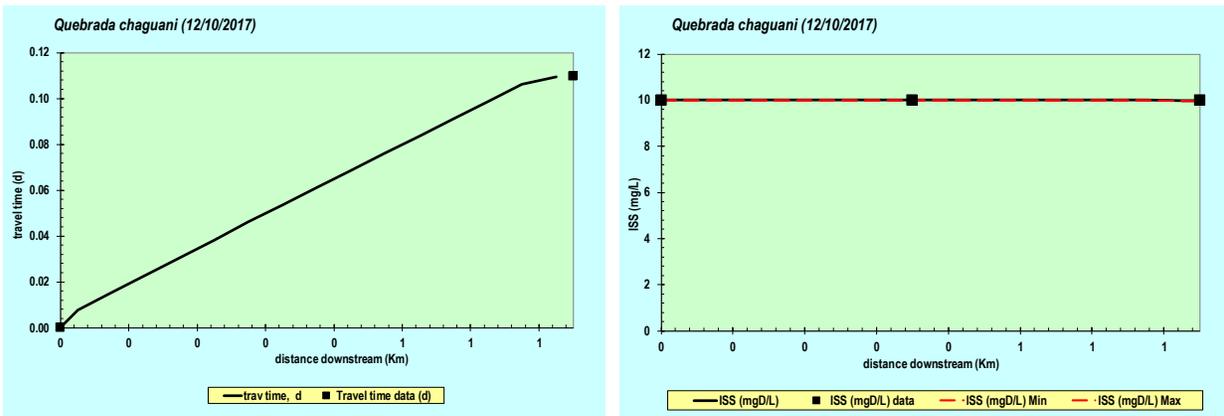


Figura 5-5 Resultados de calibración para Oxígeno disuelto y detritos.

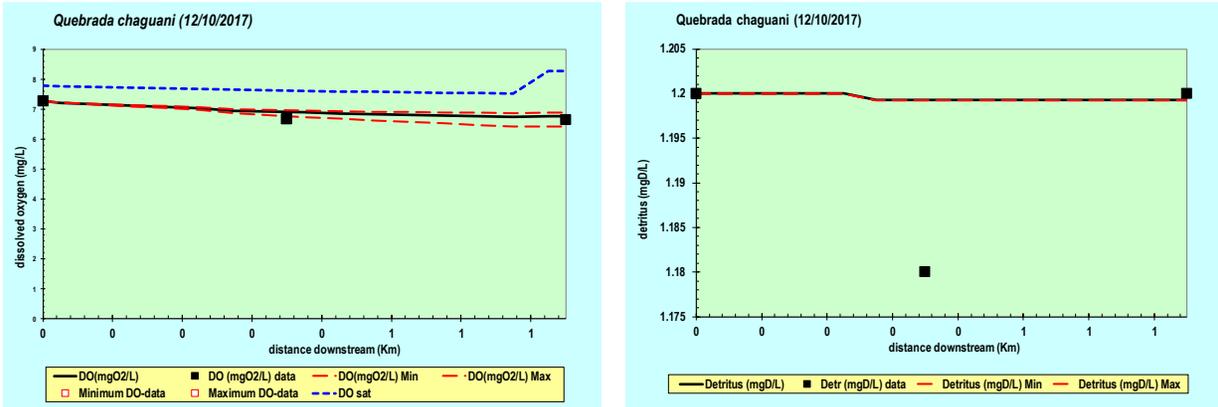
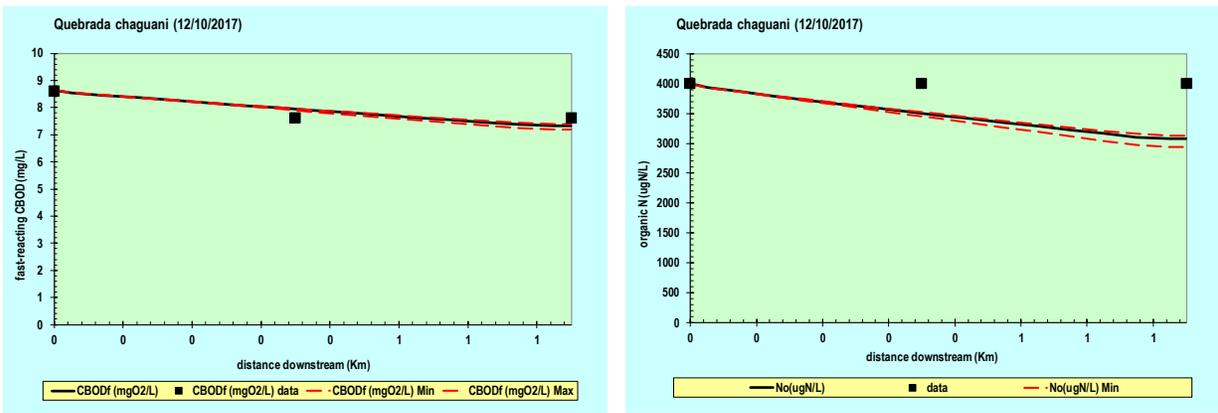


Figura 5-6 Resultados de calibración para DBO rápida y Nitrógeno Orgánico.



5.4.1 Parámetros ajustados

De acuerdo con las variables de salida utilizadas para la calibración, se definieron los siguientes parámetros y rangos de calibración. Los parámetros del modelo (tasas de reacción, sedimentación, etc.) se presentan organizadas según los determinantes de calidad del agua que representan de manera directa (SST, DBO, Nitrógeno, etc).

- Los rangos se establecieron a partir de valores por defecto que trae el modelo, así como recomendaciones de la literatura especializada (e.g. Bowie et al., 1987) y Chapra (1997). En

algunos casos el rango se fue haciendo más pequeño a medida que las calibraciones manuales o automáticas, iban mostrando que era conveniente reducirlo.

- Para algunos parámetros no se realizó calculo, sino que se dejó un valor fijo de acuerdo a diferentes condiciones las cuales son explicadas a continuación:

- Los sólidos suspendidos, nitrógeno amoniacal, fósforo: los niveles registrados en el cuerpo receptor fueron inferiores a sus límites de detección. Bajo esta condición no se puede realizar la calibración ya que se desconoce el valor verdadero en la corriente. En estas situaciones, se tomó el valor medio del rango presentado originalmente en el modelo. Se aclara que el cuerpo de agua puede presentar tasas de reacción diferentes a las aquí consideradas, pero los bajos niveles de contaminantes no permiten determinarlas.

- No se incluyen las tasas relacionadas con oxidación e hidrólisis de la DBO lenta ya que esta fue definida como 0 mg/L. Así mismo la tasa de disolución de los detritos, para convertirse en DBO lenta, fue fijada en 0.

- La tasa de reaireación se dejó en la opción Tsivoglou-Neal, adecuado para este tipo de fuentes superficiales

Figura 5-7 Tasas de reacción del modelo calibrado

Parameter	Value	Units	Symbol	Auto-cal	Min value	Max value
Inorganic suspended solids:						
Settling velocity	2	m/d	v_i	Yes	0	2
Oxygen:						
Reaeration model	Tsivoglou-Neal			f(u h)		
Temp correction	1.024		θ_a			
Reaeration wind effect	None					
O2 for carbon oxidation	2.69	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	1.555	/d	k_{dc}	Yes	0	5
Temp correction	1.047		θ_{dc}	No	1	1.07
Organic N:						
Hydrolysis	2.5	/d	k_{hn}	Yes	0	5
Temp correction	1.07		θ_{hn}	No	1	1.07
Settling velocity	1	m/d	v_{on}	Yes	0	2
Inorganic P:						
Settling velocity	0.01384	m/d	v_{ip}	Yes	0	2
Sed P oxygen attenuation half sat constant	1.69154	mgO ₂ /L	k_{spi}	Yes	0	2
Detritus (POM):						
Dissolution rate	0	/d	k_{dt}	Yes	0	5
Temp correction	1.07		θ_{dt}	No	1.07	1.07
Settling velocity	2	m/d	v_{dt}	Yes	0	5

Tabla 5-10 Tasas de reacción calculadas con ecuaciones empíricas.

Tasa	Ecuación Utilizada	Resultado	Unidades
Reaireación	$K_a = C \frac{\Delta H}{t}$	1	
Desoxigenación o Descomposición de la DBO	Siguiendo a Thomann y Mueller (1987), para cuerpos de agua someras con profundidades menores a 1.5 m	0.6	d ⁻¹

Otras tasas no se calcularon debido a que el valor reportado por el laboratorio es menor al límite de cuantificación.

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELO

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos con el modelo QUAL2Kw, para 3 escenarios de simulación. Para efectos de la interpretación, se aclara que el vertimiento ingresa en el kilómetro 0.25. El tramo de monitoreo fue de 750 m, Los impactos analizados, solo corresponderán a los relacionados con la estación de servicio y no con otras actividades ubicadas aguas abajo del tramo de monitoreo.

Figura 6-1. Simulación de Temperatura.

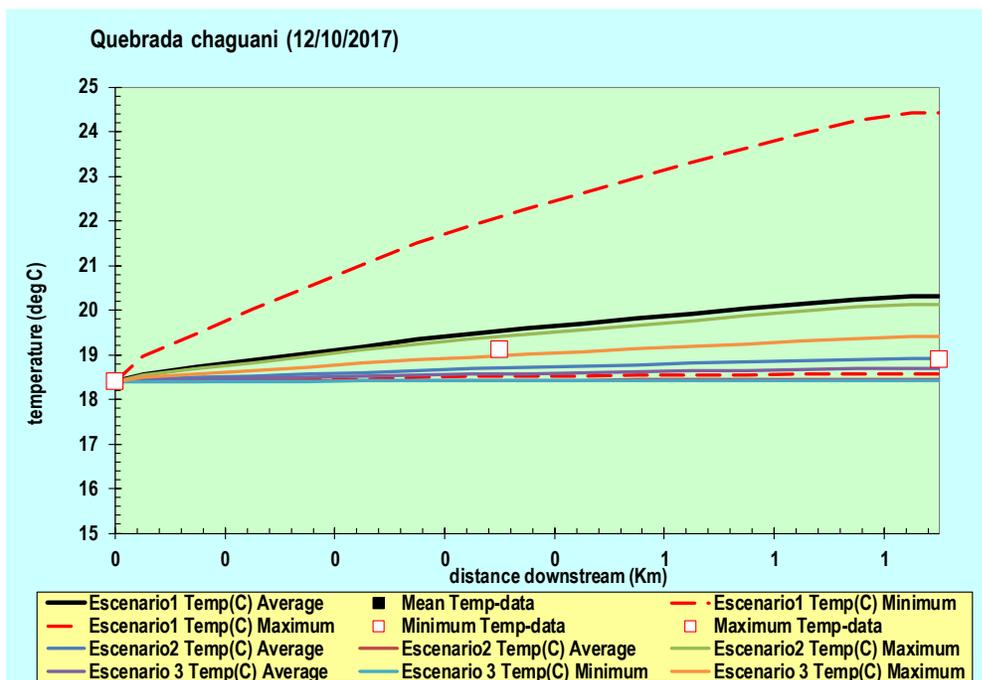


Figura 6-2. Simulación Tiempo de Viaje.

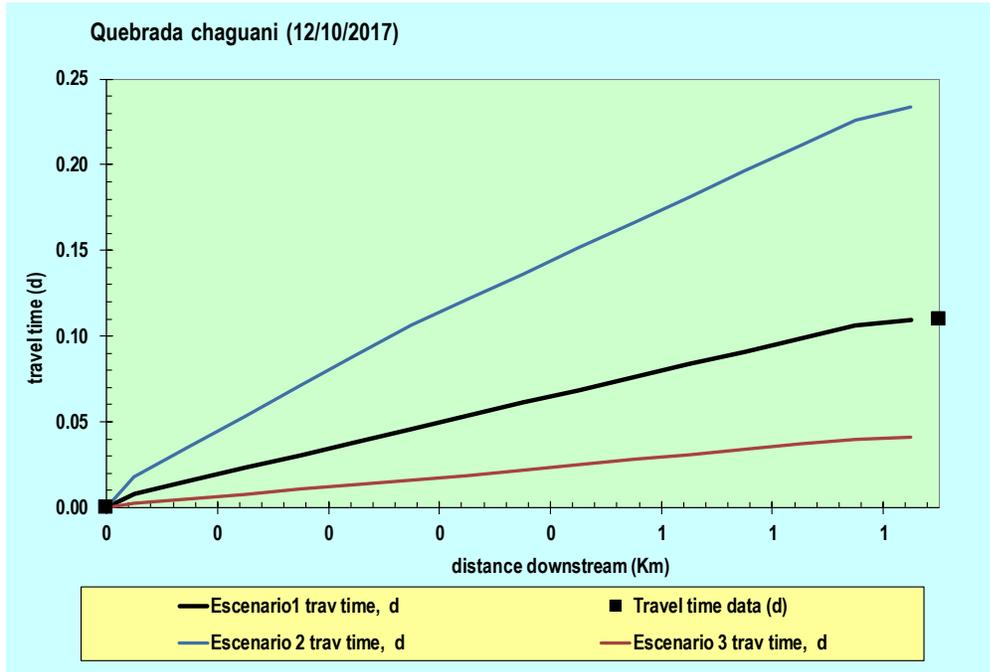


Figura 6-3. Simulación Conductividad hidráulica.

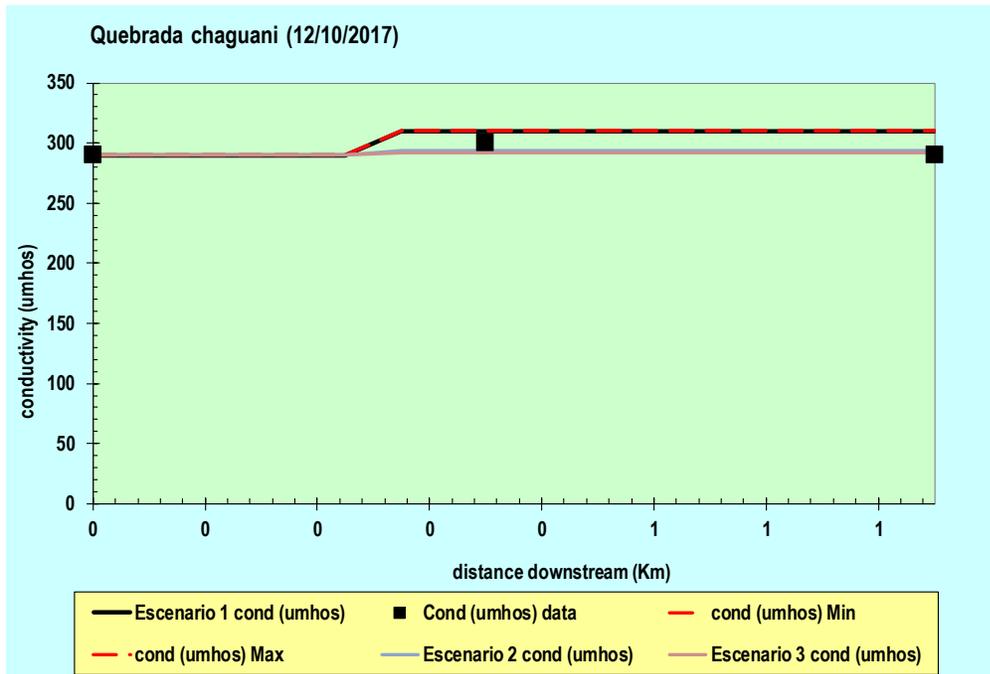
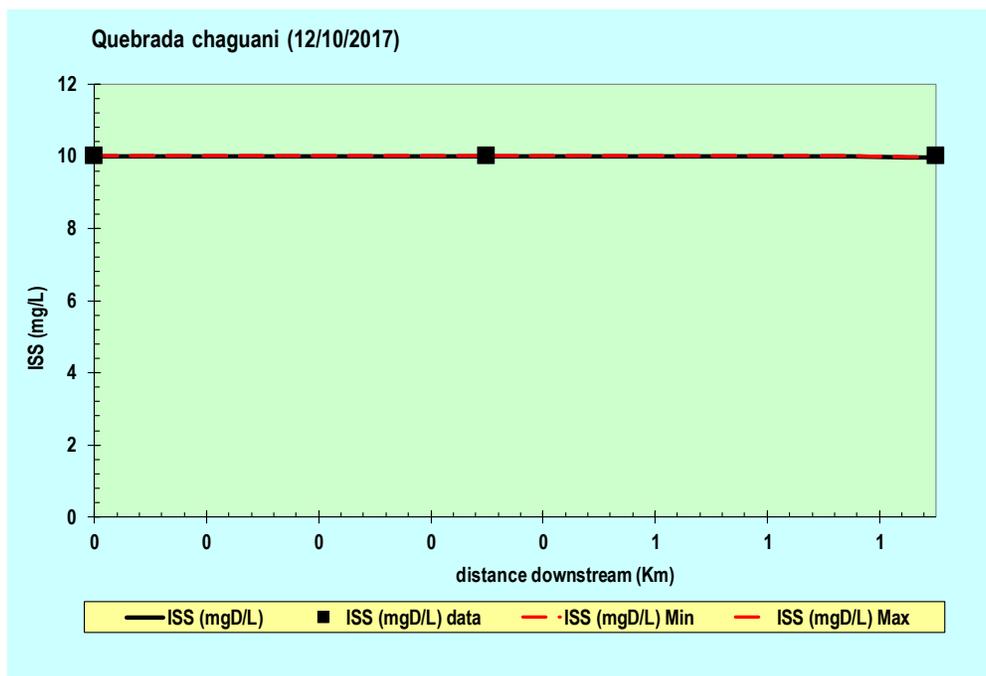


Figura 6-4. Simulación Solidos suspendidos totales.



Con base en las figuras anteriores, se puede hacer mención de lo siguiente:

1. La simulación del tiempo de viaje correspondió con la información levantada en campo y la modelación realizada en HEC-RAS, por lo cual se puede afirmar que el modelo se encuentra perfectamente calibrado, en términos hidráulicos.
2. La temperatura se mantiene estable a lo largo del tramo estudiado, a medida que disminuye el caudal el rango de calibración es más amplio.
3. Debido a que la diferencia de caudales en los escenarios planteados no es muy grande la conductividad es muy similar en cada uno de ellos
4. Los niveles de sólidos registrados en campo para la quebrada Chaguani estuvieron por debajo del límite de detección (10 mg/L), por lo cual se estableció un valor de velocidad de sedimentación de 2 días⁻¹. Un vertimiento en las condiciones simuladas en caudal mínimo no

tendría un impacto significativo por sedimentación de sólidos sobre el cuerpo receptor, debido a que es menor la profundidad de la columna de agua.

Figura 6-5. Simulación Oxígeno Disuelto.

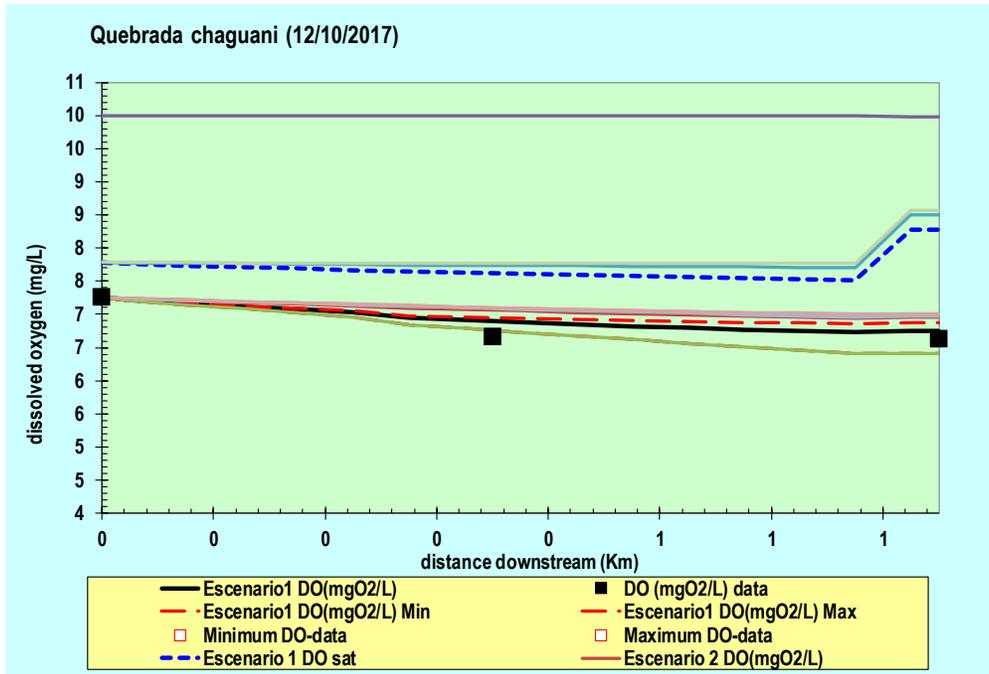


Figura 6-6. Simulación de Detritos.

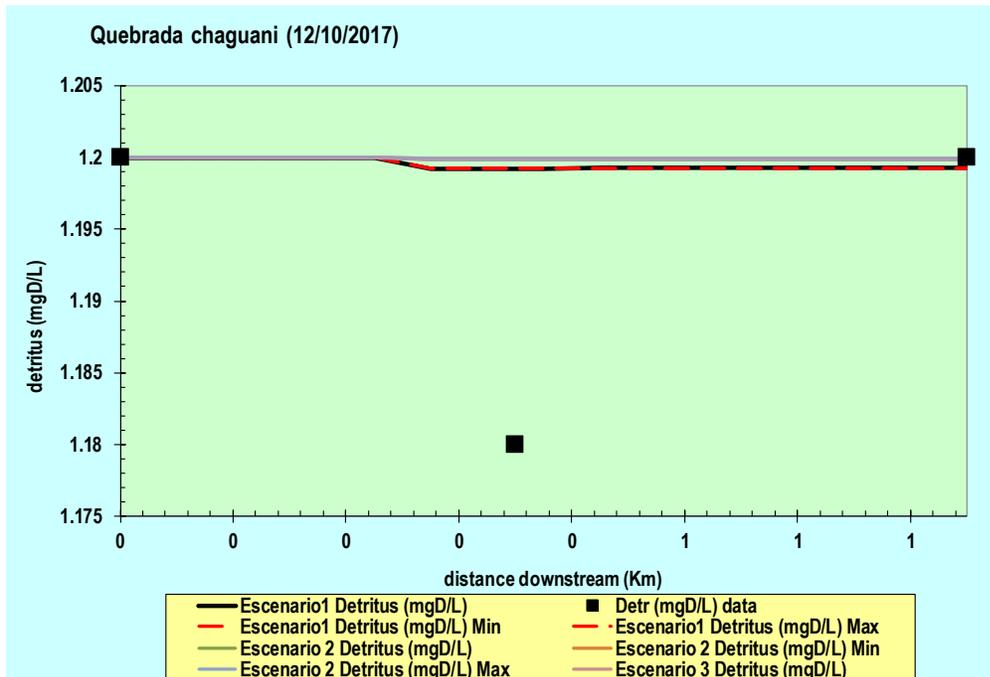


Figura 6-7. Simulación DBO rápida.

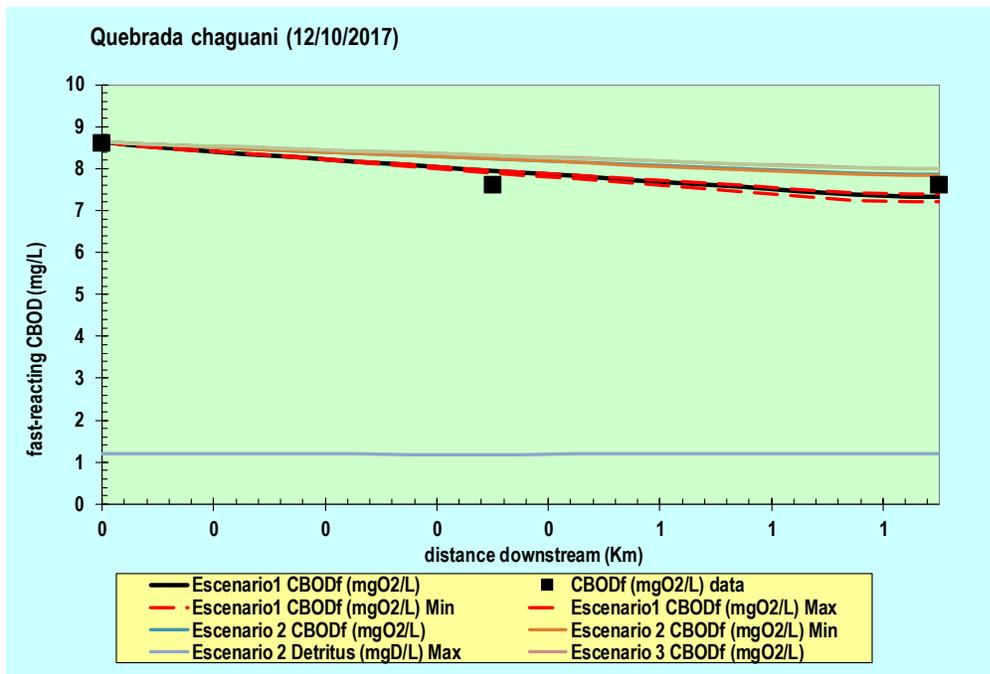
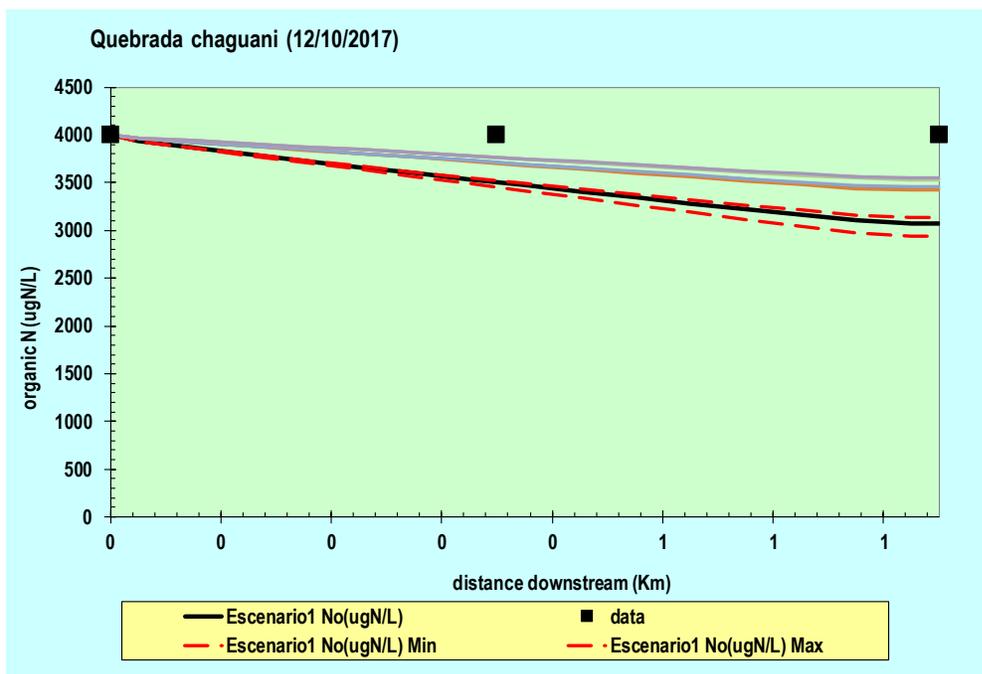


Figura 6-8. Simulación Nitrógeno Orgánico



5. El nivel de saturación de oxígeno para las condiciones de temperatura y altitud usadas en la simulación es de 7,9 mg/L. Los valores reportados en campo se encuentran entre 6,3 y 7,3 mg/L, los cuales se encuentran dentro de una condición normal. Sin embargo, debido a que la profundidad es baja (0,14 m) y debido al bajo caudal de la quebrada (3,4 L/s), se facilita el proceso de reaeración, con lo cual se espera una recuperación aguas abajo de las descargas simuladas.

6. Las condiciones actuales de calidad en términos de la DBO son buenas, con niveles en la quebrada desde 3 hasta 4 mg/L, lo cual clasificaría las aguas como sin contaminación a baja contaminación, según las categorías establecidas para el Índice de Contaminación por Materia Orgánica, ICOMO (Ramírez et al, 1997). Se considera que la calibración de la DBO5 arrojó resultados representativos, mostrando un leve decaimiento en el tramo de estudio.

7. Se midió la concentración de nitrógeno amoniacal y NTK, los cuales arrojaron valores por debajo del límite de detección (4 mg/L). Esta condición no permite realizar la calibración de los parámetros relacionados con compuestos nitrogenados, por lo que las tasas usadas corresponden al valor medio del rango reportado en el modelo original de QUAL2Kw.

8. De acuerdo con Romero (2002), las aguas residuales presentan un contenido de nitrógeno total entre 20 y 70 mg/L, mientras que las aguas sin polución fuerte presentan niveles entre 0,18 y 3 mg/L. Estos valores mostraron que, según el contenido de nitrógeno, el cuerpo receptor se asemeja a un agua sin polución.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de calibración se realizó por comparación con mediciones en campo obteniendo un buen ajuste sobre las condiciones observadas.

La variación en el caudal mínimo medio y máximo no es un factor determinante que pueda impedir el vertimiento del agua residual no domestica objeto de este estudio, teniendo en cuenta que en el momento que se tomaron las muestras de agua de la quebrada se encontraba en su nivel más bajo.

El vertimiento de la estación de servicio no representa una alteración significativa sobre el cuerpo de agua debido a que los parámetros analizados demuestran bajas concentraciones y pequeños caudales vertidos.

Los niveles de sólidos suspendidos fueron bajos en el cuerpo receptor (menor de 10 mg/L) y de acuerdo con los resultados de la simulación, no se espera un impacto más allá de 500 m del vertimiento, mientras se garantice el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015 (50 mg/L).

La quebrada no evidencia signos de contaminación por materia orgánica, según los resultados obtenidos para DBO₅ (3 a 4 mg/L) y oxígeno disuelto (6 a 7 mg/L). La descarga registrada (3,6 mg/L) o la descarga máxima de acuerdo con la Resolución 631 de 2015 (60 mg/L), garantiza el cumplimiento de la legislación ambiental vigente.

El nitrógeno no fue detectado en la corriente receptora, lo cual evidencia sus buenas condiciones de calidad. De acuerdo con los resultados del modelo, se espera que no se supere el objetivo de calidad de nitratos debido a su generación a partir del nitrógeno amoniacal.

8 BIBLIOGRAFÍA

Área Metropolitana del Valle de Aburra (2011) Informe de modelación Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río aburra- Medellín en jurisdicción del área metropolitana Fase III. Pag 13-21

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. Athens, Georgia: U.S. Environmental Protection Agency.

Brown, L., & Barnwell, T. O. (1987). The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS. Documentation and user's Manual. Report EPA/600/3-87/007, U.S. Environmental Protection Agency.

Castro H. Mayra Andrea, (2015), Aplicación del Qual2K en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, Departamento de Caldas, Colombia

Camacho, L. A., Díaz-Granados, M., & Lombana, C. (2003). Diseño y desarrollo de un marco jerárquico de modelación del flujo, transporte de solutos y calidad del agua para el manejo integral del río Magdalena. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.

Castillo G. (2008). Modelos de calidad de aguas.

Corporación Autónoma Regional del Cauca - CAR. (2012). Estudio de actualización del modelo de calidad del agua del río Palo 2011 tramo puente de Guachené – Bocas del Palo.

Cox, B. (2003). A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *The Science of the total environment*, 314-316, 335-377.

Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*. Long Grove: Waveland Press, Inc.

Chapra Steve and Pelletier Greg. (2008). *QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1)*. A modeling framework for simulating river and stream water quality.

Chin, D. A. (2013). *Water-quality engineering in natural systems (Second ed.)*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística 2005-2020 (2005) *Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal*.

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental - Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales. (2011). *Análisis de Herramientas de Evaluación de la Difusión y Comportamiento de Agentes Químicos en el Marco de la Normativa de Responsabilidad Medioambiental*. España, 2011

García T., Pelletier G., Díaz J. (2009). Water quality simulation of the Chicamocha river, Colombia. An application of the QUAL2Kw Model. *Ecological Modeling*.

García Quintero, H. (15 de Julio de 2008). Modelación de calidad del agua. Obtenido de Repositorio Institucional - Pontificia Universidad Javeriana: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/3809/1/GarciaQuinteroHermesAlfonso2008.pdf>

Kannel, P., Kanel, S., Lee, S., Lee, Y., & Gan, T. Y. (2011). A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. *Environmental Modeling & Assessment*, 16, 183-204.

Lozano G., Zapata M.A. y Peña L.E. (2003). Selección del modelo de calidad del agua en el proyecto “Modelación de corrientes hídricas superficiales en el departamento del Quindío”

Mayra Castro H, (2015) Aplicación del Qual2k en la modelación de la calidad del agua.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 4 edition. New York: Mc Graw Hill.

Moorhead, K. y K. Reddy. (1988). Oxygen transport through selected aquatic macrophytes. *J. Environ. Qual* 17: 38-142.

Pelletier, G.J., Chapra, C.S., Tao, H., 2006. QUAL2Kw, A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environ. Model. Software* 21, 419–4125.

Pelletier, G., & Chapra, S. C. (2008a). QUAL2Kw user manual (version 5.1). A modeling framework for simulating river and stream water quality. Olympia, Washington.

Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Sylvania Cundinamarca (2000).

Ramírez, A., Restrepo, R. y Viña, G., 1997. "Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación", *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1 (3):135 - 153.

Refsgaard, J. C., Sluijs, J. P., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1543-1556.

Romero R, Jairo (2002). *Calidad de Agua*. Escuela Colombiana de Carreras Industriales. Primera Edición. Bogotá D.C. Pag, 75.

Sierra R, Carlos A. (2011). *Calidad del Agua*. Universidad de Medellín. Primera Edición. Medellín. Pag. 446 -448.

Wang, Q., Li, S., Jia, P., Qi, C., & Ding, F. (2013). A Review of Surface Water Quality Models.
Retrieved from <http://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/231768/abs/>

Whitehead, P.E., William, R.J. and Lewis, D.R. (1997). Quality simulation along rivers (QUASAR), Part 1: Model theory and development science of the total environment, 194/195.447-456