

MODELACIÓN DEL ASIMILADO DE LA CARGA ORGÁNICA EN EL TRAMO DE RIO FRIO (PTAR RIO FRIO - LA AFLUENCIA CON RIO ORO), MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA QUAL2Kw (EPA), EN ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA CDMB.

ANDERSON ARRIETA LIZCANO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, QUÍMICA Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
PAMPLONA, JUNIO DE 2018

MODELACIÓN DEL ASIMILADO DE LA CARGA ORGÁNICA EN EL TRAMO DE RIO FRIO (PTAR RIO FRIO - LA AFLUENCIA CON RIO ORO), MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA QUAL2Kw (EPA), EN ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA CDMB.

ANDERSON ARRIETA LIZCANO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Ambiental

Director  
FIDEL ANTONIO CARVAJAL SUAREZ  
Docente Universidad de Pamplona

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, QUÍMICA Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
PAMPLONA, JUNIO DE 2018

## DEDICATORIA

*Primero que todo a Dios, todo el honor y la gloria para el rey de reyes, mi bastón para levantarme. Y Jehová va delante de ti; él estará contigo, no te dejara ni te desamparará; no temas ni te intimides. Deuteronomio 31:8.*

*A mi madre por ser el pilar que me sostiene día a día, quien con su apoyo incondicional me dio la fuerza psicológica, económica y moral cuando la necesite creyendo en mí desde que este sueño empezó, tus palabras siempre enriquecieron mi corazón.*

*A mi hermano, por creer en mí, y motivarme siempre.*

# PENSAMIENTO

*“Mereces lo que sueñas”  
Gustavo Cerati.*

## AGRADECIMIENTOS

*En este trabajo quiero mostrar mi agradecimiento a Dios y a la vida misma, por enseñarme que siempre hay un camino para lograr nuestros propósitos, y que los obstáculos pueden ser superados con esfuerzo y dedicación.*

*A mi familia, por creer en este proyecto y financiar su ejecución de principio a fin.*

*Al Ingeniero Fidel Antonio Carvajal Suarez, director del presente trabajo de grado, por haberme dado la oportunidad de trabajar a su lado. Sus exigencias y los consejos brindados fueron una motivación constante para superar mis propias expectativas. Gracias a sus enseñanzas y orientaciones fue posible la formulación del problema y solución de este proyecto.*

*A la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB en especial a la subdirección de ordenamiento y planificación integral del territorio SOPIT y a la ingeniera María Carmenza Vicini, por la colaboración constante y apoyo en el desarrollo del trabajo elaborado.*

*Hago extensiva mi gratitud al programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Pamplona, y a todo el personal que lo conforma, en especial a la planta docente, quienes a cambio de su tiempo aportaron la formación humana y académica necesaria para mi desarrollo como futuro profesional.*

# 1. CONTENIDO

1.	RESUMEN .....	10
2.	INTRODUCCIÓN .....	11
3.	DESCRIPCION GENERAL.....	13
3.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
3.2	JUSTIFICACIÓN .....	14
3.3	DELIMITACIÓN .....	14
3.4	OBJETIVOS .....	17
3.4.1	Objetivo General.....	17
3.4.2	Objetivos Específicos.....	17
4.	MARCO TEÓRICO.....	18
4.1	MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	18
4.2	DESCRIPCIÓN DEL QUAL2KW.....	21
4.2.1	Generalidades del modelo.....	21
4.2.2	Balance de flujo .....	23
4.2.3	Balance térmico.....	24
4.2.4	Balance de masa.....	25
4.2.5	Modelo de Reaireación .....	26
4.2.6	Datos de entrada y salida del modelo.....	27
4.2.7	Constantes hidráulicas.....	27
4.2.8	Constantes cinéticas .....	28
4.2.9	Calibración del modelo .....	29
4.2.10	Aplicación del modelo para toma de decisiones .....	31
4.3	AUTODEPURACIÓN.....	31
4.4	DESCRIPCIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO FRIO .....	32
4.4.1	Ubicación .....	32
4.4.2	Hidrología .....	33
4.4.3	Uso del Suelo .....	34
5.	METODOLOGÍA .....	35

5.1	METODOLOGÍA DE CAMPO.....	35
5.2	MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	36
5.3	DEFINICIÓN DE CONSTANTES HIDRÁULICAS .....	37
5.4	DATOS Y SITIOS DE MONITOREO.....	37
5.5	DATOS DE ENTRADA DEL MODELO .....	40
5.6	DEFINICIÓN DE CONSTANTES CINÉTICAS A CALIBRAR.....	40
5.7	CALIBRACIÓN .....	42
5.8	METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN .....	42
6.	MODELACIÓN.....	43
6.1	JORNADA DE MUESTREO .....	43
6.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CABECERA DE LA CORRIENTE .....	43
6.3	ALIMENTACIÓN DEL MODELO .....	44
6.4	CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DEL MODELO.....	48
7.	SIMULACIÓN .....	50
7.1	ESCENARIO 1: REDUCCIÓN DE HASTA UN 60% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO <sub>5</sub> EN LOS OCHO (8) VERTIMIENTOS DE AGUA RESIDUAL IDENTIFICADOS. ....	50
7.2	ESCENARIO 2: REDUCCIÓN DE HASTA UN 80% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO <sub>5</sub> EN LOS OCHO (8) VERTIMIENTOS DE AGUA RESIDUAL IDENTIFICADOS. ....	51
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	52
8.1	Resultados Campañas de Monitoreo.....	52
8.2	Resultados Modelamiento.....	56
8.3	Resultados Simulación.....	62
9.	CONCLUSIONES .....	64
10.	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA .....	66
	ANEXO 1 .....	67
	ANEXO 2 .....	70
	ANEXO 3 .....	72

## LISTADO DE TABLAS

TABLA 1 DESCRIPCIÓN MODELOS COMERCIALES DE SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	19
TABLA 2 ECUACIONES PREDICTIVAS DE LAS TASAS DE REAIRECCIÓN.....	26
TABLA 3 CONSTANTES CINÉTICAS PARA CALIBRACIÓN.....	28
TABLA 4 CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS Y USO DE LAS TIERRAS MICROCUENCA DE RIO FRIO.....	34
TABLA 5 PUNTOS DE MONITOREO EN EL RIO FRIO .....	36
TABLA 6 DEFINICIÓN DE CONSTANTES HIDRÁULICAS .....	37
TABLA 7 UBICACIÓN PUNTOS DE MONITOREO .....	37
TABLA 8 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO.....	40
TABLA 9 CONSTANTES CINÉTICAS PARA CALIBRACIÓN.....	41
TABLA 10 RESULTADOS A LA CABECERA DE LA CORRIENTE.....	43
TABLA 11 ESCENARIO 1 SIMULACIÓN.....	50
TABLA 12 ESCENARIO 2 SIMULACIÓN.....	51
TABLA 13 CONSTANTES CALIBRADAS PARA EL TRAMO DE RIO FRIO.....	56
TABLA 14 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN TRAMO RIO FRIO – CAMPAÑA 1 .....	70
TABLA 15 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN TRAMO RIO FRIO – CAMPAÑA 2 .....	71

## LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1 PROCESO DE SIMULACIÓN DE UNA CORRIENTE HÍDRICA SUPERFICIAL. ....	19
FIGURA 2 ESQUEMA GENERAL DEL QUAL2KW .....	23
FIGURA 3 ESQUEMA DEL BALANCE DE FLUJO.....	24
FIGURA 4 ESQUEMA DEL BALANCE TÉRMICO .....	25
FIGURA 5 ESQUEMA DEL BALANCE DE MASA .....	25
FIGURA 6 ESQUEMA DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN .....	30
FIGURA 7 ESQUEMA METODOLÓGICO MEDICIONES DE CAMPO FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2018).....	35
FIGURA 8 HOJA DE TRABAJO INICIAL QUAL2KW.....	45
FIGURA 9 HOJA DE TRABAJO HEADWATER.....	45
FIGURA 10 HOJA DE TRABAJO REACH.....	46
FIGURA 11 HOJAS DE TRABAJO DE DATOS METEOROLÓGICOS .....	46
FIGURA 12 HOJA DE TRABAJO RATES.....	47
FIGURA 13 HOJA DE TRABAJO WQ DATA .....	48
FIGURA 14 CARGAS ORGÁNICAS CAMPAÑA 1 .....	52
FIGURA 15 SOLIDOS CAMPAÑA 1 .....	52
FIGURA 16 TURBIEDAD CAMPAÑA 1.....	53
FIGURA 17 OXÍGENO DISUELTO CAMPAÑA 1 .....	53
FIGURA 18 CARGAS ORGÁNICAS CAMPAÑA 2 .....	54
FIGURA 19 SOLIDOS CAMPAÑA 2.....	54
FIGURA 20 OXÍGENO DISUELTO CAMPAÑA 2 .....	55
FIGURA 21 TURBIEDAD CAMPAÑA 2.....	55
FIGURA 22 CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DEL CAUDAL. ....	58
FIGURA 23 CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DE LA TEMPERATURA.....	58
FIGURA 24 CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO .....	59
FIGURA 25 CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DE LA DBO RÁPIDA.....	60
FIGURA 26 CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES .	61
FIGURA 27 SIMULACIÓN DBO5 .....	62
FIGURA 28 SIMULACIÓN SST.....	63

## 1. RESUMEN

Los modelos matemáticos son técnicas que permiten representar y simular situaciones reales, dentro de una franja de incertezas, inherente al conocimiento técnico-científico. Específicamente, un modelo matemático de calidad de agua debe ser visto como una herramienta valiosa para evaluar las alternativas propuestas por los planificadores del recurso hídrico, y cuestionadas por la población.

El estudio de simulación de la calidad del agua del Rio Frio se hizo utilizando el modelo Qual2Kw versión 5.1, desarrollado por la EPA, de muy amplio uso en estudios de modelación de calidad, el cual es desarrollado considerando flujo estacionario, simulación unidimensional y bajo ambiente Windows.

Este estudio es importante porque es uno de los principales afluentes del río Oro, recibe una gran carga contaminante proveniente de descargas de aguas residuales domésticas e industriales de Girón. Para ello se necesitó la incorporación de información confiable al modelo, con el fin de que las diferentes salidas se aproximen a la realidad. La confiabilidad de los datos se trabajó con la estandarización de metodologías, intercalibración del laboratorio participante, y desarrollo de muestreos siguiendo los protocolos recomendados.

La información de entrada, esencia del estudio, requiere de datos como: condiciones aguas arriba de los tramos a simular, características físicas e hidráulicas de la corriente, constantes de reacción físicas y químicas, y datos correspondientes a aportes (vertimientos) y abstracciones de la corriente (concesiones).

### *PALABRAS CLAVES*

Calidad de agua, Vertimientos, Calibración, Modelamiento, Qual2K, Rio Frio.

## 2. INTRODUCCIÓN

La microcuenca del río Frio hace parte de la subcuenca hidrográfica del río Oro en el Departamento de Santander, se constituye en sí misma como un área estratégica para la conservación de la biodiversidad y el recurso hídrico. Es por esto que concretar su ordenamiento y reglamentación es de vital importancia. La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB, como autoridad ambiental competente, inició el proceso de Ordenamiento y Reglamentación del río Frio en el año 2017, por lo cual es necesario contar con herramientas tales como los modelos de simulación de la calidad del agua que le faciliten ordenar y planificar de forma sostenible este recurso hídrico, de tal forma que se tomen las medidas pertinentes en pro de la recuperación y/o conservación del mismo.

Para modelar la calidad del agua de una fuente superficial, es necesario simular los diferentes procesos de transporte y degradación de los compuestos que son vertidos a la corriente. Para esto, se debe disponer de un software especializado y se debe contar con una serie de datos de campo de la corriente de interés. Uno de los modelos más ampliamente utilizados en el país es el QUAL2Kw, el cual es un software gratuito desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y se constituye como un modelo unidimensional que simula el impacto de cargas contaminantes puntuales y distribuidas en un flujo permanente, no uniforme.

Camacho y Díaz (2003) señalan que los modelos de simulación de la calidad del agua en corrientes superficiales permiten reproducir los diferentes fenómenos hidráulicos, fisicoquímicos y biológicos que ocurren en los ríos mediante el manejo de expresiones matemáticas que representan dichos procesos y los componentes de la calidad de agua en estudio. Estos modelos deben ser una representación aproximada del sistema real y contener el mayor número de aspectos importantes del mismo, sin que su grado de complejidad haga difícil su comprensión y aplicación.

La preservación de los sistemas hídricos y de la calidad de sus aguas es una constante preocupación para los investigadores que buscan mitigar las consecuencias de la acción humana sobre el medio ambiente. La multiplicidad de usos de los recursos hídricos, asociada a una característica de recurso natural renovable y también finito, define un escenario que refleja una gran complejidad de relaciones para su preservación.

La política nacional de conservación de los recursos naturales establecida en Colombia, es una importante herramienta legal para la gestión en la conservación de los cursos de agua, y como apoyo a este propósito surgen los modelos matemáticos o programas computacionales, los cuales son utilizados como soporte en la decisión entre alternativas de gestión o uso, o como agentes facilitadores en este proceso.

El estudio de modelamiento en río Frio es trascendental porque es una fuente hídrica importante en el departamento Santander, presenta contaminación por materia orgánica y metales pesados, convirtiéndose en una emergencia ambiental, la falta de cultura ambiental, el desarrollo industrial y el aumento poblacional del área metropolitana permiten un aumento progresivo de contaminantes al río Frio. En la microcuenca de río Frio se descargan todos los vertidos tratados y crudos del Área Metropolitana de Bucaramanga, cuya jurisdicción comprende los Municipios de: Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Dentro de las descargas de agua residual, se encuentran: el vertido tratado de la única planta de aguas residuales del área, denominada "PTAR Río Frío", ubicada en Floridablanca, en zona baja del río Frío, aguas arriba de la estación Pórtico.

### 3. DESCRIPCION GENERAL

#### 3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Rio Frio es una de las fuentes de agua superficial más importante del área metropolitana de Bucaramanga nutriendo a Rio de Oro en el departamento de Santander, recibiendo descargas de materia orgánica, contaminantes microbiológicos, y en menor grado sustancias tóxicas. Estos vertimientos son regulados y controlados por la corporación y en cumplimiento con los parámetros máximos permisibles de la resolución 631 del 2015.

Es bien conocido que por su localización geográfica, su orografía y una gran variedad de regímenes climáticos, Colombia se ubica entre los países con mayor riqueza en recursos hídricos en el mundo. Sin embargo, la población y las actividades socioeconómicas se ubican en regiones con baja oferta hídrica, cada vez es mayor el impacto de origen antrópico sobre el agua, y existe poca información que apoye la toma de decisiones en la planificación del recurso hídrico. Existen actualmente necesidades hídricas insatisfechas para todos los ecosistemas y la disponibilidad del recurso es cada vez menor. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y siendo evidente la problemática general del recurso hídrico a nivel nacional, se requiere ordenar el uso del recurso de manera sostenible. Para esto se requiere generar el conocimiento y la información que apoyen la toma de decisiones, la planificación, la gestión y el uso del recurso. Esto puede evitar que los sistemas y los procesos naturales sean intervenidos y alterados desordenadamente, se presente deterioro de las corrientes de agua y se incrementen los conflictos por su uso.

De ello surge la necesidad de conocer si rio frio tiene la capacidad de autodepuración recibiendo grandes descargas de materia orgánica debida que la longitud de su cauce no es tan grande. Además de monitorear su afluente para conocer si cumple con los parámetros de calidad de agua establecidos por la CDMB para la microcuenca.

### 3.2 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a la norma uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para realizar el correcto ordenamiento de las corrientes, es la aplicación y calibración de modelos de simulación de la calidad del agua. Los cuales permiten determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables. La implementación de estos modelos permite además evaluar escenarios futuros de recuperación, por lo tanto se convierten en herramientas fundamentales para elaborar una correcta planificación de las fuentes de agua.

Uno de los modelos de calidad del agua más ampliamente utilizados en el mundo es el modelo matemático QUAL2Kw, el cual ha sido implementado por varios Elaboración propia (2018) es en diferentes corrientes superficiales (Arroyave et.al., 2012; Chihhao et.al., 2009; Corporación Autónoma Regional del Cauca CAR, 2012; Pelletier, et.al., 2003), el atractivo del modelo consiste en que permite modelar una gran cantidad de parámetros de calidad del agua y es un software gratuito. El modelo unidimensional QUAL2Kw simula el impacto de cargas contaminantes puntuales y distribuidas en un flujo permanente, no uniforme, segmentando el sistema en tramos que pueden ser de longitud variable. El balance hidrológico se representa a través del flujo; el balance de calor, a través de la temperatura, y el balance de materia, a través de la concentración de especies constituyentes. Los procesos cinéticos que se incluyen en el modelo son disolución, hidrólisis, oxidación, nitrificación, desnitrificación, muerte de microorganismos, respiración/excreción y fotosíntesis. Los procesos de transferencia de masa incluidos son reaireación, sedimentación, demanda béntica de oxígeno y flujo de carbono orgánico de los sedimentos (Arroyave et.al., 2012).

Es así, como la Corporación Autónoma Regional Para la defensa de la Meseta de Bucaramanga en cumplimiento de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, inicie a realizar estudios de modelación de la calidad del agua en las principales fuentes hídricas del departamento de Santander, para lo cual este mecanismo se constituye como una herramienta de planificación que permite en la actualidad y a futuro, identificar y conservar el recurso hídrico.

### 3.3 DELIMITACIÓN

Río Frío tiene su nacimiento en una elevación de 3050 msnm en el sitio conocido como La Corcova en las divisorias de agua con los ríos Tona y Lato. Tiene una longitud de 30.1 km y es una de las microcuenca del Río de Oro con mayor receptibilidad de agua, que las descarga por la margen derecha al río de oro en proximidades del casco urbano de Girón, en el sitio conocido como Caneyes. El área de la cuenca hidrológica es de 11975 hectáreas y su cauce principal tiene una longitud de 30,1 Km. Se ubica en los municipios de Floridablanca y Girón en el departamento de Santander.

La microcuenca Río Frío fue dividida en los siguientes sectores denominados Unidades de Rendimiento Hídrico (URH) así

:

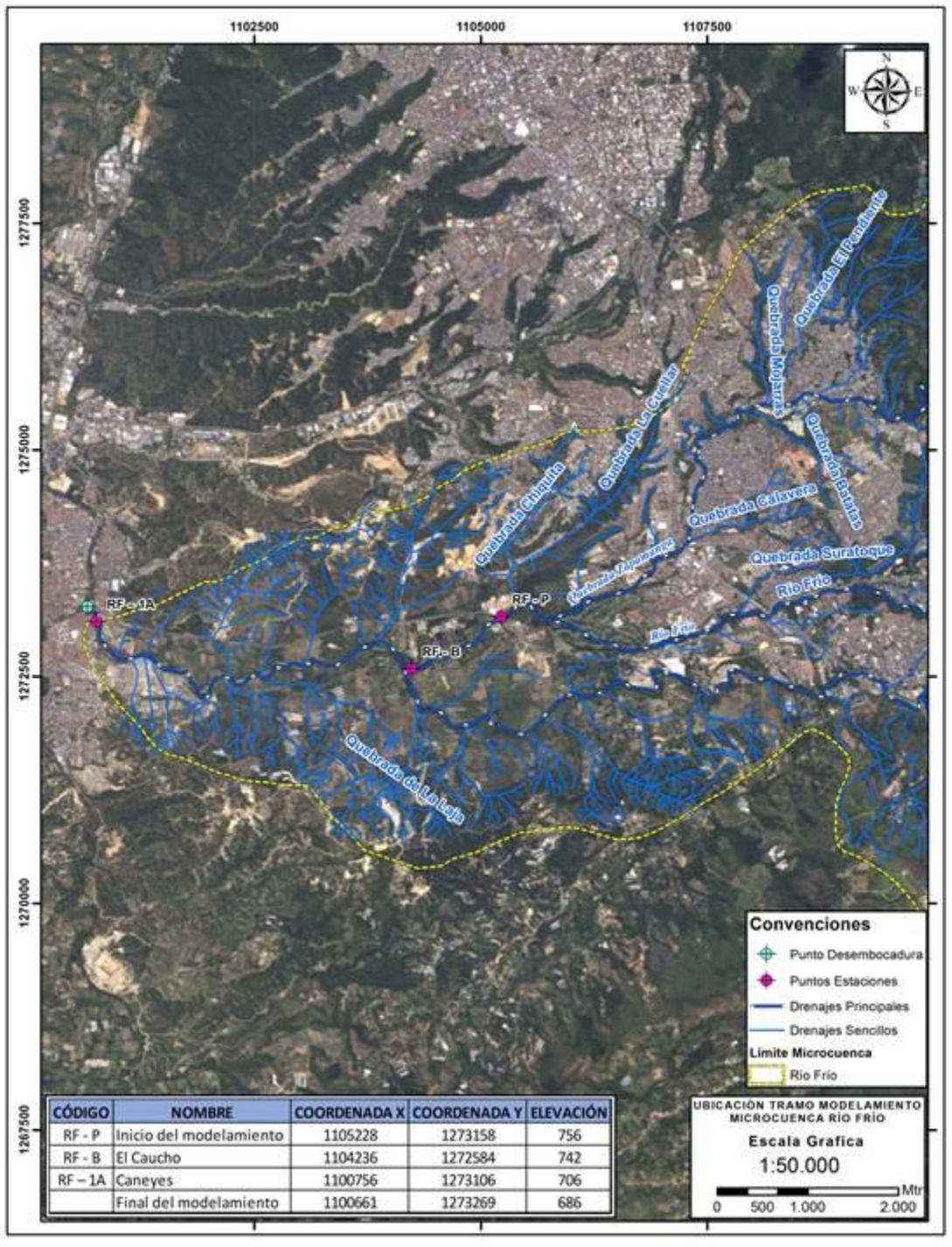
URH Río Frío Alto

URH Río Frío Quebrada Mensulí o Aranzoque o La Estancia

URH Río Frío Zapamanga

URH Río Frío Bajo

Figura 1. Ubicación tramo en estudio del Rio Frio.



Fuente: Elaboración propia 2018.

## 3.4 OBJETIVOS

### 3.4.1 Objetivo General

Modelar la carga orgánica en el tramo de Rio Frio (PTAR Rio Frio - la afluencia con Rio Oro), mediante la utilización del programa QUAL2Kw (EPA), en área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB.

### 3.4.2 Objetivos Específicos

Caracterizar la corriente y los vertimientos físico, químico e hidráulicamente pertenecientes al tramo del Rio Frio en estudio.

Calibrar y validar el modelo de calidad del agua QUAL2Kw en el río Frio, a partir de la información de monitoreo realizada por la CDMB.

Evaluar los efectos en la calidad del agua del río Frio para escenarios futuros, mediante la aplicación del modelo de simulación QUAL2Kw.

Analizar el sistema natural de autodepuración del río por medio de la herramienta QUAL2K.

## 4. MARCO TEÓRICO

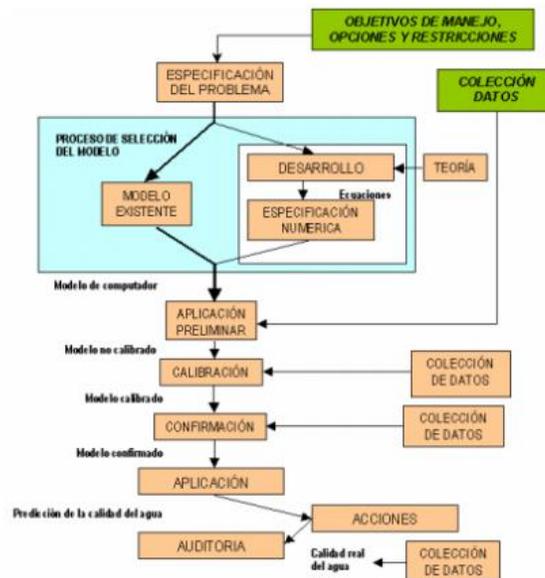
### 4.1 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua de una cuenca es el resultado de un conjunto de factores, ya que tanto el régimen hidrológico de la cuenca hidrográfica como las características hidráulicas del sistema fluvial influyen en su composición. Adicionalmente, en la sociedad moderna, esta calidad ‘natural’ se ve muchas veces drásticamente alterada debido al ingreso de contaminantes de origen antropogénico, provenientes desde fuentes puntuales y difusas. (Villalobos, 2008)

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)

El proceso general de simulación de una corriente hídrica superficial (*Figura 1*) 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 aplicación, calibración y confirmación 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.

Figura 2 Proceso de simulación de una corriente hídrica superficial.



Fuente: Lozano G. et al. 2003

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 éstos a lo largo de una corriente natural. A continuación se presentan software para la modelación de la calidad del agua:

Tabla 1 Descripción modelos comerciales de simulación de la calidad del agua

Modelo	Características
QUASAR	<p>Descripción: Este software modela un río como una serie de tramos definidos por confluencias de tributarios, vertederos, tomas públicas de abastecimiento de agua o descargas de efluentes, y puede ser corrido en dos modos diferentes: modo planificación y modo dinámico.</p> <p>Parámetros modelados: Caudal, amoníaco, pH, nitratos, temperatura, E. Coli, demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, contaminante conservativo o trazador.</p> <p>Implementado en: Cuenca el Virrey (Colombia).</p> <p>Desarrollado por: Whitehead, P.E., William, R.J. and Lewis, D.R., 1997.</p>

<p>MIKE 11</p>	<p>Descripción: Este modelo simula los procesos de reacción de sistemas multicompuestos incluyendo la degradación de la materia orgánica, la fotosíntesis y respiración de las plantas, la nitrificación y el intercambio de oxígeno con la atmósfera. El modelo se acopla al modelo básico de advección dispersión AD, lo cual significa que el modelo simula los procesos de transformación de diferentes compuestos y el modelo AD es utilizado para simular los procesos de transporte simultáneamente. Parámetros modelados: Temperatura, oxígeno disuelto, materia orgánica (DBO), amoníaco/amonio, fósforo, nitratos, coliformes totales y fecales. Implementado en: Río Cauca (Colombia), río Magdalena (Colombia). Desarrollado por: Instituto de Calidad del Agua de Dinamarca (DHI), 1999. .</p>
<p>RIOS</p>	<p>Descripción: Este modelo proporciona un método estándar, basado en la ciencia para el manejo de cuencas en contextos en todo el mundo; combina datos biofísicos, sociales y económicos para ayudar a los usuarios a identificar las mejores ubicaciones para la protección y las actividades de restauración con el fin de maximizar el retorno de la inversión ecológica, dentro de los límites de lo que es socialmente y políticamente factible. Parámetros modelados: Oxígeno disuelto, DBO carbonácea y nitrogenada, coliformes y análisis simplificados de sustancias tóxicas conservativas y no conservativas. Implementado en: Río Acelhuate, Sucio, y Suquiapa (El Salvador). Desarrollado por: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1995.</p>

QUAL2Kw	<p>Descripción: El QUAL2Kw es un modelo gratuito de calidad el agua que 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.</p> <p>Parámetros modelados: Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.</p> <p>Implementado en: Río Cauca, río Bogotá, río Chinchiná, quebrada Manizales, río Palo, río Sinú, río Aburrá (Colombia).</p> <p>Desarrollado por: Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), 2008.</p>
---------	---

Fuente: Elaboración propia (2018)

## 4.2 DESCRIPCIÓN DEL QUAL2KW

### 4.2.1 Generalidades del modelo

El modelo de calidad del agua QUAL2K fue desarrollado para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos por Chapra y 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:

**Tipo de software e interface gráfica:** El modelo se ejecuta en ambiente Windows mediante el lenguaje Visual Basic. La interface 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.

**Modelación de sistemas hídricos de tipo dendrítico:** El modelo permite realizar simulaciones en casos donde la simulación 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.

**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.

**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, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal.

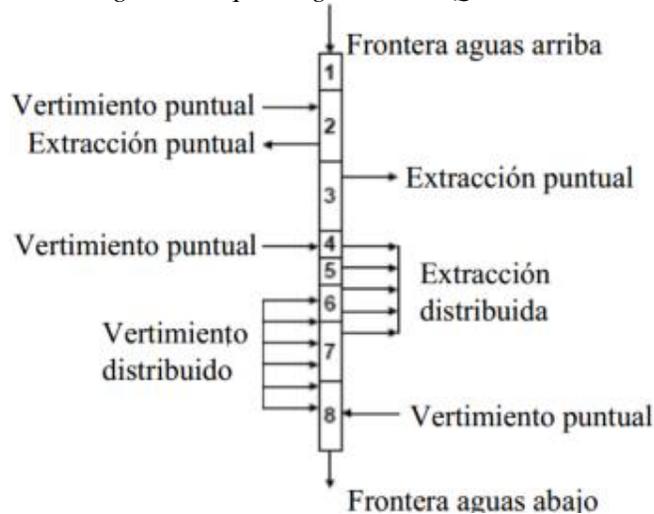
**Especies de DBO carbonácea:** El modelo QUAL2Kw usa dos formas de DBO carbonácea para representar el carbono orgánico. Estas formas son: la DBO de rápida oxidación (DBO fast) y la DBO de lenta oxidación (DBO slow). Adicionalmente, se simula la materia orgánica particulada (Detritus), este material de detritus está compuesto por partículas de carbón, nitrógeno y fósforo en una estequiometría fija.

**Interacciones agua-sedimento.** Los flujos en la interface agua-sedimento de OD 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.

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 hidrogeométricas 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. (Chapra, 2008)

En la *Figura 2* se puede observar el esquema general del modelo QUAL2Kw con sus fronteras externas e internas.

*Figura 3 Esquema general del QUAL2Kw*



Fuente: Manual de Qual2Kw

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 en términos 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 (Chapra, 1997).

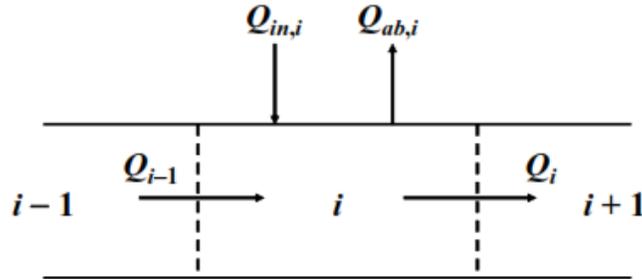
#### 4.2.2 Balance de flujo

El modelo QUAL2Kw trabaja bajo régimen estacionario, o sea que el flujo entrante y saliente en cada uno de los elementos computacionales en análisis se mantiene constante a través del tiempo (*Ecuación 1*). El esquema del balance de flujo se puede ver en la *Figura 3*.

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

En donde,  $Q_i$ : Caudal de salida del elemento computacional;  $Q_{i-1}$ : Caudal de entrada del elemento computacional;  $Q_{in,i}$ : Caudal de entrada neto lateral por fuentes puntuales y difusas;  $Q_{out,i}$ : Caudal de salida neto lateral por fuentes puntuales y difusas.

Figura 4 Esquema del balance de flujo



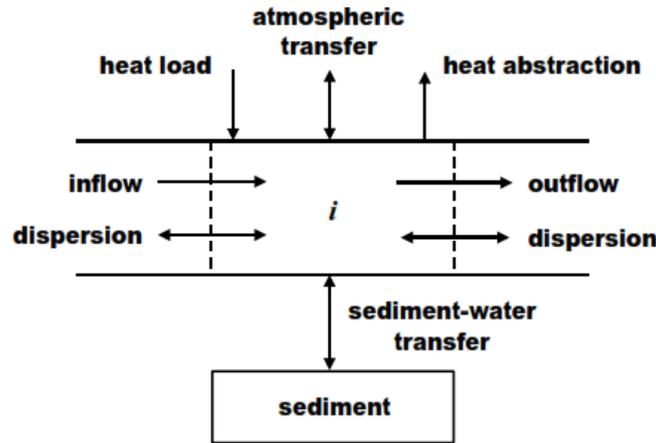
#### 4.2.3 Balance térmico

El balance de calor o de temperatura en cada uno de los elementos que conforman el sistema es función de la transferencia de calor de los elementos adyacentes, de la transferencia de calor entre los sedimentos, el agua y la atmósfera, de las entradas y salidas externas al sistema (Ecuación 2). El esquema del balance de temperatura se puede ver en la Figura 4.

$$0 = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w * C_{pw} * V_i} \left( \frac{m^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right) + \frac{J_{a,i}}{\rho_w * C_{pw} * H_i} \left( \frac{m}{100 \text{ cm}} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w * C_{pw} * H_i} \left( \frac{m}{100 \text{ cm}} \right) \quad (2)$$

En donde,  $T_i$ : temperatura en el elemento  $i$ ;  $E'_i$ : coeficiente de dispersión del volumen entre los elementos  $i$  e  $i+1$ ;  $W_{h,i}$ : carga neta de calor de fuentes puntuales y no puntuales en el elemento  $i$ ;  $\rho_w$ : densidad del agua;  $C_{pw}$ : calor específico del agua;  $J_{a,i}$ : flujo de calor aire-agua;  $J_{s,i}$ : flujo de calor entre agua y sedimentos.

Figura 5 Esquema del balance térmico



Fuente: Manual de Qual2Kw

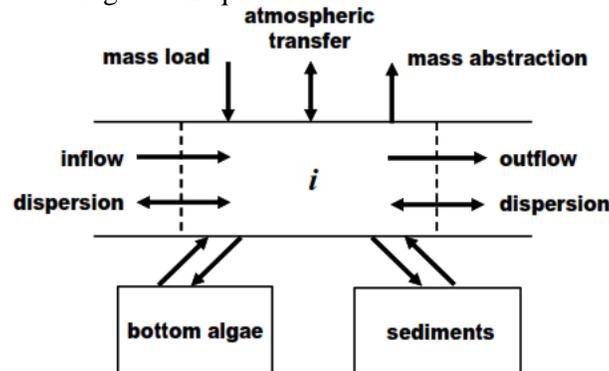
#### 4.2.4 Balance de masa

El modelo QUAL2Kw considera por cada constituyente (parámetro fisicoquímico o biológico) un balance general de masa en cada elemento computacional (Figura 5), descrita mediante la Ecuación 3, la cual involucra los efectos de dispersión, dilución, consumo o generación de constituyentes por reacciones químicas o bioquímicas y la generación o pérdida de nutrientes por fuentes externas o internas (descargas puntuales, captaciones, etc).

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (3)$$

En donde,  $C_i$ : Concentración;  $Q_i$ : Flujo en el  $i$ ésimo segmento;  $Q_{ab}$ : Salida en el elemento  $i$  debido a extracción puntual o difusa;  $V_i$ : Volumen incremental del  $i$ ésimo segmento;  $t$ : Tiempo;  $S_i$ : Fuentes y sumideros del constituyente debido a reacciones y mecanismos de transferencia de masa;  $E_i$ : Coeficiente de dispersión longitudinal entre segmentos  $i$  y  $i+1$ ;  $S_i$ : Carga externa del constituyente en el elemento  $i$ .

Figura 6 Esquema del balance de masa



Fuente: Manual de Qual2Kw

#### 4.2.5 Modelo de Reaireación

Las ecuaciones que permiten predecir el proceso de reaireación en los ríos están enfocadas a determinar la tasa de reaireación, también llamada coeficiente de reaireación ( $Ka$ ), la cual mide la velocidad a la que el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de. En la Tabla 2 se resumen las ecuaciones que predicen las tasas de reaireación en el QUAL2Kw, a partir de parámetros hidráulicos.

Tabla 2 Ecuaciones predictivas de las tasas de reaireación

Ecuación	$Ka$ ( $d^{-1}$ a $20^{\circ}C$ )	Unidades
O'Connor y Dobbins (1958)	$Ka = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$ $0.305m \leq H \leq 9.14m$ $0.15 \text{ m/s} \leq U \leq 0.49 \text{ m/s}$ $0.05 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 12.2 \text{ d}^{-1}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$
Churchill et al. (1962)	$Ka = 5.026 \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$ $0.61m \leq H \leq 3.35m$ $0.55 \text{ m/s} \leq U \leq 1.5 \text{ m/s}$ $0.000126 \text{ m/m} \leq S \leq 0.002351 \text{ m/m}$ $0.225 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 5.56 \text{ d}^{-1}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$
Owens et al. (1964)	$Ka = 5.34 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$ $0.122m \leq H \leq 3.35m$ $0.0305 \text{ m/s} \leq U \leq 1.52 \text{ m/s}$ $0.000156 \text{ m/m} \leq S \leq 0.0106 \text{ m/m}$ $0.31 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 49.17 \text{ d}^{-1}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$
Tsivoglou y Neal (1976)	$Ka = 0.3609 \frac{\Delta H}{t}$ <p>para <math>0.028 \text{ m}^3/\text{s} = Q = 0.28 \text{ m}^3/\text{s}</math></p> $Ka = 0.1772 \frac{\Delta H}{t}$ <p>para <math>0.708 \text{ m}^3/\text{s} = Q = 85 \text{ m}^3/\text{s}</math></p> $Ka = 13566 \text{ US}$	$\Delta H = \text{m}$ $t = \text{d}$ $U = \text{m/s}$ $S = \text{m/m}$
Thackston y Dawson (2001)	$Ka = 0.000025 \left(1 + 9F^{\frac{1}{4}}\right) * \frac{U}{H}$	$H = \text{m}$ $U = \text{m/s}$
USGS (pool-riffle)	$Ka = 517 (US)^{0.524} * Q^{-0.242}$ <p>para <math>Q &lt; 0.28 \text{ m}^3/\text{s}</math></p> $Ka = 596 (US)^{0.528} * Q^{-0.136}$ <p>para <math>Q &lt; 0.556 \text{ m}^3/\text{s}</math></p>	$U = \text{m/s}$ $Q = \text{m}^3/\text{s}$

USGS (Channel-control)	$Ka = 88 (US)^{0.313} * D^{-0.353}$ para $Q < 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 142 (US)^{0.333} * D^{-0.66} * W^{-0.243}$ para $Q < 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$	$U = \text{m/s}$ $Q = \text{m}^3/\text{s}$ $D = \text{m}$ $W = \text{m}$
------------------------	---	---

#### 4.2.6 Datos de entrada y salida del modelo

El modelo QUAL2Kw se ejecuta en ambiente Windows mediante el lenguaje Visual Basic. La interface gráfica funciona bajo el software Excel, lo que hace el modelo muy amigable y de fácil uso. El libro de Excel contiene varias hojas de trabajo en las cuales se ingresan los diferentes datos de entrada del modelo y desde donde éste es ejecutado.

Cada hoja de trabajo tiene un nombre que identifica el tipo de información que contiene y que puede resumirse de la siguiente forma: parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tomados en campo en las campañas de monitoreo, descripción de los tramos del río, constantes hidráulicas, los valores de las constantes cinéticas de calibración del modelo, condiciones meteorológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales y difusas como tributarios, captaciones y vertimientos.

En el modelo se usan colores en las celdas para identificar si la información debe ser ingresada por el usuario o si corresponden a resultados del programa:

*Celdas azules:* corresponden a las variables de diseño y los valores de los parámetros que deben ser ingresados por el usuario.

*Celdas amarillas:* son los datos medidos en campo que deben ser ingresados por el usuario. Estos datos posteriormente se muestran en las gráficas generadas por el modelo.

*Celdas verdes:* corresponden a los resultados del modelo.

*Celdas oscurecidas:* se usan para títulos y nomenclatura y no deben cambiarse.

Después de que el modelo QUAL2Kw ha efectuado los cálculos necesarios para poder realizar las corridas de simulación, se generan diferentes hojas electrónicas y gráficas con los resultados. En las gráficas resultantes se pueden comparar las curvas correspondientes al perfil de concentraciones de los diferentes parámetros estimados por el modelo a lo largo del río, con los datos medidos en campo en las estaciones de monitoreo.

#### 4.2.7 Constantes hidráulicas

En un modelo de calidad es indispensable definir en forma correcta el componente hidráulico, ya que la velocidad media de la corriente, la pendiente del tramo, el ancho y la profundidad de la sección transversal, determinan la tasa de reaeración de la corriente y por lo tanto su capacidad de autodepuración, así mismo la velocidad del flujo determinan los tiempos de viaje o de residencia de los contaminantes en el tramo.

El QUAL2Kw tiene dos opciones para definir las constantes hidráulicas como se muestra a continuación, el primer método se conoce como Rating Curves y el segundo utiliza la fórmula de

Manning. La elección de cualquiera de estos métodos depende de la información con la que se cuente y la confiabilidad de la misma.

- Rating Curves:

$$U = k * Q^m \quad (4)$$

$$H = c * Q^f \quad (5)$$

$$W = a * Q^b \quad (6)$$

$$c * k * a = 1 \quad (7)$$

$$f + b + m = 1 \quad (8)$$

Donde Q: caudal; U: velocidad; H: profundidad; W: ancho; k,c, a: constantes; f,b,m: coeficientes.

- Manning Formula:

$$Q = \frac{S_o^{1/2} A_c^{5/3}}{nP^{2/3}} \quad (9)$$

Donde Q: caudal; So: pendiente del fondo; Ac: área transversal; P: perímetro mojado; n: coeficiente de manning.

#### 4.2.8 Constantes cinéticas

El QUAL2Kw permite definir una gran cantidad de variables cinéticas para describir todas las reacciones que tienen lugar en la dispersión y la dilución de los contaminantes en una corriente de agua, sin embargo, aunque todas las variables se tienen en cuenta en la aplicación del modelo, es elección del usuario cuáles de estas variables desea calibrar.

En la *Tabla 3* se presentan las constantes cinéticas que permite calibrar el QUAL2Kw, la descripción de cada una de ellas y el rango de valores de calibración encontrados en la bibliografía a través de múltiples ensayos para cada constante. Los valores iniciales de las constantes cinéticas a calibrar pueden ser definidos por el usuario de acuerdo a experiencias en la región o lo puede asignar arbitrariamente siempre y cuando estén entre los rangos establecidos.

*Tabla 3 Constantes cinéticas para calibración*

Parámetro de Calibración	Abreviación	Unidades	Rango de Calibración
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d	0 – 2
Tasa de reaireación, descrita por la ecuación de reaireación	Ka	1/d	Auto- selección

Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO- DBO slow	1/d	0 – 4.2
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d	0 – 5
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d	0.001 – 0.1
Tasa de nitrificación de amonio	Tasa Nitrificación	1/d	0 – 10
Tasa de desnitrificación de nitratos (importante cuando existen condiciones anaeróbicas)	Tasa Desnitrificación	1/d	0 – 2
Coefficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	CT-Desnitrificación Sed.	m/d	0 – 1
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d	0.001 – 0.7
Velocidad de sedimentación del Fósforo Orgánico	VS - PO	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación del Fósforo Inorgánico	VS - PI	m/d	0 – 2
Hidrólisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d	0 – 5
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Vel. Sedimentación POM	1/d	0 – 5
Tasa de decaimiento de los patógenos	Tasa Decaimiento Patógenos	1/d	0 – 2
Velocidad de sedimentación de los patógenos	VS - Patógenos	m/d	0 – 2
Constante $\alpha$ para mortalidad de los patógenos por luz solar	Contaste $\alpha$ Mortalidad - Patógenos	1/d per y/hr	0 – 1

Fuente: Chapra, 1997; Kannel et.al., 2007; Pelletier et.al., 2003.

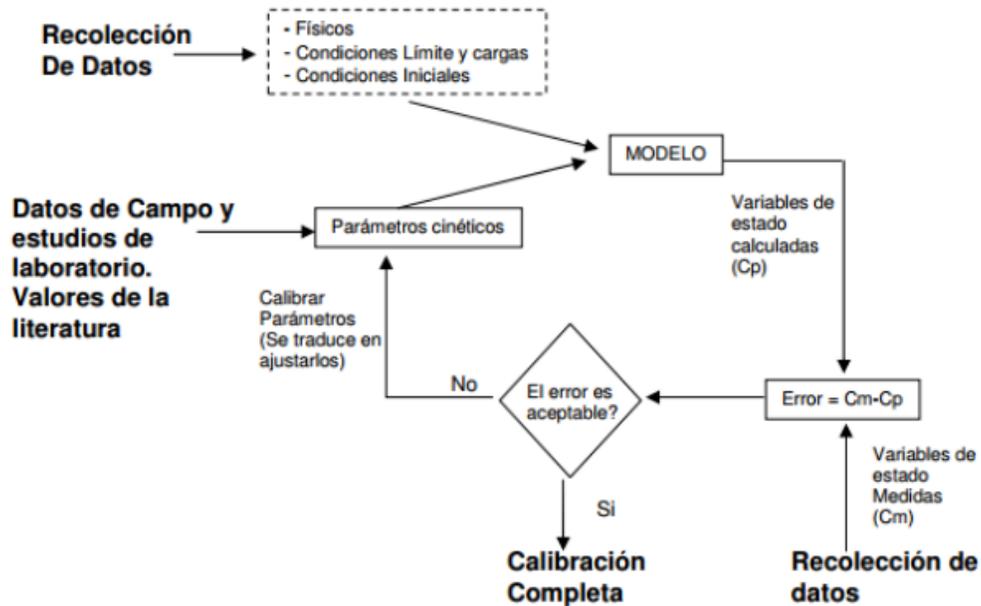
#### 4.2.9 Calibración del modelo

La calibración es un proceso iterativo encaminado a llevar a un margen de error mínimo la diferencia entre los datos simulados por el modelo y los valores medidos en campo para el mismo. En un modelo de calidad del agua se deben especificar las tasas de reacción o transformación de

los determinantes de calidad del agua y tasas de transferencia de masa hacia o desde la superficie del agua y el fondo del canal. La cinética de las reacciones son particulares para cada tipo de río en las condiciones específicas que se presentan en el sistema físico modelado y las tasas de transferencia dependen en gran parte de la turbulencia de la corriente.

Las técnicas empleadas para encontrar las soluciones óptimas que permitan un error mínimo pueden basarse en algoritmos de optimización matemática integrados al modelo y a los resultados de sus corridas. Dentro de las técnicas de optimización matemática se pueden mencionar algunos procedimientos: amoeba, recocido simulado, algoritmos genéticos y colonia de hormigas, cada uno con un proceso de convergencia, costo y eficiencia computacional diferente. En general, el algoritmo seleccionado debe permitir disminuir el error secuencialmente para que el modelo converja hacia soluciones admisibles para el mismo. En la Figura 6 se presenta el esquema del proceso de calibración que sigue el modelo de calidad del agua.

Figura 7 Esquema del proceso de calibración



El modelo QUAL2Kw realiza la calibración automática de los parámetros cinéticos mediante el AG-PIKAIA, el cual es un algoritmo genético (AG) que funciona como un sistema de búsqueda a través de un espacio de decisión, usando un proceso análogo al de la “selección natural de las especies” de Darwin, que busca la supervivencia, en mayor número, de los individuos más aptos. De esta forma, el QUAL2Kw determina los valores óptimos de los parámetros cinéticos entre máximos y mínimos especificados para cada parámetro, buscando maximizar la bondad de ajuste con respecto a los datos de campo.

#### 4.2.10 Aplicación del modelo para toma de decisiones

El uso de modelos de calidad del agua ha ido ganando importancia como herramienta para contribuir a la planificación integral de los recursos hídricos, puesto que al contar con un modelo confiable calibrado y confirmado, éste puede ser usado para representar esquemas de gestión e intervención directa. De esta forma, se convierte en una herramienta útil de planeación que puede soportar la toma de decisiones en problemas específicos que se quieran solucionar y estén afectando la calidad del agua de una corriente específica (Vera, 2007).

Una vez calibrado y confirmado el modelo de calidad QUAL2Kw, se cuenta con una herramienta capaz de predecir la respuesta de la corriente ante distintos escenarios de intervención, para esto, se deben formular los escenarios de posibles soluciones, por ejemplo la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, la implementación de sistemas individuales de saneamiento o la implementación de las áreas de retiro que permitan mejorar la calidad del agua de la corriente afectada. Una vez se formulan los escenarios, se deben definir los valores de calidad de entrada del modelo y se modela nuevamente con estos valores.

Es importante tener en cuenta que la toma de decisiones debe estar enfocada al monitoreo posterior a la realización de las medidas que se hayan tomado para solucionar el problema, y saber si el escenario de modelación tomado como base para tomar esa decisión, fue efectivo y tuvo el impacto esperado, o si el modelo debe ser ajustado (Arias, 2008)

### 4.3 AUTODEPURACIÓN

La autodepuración es el proceso de recuperación de un curso de agua después de un episodio de contaminación tanto orgánica como inorgánica. En este proceso, los compuestos orgánicos son diluidos y transformados progresivamente por la descomposición bioquímica, aumentando su estabilidad. Cada etapa se caracteriza por su distinta composición física y química. (Ramírez, 2005).

Arenas afirma:

“Los contaminantes que ingresan a los ríos son tratados ya sea por medios físicos o por medios bioquímicos. Entre los mecanismos físicos utilizados, se puede citar el hecho de que los productos flotantes quedan retenidos por las plantas y en las orillas, de esta manera, poco a poco el agua va quedando libre de estos elementos y también los elementos pesados van quedando depositados en el fondo, por lo que el agua queda libre de partículas sedimentables. Sin embargo, uno de los procesos físicos de mayor importancia es la reaireación que se da por saltos y caídas de agua a lo largo del río, ya que estos oxigenan de gran manera. Aparte de los procesos

físicos los ríos emplean mecanismos bioquímicos para liberarse de los contaminantes, como son la neutralización de los ácidos y las bases provenientes de los vertidos. Además, un proceso de gran importancia es en el que los microorganismos existentes en el agua o que se encuentran presentes en los vertidos, como bacterias, algas, hongos, insectos, entre otros, utilizan la materia orgánica existente en las aguas metabolizándola y transformándola.” (Arenas, 2004).

Los elementos que se encuentran en los vertidos son principalmente: carbono, fósforo y nitrógeno. Estos elementos a la vez forman parte de los microorganismos, por lo que las principales transformaciones que sufren se resumen en ciclos: del carbono, nitrógeno y fósforo, siendo estos de gran importancia en la autodepuración.

Para representar los procesos físicos y químicos que dan lugar a la autodepuración de los ríos se han planteado diversos modelos que conjugan diversos procesos dentro de los cuales se encuentran inmersos los ciclos antes citados, tal como el Modelo Qual2Kw.

#### 4.4 DESCRIPCIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO FRÍO

##### 4.4.1 Ubicación

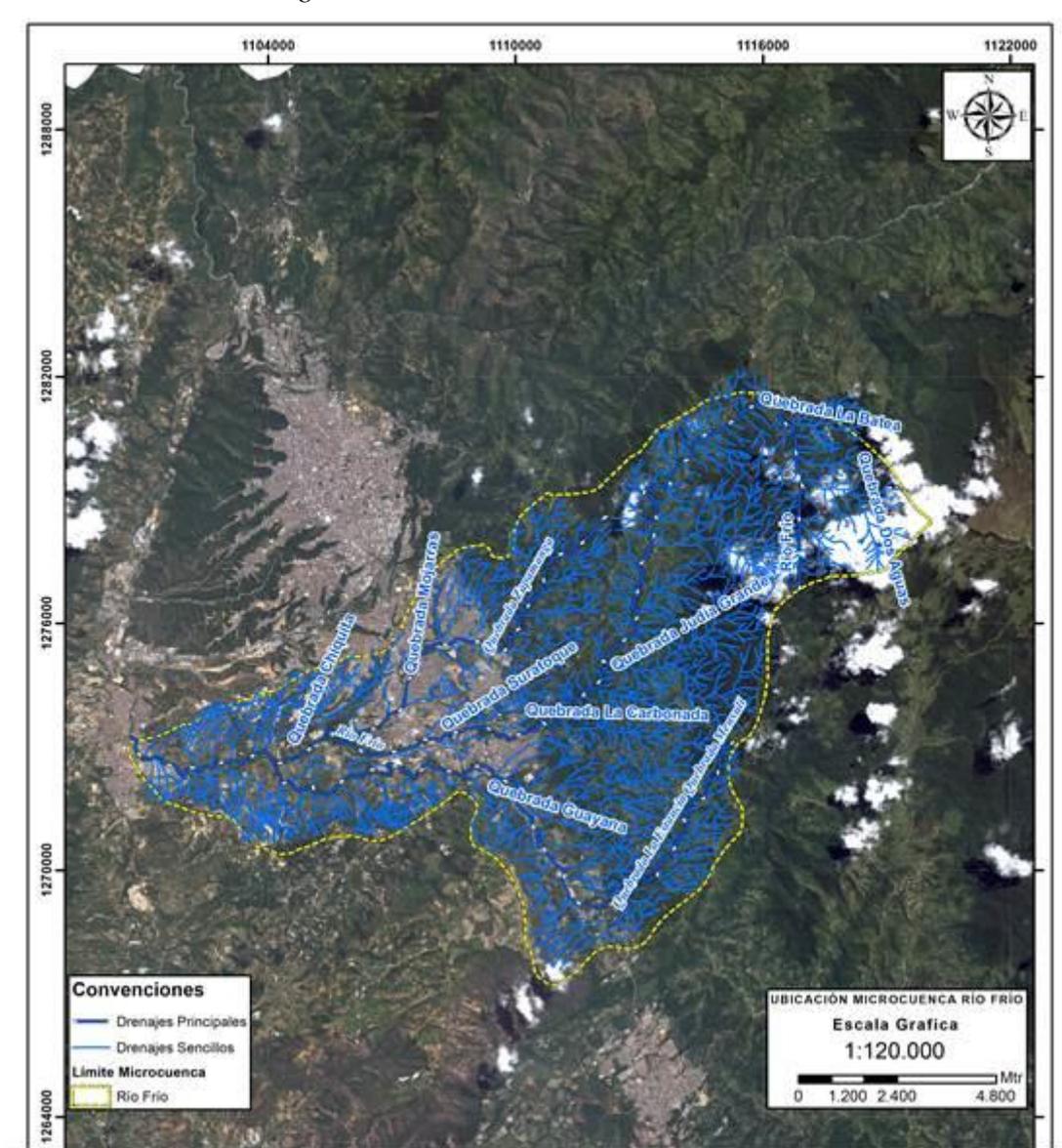
La microcuenca Río Frío es atravesada por numerosas vías tanto en el sector urbano como rural. La Transversal Oriental atraviesa la zona urbana de Floridablanca, desde la divisoria de aguas con la Microcuenca Oro Bajo hasta conectarse con la vía Bucaramanga Piedecuesta. Por el costado oriental bordeando la divisoria de aguas con el Río Tona, asciende la carretera Bucaramanga - Cúcuta hasta La Corcova y la Hacienda La Mariana, donde nace el Río Frío.

La microcuenca Río Frío, alcanza una extensión aproximada de 12089 Hectáreas, ubicándose en ella la mayor parte del territorio municipal de Floridablanca y unas zonas más pequeñas en los municipios de Bucaramanga, Girón, Piedecuesta y Tona.

La altitud de la microcuenca Río Frío varía entre 800 y 3.050 msnm, presenta precipitaciones entre 1.000 y 2.000 mm y su temperatura oscila entre 10 y 25°C, parámetros que le imparten a la microcuenca diversos climas ambientales: cálido semiseco, medio semihúmedo a muy húmedo y frío muy húmedo.

El cuerpo hídrico principal, el Río Frío, nace al Oeste del Alto del Picacho, en donde su curso que es originariamente Norte, en la Corcova se convierte en Suroeste. Se presenta su desembocadura en el Río de Oro, municipio de Girón.

Figura 8. Área de estudio Cuenca Río Frio



Fuente: Elaboración propia (2018).

#### 4.4.2 Hidrología

La microcuenca del Río Frio presenta un área total de 11975 hectáreas y hace parte de la zona hidrográfica del Magdalena Medio; se localiza dentro de la Cuenca del Río Lebrija, y de la subcuenca del Río de Oro identificada por el HIMAT (hoy IDEAM) con el código 2319-9-2. En esta área se localiza gran parte del área de jurisdicción de los municipios de Girón, Floridablanca, Piedecuesta y Bucaramanga.

#### 4.4.3 Uso del Suelo

La mayor parte de las tierras en la microcuenca de Río Frío se han destinado históricamente a las actividades agrícolas, pecuarias y de turismo ecológico. Es mínima la destinación en actividades de construcción y para la agroindustria.

El uso del suelo en la microcuenca ha ido sufriendo transformaciones en el transcurso de tiempo, manifestadas en la incorporación de nuevas tierras en actividades productivas, mediante una ampliación agresiva de la frontera agropecuaria de manera continuada, llegando en la actualidad hasta los límites permisibles, siendo una tarea urgente evitar y controlar el desequilibrio ecológico y la degradación excesiva de sus recursos naturales y ambientales.

*Tabla 4 Clasificación de coberturas y uso de las tierras microcuenca de Rio Frio.*

GRAN GRUPO	GRUPO	SUBGRUPO	Área (Has)	%
1. AREAS DECLARADAS PROTEGIDAS	DMI	DMI FLORIDABLANCA	1.936,5	16
2. TIERRAS AGROPECUARIAS	CULTIVOS AGRÍCOLAS MIXTOS	Cultivos transitorios, permanentes y semipermanentes	1.616,6	14
	POTREROS ABIERTOS	Pastos naturales	174,9	1.5
3. TIERRAS AGROFORESTALES	SILVOAGRICOLA	Café + sombrío	45,4	0.4
	SILVOPASTORIL	Caña-caracol	13,8	0.1
4. BOSQUES	BOSQUE NATURAL	Bosque Natural Secundario	3.725,8	32
		Rastrojo	892,7	7.6
	BOSQUE PLANTADO	Coníferas	315,5	2.7
5. TIERRAS ERIALES	EROSION	Erosión	4,4	0
6. FORMAS DE VEGETACIÓN ESPECIAL	HERBACEAS	Pajonales	5,7	0
7. INFRAESTRUCTURA CONSTRUIDA	URBANA	Zona Urbana y Suburbana	2.853,1	24
TOTAL			11.795,3	100

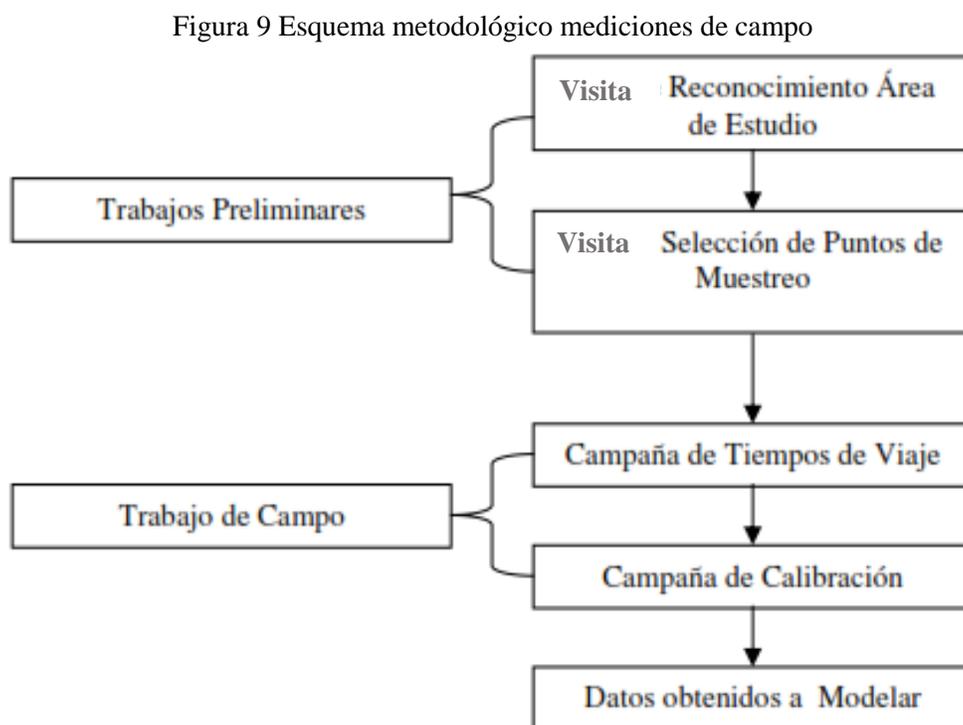
*Fuente: POMCA Rio de Oro*

## 5. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el presente estudio, se basó en cumplir los objetivos específicos a partir del desarrollo de actividades por cada uno de ellos.

### 5.1 METODOLOGÍA DE CAMPO

Para que los datos de campo se obtengan de la mejor manera posible, es de gran importancia que el trabajo se realice siguiendo un esquema ordenado y metodológico. De esta forma, se reducen las fuentes de error que se podrían introducir debido a un trabajo descoordinado y sin planificación. Para este proyecto el trabajo realizado se dividió como se detalla a en la Figura 9:



Fuente: Elaboración propia (2018).

La secuencia de estos pasos es bastante simple y lógica, pero es de gran importancia respetarla y no improvisar pasos. Además, es fundamental acatar las responsabilidades establecidas, ya que éstas se formulan con el fin de garantizar el éxito y representatividad de los datos.

## 5.2 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA

La información de cantidad y calidad del agua utilizada para ingresar al modelo de Qual2Kw fue recopilada durante dos jornadas de monitoreo, una en temporada de sequía el día 22 de marzo y la otra en temporada de lluvias el día 24 de mayo del presente año, el monitoreo se realizó a los 8 puntos de vertimientos y los 3 puntos de monitoreo en el tramo de río frío a modelar, el cual inicia en las coordenadas X:1105199 Y:1273110 en el punto de monitoreo RF-P y finaliza en la desembocadura de río frío en las coordenadas X:1100661 Y:1273269.

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que se monitorearon en cada punto de muestreo y a partir de los cuales se alimentó el modelo fueron: conductividad, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, DBO5 total, DBO5 filtrada, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, fósforo orgánico, fósforo inorgánico, alcalinidad, temperatura y caudal.

Tabla 5 Puntos de monitoreo en el Río Frío

Puntos de Monitoreo		Elevación (m.s.n.m)	Distancia Acumulada (Km)	Campaña Septiembre Caudal (m3/s)	Campaña Octubre Caudal (m3/s)
<i>EL PÓRTICO</i>	RF-P	789	0.4	0.4811	0.8932
<i>EL CAUCHO</i>	RF-B	755	1.2	1.2333	1.8515
<i>CANEYES</i>	RF-1A	715	4.6	1.5714	2.4577

Fuente: Elaboración propia (2018)

Para efectos de la modelación, teniendo en cuenta que al modelo QUAL2Kw se deben ingresar valores de DBO última, se asumió una constante cinética para la DBO (KDBO) igual a  $0.23 \text{ d}^{-1}$  de acuerdo a lo reportado en la literatura, puesto que esta variable no fue determinada en el laboratorio solo se halló la DBO<sub>5</sub>. A partir de los valores de DBO5 filtrada se calcularon los valores de DBO rápida que deben ingresarse al modelo, en el caso de la DBO lenta, no se contó con la medición del carbono orgánico disuelto, por lo cual se asumió que dadas las características de la corriente la DBO lenta se puede aproximar a cero. Para el caso de los detritus, se asumió que la DBO última de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) es igual a los detritus. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas.

$$DBO_{Utotal} = DBO_{UDetritus} + DBO_{Urapida} + DBO_{Ulenta} \quad (10)$$

$$DBO_{Ufiltrada} = \frac{DBO_5 \text{ filtrada}}{1 - e^{-k-5}} \quad (11)$$

$$DBO_{rapida} = DBO_{Ufiltrada} \quad (12)$$

$$DBO_{Ussv} = g \frac{SSV}{L} * \frac{40g \text{ C}}{g \text{ SSV}} * \frac{2.69g \text{ O}_2}{g \text{ C}} \quad (13)$$

$$DBO_{UDetritus} = DBO_{U_{SSV}} \quad (14)$$

$$DBO_{U_{lenta}} \approx 0 \quad (15)$$

Los valores de DBO lenta, DBO rápida y Detritus se calcularon a partir de las ecuaciones anteriores para ser ingresados al modelo, los demás parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que fueron alimentados al modelo no tuvieron ninguna modificación o ajuste y se ingresaron tal cual están descritos en los resultados entregados por el laboratorio.

### 5.3 DEFINICIÓN DE CONSTANTES HIDRÁULICAS

Las constantes hidráulicas se ingresaron al modelo de calidad QUAL2Kw por el método de Manning, esto teniendo en cuenta los monitoreos de la CDMB durante el año 2017, se encontraba la información necesaria para determinar los valores por tramos que exige el método. Los valores de las constantes hidráulicas que se determinaron para el río Frio se presentan a continuación en la Tabla 5.

*Tabla 6 Definición de constantes hidráulicas*

Tramo	Pendiente	Coefficiente de Manning	Ancho, m
El Pórtico – El Caucho	2.85	0.08	14
El Caucho – Caneyes	0.88	0.08	14.5

Fuente: Elaboración propia (2018)

### 5.4 DATOS Y SITIOS DE MONITOREO

Los lugares de muestreo se establecieron en basa a los puntos de monitoreos ya establecidos por la CDMB y a los vertimientos encontrados dentro del tramo en estudio, a continuación se mencionan los sitios de monitoreo.

*Tabla 7 Ubicación puntos de monitoreo*

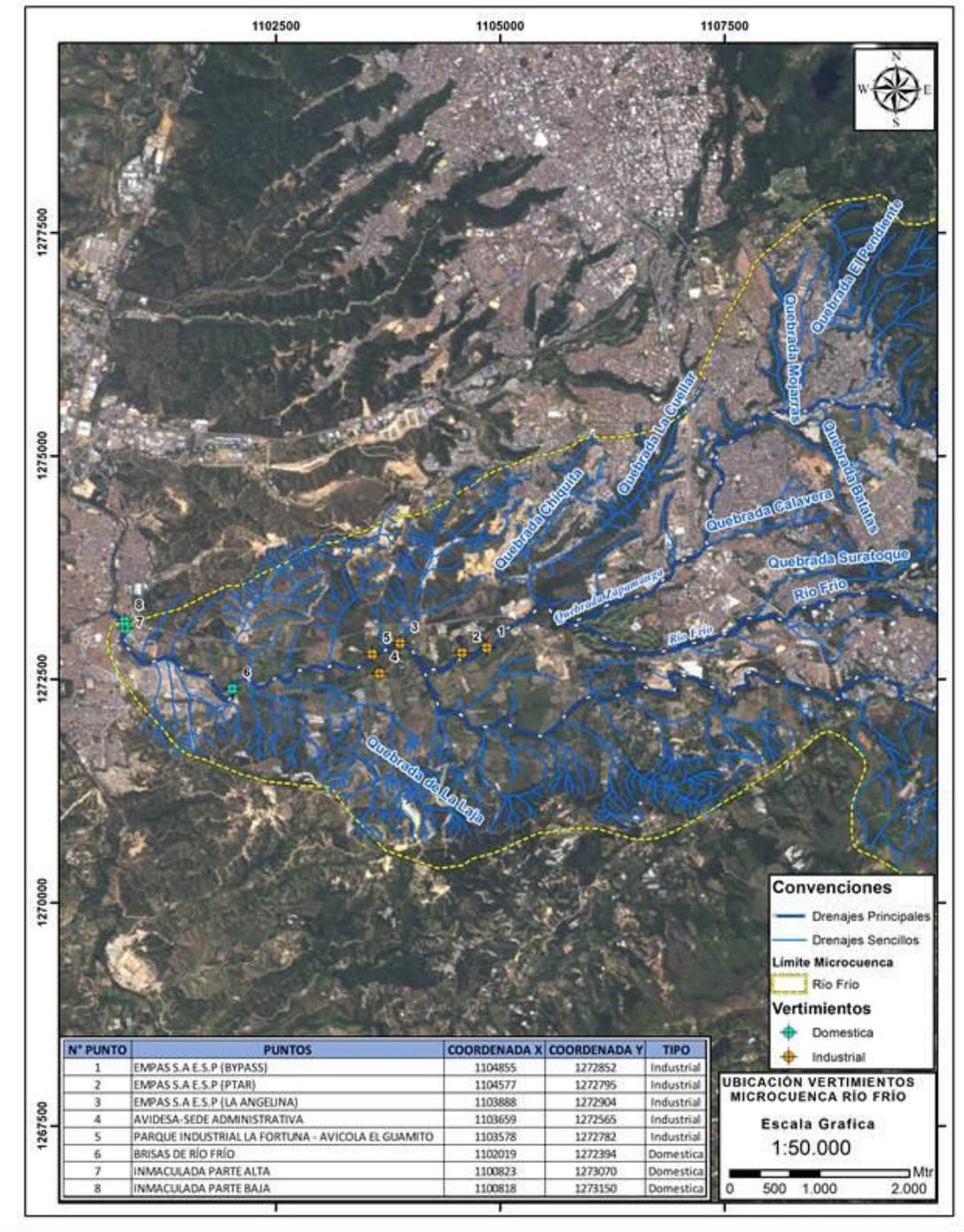
Tipo	Nombre	Coordenadas	
		Coordenada X	Coordenada Y
Vertimiento Industrial	EMPAS S.A E.S.P (BYPASS)	1105406	1273353

<i>Tipo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Coordenadas</i>	
		<i>Coordenada X</i>	<i>Coordenada Y</i>
Vertimiento Industrial	EMPAS S.A E.S.P (PTAR)	1104577	1272795
Vertimiento Industrial	EMPAS S.A E.S.P (LA ANGELINA)	1103888	1272904
Vertimiento Industrial	AVIDESA	1103659	1272565
Vertimiento Industrial	AVICOLA EL GUAMITO	1103578	1272782
Vertimiento Domestico	BRISAS DE RIO FRIO	1102019	1272394
Vertimiento Domestico	INMACULADA PARTE ALTA	1100823	1273070
Vertimiento Domestico	INMACULADA PARTE BAJA	1100818	1273150
Punto Monitoreo	EL PORTICO RF-P	1105199	1273110
Punto Monitoreo	EL CAUCHO RF-B	1104257	1272587
Punto Monitoreo	LOS CANEYES RF- 1A	1100822	1273097

*Fuente: Elaboración propia (2018)*

Los datos requeridos por el software Qual2Kw para llevar a cabo la modelación y simulación del río frío, fueron tomados en muestras puntuales durante dos jornadas de muestreo una en época de lluvia y una en época de estiaje, tomando datos in situ y datos para el análisis de laboratorio. Los datos fueron: temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto, Sólidos inorgánicos, Nitrógeno orgánico, NH<sub>4</sub>, Nitratos, Alcalinidad, DBOC rápida y DBO lenta.

Figura 10. Ubicación de los vertimientos tramo de estudio Rio Frio.



Fuente: Elaboración propia (2018)

## 5.5 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

Para implementar el modelo de calidad del agua QUAL2Kw en el río Frio se partió de la revisión detallada de las hojas de trabajo del QUAL2Kw para identificar los datos de entrada del modelo, se definió la información con la que se contaba y la información que era necesario establecer de acuerdo a la literatura. En la tabla 8 se resumen los datos de entrada del programa y el chequeo realizado.

*Tabla 8 Datos de entrada del modelo.*

Hoja de trabajo del modelo	Descripción	Información existente o asumida de acuerdo a la bibliografía
QUAL2K	Información general de la corriente	Si
Headwater	Caudal y caracterización de la cabecera del río	Si
Reach	Segmentación de la corriente, georreferenciación, y constantes hidráulicas	Si
Air Temperature, Dew Point Temperature, Wind Speed, Cloud Cover, Shade, Solar	Variables meteorológicas	Si
Point Sources	Información de ubicación, caudal y calidad de las fuentes puntuales	Si
Diffuse Sources	Información de ubicación, caudal y calidad de las fuentes difusas	Si
Rates	Valores de los parámetros cinéticos y las velocidades de asentamiento de los diferentes constituyentes simulados por el modelo.	Si
Hydraulic Data, Temperature Data, WQ Data	Información de ubicación, caudal y calidad medida en los puntos de monitoreo sobre la corriente.	Si

Fuente: Elaboración propia (2018)

## 5.6 DEFINICIÓN DE CONSTANTES CINÉTICAS A CALIBRAR

El artículo 7 del Decreto 3930 del 2010 establece los siguientes parámetros mínimos a tener en cuenta para implementar los modelos de simulación de la calidad del agua con fines de ordenamiento del recurso hídrico: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DB05), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, pH, temperatura, oxígeno disuelto y caudal.

Teniendo en cuenta los parámetros que permite modelar el QUAL2Kw y las constantes cinéticas involucradas, así como lo que establece la norma vigente para los modelos implementados con fines de ordenamiento, se definió calibrar las constantes cinéticas de la Tabla 8.

*Tabla 9 Constantes cinéticas para calibración*

Constante Cinética	Abreviación	Unidades
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO- DBO slow	1/d
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d
Tasa de nitrificación de amonio	Tasa Nitrificación	1/d
Coficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	CT-Desnitrificación Sed.	m/d
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d
Velocidad de sedimentación del Fosforo Orgánico	VS-PO	1/d
Velocidad de sedimentación del Fosforo Inorgánico	VS-PI	m/d
Hidrolisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d
Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Vel. Sedimentación POM	1/d

Fuente: Chapra, 1997; Kannel et.al., 2007; Pelletier et.al., 2003.

Los valores iniciales de las constantes cinéticas son los que traen el ejemplo del programa al descargarse, se revisó que los valores estuvieran en los rangos establecidos en la literatura (Tabla 2) y a partir de estos valores se inició la calibración automática del modelo.

## 5.7 CALIBRACIÓN

A través de esta etapa es posible detallar las deficiencias en un primer paso que tiene el modelo con los datos obtenidos en río frío, por ello es necesario la calibración del modelo al entorno de la zona de estudio para este trabajo.

Básicamente en el proceso de calibración consiste en un procedimiento de prueba y error, no todos los parámetros se deben calibrar debido que el modelo se puede ajustar automáticamente con los datos de la zona de estudio, dicho procedimiento consiste en buscar un rango donde los datos del modelo se vayan ajustando con los datos obtenidos de la zona de estudio.

## 5.8 METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN

Una vez validado y calibrado el modelo con respecto a las condiciones del entorno y del área en estudio, se definen las variables las cuales forman parte de la simulación, para establecer o suponer unos resultados a futuros en base de las hipótesis planteadas.

El propósito último de la simulación o experimentación con el modelo es obtener información acerca del comportamiento del sistema para que esto nos ayude en la toma de decisiones, se puede conocer empíricamente cómo se comporta dicho sistema en sentido absoluto, o comparativamente, para poder contrastar varias configuraciones alternativas del sistema.

## 6. MODELACIÓN

### 6.1 JORNADA DE MUESTREO

En el presente trabajo se contó con dos jornadas de monitoreo para obtener los datos físicos, químicos e hidráulicos a ingresar al modelo, las campañas se realizaron en un tiempo de lluvia y en un periodo de sequía. En las dos campañas de muestreo se evaluaron igualmente los puntos de monitoreo establecidos por la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga CDMB, analizando parámetros in situ y tomando muestras para análisis en el laboratorio de la corporación.

Durante las dos jornadas se monitoreo todo el tramo en estudio observando los puntos de descargas, hallando 5 vertimientos industriales y 3 vertimientos de asentamientos humanos o vertimientos domésticos, cabe mencionar que entre los vertimientos industriales encontramos 2 vertimientos de la PTAR Rio Frio, en los puntos de vertimientos se midieron con multiparametro los parámetros in situ (Temperatura ambiente, temperatura agua, pH, oxígeno disuelto y conductividad) y se tomaron muestras puntuales en recipientes de 2,5 L y 1 L el cual se preservó con un 1 ml de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  para la DQO para posterior análisis en laboratorio.

### 6.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CABECERA DE LA CORRIENTE

El tramo a modelar inicia en el punto de monitoreo el pórtico RF-P las características de la cabecera se tomaron 200 metros aguas arriba, se tomaron los datos solicitados por el modelo de Qual2Kw a continuación los resultados:

*Tabla 10 Resultados a la cabecera de la corriente*

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>	<i>Resultado</i>
Caudal	m <sup>3</sup> /s	0.893
Temperatura Agua	°C	24.7

<i>Parámetro</i>	<i>Unidades</i>	<i>Resultado</i>
Conductividad	µmhos	1.464
Sólidos Inorgánicos	mgD/L	56
Oxígeno Disuelto	Mg/L	7.3
DBO Lenta	mgO <sub>2</sub> /L	48
DBO rápida	mgO <sub>2</sub> /L	48
Nitrógeno Orgánico	µgN/L	1.14
NH <sub>4</sub> Nitrógeno	µgN/L	2.02
NH <sub>3</sub> Nitrógeno	µgN/L	1.01
Alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L	48.3
pH	s.u.	7.8

*Fuente: Elaboración propia (2018).*

### 6.3 ALIMENTACIÓN DEL MODELO

Se realizó la alimentación del modelo de calidad del agua QUAL2Kw tal y como se describió en la metodología, la información general ingresada en cada hoja de trabajo del programa se puede resumir de la siguiente forma: parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tomados en campo en las campañas de monitoreo, descripción de los tramos del río, constantes hidráulicas, selección de las constantes cinéticas de calibración, condiciones meteorológicas (temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, velocidad del viento, nubosidad y sombra), y la información fisicoquímica correspondiente a fuentes puntuales y difusas.

En la Figura 11 se presenta la hoja de trabajo inicial del QUAL2Kw, en la cual se ingresó entre otras cosas el nombre de la corriente, la fecha, la zona horaria en la cual se ubica la corriente, y se especificaron algunas opciones para la ejecución del modelo.

Figura 11 Hoja de trabajo inicial QUAL2Kw

1 **QUAL2Kw (version 5.1)**

2 **Stream Water Quality Model** Open File Run VBA Run Fortran

3 **Greg Pelletier, Steve Chapra, and Hua Tao**

4 **Department of Ecology and Tufts University**

---

7 **System ID:**

River name	Rio Frio (Santander, Colombia)
Saved file name	RF_2018-05-22
Directory where the input/output files are saved	D:\Users\INNOVATEC.C\Desktop\CDBM\Qual2Kw\Qual2k
Month	10
Day	19
Year	2017
Local standard time zone relative to UTC	-5 hours
Daylight savings time	Yes

16 **Simulation and output options:**

Calculation step	11.25	minutes
Number of days	5	days
Solution method (integration)	Euler	
Solution method (pH)	Brent	
Simulate hyporheic exchange and pore water quality	No	
Display dynamic diel output	Yes	
State variables for simulation	All	
Simulate sediment diagenesis	Option 1	
Simulate alkalinity change due to nutrient change	Yes	
Write dynamic output of water quality	No	
Program determined calc step	11.25	minutes
Time elapsed during last model run	0.18	minutes
Time of sunrise	9:15 AM	
Time of solar noon	2:45 PM	

Navigation: < > QUAL2K Headwater Reach Reach Rates Initial Conditions Air Temperature Dew Point Temperature

En la Figura 12 se presenta la hoja de trabajo Headwater, en la cual se ingresó el caudal y la información fisicoquímica de la cabecera de la corriente.

Figura 12 Hoja de trabajo Headwater

1 **QUAL2Kw**

2 **Stream Water Quality Model** Open File Run VBA Run Fortran

3 **Rio Frio (Santander, Colombia) (05/22/2018)**

4 **Headwater and Downstream Boundary Data:**

---

7 Headwater Flow	0.893	m3/s								
8 Prescribed downstream boundary?	No									
9 Headwater Water Quality	Units	12:00 a. m.	01:00 a. m.	02:00 a. m.	03:00 a. m.	04:00 a. m.	05:00 a. m.	06:00 a. m.	07:00 a. m.	08:00 a. m.
10 Temperature	C	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30
11 Conductivity	umhos	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
12 Inorganic Solids	mgD/L	56.00	56.00	56.00	56.00	56.00	56.00	56.00	56.00	56.00
13 Dissolved Oxygen	mg/L	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85
14 CBODslow	mgO2/L	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
15 CBODfast	mgO2/L	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00	33.00
16 Organic Nitrogen	ugN/L	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
17 NH4-Nitrogen	ugN/L	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
18 NO3-Nitrogen	ugN/L	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38
19 Organic Phosphorus	ugP/L	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
20 Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
21 Phytoplankton	ugA/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22 Detritus (POM)	mgD/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23 Pathogen	cfu/100 mL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24 Generic constituent	user defined	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25 Alkalinity	mgCaCO3/L	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00
26 pH	s.u.	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14

Navigation: < > QUAL2K Headwater Reach Reach Rates Initial Conditions Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover Shade Sol



En la Figura 15 se presenta la hoja de trabajo “Rates”, en la cual se definieron las constantes cinéticas a calibrar y sus valores iniciales, también se definió en esta hoja de trabajo los parámetros del algoritmo genético.

Figura 15 Hoja de trabajo Rates

Parameter	Value	Units	Symbol	Auto-cal	Min value	Max value
<b>Stoichiometry:</b>						
Carbon	40	gC	gC	No	30	50
Nitrogen	7.2	gN	gN	No	3	9
Phosphorus	1	gP	gP	No	0.4	2
Dry weight	100	gD	gD	No	100	100
Chlorophyll	1	gA	gA	No	0.4	2
<b>Inorganic suspended solids:</b>						
Settling velocity	0.06128	m/d	$v_i$	Yes	0	2
<b>Oxygen:</b>						
Reaeration model	Internal			f(u h)		
Temp correction	1.024		$\theta_a$			
Reaeration wind effect	None					
O2 for carbon oxidation	2.69	gO <sub>2</sub> /gC	$r_{oc}$			
O2 for NH4 nitrification	4.57	gO <sub>2</sub> /gN	$r_{on}$			
Oxygen inhib model CBOD oxidation	Exponential					
Oxygen inhib parameter CBOD oxidation	0.60	L/mgO <sub>2</sub>	$K_{soof}$	No	0.60	0.60
Oxygen inhib model nitrification	Exponential					

En la Figura 16 se presenta la hoja de trabajo “WQ Data”, en la cual se ingresó la información de calidad del agua de los puntos de monitoreo sobre la corriente.

Figura 16 Hoja de trabajo WQ Data

Distance	Cond (umhos)	ISS (mgD/L)	DO (mgO2/L)	CBODs (mgO2/L)	CBODf (mgO2/L)	Norg (ugN/L)	NH4 (ugN/L)	NO3 (ugN/L)
km	data	data	data	data	data	data	data	data
13.60	294.71	8.77	8.26			1648.97	85.71	168.57
13.39	498.00	8.51	4.77			3043.66	4789	1704.29
8.08	483.43	3.26	3.80			3230.17	3826	1910.00
3.83	504.14	1.14	5.96			3105.26	1760	2781.43
0.42	541.86	14.09	7.04			3341.14	746	3368.57

## 6.4 CALIBRACIÓN Y CONFIRMACIÓN DEL MODELO

Se emplearon los datos de calidad del agua y los datos correspondiente a la campaña de monitoreo de marzo para realizar la calibración del modelo, teniendo en cuenta que esta campaña correspondió a tiempo seco. Por otra parte, los datos de campo recopilados en la campaña de monitoreo de mayo (tiempo de lluvia) se utilizó para la confirmación de las constantes cinéticas en la calibración del modelo.

Primeramente la calibración del modelo de calidad, se precisó el modelo de reaireación que más se ajustaba a las características de la corriente de rio frio, para esto, se ensayaron todos los modelos que se describieron en la Tabla 2, hasta encontrar que el modelo USGS (pool-riffle) es el que se ajusta con mayor precisión.

Sabiendo que el software de QUAL2Kw realiza la calibración automática de las constantes cinéticas mediante algoritmos genéticos para obtener un margen de error mínimo entre los datos

simulados por el modelo y los datos medidos en campo, se eligió la función objetivo recomendada por Kannel et. al y Pelletier et al. Que se presenta a continuación.

$$f(x) = \left[ \sum_{i=1}^q W_i \right] \left[ \sum_{i=1}^q \frac{1}{W_i} \left[ \frac{\frac{\sum_{j=1}^m O_{i,j}}{m}}{\left[ \frac{\sum_{j=1}^m (P_{i,j} - O_{i,j})^2}{m} \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \right]$$

Dónde:  $O_{i,j}$  es el valor observado,  $P_{i,j}$  es el valor predicho por el modelo,  $m$  es el número de pares de valores observados y predichos,  $W_i$  es el factor de peso y  $q$  es el número de variables de estado.

El valor asignado a cada variable se estableció de acuerdo a la importancia del parámetro en la modelación y a la confiabilidad del dato, por esta razón variables como conductividad, oxígeno disuelto, pH y sólidos suspendidos totales, tuvieron pesos más elevados que las otras variables fisicoquímicas.

La función objetivo se programó en la hoja de trabajo “Fitness” del software y se enlazó al algoritmo genético y las constantes cinéticas a calibrar en la hoja de trabajo “Rates”. En el algoritmo genético los valores de velocidad de mutación inicial, velocidad de mutación mínima y máxima, y el número de dígitos para codificar el genotipo correspondieron a los valores que trae el ejemplo del programa. El número de poblaciones y de generaciones se fue incrementando y para cada combinación se calibró el modelo, al final se seleccionó una población de 50 y un número de generaciones de 20 para la calibración definitiva, puesto que representaba el mejor ajuste en un menor tiempo de cálculo.

Después de ingresar toda la información de la campaña de monitoreo seleccionada para la calibración al modelo, se estableció el modelo de reaireación a utilizar, se programó la función objetivo, se eligieron las constantes cinéticas a calibrar y se definieron los parámetros del algoritmo genético, se ejecutó la opción “Run Auto-cal” del modelo. Al finalizar la calibración se obtuvieron las gráficas con los resultados para los parámetros modelados. Para verificar los resultados de la calibración se determinaron los porcentajes de error entre los datos de campo en las estaciones de monitoreo y los datos simulados por el modelo.

Finalizado el proceso de calibración, se alimentó el modelo con los datos de la campaña de monitoreo seleccionada para la confirmación (temporada de lluvia), se mantuvieron fijas las constantes cinéticas calibradas y se ejecutó la opción “RUN Fortran” del modelo para correr el programa con los nuevos datos ingresados. Al finalizar la ejecución se obtuvieron las gráficas con los resultados para los parámetros modelados.

## 7. SIMULACIÓN

Los escenarios hipotéticos de simulación son representaciones del comportamiento de una sustancia contaminante en un cuerpo hídrico, que ha sido modelada por medio del programa de QUAL2Kw, y a la cual se le aplica un tratamiento que también es simulado por el programa.

Una vez se ha ejecutado, calibrado y verificado el modelo de simulación, se procede a establecer escenarios con él para que así, sea utilizado como una herramienta de planificación. El modelo de simulación implementado para río frío, de acuerdo a su calibración, tiene validez para niveles medio a bajos. Con esto, ya se tiene el modelo de simulación listo para la formulación de escenarios.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los escenarios de saneamiento propuestos para río frío.

### 7.1 Escenario 1: Reducción de hasta un 60% de los niveles de SST y DBO<sub>5</sub> en los ocho (8) vertimientos de agua residual identificados.

Se proponen reducciones del 60% de las cargas en los vertimientos analizados dentro del tramo en estudio de la modelación para río frío, con el fin de evaluar el tramo que cumpla con el Decreto 1594/84 para la destinación del recurso. Con lo anterior se pretende evidenciar el comportamiento en el río si se llegara a implementar algún sistema de tratamiento o mejorar los existentes que lograra reducir estos niveles de contaminación actuales.

*Tabla 11 Escenario 1 Simulación*

Vertimiento	Sin Remoción (máxima)		60% Remoción	
	DBO	SST	DBO	SST
EMPAS S.A E.S.P (Bypass)	390	372	156	148.8
EMPAS S.A E.S.P (PTAR)	110	94	44	37.6
EMPAS S.A E.S.P (La Angelina)	378	320	151.2	128
Avidesa	40	42	16	16.8
Avícola el Guamito	42	96	16.8	38.4
Brisas de río frío	31.3	50	12.5	20
Inmaculada Parte Alta	8.25	13.2	3.3	5.28
Inmaculada Parte Baja	22	35.2	8.8	14.08

*Fuente: Elaboración propia.*

7.2 Escenario 2: Reducción de hasta un 80% de los niveles de SST y DBO<sub>5</sub> en los ocho (8) vertimientos de agua residual identificados.

Se proponen reducciones del 80% de las cargas en los vertimientos analizados dentro del tramo en estudio de la modelación para río frío (porcentaje de remoción en carga propuesto a través del Decreto 1595 de 1984 para vertimientos a un cuerpo).

*Tabla 12 Escenario 2 Simulación*

Vertimiento	Sin Remoción (máxima)		80% Remoción	
	DBO	SST	DBO	SST
EMPAS S.A E.S.P (Bypass)	390	372	78	74.4
EMPAS S.A E.S.P (PTAR)	110	94	22	18.8
EMPAS S.A E.S.P (La Angelina)	378	320	75.6	64
Avidesa	40	42	8	8.4
Avícola el Guamito	42	96	8.4	19.2
Brisas de río frío	31.3	50	6.26	10
Inmaculada Parte Alta	8.25	13.2	1.65	2.64
Inmaculada Parte Baja	22	35.2	4.4	7.04

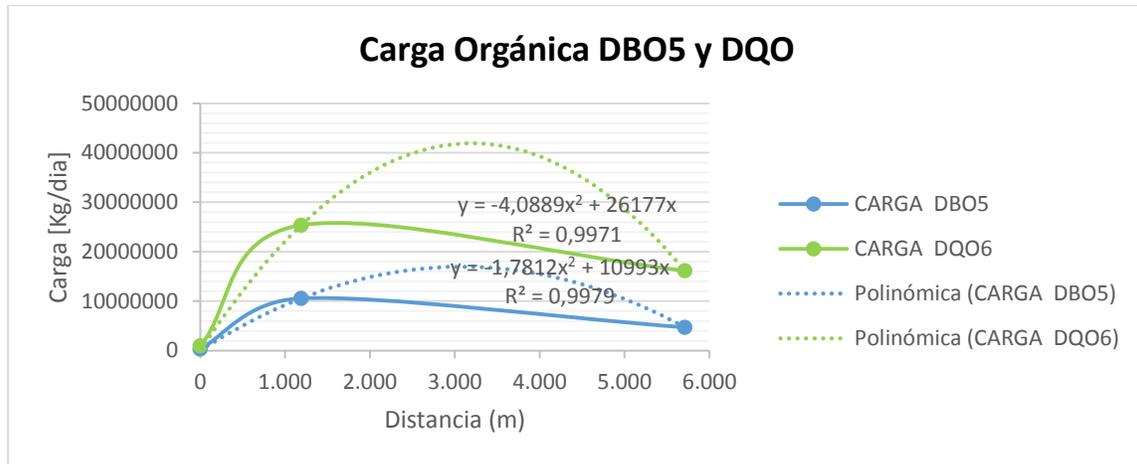
Fuente: Elaboración propia.

## 8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 8.1 Resultados Campañas de Monitoreo

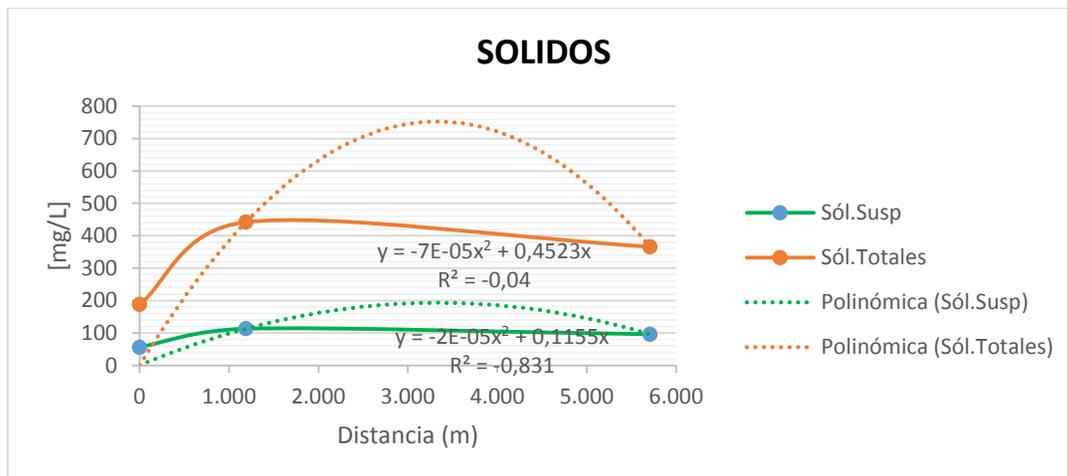
A continuación se presentan los resultados de las campañas de monitoreo en río frío de los parámetros utilizados para el modelamiento en el software QUAL2Kw.

Figura 17 Cargas Orgánicas Campaña 1



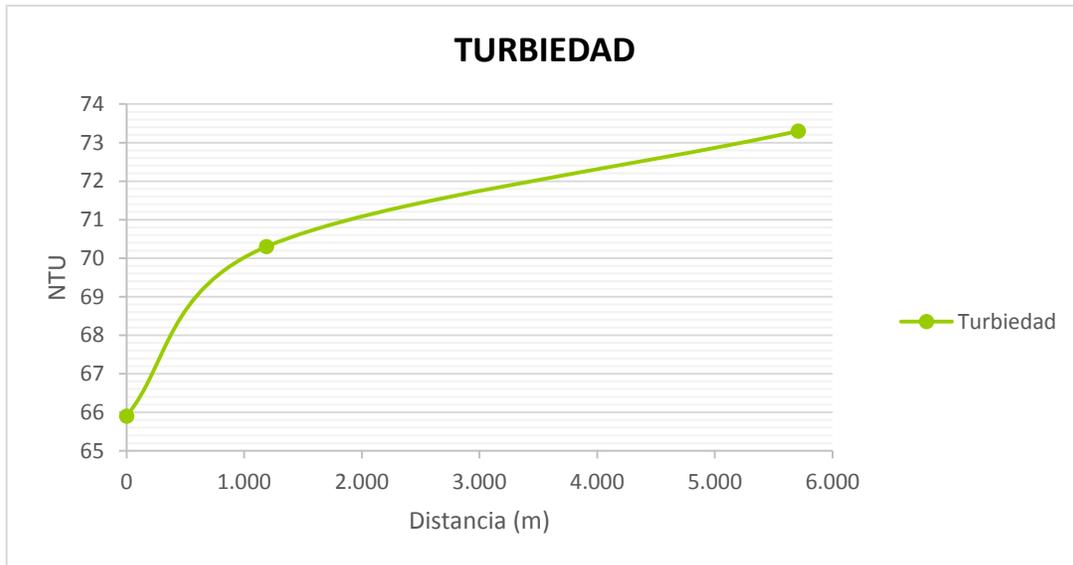
Se puede observar en la gráfica anterior que la carga orgánica de la DBO5 y DQO al inicio del tramo tiene valores en un rango permisible, después del kilómetro 1 se realiza la descargar de la PTAR de río frío y dichas cargas orgánicas aumentan dramáticamente y después del kilómetro 4 las cargas comienzan a disminuir.

Figura 18 Sólidos Campaña 1



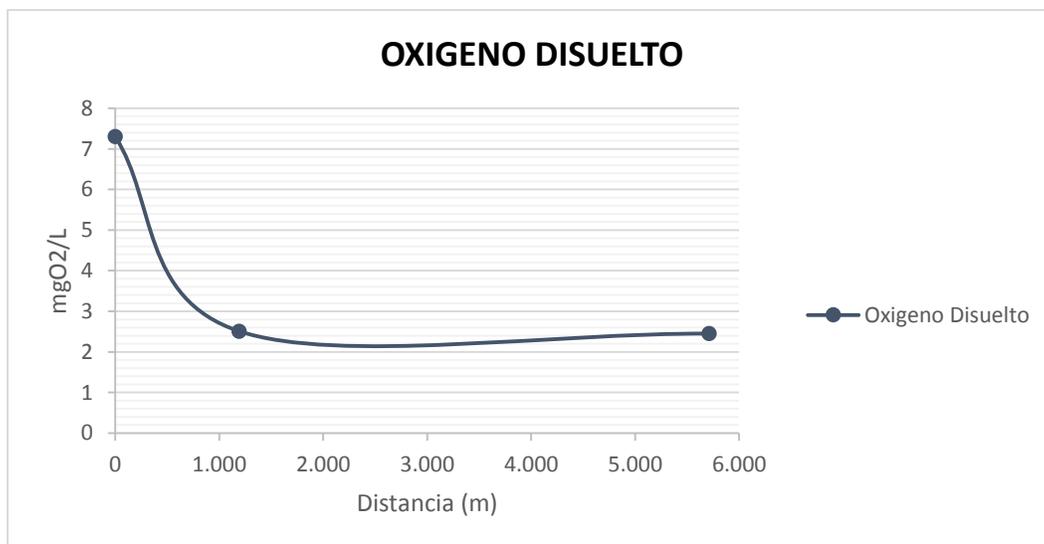
En la figura 18 se observa el comportamiento de los sólidos suspendidos y solidos totales, a partir del kilómetro 1 asciende el nivel de los sólidos a un máximo de 472 mg/L debido a la descarga de la PTAR en el tramo restante la concentración de los sólidos disminuye.

*Figura 19 Turbiedad Campaña 1*



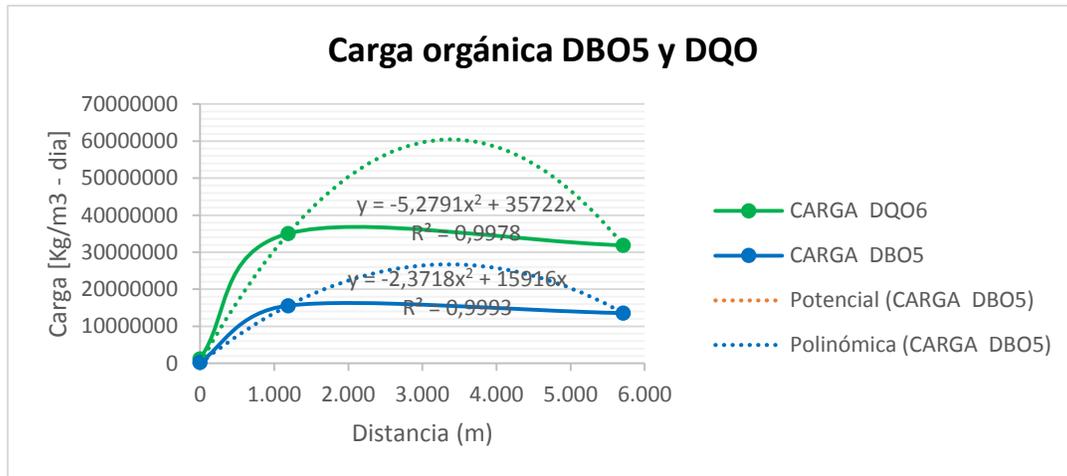
Se observa en la figura 19 la turbiedad en todo el tramo en estudio incrementa exponencialmente, a partir del kilómetro 1 la turbiedad asciende y el rio no tiene la capacidad de autodepuración por ello la turbiedad no desciende.

*Figura 20 Oxígeno Disuelto Campaña 1*



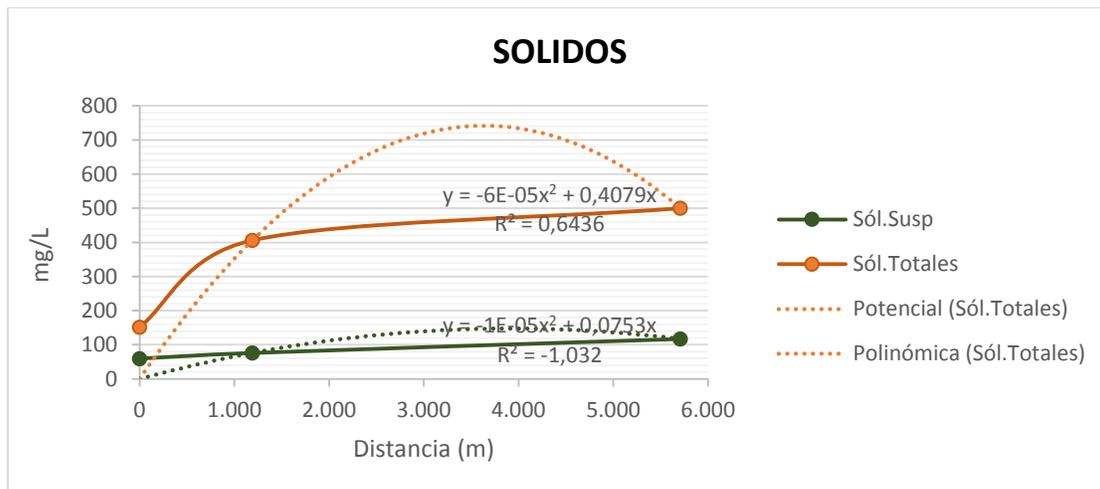
El oxígeno disuelto en el tramo de estudio disminuye después del kilómetro 1 obteniendo un valor mínimo de 2.1 mgO<sub>2</sub>/L el río no tiene las propiedades de recuperación y por ello el oxígeno no supera el objetivo de calidad.

Figura 21 Cargas Orgánicas Campaña 2



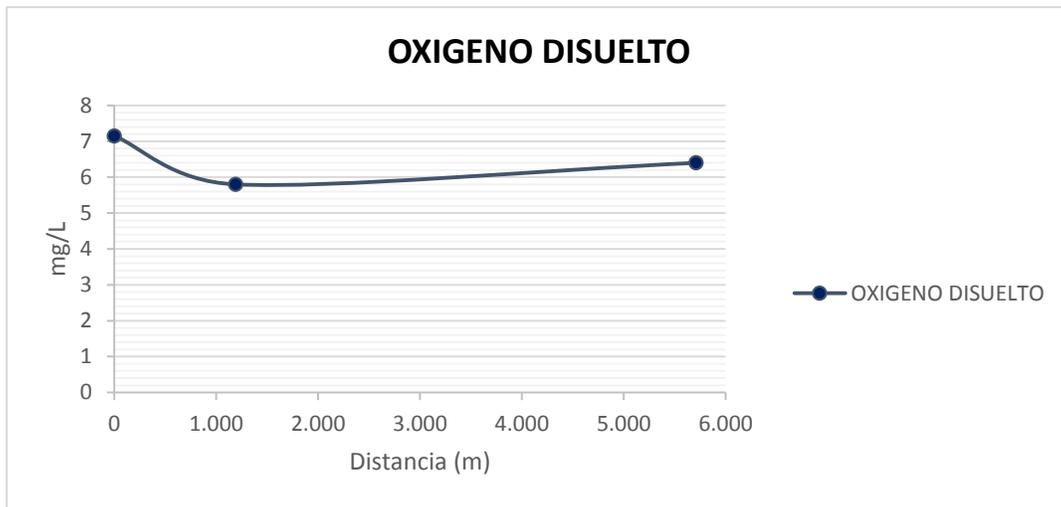
Se puede observar en la figura 21 la carga orgánica de la DBO5 y DQO al inicio del tramo tiene valor considerable bajo, después del kilómetro 1 se realiza la descargar de la PTAR de río frío y dichas cargas orgánicas aumentan dramáticamente y después del kilómetro 4 las cargas comienzan a disminuir.

Figura 22 Sólidos Campaña 2



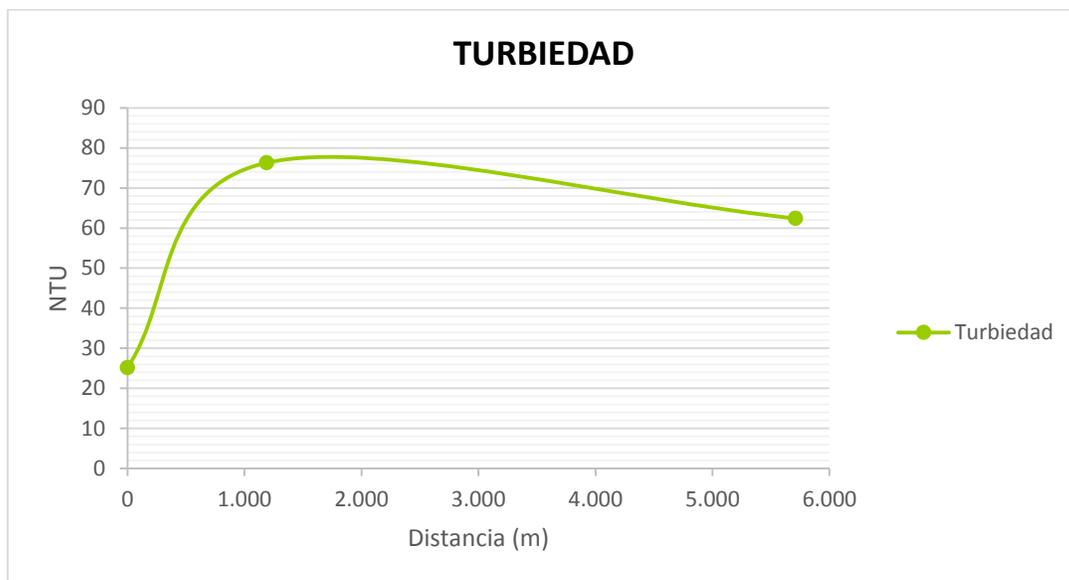
En la figura 22 se observa el comportamiento de los sólidos suspendidos y sólidos totales, a partir del kilómetro 1 asciende el nivel de los sólidos y de ahí en adelante sigue en aumento la concentración de los sólidos.

Figura 23 Oxígeno Disuelto Campaña 2



El oxígeno disuelto en el tramo de estudio disminuye después del kilómetro 1 después comienza a aumentar considerablemente recuperando su capacidad de oxígeno disuelto.

Figura 24 Turbiedad Campaña 2



Se observa en la figura 24 el comportamiento de la turbiedad; en el primer kilómetro del tramo aumenta drásticamente después del kilómetro 2 comienza a disminuir a medida que se avanza en el tramo.

## 8.2 Resultados Modelamiento

A continuación se presentan los resultados de la calibración y confirmación del modelamiento, teniendo en cuenta que la calibración se realizó a partir de la información de la campaña de monitoreo realizada en tiempo seco (marzo), y se ejecutó el modelo en modo “Auto-cal” para encontrar las constantes cinéticas de la corriente de río frío. Por otra parte, la confirmación se realizó a partir de la información de la campaña de monitoreo realizada en tiempo de lluvia (mayo) y se mantuvieron fijas las constantes cinéticas calibradas.

La calibración del modelo de calidad de agua mediante el algoritmo genético (AG) y la función objetivo recomendada por Kannel et. al y Pelletier et al., permitió determinar las constantes cinéticas que se adaptan mejor para río frío. En la Tabla 13 se presenta las constantes cinéticas calibradas para el tramo en estudio, se observa que los valores encontrados por el modelo se encuentran en los rangos establecidos en la literatura y similares a estudios anteriores.

Tabla 13 Constantes calibradas para el tramo de río frío

Constante Cinética	Abreviación	Unidades	Valor	Rango
Velocidad de sedimentación de sólidos suspendidos inorgánico	VS - SSI	m/d	0.9520	0 - 2
Tasa de hidrólisis de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO slow	1/d	1.2688	0 - 5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de lenta descomposición	Tasa hidrólisis DBO- DBO slow	1/d	0.1070	0 - 0.5
Tasa de oxidación de la materia orgánica de rápida degradación	T. Oxidación DBO fast	1/d	2.0577	0 - 5
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	Hidrólisis NO	1/d	1.3223	0 - 5
Velocidad de sedimentación de nitrógeno orgánico	VS-NO	m/d	0.7698	0 - 2
Tasa de nitrificación de amonio	Tasa Nitrificación	1/d	4.9188	0 - 10

Coeficiente de transferencia por desnitrificación de sedimentos	CT-Desnitrificación Sed.	m/d	0.5127	0 - 1
Hidrólisis del Fósforo Orgánico	Hidrólisis PO	m/d	0.8695	0 - 5
Velocidad de sedimentación del Fosforo Orgánico	VS-PO	1/d	1.2897	0 - 2
Velocidad de sedimentación del Fosforo Inorgánico	VS-PI	m/d	0.9980	0 - 2
Hidrolisis de la materia orgánica particulada (Detritus (POM))	Hidrólisis POM	m/d	3.8053	0 - 5

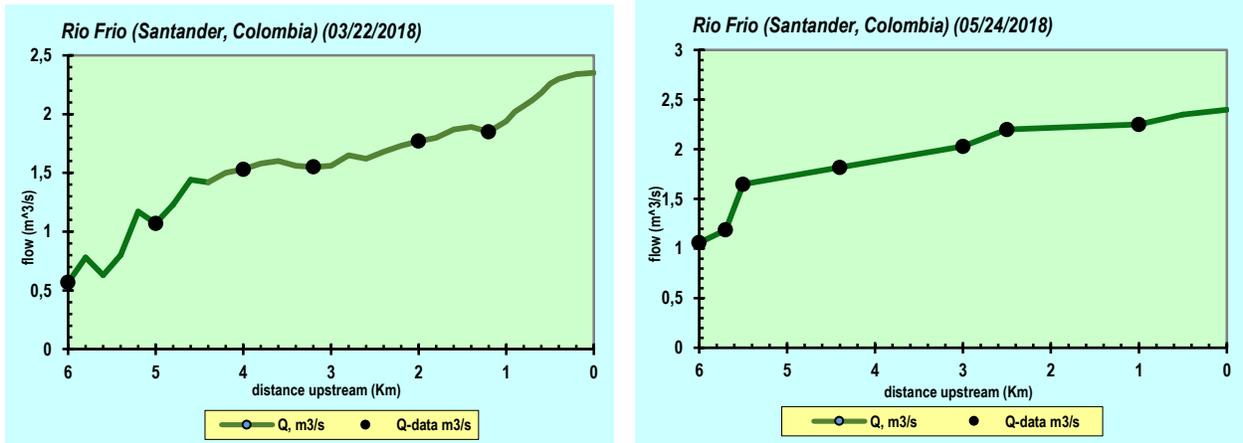
Fuente: Elaboración propia

En forma general los resultados de la calibración y confirmación del modelo de simulación muestran un ajuste moderado entre los valores calculados por el modelo y los valores medidos en campo de las diferentes variables, esto considerando que anteriormente se había modelado río frío y los resultados de los estudios preliminares sirvieron como una línea base para la modelación del presente trabajo que permitió ajustar las constantes calibradas. Se resalta que la confirmación del modelo QUAL2Kw se realizó con una campaña de monitoreo que presentó condiciones hidrológicas y ambientales diferentes (tiempo lluvia) a las observadas en la calibración (tiempo de sequía).

En las figuras 14, 15, 16, 17 y 18 se muestran los resultados del modelo para el caudal, la temperatura, el oxígeno disuelto, la DBO rápida y los sólidos suspendidos totales respectivamente, en las figuras la línea continua representa la predicción que realiza el modelo, mientras que los puntos representan los datos medidos en campo a lo largo de la corriente en cada campaña de monitoreo.

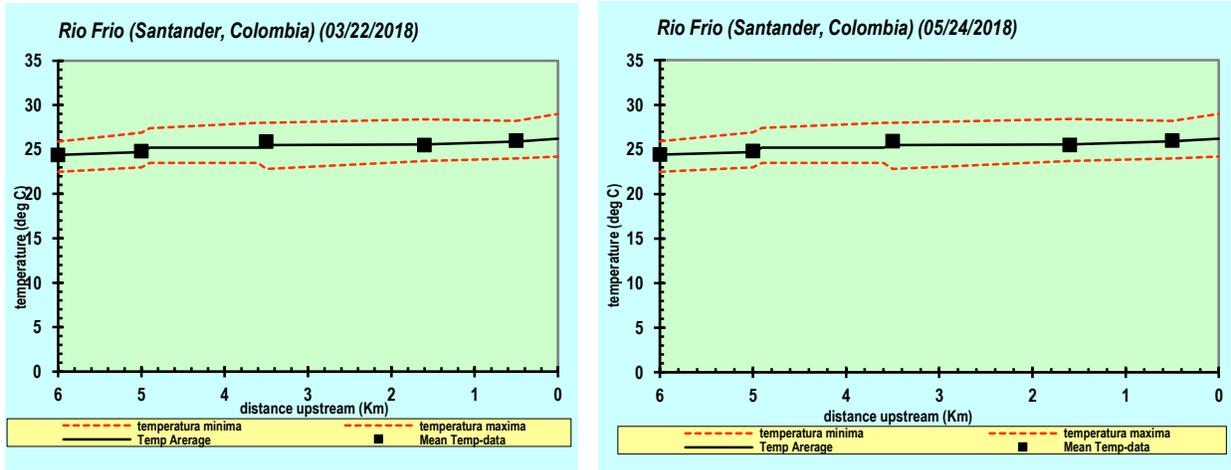
Se tiene que el caudal del tramo de río frío en estudio aumenta progresivamente a lo largo de su recorrido, en la cabecera presenta un caudal de 0.89 m<sup>3</sup>/s (kilómetro 6) y en la desemboca en el río oro con un caudal promedio de 2.45 m<sup>3</sup>/s (kilómetro 0). El caudal a lo largo de la corriente se ajustó tanto en la calibración como en la confirmación mediante el ingreso de los caudales por los vertimientos, y la determinación por medio de balances de flujo entre los puntos de monitoreo.

Figura 25 Calibración y confirmación del caudal.



La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias, aumentando la de los sólidos disueltos y disminuyendo la de los gases (Jiménez, 2000). Los resultados para la calibración y la confirmación de la temperatura se presentan en la Figura 15.

Figura 26 Calibración y confirmación de la temperatura



De acuerdo a los datos de temperatura medidos durante las campañas de monitoreo, se observa que la temperatura para el tramo de río Frio en la parte donde inicia el modelamiento y se ubica el primer punto de monitoreo el Pórtico es de 24°C aproximadamente. Posteriormente conforme el río avanza en su recorrido, la temperatura va aumentando progresivamente debido a la transferencia de calor de los elementos adyacentes, de la transferencia de calor entre los sedimentos, el agua y la atmósfera, y de las entradas y salidas externas al sistema (Chapra et.al.,

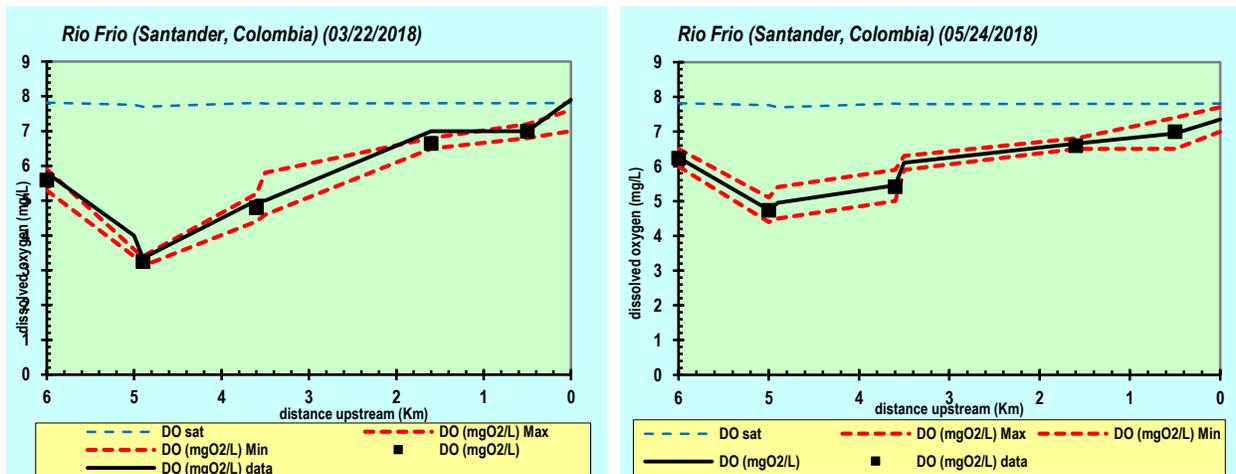
2008). De esta forma, río frío desemboca en el río de oro con una temperatura de 31°C aproximadamente.

En base a los resultados de la calibración y confirmación del modelo para la variable de temperatura, podemos observar que en ambos casos o en ambas temporadas el modelo se ajusta a lo largo de la corriente, puesto que los resultados del modelo representan correctamente los valores de temperatura determinados en campo.

Todos los organismos dependen de una u otra forma del oxígeno para mantener los procesos metabólicos que producen energía para su crecimiento y reproducción. El agotamiento de este elemento por la oxidación de materia orgánica e inorgánica o la disminución de su solubilidad en el agua por la presencia de sales, son factores que afectan considerablemente la presencia de la vida acuática (Vera, 2007). De acuerdo a los estándares de calidad del agua, se sabe que una concentración de oxígeno disuelto menor a 5 mg/L afecta la diversidad biológica.

En la Figura 16 se presentan los resultados para la calibración y la confirmación del oxígeno disuelto en el río frío, en este caso, la línea azul representa el máximo oxígeno disuelto que se puede alcanzar a lo largo de la corriente (oxígeno disuelto de saturación), la línea continua representa los resultados de la simulación y los puntos los datos medidos en campo.

Figura 27 Calibración y confirmación del oxígeno disuelto



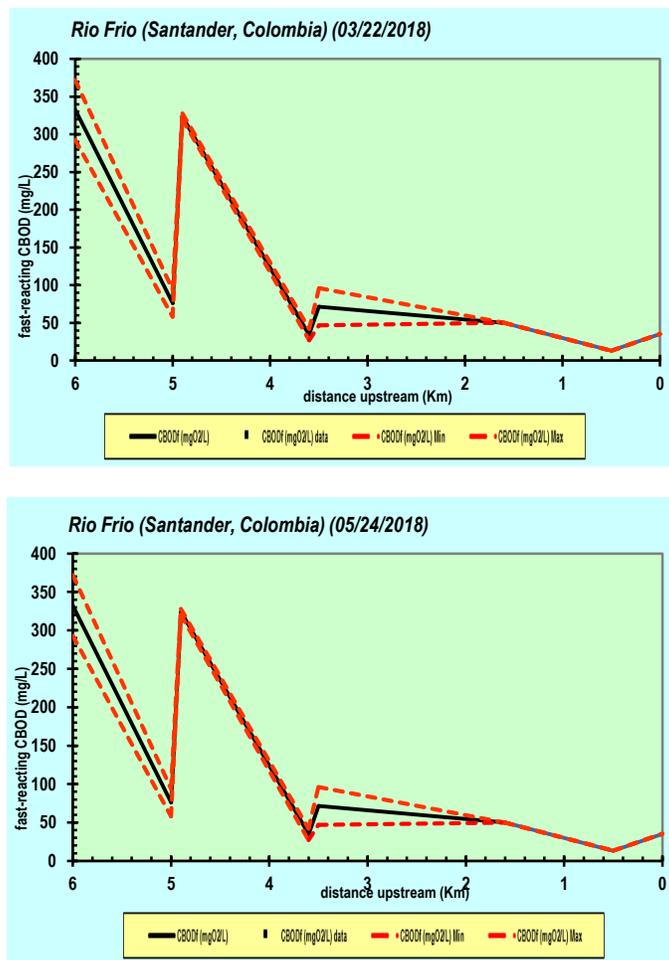
En este caso se encontró que el río frío en todo el recorrido del tramo en estudio presenta bajas concentraciones de oxígeno disuelto lejanas al oxígeno de saturación, esta característica se presenta debido a que no cuenta con gran capacidad de autodepuración, debido a las altas descargas y la poca turbulencia del flujo.

En la modelación del oxígeno disuelto, este componente se incrementa debido al proceso de fotosíntesis de las plantas, la biomasa de las algas de fondo y el fitoplancton. Así mismo, la concentración del oxígeno decrece debido al proceso de oxidación de la DBO rápida, por la

respiración de las plantas y por los procesos de nitrificación. La reaeración debido a las condiciones hidráulicas del sistema que se está modelando, puede aportar o consumir oxígeno dependiendo si el oxígeno presente es inferior o superior al oxígeno de saturación respectivamente (Chapra et al, 2006).

La demanda bioquímica de oxígeno se define de forma general como la cantidad de oxígeno requerida por las bacterias en el proceso de estabilización de la materia orgánica descomponible bajo condiciones aeróbicas (Vera, 2007). Por otra parte, la DBO rápida representa la materia orgánica que es rápidamente biodegradable, aumenta debido a la disolución de detrito, y se pierde por hidrólisis y oxidación. En la Figura 17, se presentan los resultados para la calibración y la confirmación de este parámetro de calidad del agua en el tramo de río frío.

Figura 28 Calibración y confirmación de la DBO rápida



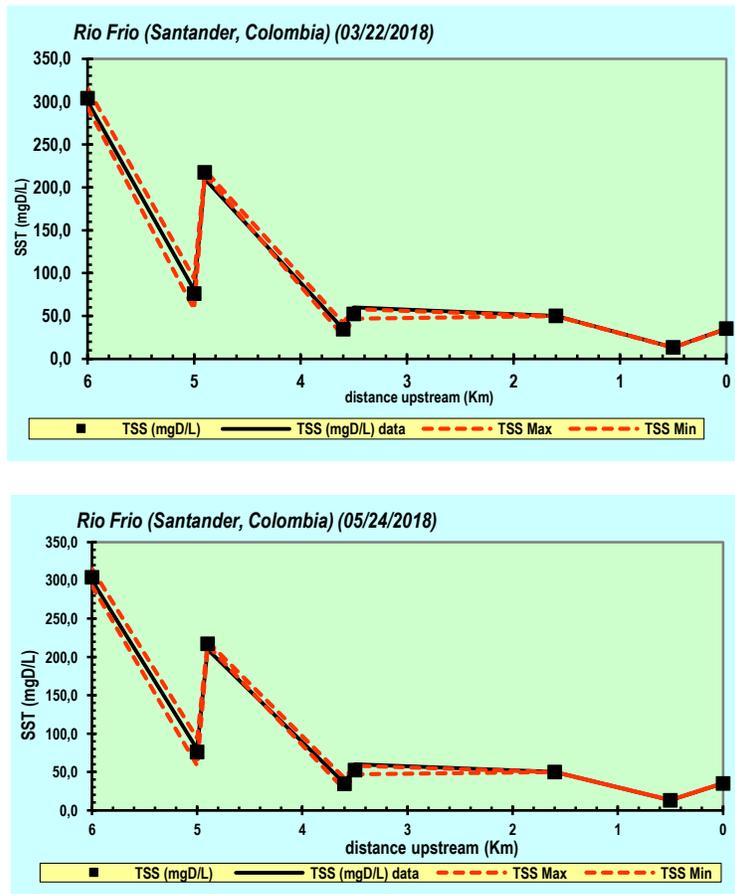
A partir de los datos medidos en campo se observa que la DBO rápida en el río frío presenta valores superiores a 5 mg/L en todo el tramo hasta su desembocadura en el río oro, por lo cual es evidente el deterioro de la calidad del agua en el río frío cuando la PTAR de río frío descarga sus aguas en

el kilómetro 1,1 ocasionando que la concentración de la DBO rápida se incremente a valores cercanos a 10 mg/L. Lo anterior corresponde de acuerdo a los estándares de calidad del agua a una corriente en mal estado, ya que se considera que DBO mayores a 5 mg/L son corrientes contaminadas.

La DBO es el parámetro que más dificultades presenta para ser simulado, posiblemente por tratarse de un bioensayo donde son muchos los factores que afectan la medición, en el caso de la DBO rápida no se ingresaron valores medidos en campo como puede observarse, ya que este parámetro no fue determinado en el laboratorio y para su cálculo se asumió un valor de la constante cinética de degradación y se calculó a partir de la DBO filtrada.

Los sólidos disueltos pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua, el promedio de sólidos disueltos totales para los ríos de todo el mundo ha sido estimado en alrededor de 120 ppm (Livingston, 1963). En la Figura 18, se presentan los resultados para la calibración y la confirmación de los sólidos suspendidos totales en el tramo del río frío desde su punto de modelamiento hasta su desembocadura en el río oro.

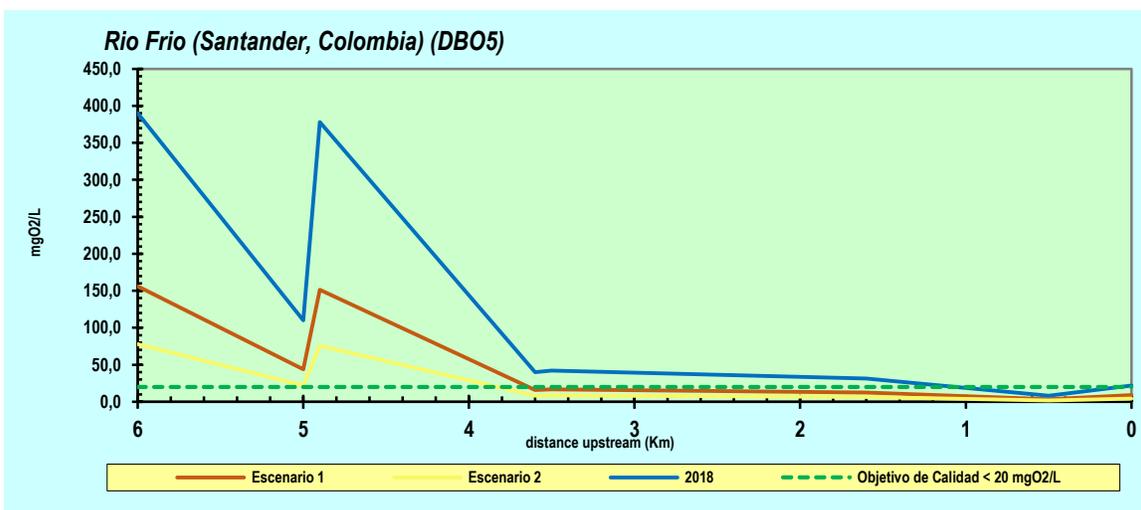
Figura 29 Calibración y confirmación de los sólidos suspendidos totales



La concentración de sólidos suspendidos totales de acuerdo a las campañas de monitoreo al inicio del tramo fue superior a 10 mg/L. Además, la concentración de sólidos suspendidos empieza a aumentar en la corriente en ambas campañas, esto se debe al aporte en carga de sólidos de los vertimientos que se encuentran en el tramo evaluado, así como a los sólidos de carácter orgánico que llegan al río por escorrentía.

### 8.3 Resultados Simulación

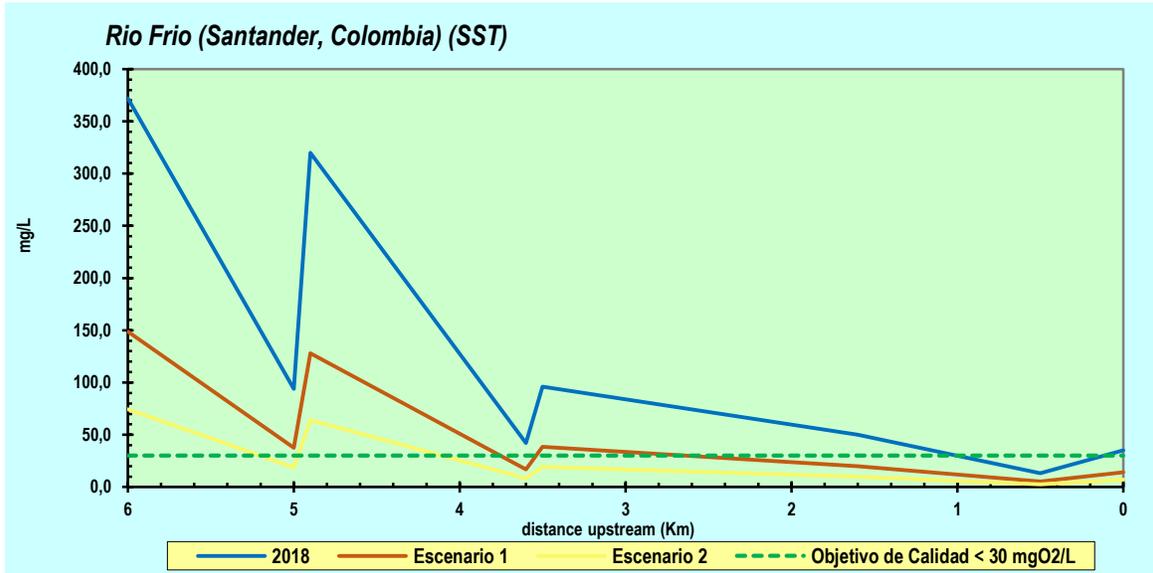
Figura 30 Simulación DBO5



Cumplimiento de los Objetivos de Calidad, CDMB. En los primeros 2.5 kilómetros del tramo para los dos escenarios en análisis, el modelo de simulación calibrado presenta valores por encima de 20 mgO<sub>2</sub>/l valor propuesto dentro de los Objetivos de Calidad por la Corporación para la DBO, esto debido a que en este sector se encuentra la descarga de la PTAR de rio frio en la cual es demasiado alto las concentraciones de descarga. A partir del kilómetro 2.5 en adelante, la DBO desciende a un mínimo de 8,8 mgO<sub>2</sub>/l (escenario 1) y 4,4 mgO<sub>2</sub>/l (escenario 2) donde se encuentra la zona de mayor degradación en rio frio. En los escenarios a futuro con la reducción de un 80% y 60% de la DBO en los vertimientos analizados, este parámetro cumple con el Objetivo de Calidad menor a 20 mgO<sub>2</sub>/l en la mayoría del tramo, debido a que actualmente en un 90% del tramo en estudio no se cumple con el Objetivo de Calidad de la DBO.

Escenarios de saneamiento. La reducción del 60% y 80% en los niveles de este parámetro para los vertimientos involucrados, evidencia una reducción del 46% y 77% entre el promedio de valores de la condición actual y la obtenida en los escenarios 1 y 2 respectivamente.

Figura 31 Simulación SST



Cumplimiento Objetivos de Calidad CDMB. Para la condición inicial de las dos campañas de monitoreo, en los primeros 5 km no se cumplen los objetivos de calidad establecidos en 30 mgO<sub>2</sub>/L teniendo un máximo de 372 mgO<sub>2</sub>/L superando el objetivo en un 1000% siendo totalmente necesario medidas para ajustarse al límite del objetivo de calidad, en el último kilómetro del tramo en análisis desciende a un nivel mínimo de 13.2 cumpliendo con el objetivo de calidad. Con remociones del 60% y 80% en los vertimientos directos hacia la quebrada, se estarían cumpliendo en un 55% los Objetivos de Calidad propuestos por la CDMB.

Escenarios de saneamiento. Con remociones del 60% y 80% en los niveles de este parámetro sobre los vertimientos de aguas residuales hacia la quebrada, se tiene una reducción promedio de 58% y 77% de los SST respectivamente, a pesar de continuar aumentando este parámetro a través de la quebrada.

En los escenarios hipotéticos a futuro en una remoción del 60% y 80% en las descargas en estudio, parámetros como oxígeno disuelto, turbiedad, pH y alcalinidad estarían cumpliendo en la mayoría del tramo de río frío con los objetivos de calidad.

## 9. CONCLUSIONES

Las dos campañas realizadas en el tramo de río frío en los tres puntos de monitoreo sirvieron como fuente de datos para el análisis de la calidad del agua y la información existente ayudaron a contar con los datos de campo necesarios para implementar el modelo de calidad del agua QUAL2Kw y realizar su calibración y confirmación. Se observó que los resultados obtenidos tanto en la calibración y la confirmación del modelo representaron en un gran porcentaje las condiciones encontradas en las dos campañas de monitoreo realizadas en el presente año.

Los resultados evidencian un tramo crítico sobre la corriente, el cual tiene problemas de contaminación debido a las actividades antrópicas que se realizan en la zona sin embargo, el mayor impacto que se observa es en el punto donde río frío recibe la descarga de la PTAR río frío con una alta carga contaminante, lo cual ocasiona que los niveles de todos los contaminantes se incrementen considerablemente y deterioren la calidad del agua del río frío en el tramo estudiado.

El tramo estudiado presenta baja pendiente generando poca reaireación lo cual es perjudicial para un río de montaña, con el software QUAL2Kw logramos simular una estabilización promedio de  $R=0.92$ , está siendo más alta que estudio anteriores e indica que el modelo se adecua a las condiciones de modelamiento dinámico en estos ríos de montaña de alta rugosidad y baja profundidad. Las variables más ajustadas son el caudal, temperatura, oxígeno disuelto y la DBOC rápida con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) promedio de 0.97.

En general, se tiene una microcuenca dentro del perímetro urbano en malas condiciones de calidad, donde un porcentaje considerable del caudal en el río es atribuido a las diferentes descargas de aguas residuales a lo largo de ella. El río frío posee un afluente natural en el tramo estudiado pero no tan importante que minimice de cierta forma la contaminación allí presente. Como consecuencia de ello, el río por sí solo no es capaz de recuperarse (autodepuración).

## 10. RECOMENDACIONES

Se aconseja continuar con la realización de muestreos sincronizados y reportes de caudal instantáneo (época de estiaje) tomados en todo río frío o en el tramo estudiado, como soporte para la validación del modelo.

El modelo de calidad del agua QUAL2Kw implementado en el río frío, puede ser ajustado posteriormente a partir de la realización de otras campañas de monitoreo para ser consolidado como una herramienta confiable y eficaz para la autoridad ambiental (CDMB), que contribuya a la planificación del recurso hídrico.

Se deben hacer estudios para mejorar la calidad del agua a futuro, como por ejemplo: revisar las eficiencias de la PTAR de río frío, probar maneras más eficientes para la remoción y minimizar las descargas al río, velar por que todos los usuarios para uso doméstico tengan PTARDs para el tratamiento del agua que va al río; concertar con las industrias que el grado de contaminación por parte de las mismas no aumente durante los próximos años tratando que por ente disminuya y campañas ambientales educativas, entre otros.

## BIBLIOGRAFÍA

Villalobos Slon Hernán, Calibración del modelo matemático Qual2k para el análisis de calidad del agua, Universidad de Costa Rica, 2008.

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

Chapra, S. C. (1997). Surface Water-Quality Modelling, The McGraw-Hill Companies. Inc., New York.

Camacho y Díaz (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y calidad del agua en ríos – caso río Bogotá, Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Universidad del Valle.

Rientjes y Boekelman (1998). Hydrological models. Section of Hydrology and Ecology, Delf University of Technology, TU Delft, CT443.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, PORH, POA y POMCA de río oro y su afluente río frío. 2014.

SALAS, H. Criterios para seleccionar modelos matemáticos de calidad de agua. CEPIS. 1984

## ANEXO 1

### Anexo 1.1 Ficha de Campo El Pórtico

FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACION DE MONITOREO				OBSERVACIONES			
El Pórtico RF-P				Tipo de aforo: Molinete  Punto ubicado en la zona urbana del municipio Girón antes de la PTAR rio frio. Se observa que hay extracción de arenas y basuras en las orillas, el agua presenta a simple vista buena calida.			
CORRIENTE							
Rio Frio							
UBICACIÓN							
Coordenadas		Altura					
X: 1105199		789 m.s.n.m					
Y: 1273110							
PARAMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña ©	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (µS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	22/03/2018	8:35 am	7.8	1.464	30.3	25.3	7.3
C2	24/05/2018	7:40 am	8.14	1.245	29.1	24.7	8.85
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Anexo 1.2 Ficha de Campo El Caucho

FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACION DE MONITOREO				OBSERVACIONES			
El Caucho RF-B				Tipo de aforo: Molinete  Punto ubicado después de la PTAR rio frio. El agua presenta alta turbiedad a la vista, mal olor y gran cantidad de contaminación.			
CORRIENTE							
Rio Frio							
UBICACIÓN							
Coordenadas		Altura					
X: 1104257		755 m.s.n.m					
Y: 1272587							
PARAMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña ©	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (µS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	22/03/2018	10:20 am	7.28	7.94	33.5	30.4	2.51
C2	24/05/2018	11:25 am	7.31	6.71	32.6	28.3	6.72
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

Anexo 1.3 Ficha de Campo Caneyes

FICHA DE CAMPO							
NOMBRE ESTACION DE MONITOREO				OBSERVACIONES			
Los Caneyes RF-1 <sup>a</sup>				Tipo de aforo: Molinete  Se tomó la muestra pocos metros antes de la desembocadura de río frío con río oro, el punto está ubicado en municipio de Girón, el agua presenta alta turbiedad a la vista y se percibe un ligero mal olor.			
CORRIENTE							
Río Frio							
UBICACIÓN							
Coordenadas		Altura					
X: 1100822		715 m.s.n.m					
Y: 1273097							
PARAMETROS DETERMINADOS EN CAMPO							
Campaña ©	Fecha (d/m/a)	Hora	pH (Unid)	Conductividad (µS/cm)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. Agua (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
C1	22/03/2018	1:40 pm	7.16	6.15	30.2	30.5	2.45
C2	24/05/2018	2:15 pm	7.62	6.17	33.5	31.4	7.46
REGISTRO FOTOGRÁFICO							
							

ANEXO 2

Tabla 14 Resultados Caracterización tramo rio Frio – Campaña 1

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>EMPAS S.A E.S.P (BYPASS)</i>	<i>EMPAS S.A E.S.P (PTAR)</i>	<i>EMPAS S.A E.S.P (LA ANGELINA)</i>	<i>AVIDESA – SEDE ADMINISTRATIVA</i>	<i>PARQUE INDUSTRIAL LA FORTUNA – AVICOLA EL GUAMITO</i>	<i>BRISAS DE RÍO FRÍO</i>	<i>INMACULADA PARTE ALTA</i>	<i>INMACULADA PARTE BAJA</i>
Temperatura Agua	°C	25.9	26.2	25.3	28.4	28.1	27.4	28.7	28.5
Temperatura Ambiente	°C	27.8	28.7	26.6	25.6	28.7	29.3	28.1	27.3
Caudal	(m <sup>3</sup> /s )	0.1172	0.46	0.01034	0.0007	0.00015	0.00033	0.00031	0.00083
Conductividad	(μS/cm)	923	1018	1009	1104	937	689	583	704
pH	s.u.	7.3	7.31	8.02	7.4	7.6	7.2	7.4	7.1
Oxígeno Disuelto	mgO <sub>2</sub> /L	5.9	2.45	6.8	7.2	6.2	7.4	7.3	6.6
Nitrógeno Amoniacal	mg N/L	39.3	61.9	41.7	95.2	84.1	13.4	12.6	33.8
Nitratos	mg N/L	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15
Nitritos	mg N/L	0.002	0.005	0.02	0.002	0.15	0.005	0.005	0.1
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub>	261	397	438	225	208.6	198.9	214.2	221.875
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	740	246	906	168	225	65	17	53
DQO Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	518	159.9	507.4	134.4	146.25	46.8	12.2	38.2
DBO <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub> mg/L	349	113	436	52.8	111	31.3	8.25	22
DBO Filtrada	DBO <sub>5</sub> mg/L	348	107	267	45.9	89.9	25.7	6.8	18.0
Nitrógeno Kjeldahl	mg N/L	66.4	81.8	81.7	111	82.5	16.0	15.1	40.3
SST	mg/L	293	58	328	27	47	50	13.2	35.2
SSV	mg/L	228.5	52.2	236.2	21.6	32.4	43.5	9.1	24.3

Tabla 15 Resultados Caracterización tramo rio frio – Campaña 2

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>EMPAS S.A E.S.P (BYPASS)</i>	<i>EMPAS S.A E.S.P (PTAR)</i>	<i>EMPAS S.A E.S.P (LA ANGELINA)</i>	<i>AVIDESA-SEDE ADMINISTRATIVA</i>	<i>PARQUE INDUSTRIAL LA FORTUNA – AVICOLA EL GUAMITO</i>	<i>BRISAS DE RÍO FRÍO</i>	<i>INMACULADA PARTE ALTA</i>	<i>INMACULADA PARTE BAJA</i>
Temperatura Agua	°C	24.7	26	25.1	27.1	27.8	27.4	28.7	28.5
Temperatura Ambiente	°C	27.4	28.6	28.7	27.7	29.2	29.3	28.1	27.3
Caudal	(m <sup>3</sup> /s )	0.1283	0.5140	0.0132	0.00103	0.00077	0.00033	0.00031	0.00083
Conductividad	(µS/cm)	630	685	975	1324	891	689	583	704
pH	s.u.	7.2	7.36	7.67	8.23	8.12	7.2	7.4	7.1
Oxígeno Disuelto	mgO <sub>2</sub> /l	5,3	3.6	7	6.6	6.8	7.0	7.2	6.7
Nitrógeno Amoniacal	mg N/L	42.3	61	35.3	112.8	93.4	13.4	12.6	33.8
Nitratos	mg N/L	0.1	0.1	0.15	0.15	2.67	0.1	0.1	0.15
Nitritos	mg N/L	0.002	0.005	0.005	0.011	2.36	0.005	0.005	0.1
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub>	280.7	366	280.2	452.8	224.3	199	214	447
DQO Total	mg O <sub>2</sub> /L	740	281	835	144	141	65	17	53
DQO Filtrada	mg O <sub>2</sub> /L	518	182.7	314	114	87.5	42.3	11.1	34.5
DBO5 Total	DBO5 mg/L	390	110	378	40	42	31.3	8.25	22
DBO Filtrada	DBO5 mg/L	387	101	156	35	34	25.7	6.8	18.0
Nitrógeno Kjeldahl	mg N/L	73.3	75.6	59.8	121	99.4	16.0	15.1	40.3
SST	mg/L	372	94	320	42	96	50	13.2	35.2
SSV	mg/L	290	88	230	34	66	43.5	9.1	24.3

## ANEXO 3

Actividades Desarrolladas de la Pasantía en la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB.

Recopilación y actualización de la información de los vertimientos aprobados actualmente en el área de jurisdicción de la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga CDMB.

Se diligenció la plantilla desarrollada por el IDEAM, para vertimientos realizados por personas naturales y jurídicas, en cumplimiento del objetivo de cargar la información de los vertimientos en el SIRH subiendo las plantillas a la plataforma del mismo, a continuación se observa la plantilla:

TIPO USUARIO	RACION SOCIAL	TIPO DOC	№. DOC.	ACTIVIDAD ECONOMICA	DIRECCION DE CORRESPONDENCIA	E-MAIL	TEL	FAX	NOMBRE
Persona Jur. de Privada	AUTOLOMBIAS SAS	Ns	80983262-8	Explotación Diamantina	Carrera 26 No. 26-14	asac@autoombias.com.co	4384877	4348888	CESAR AUGUSTO
Persona Jur. de Privada	EMPRESA INGENIERIA NEMO DE CONIOLDA	Ns	99402224-4	Explotación de Mineria de Bauxita	Carrera 27 No. 29-89		210462166		RODOLFO
Persona Jur. de Privada	SOCCO INGENIERIA TIPOPIETRE LTDA	Ns	99030999-9	Miscelánea	Carrera 19 No. 26-04 oficina 404		3207930		OSCAR GÓ
Persona Jur. de Pública	HATADERO DE CORDERO / FONDO TEMPORAL FINIS RIO	Ns	8004942-3	Servicio de Bacterio Parasitar	Calle 32 No. 10-11		298950-96		FELISA MURY
Persona Jur. de Privada	INERSONEZ DE TRANSPORTE DEL SUR SOTRASUR S.A	Ns	8848029-9	Lavandería de subserbio	Ardila via No. 10-240	comab@inersonez.com	4344853		OTONIEL BEP
Persona Jur. de Privada	INVERSIONES Y SERVICIOS DE COLOMBIA S.A.	Ns	8848022-9	Explotación de Servicios Turístico	Calle 39 No. 10-17		441221	441221	JUAN CARLOS
Persona Jur. de Privada	OSIEDER OPERATORIA LTDA	Ns	99063263-3	Explotación de servicios Diamantina	Carrera 19 No. 26-04 oficina 310	osieder@osieder.com	3242910		4348888
Persona Jur. de Privada	INDUSTRIAS LAS AMARAVILLAS Y COMPAÑIA LIMITADA- LANCOLTA	Ns	8001732-2	Fabricación de estanterías	Km. 4. de Amopora Florida Páramo	lasamaravillas@lancolta.com	431921	4349124	OLGA PATRICIA
Persona Jur. de Privada	EGOPETROL S.A.	Ns	99999998-1	Operación del sistema de distribución Práctica	Edificio 28 de Asesoría Dinámica 8 edificio Avilés	info@egopetrol.com	4201979		LUISA FERNANDA
Persona Jur. de Privada	CONDORINI HENLY COMPESITRE	Ns	9605049-4	Restauración	Torre de Mercado	condorini@condorini.com	496978		ANDRÉS
Persona Jur. de Privada	PARADOR TURISTICO BUENAVISTA	Ns	9102397-1	Procesamiento de alimentos y bebidas	Km 7 de la vía a Cortes - Bogotá	parador@parador.com	4952419	4402221	EDUARDO
Persona Jur. de Privada	CAJA DE COMPENSACION FAMILIAR COMPENALCO SANTANDER	Ns	9803971-7	Actividad de administración de recursos de	R. General Valencia Número 24-49	caja@compensacion.com	4577960		LUIS FERNAN
Persona Jur. de Privada	BANANAS S.A.	Ns	9804924-9	Botánica comercial, cultivo de banana	Carrera 478 No. 621-79	bananas@bananas.com	4349900		ROBERTO LUIS
Persona Jur. de Privada	DISTRIBUIDORA APOLLO DISTRIBUYES S.A	Ns	9902945-2	Venta de mercancías, distribución de	Km 4 de la vía a Cortes	apollo@apollo.com	4797979	4954902	TATIANA ANDREA
Persona Jur. de Privada	CENTRAL MOTOR LTDA	Ns	8048032-7	Lavandería de subserbio	Calle 19 No. 27-45	centralmotor@centralmotor.com	4313041		SILVIA
Persona Jur. de Privada	BAFESOSA IMPRINTA S.A.	Ns	99029483-4	Industrial	Carrera 27 No. 48-55	bafe@bafe.com	4977760		HENRI MARIANO
Persona Jur. de Privada	CONSTRUYENDO CON VIMARIEZ CONSUMIDORA	Ns	8048171-8	Usos Residenciales	Calle 48 No. 26-22 Oficina 402		3268937		OSCAR JAIKER
Persona Jur. de Privada	HERNANDEZ GOMEZ CONSTRUCTORA S.A	Ns	9903932-4	Actividad de Demoliciones	C.O.D.F. vía a Cortes 401		4402300	4423300 Ext. 234	RODOLFO
Persona Jur. de Privada	ECODOROMINIA S. COOP. SUCUCAL COLOMBIA	Ns	3204283-2	Actividad Minería	Carrera 27 No. 26-14 pta 6	ecodominia@ecodominia.com	4347773	4342870	DEIGO HERNANDEZ
Persona Jur. de Privada	CONSTRUYENDO CON VIMARIEZ CONSUMIDORA	Ns	99029483-4	Actividad de administración de recursos de	Km 7 de la vía a Cortes	construyendo@construyendo.com	4791010	4791010	RICARDO
Persona Jur. de Privada	ZONIA FINCA SANTANDER S.A.	Ns	9903784-2	Reforestación de áreas de banano y papaya	Vía a Cortes del Fuerte Calle 206 No. 9431	zonia@zonia.com	370327236		—
Persona Jur. de Privada	PLANTA ECOLOGICA DE BENEFICIO ANIMAL BOPFRO SAS	Ns	9904987-4	Demolición	Km. 2.5 de Amopora Florida - Florida	planta@ecologica.com	4303340	4303372	CLEBERNIA
Persona Jur. de Privada	ACEBDO SILVA LIMITADA	Ns	99029898-2	Beneficiación de madera de serrano	Km 2 de la Vía a Cortes	acebdo@silva.com	4339000		ROMAN CEDELO
Persona Jur. de Privada	SOCIEDAD MINERAL LA PROSPERIDAD S.A.	Ns	8048022-4	Industrial	Calle 44 No. 74-47	mineral@prospiedad.com	4339000	4339154	MARIO ANDRÉS
Persona Jur. de Privada	BANANAS S.A.	Ns	9804924-9	Industrial	Calle 44 No. 74-47	bananas@bananas.com	4339000	4339154	MARIO ANDRÉS
Persona Jur. de Privada	PLANTA DE BENEFICIO PLOPLUS	Ns	9989123-1	Servicio de aserrío	VEREDA VALLE DE FRUTOCORRE	planta@ploplus.com			EDISON MENEZ
Persona Jur. de Pública	EGOPETROL S.A. INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLIO	Ns	99999998-1	Transportación de petróleo	Km 7 de la vía a Cortes	egopetrol@egopetrol.com	2244825	2244824	JAVIER ENRIQUE
Persona Jur. de Privada	OLVER COMPRESORES PARA INVERSIONES DE PORTAL S.A.	Ns	9848029-1	Actividad de fabricación de piezas de repuesto de	Km 2.4 de Amopora Florida - Florida	olver@olver.com	4404824	4320149	HILTON BERTRAM
Persona Jur. de Privada	ARRISA S.A.S	Ns	80080327-4	Planta de Beneficiación de	Km 2.5 de Amopora Florida - Florida		4319224	4319214 Ext. 104	PABLO HERNANDEZ
Persona Jur. de Privada	COMPAÑIA DE EJES	Ns	99029539-1	Oficina	Rta. Laya - Manabí	compania@compania.com	4402323	4577236	PABLO GERARDO
Persona Jur. de Privada	PRECONDICIONADOR DE ALIMENTOS S.P.A	Ns	99409494-4	Mercado y distribución de Alimentos	Carrera 19 No. 26-04		4404900		GABRIEL

Plantillas RURH-1-27-05-2014 (3) [Modo de compatibilidad] - Microsoft Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA COMPLEMENTOS

General Ajustar texto Combinar y centrar Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Eliminar Formato Celdas

Autosuma Rellenar Ordenar y Buscar y filtrar

CE10 37.83

TIPO USUARIO	MUNICIPIO	TIPO CENTRO POBLADO	NOMBRE CENTRO POBLADO	CEDULA CATASTRAL	MATRICULA INMOBILIARIA	AREA total del predio (ha)	DIRECCION DEL PREDIO	CLASIFICACION SUELO	No. ACTO ADMON. INICIO TRONQUE DE AUTORIZACION DE VENTIMIENTO	FECHA DE EXPEDICION N DE ACTO ADMON.	No. EXPEDIENTE	No. SINCA
Persona Juridica Privada	WETAS	Turista	MONSORA	002040024	300-22534	2.42	SECTOR PADILLA	Sueltorral	80	03/02/2016	VE-009-2010	22476
Persona Juridica Privada	WETAS	Turista	EL VOLCAN	0000000000000		39		Sueltorral	629	04/09/2016	VE-004-2012	25100
Persona Juridica Privada	WETAS	Turista	BORRERO	0000000000000		2		Sueltorral	904	05/05/2012	VE-009-2012	25476
Persona Juridica Publica	RIODEGRO	Cabecera municipal		0000000000000	00-75164-4	2		Sueltorral	949	21/01/2003	VE-852	1085
Persona Juridica Privada	FLORIBLANCA	Turista	VEREDA PROPIO		300-200167	0.293	Aculla vital B10-240	Sueltorral	282	07/04/2016	VE-002-2008	25700
Persona Juridica Privada	GRON	Cabecera municipal	LA ESPERANZA			6.5705	Bombona e Gran Almacén e Bodega Central	Sueltorral	100	20/01/2012	VE-009-2012	2521
Persona Juridica Privada	CALIFORNIA	Turista	BOGOTURAS	0000000000000		4	La Boqueron	Sueltorral	9425	04/01/2010	VE-005-2000	11000
Persona Juridica Privada	FLORIBLANCA	Turista	PALMARIERO	0000000000000	300-191031	0.06	Km 4 Autopista Florida-Piedecuesta	Sueltorral	2629	04/01/2010	VE-046	3246
Persona Juridica Privada	RIODEGRO	Turista	EMONICA	0000000000000	300-22512	50.005	Estacion Demosna	Sueltorral	772	20/01/2014	VE-002-2012	2571
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Comunidades	INDIOHONORABLES COMPLETO	0000000000000		50.005	Turismo	Sueltorral	774	27/01/2010	VE-002-2010	2676
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Comunidades	ESQUINAS	0000000000000	314-0004764		Km 1 Via Piedecuesta - Boqueron	Sueltorral	5932	27/01/2010	VE-003-2012	2246
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	LOS LLANTOS	314-22167	11		Km 11 Via Piedecuesta	Sueltorral	94	04/02/2012	VE-956	3014
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	HEUSUL	0000000000000		21	Piedecuesta Via de Piedecuesta	Sueltorral	3246	20/01/2010	VE-056	21712
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	GUAYABAMA EL OMBAGA	0000000000000	314-7921	1.512	Km 4 Via Autopista de la zona	Sueltorral	208	01/07/2014	VE-161	3124
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	HEUSUL	0000000022000	314-27732	7.1	Lota de Heusul	Sueltorral	104	01/04/2012	VE-003-2012	1059
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	GUAYABAMA	314-49233	4		Turista de Guayabama	Sueltorral	5161	20/01/2010	VE-008-2008	1610
Persona Juridica Privada	FLORIBLANCA	Turista	VALLE DE RUTODIE	000000007000000	300-220409	19.240	Km 1 Via Frio de Bucaramanga	Sueltorral	3793	05/01/2014	VE-009-2014	2000
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	LLANTOS	0000000000000	314-24233	14.3	Turista de Llano de Frio e Centro	Sueltorral	978	01/04/2012	VE-002-2011	21722
Persona Juridica Privada	CALIFORNIA	Turista	LARAJA	0000000000000	300-227849	429.328	zona de la Ruta	Sueltorral	828	17/04/2010	VE-006-2010	22540
Persona Juridica Privada	FLORIBLANCA	Turista	RIOFRIO	0000000000000	300-226493	124.096	Km 3, 3018 Aculla vital Frio	Sueltorral	849	05/01/2010	VE-001-2010	22490
Persona Juridica Privada	FLORIBLANCA	Turista	RIOFRIO	0000000000000		6	Manzana de Frio Frio, Calle 210 No. 431	Sueltorral	192	04/01/2014	VE-001-2012	2316
Persona Juridica Privada	WETAS	Turista	RIOFRIO	300-242762	0.06910		Km 2.5 Aculla vital - via Guayabama - Florida Blanca	Sueltorral	74	22/04/2014	VE-006-2012	2304
Persona Juridica Privada	WETAS	Turista	BORRERO		2		Km 2 zona zona del barrero	Sueltorral	96	05/01/2012	VE-004-2012	1859
Persona Juridica Privada	BUCARAMANGA	Cabecera municipal	BUCARAMANGA	0000000000000		24	Comparto de La Florida - Km 4	Sueltorral	278	27/01/2014	VE-067	2007
Persona Juridica Privada	BUCARAMANGA	Cabecera municipal	BUCARAMANGA	0000000000000		24	Comparto de La Florida - Km 4	Sueltorral	278	27/01/2014	VE-067	2007
Persona Juridica Privada	FLORIBLANCA	Turista	VALLE DE RUTODIE	300-227423	0.309		VEREDA VALLE DE RUTODIE	Sueltorral	8074	20/01/2010	VE-002-2008	1216
Persona Juridica Publica	FLORIBLANCA	Turista	VALLE DE RUTODIE	0000000000000	314-19167	32.4	Km 11 Via Piedecuesta	Sueltorral	163	02/01/2010	VE-217	2040
Persona Juridica Privada	RIODEGRO	Turista	PORTONUEVO	300-227427	29		Km 2.5 Via Bucaramanga - La Boqueron	Sueltorral	3	02/01/2012	VE-452	2012
Persona Juridica Privada	FLORIBLANCA	Turista	OSORHO	0000000000000	300-221000	0.772	Km 2 Autopista Florida Blanca	Sueltorral	22	02/02/2010	VE-232	22778
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	HEUSUL	0000000000000		29	Km 7 Via Florida Blanca - Piedecuesta	Sueltorral	941	04/02/2010	VE-789	1193
Persona Juridica Privada	FIDEICUETA	Turista	GUAYABAMA	314-48104	1.05		Sector la Diva	Sueltorral	9378	01/01/2014	VE-023-2008	19710

PERSONA NATURAL - CA PERSONA JURIDICA - CA PERSONA NATURAL - PV PERSONA JURIDICA - PV

LISTO 70%

Verificar que la información presente en el sistema de información ambiental de la corporación “SINCA” de los vertimientos respecto al predio y cuerpo hídrico donde se realiza la descarga coincida con la información de los expedientes en físico para establecer la tasa retributiva y la información obtenida en campo, si dicha información presentaba errores e inconcincias se corrigió la información en el sistema de información ambiental “SINCA”.

Brindar apoyo en el Plan de Ordenamiento de Recurso Hídrico en Rio Frio en la parte de modelamiento de tramo del mismo, el cual se modelo desde la PTAR de Rio Frio hasta la confluencia con Rio Oro.

El día 21 de mayo se llevó a cabo el primer evento de conocimiento ambiental a cargo de la coordinación generación del conocimiento de la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga CDMB, en el cual se asistió como ponente en el tema de modelamiento de corrientes hídricas y uso del software QUAL2Kw.