

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA  
RIO SAN JUAN, MUNICIPIO DE GÉNOVA DEPARTAMENTO DEL QUINDIO**

**ENMARCADO EN EL PROYECTO  
“PENSEMOS EN EL FUTURO, AHORREMOS AGUA”**

**Presentado a:**

**LINA MARIA GALLEGO ECHEVERRY  
Profesional Especializado  
Subdirección de Gestión Ambiental  
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL QUINDÍO**

**Preparó:**

**JOHANA PÉREZ CARREÑO  
Ingeniera Civil  
Especialista en Ingeniería Hidráulica y Ambiental**



**Armenia, Diciembre de 2015**

## CONTENIDO

<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>4</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	4
1.2 OBJETIVOS .....	5
1.3 ALCANCE .....	5
1.4 MARCO NORMATIVO.....	6
<b>2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.....</b>	<b>8</b>
2.1 LOCALIZACIÓN .....	8
2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL .....	9
2.2.1 <i>Tributario principal</i> .....	9
2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL .....	10
2.4 DEMANDA HÍDRICA .....	11
2.5 VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS .....	11
<b>3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2K .....</b>	<b>13</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	13
3.2 METODOLOGÍA .....	14
<b>4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO.....</b>	<b>16</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR .....	17
4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE .....	20
4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS .....	21
4.4 CONDICIONES DE BORDE Y RED DE MODELACION .....	22
4.4.1 <i>Condiciones de borde externas</i> .....	22
4.4.2 <i>Condiciones de borde internas</i> .....	22
4.4.3 <i>Red final de modelación</i> .....	23
4.5 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO .....	24
4.5.1 <i>Resultados de la modelación del componente hidráulico</i> .....	24
<b>5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD.....</b>	<b>27</b>
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO .....	27
5.1.1 <i>Observaciones Generales de los reportes de calidad</i> .....	27
5.1.2 ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES OBTENIDAS EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES IDENTIFICADOS EN EL RIO SAN JUAN CON RELACIÓN A LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015 .....	30
5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN.....	31
5.2.1 <i>Constante de decaimiento de la DBO (Kd)</i> .....	31
5.2.2 <i>Constante de decaimiento de los coliformes (Kb)</i> .....	33
5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD.....	34
<b>6. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>38</b>
<b>7. CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD PARA EL RIO SAN JUAN.....</b>	<b>39</b>
<b>8. PLANTEAMIENTO ESCENARIO DE SANEAMIENTO: COLIFORMES FECALES .....</b>	<b>42</b>
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>43</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>44</b>

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. NORMA PARA VERTIMIENTOS A UN CUERPO DE AGUA PARA USUARIOS NUEVOS .....	6
TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA DESTINACIÓN DEL RECURSO .....	6
TABLA 3. OBJETIVOS DE CALIDAD RIO ROJO, GRIS Y SAN JUAN, CRQ .....	7
TABLA 4. LOCALIZACIÓN UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO SAN JUAN .....	8
TABLA 5. RESUMEN CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS – UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO SAN JUAN Y RIO GRIS .....	9
TABLA 6. NUMERO DE VERTIMIENTOS HACIA LOS DIFERENTES CUERPOS DE AGUA, PROVENIENTES DE LA ZONA URBANA .....	11
TABLA 7. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS A MODELAR SOBRE EL RIO SAN JUAN.....	16
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE FORO Y MUESTREO – RIO SAN JUAN .....	18
TABLA 9. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 14 DE MAYO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE .....	20
TABLA 10. TIEMPOS DE VIAJE DE LA MASA DE AGUA PARA EL DÍA 14 DE MAYO DE 2015.....	21
TABLA 11. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 2 DE AGOSTO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO Y MUESTREO.....	21
TABLA 12. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES TRANSVERSALES DE LA MALLA DE MODELACIÓN PARA EL RIO SAN JUAN.....	23
TABLA 13. RED ESQUEMATIZADA PARA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA – RIO SAN JUAN .....	24
TABLA 14. FUENTE DIFUSA INCLUIDA COMO PARTE DEL BALANCE HÍDRICO .....	24
TABLA 15. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EN LA CALIBRACIÓN HIDRÁULICA .....	25
TABLA 16. DATOS DE CALIDAD RIO SAN JUAN (CRQ) – CAMPAÑA DE MUESTREO 06/08/2015 .....	27
TABLA 17. CARGA CONTAMINANTE DE LOS VERTIMIENTOS IDENTIFICADOS EN LA MODELACIÓN .....	31
TABLA 18. CUMPLIMIENTO DE LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015, PARA LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES IDENTIFICADOS EN LA CAMPAÑA DE MUESTREO EL DÍA 06/08/2015 .....	31
TABLA 19. CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN UTILIZADAS PARA LA CALIBRACIÓN .....	34
TABLA 20. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS CF, RIO SAN JUAN.....	42

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN RIO SAN JUAN - DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO .....	8
FIGURA 2. UNIDAD HIDROGRÁFICA, RIO SAN JUAN .....	10
FIGURA 3. PORCENTAJES DEL CAUDAL DEMANDADO, UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO SAN JUAN.....	11
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA .....	14
FIGURA 5. PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, RIO SAN JUAN .....	17
FIGURA 6. MAPA DE PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, SUBCUENCA RIO SANTO DOMINGO.....	19
FIGURA 7. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES, RIO SAN JUAN.....	22
FIGURA 8. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL DE CAUDAL, VELOCIDAD Y PROFUNDIDAD - OBSERVADAS VS SIMULADA.....	26
FIGURA 9. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO SAN JUAN.....	35
FIGURA 10. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO SAN JUAN .....	35
FIGURA 11. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO SAN JUAN .....	36
FIGURA 12. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO SAN JUAN .....	36
FIGURA 13. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO SAN JUAN .....	36
FIGURA 14. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO SAN JUAN .....	37
FIGURA 15. PERFIL LONGITUDINAL DBO <sub>5</sub> AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ.....	39
FIGURA 16. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS OD, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ.....	39
FIGURA 17. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS PH, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ .....	40
FIGURA 18. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS SST, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD CRQ .....	40
FIGURA 19. PERFIL LONGITUDINAL DE LOS CF, AÑO 2015 EN CUMPLIMIENTO DEL DECRETO 1594/84 PARA SU DESTINACIÓN AL CONSUMO HUMANO .....	41

## 1. GENERALIDADES

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La normativa ambiental que reglamenta la formulación de planes de saneamiento y manejo de vertimientos y los procesos de licenciamiento ambiental reconocen la importancia de conocer la capacidad de autodepuración de ríos y corrientes, lagos o humedales e identificar los impactos en el uso y calidad del agua que generan los vertimientos de agua residual doméstica y/o industrial en las fuentes receptoras. Es por ello, que los modelos de transporte de contaminantes y de calidad del agua permiten conocer la capacidad de autodepuración por dilución, dispersión longitudinal y procesos de transferencia y/o reacción físico-químicas y biológicas en las fuentes receptoras, dimensionándolas y seleccionando soluciones estructurales (ejemplo, plantas de tratamiento) y no estructurales (ejemplo, tecnologías de producción más limpias) requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua en la fuente receptora bajo diferentes niveles de contaminación y/o tratamiento. Para esto, se requiere seguir una metodología rigurosa en la implementación y aplicación de los modelos de calidad del agua para que puedan ser utilizados efectivamente como herramientas útiles en la toma de decisiones de saneamiento y manejo de vertimientos.

El presente estudio de modelación denominado “Modelación de la Calidad del agua del rio San Juan”, es realizado mediante la aplicación del software QUAL2Kw elaborado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el cual siguiendo una serie de pasos involucrados dentro de sus lineamientos, establece una aproximación de una realidad existente y futura de los parámetros hidráulicos y de calidad de la fuente hídrica a analizar, considerando este los diferentes vertimientos de aguas residuales originadas por distintos usos a lo largo del tramo de análisis sobre la corriente principal.

En cumplimiento con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, la Corporación Autónoma Regional del Quindío viene adelantando estudios de modelación de la calidad del agua en las principales fuentes hídricas del departamento del Quindío, evidenciando así, su comportamiento a través del tiempo, lo que constituye una herramienta de planificación que permite en la actualidad y a futuro, identificar y preservar el recurso hídrico.

## 1.2 OBJETIVOS

### General

- Realizar la modelación de la calidad del agua en río San Juan, en un tramo cercano a los 4.4 kilómetros.

### Específicos

- Determinar la capacidad de autodepuración de la corriente modelada e identificar los impactos en el uso y calidad del agua que generan los vertimientos de agua residual en las fuentes receptoras.
- Elaborar escenarios de saneamiento partiendo de información existente.

## 1.3 ALCANCE

El estudio considera el muestreo en diferentes puntos sobre el río San Juan, donde se incluyen vertimientos directos del casco urbano del municipio de Génova y su tributario principal, el río Gris. El tramo inicia al sur este del municipio, bajo el puente vehicular que comunica a la veredera Cumaral con la zona urbana de Génova hasta la el norte del municipio, antes de la confluencia del río San Juan con el río Rojo.

Las actividades desarrolladas dentro de la elaboración del presente estudio son las siguientes:

Trabajo de campo,

- Determinación de tiempos de viaje
- Campañas de aforo y muestreo de agua

Trabajo de oficina,

- Obtención y ajuste de registros hidrométricos
- Análisis Hidrológico de la fuente a modelar
- Procesamiento de la información físico-química y bacteriológica
- Selección del Modelo de Simulación a implementar
- Calibración del modelo
- Escenarios de saneamiento utilizando el modelo ya calibrado

### 1.4 MARCO NORMATIVO

En Colombia, por medio del Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Decreto 1076 de 2015), se encuentran compilados en un solo cuerpo normativo todos los decretos reglamentarios vigentes expedidos hasta la fecha, que desarrollan las leyes en materia ambiental. Teniendo en cuenta esta finalidad este decreto no contiene ninguna disposición nueva, ni modifica las existentes.

Para los usos del agua y residuos líquidos están reglamentados mediante los decretos 1594 de 1984 y 3930 de 2010, en donde se establecen las normas de vertimiento a un cuerpo de agua.

Tabla 1. Norma para vertimientos a un cuerpo de agua para usuarios nuevos

PARÁMETRO	DECRETO 1594 / 84
pH (min-max)	5.0 – 9.0
Temperatura	≤40 ºC
DBO <sub>5</sub>	Remoción en carga ≥ 80%
Sólidos Suspendedos	Remoción en carga ≥ 80%
Grasas y/o Aceites	Remoción en carga ≥ 80%

De igual forma, el Decreto 1594 de 1984 establece los criterios de calidad admisibles para los diferentes usos del agua. Entre estos se encuentra el uso agrícola, pecuario, recreativo y de consumo humano y doméstico.

Tabla 2. Criterios de calidad para la destinación del recurso

Parámetro	Expresado como	Consumo Humano y doméstico(1)	Uso Agrícola	Uso Recreativo(2)
pH	Unidades	5 – 9	4.5 – 9.0	5.0 – 9.0
Oxígeno Disuelto (3)	mg/l O <sub>2</sub>	-	-	6.1
Cloruros	mg/l	250	-	-
Tensoactivos	mg/l	0.5	-	0.5
Grasas y/o Aceites	mg/l	Ausente	-	Ausente
Coliformes Totales	NMP/100ml	20000	< 5000	1000
Coliformes Fecales	NMP/100ml	2000	< 1000	200

(1) Para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional

(2) Contacto primario

(3) 70% de la concentración de saturación

El Decreto 3930 del 2010, establece los parámetros mínimos que deben ser utilizados en los modelos de simulación aplicables en la ordenación del recurso hídrico, los cuales se presentan a continuación:

- DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno a cinco (5) días.
- DQO: Demanda química de oxígeno.
- SST: Sólidos Suspendidos Totales.
- pH: Potencial del Ion hidronio, H<sup>+</sup>
- T: Temperatura.
- OD: Oxígeno disuelto.
- Q: Caudal.
- Datos Hidrobiológicos.
- Coliformes Totales y Fecales.

Así mismo, la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, “Por medio de la cual se establecen objetivos de calidad para las fuentes hídricas del departamento del Quindío” resuelve en su Artículo Primero cada uno de los objetivos de calidad de los diferentes cuerpos de agua en el departamento a ser alcanzados antes del año 2017.

Tabla 3. Objetivos de calidad rio Rojo, Gris y San Juan, CRQ

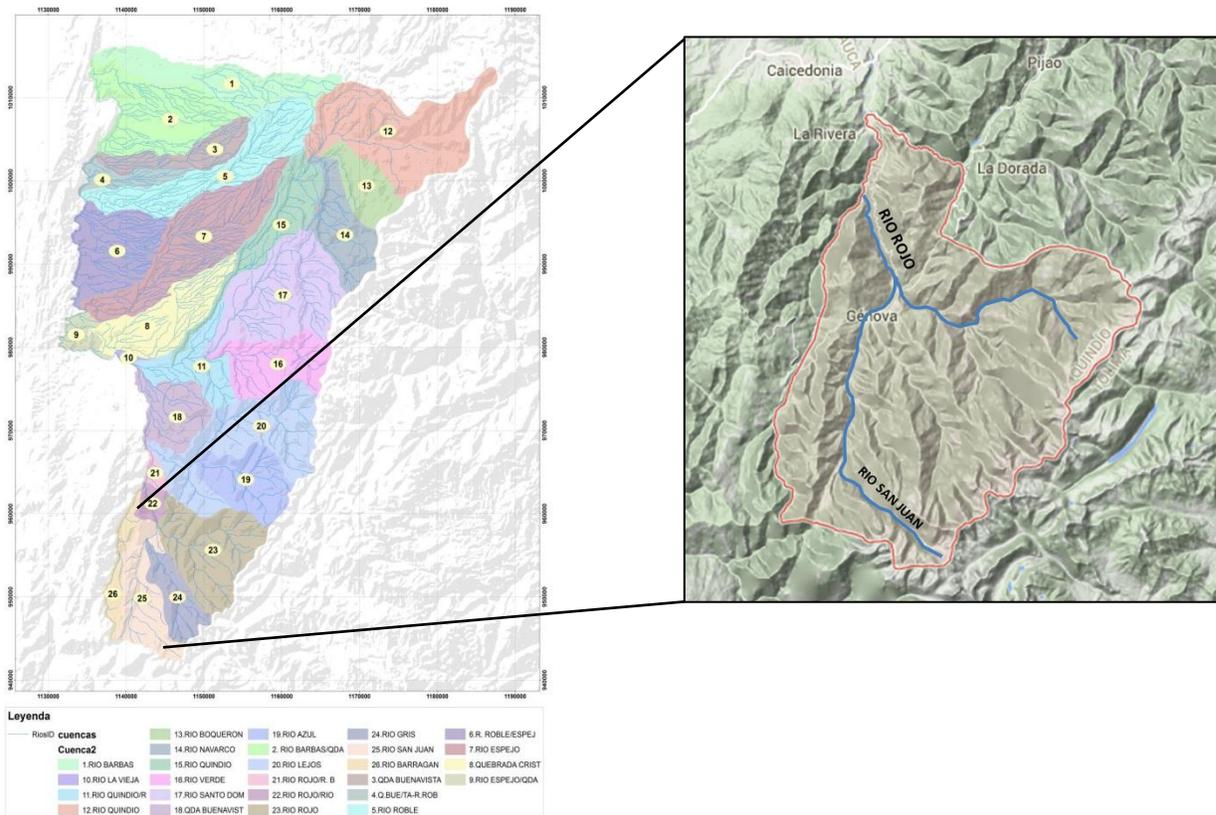
TRAMO DEL RIO	PARÁMETRO DE CALIDAD	OBJETIVO DE CALIDAD ESPERADA PARA EL AÑO 2017
Tramo Comprendido desde el puente vía a Génova hasta desembocadura en el rio Barragán	Oxígeno disuelto (mg/l O <sub>2</sub> )	Mayor a 5.0
	DBO (mg/l O <sub>2</sub> )	Menor a 5.0
	SST (mg/l)	Menor a 20
	pH (unidades)	Mayor a 6.5 y menor a 9

## 2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

### 2.1 LOCALIZACIÓN

El río San Juan nace en los límites con el departamento del Tolima a 3.850 m.s.n.m, al sur del departamento del Quindío, y conformando el valle de las Juntas, su afluente principal es el río Gris. Así mismo, el río San Juan es tributario principal del río Rojo, conformando la unidad hidrográfica del río Rojo.

Figura 1. Localización río San Juan - Departamento del Quindío



Geográficamente se localiza entre las siguientes coordenadas:

Tabla 4. Localización unidad hidrográfica Rio San Juan

	Latitud	Longitud
<b>Nacimiento</b>	04° 4' 32" N	75° 45' 13" W
<b>Desembocadura al río Rojo</b>	04° 13' 19.5" N	75° 46' 52.6" W

Fuente: Google Maps

## 2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL

De acuerdo a la información recopilada en el estudio “Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja, 2008”, las características fisiográficas principales del río San Juan se indican en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen Características Fisiográficas – unidad hidrográfica río San Juan y río Gris

RÍO	Área (km <sup>2</sup> )	Longitud Cauce (km)	Perímetro (Km)	Cota Nacimiento (m)	Cota Llegada (m)	Forma		
						Kf	Kc	la
Gris	53.75	15.16	41.55	3900	1465	0.23	1.59	2.57
San Juan	63.1	21.99	43.56	3850	1361	0.13	1.54	2.58

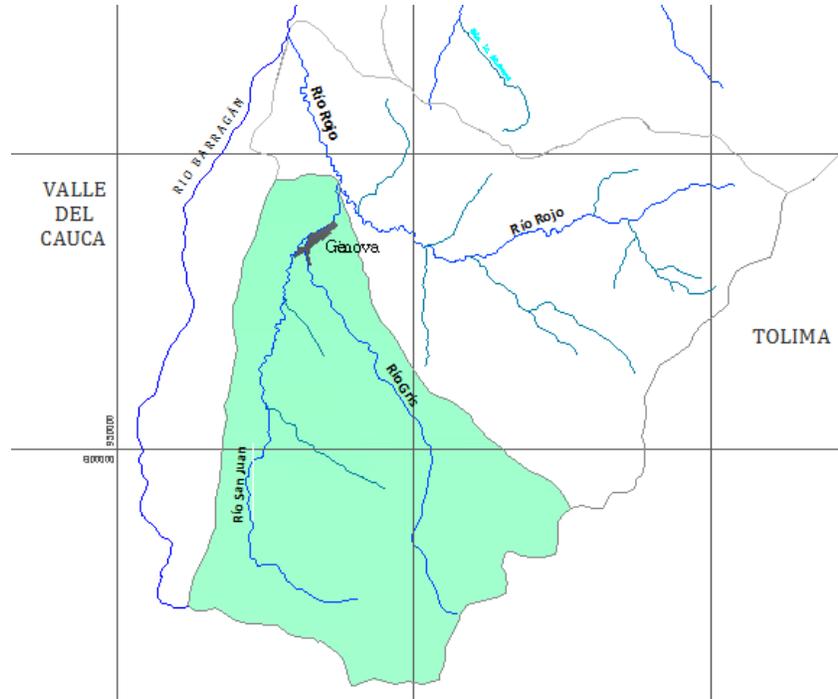
Fuente: Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río La Vieja, 2008.

Las características de este río son similares a las del río Gris, pero aparentemente en menor grado por la forma más alargada de la cuenca, lo hace menos peligroso desde el punto de vista de crecientes fluvio-torrenciales. Sin embargo sobre el casco urbano, existen numerosas viviendas localizadas muy cerca de la zona de influencia del río y por lo tanto en épocas de caudales máximos se puede producir socavación que induzca a la destrucción parcial o total de las mismas (Fenómeno de la Niña 2010-2011). En esta unidad hidrográfica, se evidencian procesos de remoción en masa y procesos erosivos de carácter superficial, dentro de los que se destacan la erosión laminar y cárcavamientos, siendo muy comunes en las zonas de laderas dedicadas a la ganadería y en los sectores de vertiente donde se han desarrollado cultivos limpios, sin técnicas de conservación de suelos (Fuente: *Alcaldía de Génova*).

### 2.2.1 Tributario principal

**Río Gris:** Nace al suroriente del municipio de Génova, en la cota 3900 m.s.n.m; atraviesa el casco urbano y abastece el acueducto municipal. Este río es considerado en época de lluvias, altamente peligroso ya que presenta un alto gradiente, limitado por valles estrechos y de pendientes moderadas a fuertes.

Figura 2. Unidad hidrográfica, río San Juan



### 2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

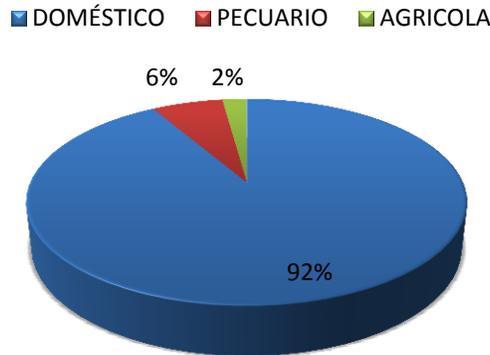
El municipio de Génova posee un alto potencial hídrico, resultado de las características hidrológicas del mismo. Éste pertenece a la unidad hidrográfica del río San Juan que a su vez es afluente principal del río Rojo, el cual finalmente desemboca al Río Barragán.

Caudal Máximo (m <sup>3</sup> /s)	3.90
Caudal Medio (m <sup>3</sup> /s)	1.92
Caudal Mínimo (m <sup>3</sup> /s)	0.57

Fuente: Tomado del estudio "Elaboración de Curvas de Gasto", Universidad del Quindío, 2002.

## 2.4 DEMANDA HÍDRICA

La principal demanda hídrica en la unidad hidrográfica del río San Juan es para uso doméstico representando el 92% de la demanda total, seguido por el uso pecuario con un 6%. (*Base de datos Concesiones CRQ 2014*).



Uso	Caudal concesionado (l/s)
Doméstico	63.50
Agrícola	1.50
Pecuario	4.33

Figura 3. Porcentajes del caudal demandado, unidad hidrográfica río San Juan

## 2.5 VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

El río San Juan, es el límite del casco urbano del municipio por el norte, y transita de occidente a oriente. Sobre él se encuentran tres (3) vertimientos directos localizados en el sector Transversal 12 con calle 33, carrera 13 con calle 13 y Carrera 12 con calle 12, todos de origen doméstico.

Río Gris es límite del casco urbano del municipio por sur y occidente, y hace su recorrido de sur a norte, sobre él se encuentran dos (2) vertimientos de origen doméstico, localizados en el sector de la carrera 12 con calle 29 y carrera 12 con calle 28.

Tabla 6. Numero de vertimientos hacia los diferentes cuerpos de agua, provenientes de la zona urbana

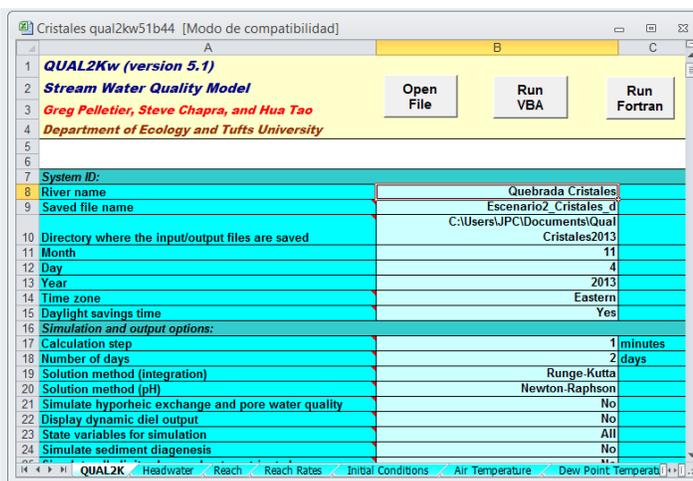
Municipio Génova	Fuentes	Vertimientos
	Río San Juan	3
Río Gris	2	

Fuente: PSMV Génova, 2009

Debido a la poca información existente no es posible la elaboración de perfiles de calidad que permitan visualizar el comportamiento de los diferentes parámetros a lo largo del cauce principal.

### 3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL Qual2K

El modelo dinámico unidimensional Qual2k, simula la calidad del agua en ríos y arroyos de bajo caudal, asume zonas anóxicas y tramos longitudinalmente heterogéneos, maneja tributarios, fuentes puntuales y difusas. La EPA, (U.S. Environmental Protection Agency), lo aprobó en el 2007, se realizaron una serie de simulaciones en el en el arroyo “Southampton” en el Condado de Montgomery y Bucks, en Pennsylvania, USA en el 2008 (Capacasa, J;, 1998). En Colombia, fue validado en el río Bogotá, (IDEAM, 2010).



#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

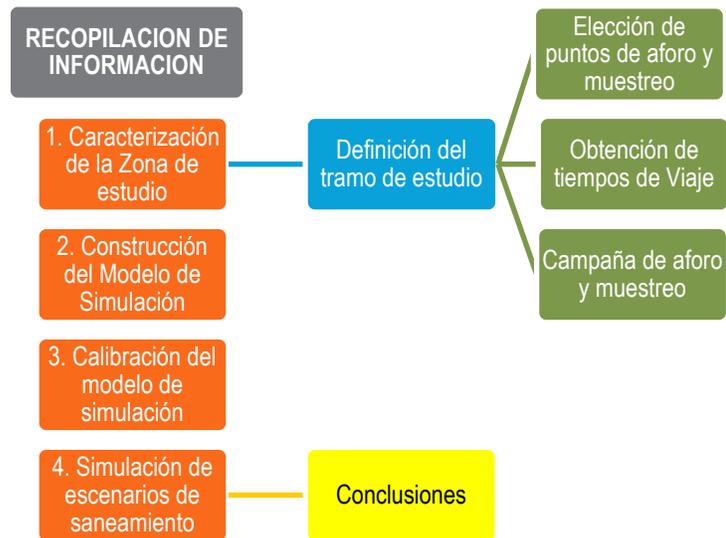
El modelo presenta características útiles para la simulación de los rios y quebradas de montaña (cauces con pendiente longitudinal mayor al 1.0 %, Parraga 2004.) propios de nuestra región. A continuación se detallan algunas de sus cualidades:

- Modelación en una sola dimensión (1D), en estado estacionario y con flujo no uniforme.
- Simula el cauce bien mezclado lateral y verticalmente.
- Simula el ingreso de fuentes puntuales y difusas.
- Simula las concesiones de agua como salidas puntuales y difusas.
- Simula la diagénesis y el flujo hiporreico.
- Permite la discretización espacial con tramos de diferentes longitudes.
- Simula las dos formas de oxidación de la materia orgánica carbonosa: rápida (DBOC<sub>5</sub>) y lenta (DBOC<sub>20</sub> o DBOC<sub>ultima</sub>).
- Simula la anoxia.
- Simula las bacterias (Coliformes totales o fecales)

### 3.2 METODOLOGÍA

La Figura 4, representa esquemáticamente la metodología aplicada para la modelación de la calidad del agua para una corriente hídrica.

Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología empleada



Inicialmente se realizó la recopilación de información cartográfica con el fin de localizar la corriente principal junto a sus tributarios. A su vez, se evaluaron las diferentes estaciones a monitorear seleccionadas de acuerdo a su importancia geográfica y usos actuales (concesiones y vertimientos). Posteriormente, se georreferenciaron los puntos o secciones ya escogidos, para así determinar los tiempos de viaje de la masa de agua, cuyo fin es establecer un horario en la toma de muestras de calidad y cantidad sobre el tramo objeto de evaluación.

Definido el tramo, las secciones y los valores fisicoquímicos e hidrológicos a modelar, se construye el modelo de simulación teniéndose como objetivo, la identificación del comportamiento de los parámetros a modelar mediante el software QUAL2K. Para el presente estudio, se realizó una campaña de aforo y muestreo el día 6 de Agosto de 2015, esperando que esta información simule el comportamiento usual de la corriente hídrica bajo condiciones de caudales medios a bajos, sin presencia de lluvias que modifiquen el estado del líquido en su trayectoria.

Luego de ingresar los datos que requiere el modelo, se realiza el proceso de calibración, donde se pretende aproximar los valores modelados con los valores reales

tomados en la fuente hídrica, siendo esta la parte más importante en la implementación de esta herramienta. Por último se efectúa la simulación de escenarios de saneamiento en relación con los objetivos de calidad esperados para el año 2017 (Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, CRQ).

#### 4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO

El tramo de estudio, tiene una longitud de aproximadamente 4.47 kilómetros y está ubicado en su totalidad en el municipio de Génova. El cauce tiene una diferencia de nivel entre estaciones Cabecera y Desembocadura de 116 metros y una pendiente media de 3 %.

A continuación se presentan las coordenadas de los puntos a modelar conformados por 2 secciones transversales sobre la fuente principal y tres vertimientos (identificado uno como afluente natural – río Gris, receptor de aguas residuales provenientes del casco urbano del municipio de Génova).

Tabla 7. Localización de puntos a modelar sobre el río San Juan

SECCION No.	ESTACION	CODIGO	ABSCISA (Km)	COORDENADAS		
				X	Y	m.s.n.m.
1	Puente Cumaral	R1	K 00 + 000	4° 12' 0.6"	75° 47' 50.6"	1480
2	Vertimiento Polideportivo	V1	K 01 + 700	4° 12' 17"	75° 47' 41.6"	1470
3	Río Gris	V2	K 01 + 960	4° 12' 22.8"	75° 47' 37"	1460
4	Vertimiento Nueva Esperanza	V3	K 02 + 970	4° 12' 39"	75° 47' 08.4"	1400
5	Desembocadura	R2	K 04 + 472	4° 13' 06"	75° 46' 42"	1364

R: Estación sobre el río San Juan  
 V: Vertimiento  
 m.s.n.m.: altura sobre el nivel del mar

Las diferentes secciones transversales del río se fijaron en función de:

- a. Accesibilidad
- b. Seguridad del personal
- c. Condiciones hidráulicas

Figura 5. Puntos de aforo y muestreo, río San Juan



En el momento de la toma de muestras se observó que el vertimiento localizado en la Carrera 12 con Calle 12 (barrio San Vicente) no tenía caudal, por lo cual se decidió eliminar este punto. Lo anterior podría ser asociado a la hora de toma de la muestra dado que el área aferente de esta alcantarilla es algo pequeña. Finalmente se obtuvo las cinco (5) estaciones que se observan en la Figura 5.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR

A continuación se presenta un resumen de las principales características que componen las estaciones de aforo y muestreo.

Tabla 8. Características de los puntos de foro y muestreo – río San Juan

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p><b>R1</b> <b>Puente Cumaral</b></p>	<p>Vía hacia la Vereda Cumaral</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Río en aparente buenas condiciones, rodeado por pastizales.</li> </ul>	
<p><b>V1</b> <b>Vertimiento Polideportivo</b></p>	<p>Zona urbana, Sector Transversal 12 Calle 33</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Vertimiento directo al río San Juan.</li> </ul>	
<p><b>V2</b> <b>Río Gris</b></p>	<p>Zona urbana</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Río en aparente buenas condiciones</li> <li>· Presencia de residuos sólidos, dentro y fuera del lecho del río.</li> <li>· Viviendas localizadas en la rivera del río.</li> </ul>	

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO
<p><b>V3</b>  <b>Vertimiento</b>  <b>Nueva Esperanza</b></p>	<p>Zona urbana, Cra. 13  Calle 13</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Vertimiento directo al rio San Juan.</li> </ul>	
<p><b>R2</b>  <b>Desembocadura</b></p>	<p>Vía Génova-Barragán</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Olor a agua residual en el momento de la toma de muestras,</li> <li>· No se observa algún tipo de vertimiento directo 100 metros aguas arriba.</li> </ul>	

## 4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE

Se requiere la obtención de los tiempos de viaje en los diferentes puntos dentro del río San Juan para así conocer cuánto tiempo tarda la masa de agua en trasladarse de una estación a otra, lo cual permite, en la medida de lo posible, tomar las muestras de agua de la misma masa de forma homogénea, además de poder realizar una óptima planificación del muestreo.

A continuación se explica la metodología utilizada para la obtención de los tiempos de viaje según el modelo matemático Qual2k (Chapra y Pelletier 2003) y su resultado.

El tiempo de viaje ( $T_n$ ) de una corriente hídrica es igual a la sumatoria de los tiempos de residencia ( $t_n$ ) de cada tramo discretizado, es decir:

$$T_n = \sum_1^n t_n$$

Dónde:

$$t_n = \frac{\text{Volumen}_n}{\text{Caudal}_n} \quad \text{Volumen}_n = \frac{(\text{Area}_i + \text{Area}_k) \div 2}{\Delta x_{i,k}} \quad \text{Caudal}_n = \frac{(\text{Caudal}_i + \text{Caudal}_k)}{2}$$

Tabla 9. Variables hidrométricas obtenidas el 14 de mayo de 2015 durante la jornada de aforo para la obtención de los tiempos de viaje

Estación	Velocidad (m/s)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Profundidad Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Puente Cumaral	0.439	2.205	0.232	9.500	0.968
Desembocadura	0.445	3.616	0.338	10.700	1.608

Tabla 10. Tiempos de viaje de la masa de agua para el día 14 de mayo de 2015

ESTACIÓN	A(m <sup>2</sup> )	Δx (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Q medio (m <sup>3</sup> /s)	T viaje (seg)	T viaje (min)	ΣT viaje (min)	ΣT viaje (hora)	Horas parciales
Puente Cumaral	2.205	0	0.968	0	1.0	0	0	0	0	0
Desembocadura	3.616	2669	1.608	7767.46	1.3	6030.18	100.50	100.50	1.68	1.68

### 4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS

El método de aforo para la obtención de los tiempos de viaje y la toma de muestras de agua, fue seleccionado de acuerdo con lo establecido por el IDEAM en su “Guía para el monitoreo de cuerpos de agua, 1999”. El tipo de aforo implementado fue por vadeo; se seleccionaron un mínimo de 11 secciones verticales dentro de cada sección transversal elegida (punto de monitoreo); la velocidad de flujo se obtuvo por medio de un molinete de eje horizontal.

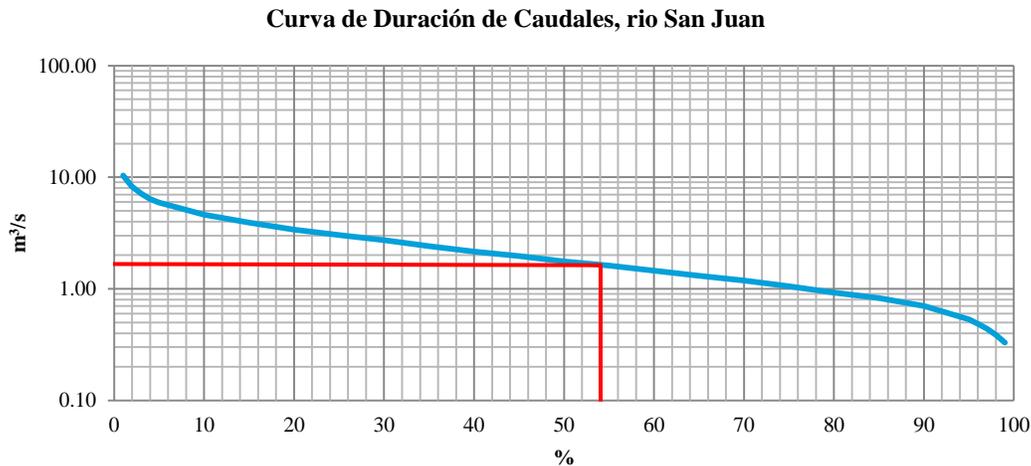
Tabla 11. Variables hidrométricas obtenidas el 2 de agosto de 2015 durante la jornada de aforo y muestreo

Punto	Abscisa	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Profundidad Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
R1	K 00+000	Puente Cumaral	0.900	1.136	0.196	5.800	1.023
V1	K 01+700	Vertimiento Polideportivo					0.001
V2	K 01+960	Rio Gris	0.509	0.955	0.208	4.600	0.486
V3	K 02+970	Vertimiento Nueva Esperanza					0.049
R2	K 04+472	Desembocadura	0.389	3.795	0.345	11.000	1.478

- Caudal de muestreo

El tipo de caudal (máximo, medio o bajo) obtenido el día del muestreo, se determinó a partir de la *Curva de Duración de Caudales*, elaborada dentro del informe: Línea Base CRQ et al, 2011. Esta representa un análisis de frecuencias de caudales que permite emplearse para referenciar el estado del recurso hídrico en cuanto a cantidad en condiciones de caudales máximos, medios, bajos y de sequía.

Figura 7. Curva de Duración de Caudales, rio San Juan



Fuente: Línea Base, CRQ 2011.

El valor del caudal arrojado el día del muestreo (23 de julio de 2015) en la estación Desembocadura fue de **1.478 m³/s**, es decir, este caudal es superado un 54% durante el año, se puede considerar como caudal medio.

## 4.4 CONDICIONES DE BORDE Y RED DE MODELACION

### 4.4.1 Condiciones de borde externas

Las condiciones de borde externas corresponden a las fronteras o límites del tramo a modelar de cualquier corriente hídrica principal (estación Puente Cumaral y Desembocadura). La localización de las fronteras abiertas del modelo y la definición de las condiciones hidrodinámicas y de calidad del agua a imponer en dichos límites, son denominadas como condiciones de frontera. Estas constituyen en uno de los aspectos más relevantes dentro del proceso de implementación del modelo matemático.

### 4.4.2 Condiciones de borde internas

Las condiciones de borde internas de una corriente hídrica a modelar, corresponden a los diferentes afluentes y derivaciones existentes a lo largo del cauce principal, como son afluentes naturales y aguas residuales domésticas para el caso de estudio. Los

caudales y las características de calidad para las condiciones de borde internas son las obtenidas durante el día de muestreo en el río San Juan.

#### 4.4.3 Red final de modelación

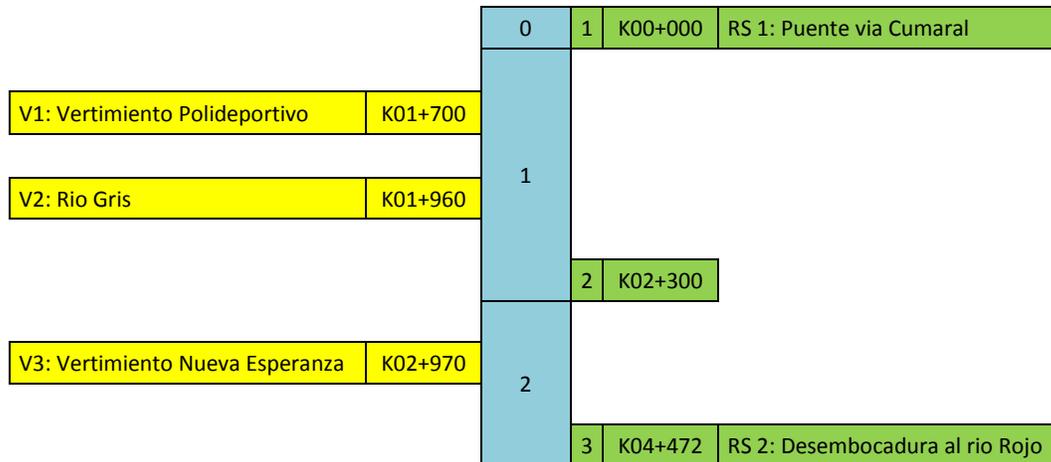
El grid o malla de modelación, quedó conformada por 3 secciones transversales, de las cuales 2 corresponden a las secciones localizadas en las salidas de campo como estaciones de aforo y de toma de muestras de agua y la restante a una estación intermedia la **cuán** fue interpolada a partir de las existentes. En la siguiente tabla se presenta la malla de modelación para el río San Juan, donde se especifican las distancias entre las secciones a implementar.

Tabla 12. Localización de las estaciones transversales de la malla de modelación para el río San Juan

SECCION No.	ESTACION	CODIGO	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES $\Delta x$ (m)	COORDENADAS		
					X	Y	a.s.n.m.
1	Puente Cumaral	R1	K 00 + 000	-	4° 12' 0.6"	75° 47' 50.6"	1480
2	Vertimiento Polideportivo	V1	K 01 + 700	1700	4° 12' 17"	75° 47' 41.6"	1470
3	Río Gris	V2	K 01 + 960	260	4° 12' 22.8"	75° 47' 37"	1460
4	Vertimiento Nueva Esperanza	V3	K 02 + 970	1010	4° 12' 39"	75° 47' 08.4"	1400
5	Desembocadura	R2	K 04 + 472	1502	4° 13' 06"	75° 46' 42"	1364

Con base en los diferentes análisis efectuados, la red esquematizada del río San Juan para fines de la modelación numérica, queda definida de la siguiente manera, (ver Tabla 13): 3 estaciones transversales, 2 condiciones de borde externas (estación Puente Cumaral y estación Desembocadura) y 3 fronteras internas (dos vertimientos y el río Gris).

Tabla 13. Red esquematizada para modelación de calidad del agua – río San Juan



#### 4.5 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO

Durante la campaña de muestreo para la corriente en estudio, se obtuvo información de caudales y parámetros de calidad solamente en los tributarios de mayor interés debido a su localización. Partiendo de este hecho, fue necesario tener en cuenta dentro de este componente, las fuentes difusas de agua necesarias para el balance de caudales no aforados en campo, es decir, es necesario introducir estos valores de caudal ya que la medición en campo no es específicamente exacta y se pierden ciertas cantidades de agua entre tramo y tramo.

Tabla 14. Fuente Difusa incluida como parte del balance hídrico

Fuente Difusa		Localización entre la abscisa (km)		Diffuse Abstraction	Diffuse Inflow
				m <sup>3</sup> /s	
Fuente Difusa 1	D1	1.0	0.0	0.080	-

##### 4.5.1 Resultados de la modelación del componente hidráulico

Un modelo es una representación discreta y simplificada de una situación continua y compleja de un flujo real. Los diferentes tramos de una fuente hídrica o un canal son representados por elementos equivalentes o simplificados (unidimensionales,

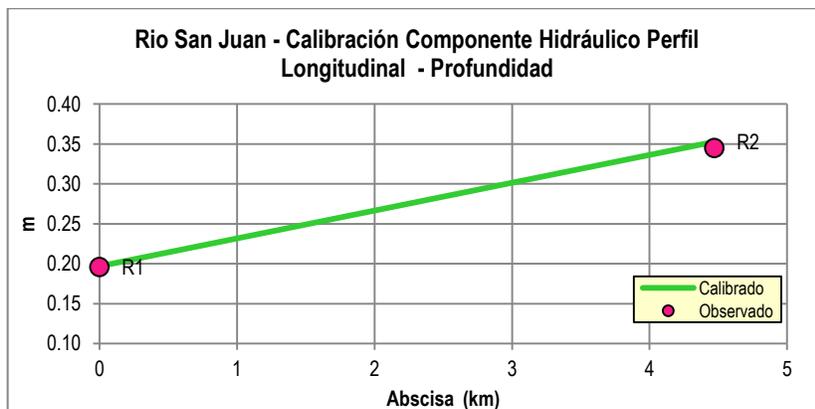
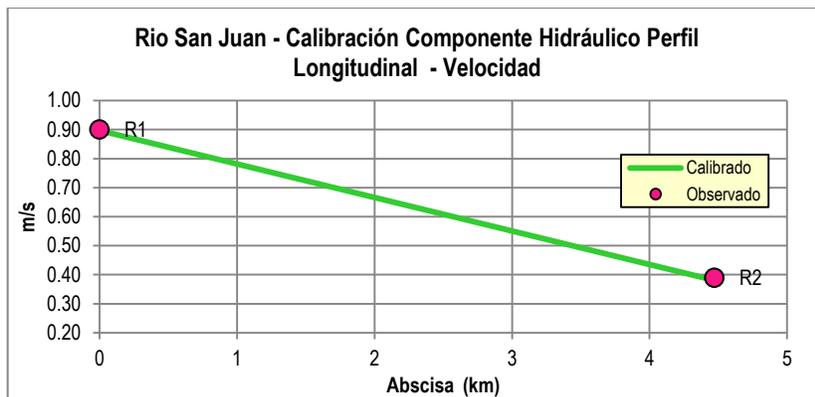
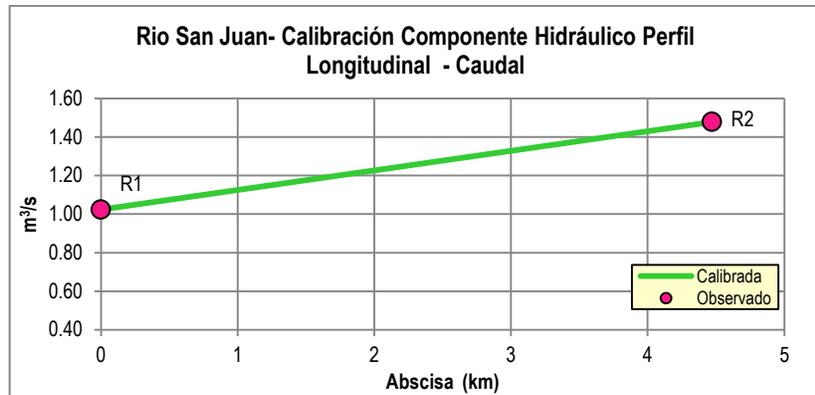
bidimensionales o tridimensionales), en los cuales se considera que el flujo sigue o responde a ciertas leyes físicas (continuidad y cantidad de movimiento), representadas mediante ecuaciones diferenciales que incluyen diferentes coeficientes empíricos. En el proceso de implementación del sistema de modelación matemática, inicialmente se lleva a cabo la fase de calibración del modelo hidrodinámico, el cual se constituye el módulo básico del sistema de modelación. Una vez lograda la calibración del modelo hidrodinámico, se procede a efectuar la calibración de los modelos de transporte y de calidad de agua, en la medida en que la información de campo disponible lo permita.

En la Tabla 15 se presentan los resultados de las variables hidrométricas, obtenidas después de la calibración hidráulica. Asimismo, en las Figura 8 se muestran los perfiles longitudinales de las variables observadas comparadas con las calculadas por el modelo (simuladas).

Tabla 15. Variables hidrométricas obtenidas en la calibración hidráulica

Abscisa (km)	Profundidad media (m)	Ancho Cauce (m)	Área húmeda (m <sup>2</sup> )	Velocidad media (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	n Manning
0.000	0.20	5.80	1.14	0.90	1.02	0.0740
2.300	0.45	8.00	3.62	0.42	1.51	0.1500
4.472	0.35	11.00	3.88	0.38	1.48	0.3000

Figura 8. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal de caudal, velocidad y profundidad - Observadas vs Simulada



## 5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD

### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO

Los datos de entrada (Inputs) para el modelo de “Calidad del agua” en el río San Juan, fueron obtenidos por medio de la toma de muestras en el cauce principal y vertimientos y tributario de mayor interés hídrico, de forma simultánea, siguiendo la masa de agua de acuerdo a los horarios establecidos (tiempos de viaje). Estas muestras fueron posteriormente analizadas en el laboratorio de aguas de la CRQ.

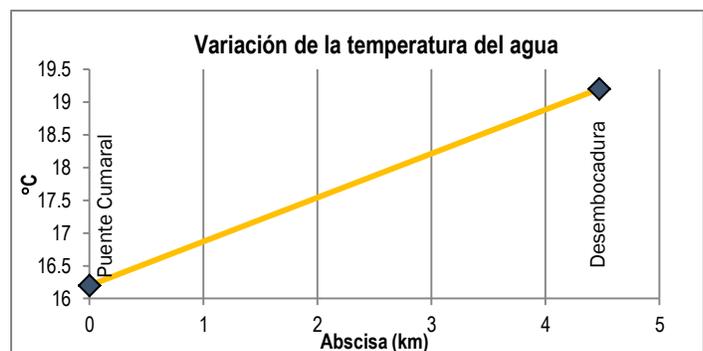
Tabla 16. Datos de calidad río San Juan (CRQ) – Campaña de muestreo 06/08/2015

PUNTO DE MONITOREO		Caudal (m³/s)	Temp. (°C)	SST (mg/l)	ST (mg/l)	OD (mg/l O <sub>2</sub> )	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	pH (unidades)	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
										NMP/100ml	NMP/100ml
Puente Cumaral	R1	1.023	16.20	1.80	107.00	7.99	0.72	12.90	8.05 (16.2 °C)	4.90E+04	4.90E+04
Vertimiento Polideportivo	V1	0.001	22.80	196.00	620.00	3.38	349.00	668.00	7.69 (22.8 °C)	>1.60E+11	>1.60E+11
Río Gris	V2	0.486	17.10	4.00	140.00	7.46	1.94	10.80	8.26 (17.1 °C)	>1.60E+06	>1.60E+06
Vertimiento Nueva Esperanza	V3	0.049	21.90	114.00	164.00	4.31	141.00	301.00	8.20 (21.9 °C)	>1.60E+10	>1.60E+10
Desembocadura	R2	1.478	19.20	4.00	154.00	6.91	3.13	14.60	8.21 (19.2 °C)	>1.60E+06	>1.60E+06

#### 5.1.1 Observaciones Generales de los reportes de calidad

- **Temperatura**

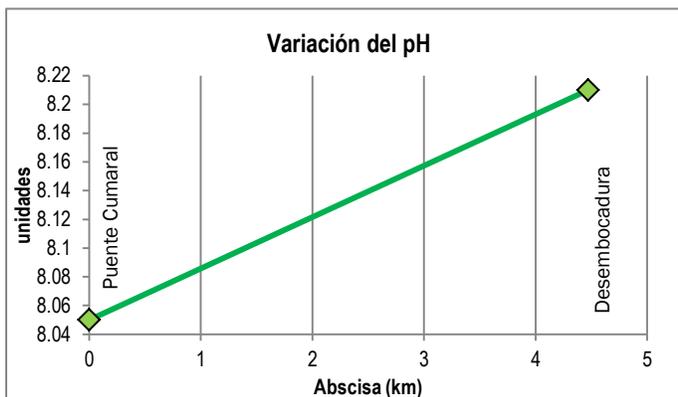
Existe una tendencia creciente de esta variable relacionada directamente con la altura sobre el nivel del mar lo que hace que esta vaya en aumento de estación a estación (1480 m.s.n.m a 1364 m.s.n.m). Además, las mediciones de temperatura en las estaciones van asociadas al aumento o disminución de la temperatura ambiente que se produce en el transcurso del día. La temperatura influye directamente en la disociación de sales y gases, por lo tanto en la



conductividad eléctrica y el pH. Para el tramo de estudio se aprecia un aumento del 16% de este parámetro (16.2°C a 19.2°C) el cual podría estar asociado a la descripción anterior así como a los vertimientos de ARD que llegan al río.

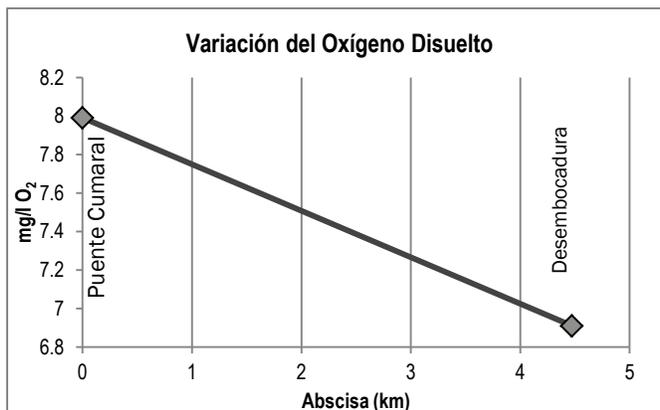
- **pH**

El análisis de esta variable es fundamental para establecer la calidad del agua, pues permite identificar las condiciones ácidas o alcalinas de una corriente cuyos valores extremos puede repercutir seriamente en la flora y fauna acuáticas. En todo momento los valores se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84 (entre 5.0-9.0 unidades): 8.05 a 8.21 unidades, aceptable para la destinación del recurso para consumo humano-doméstico y recreativo.



- **OD**

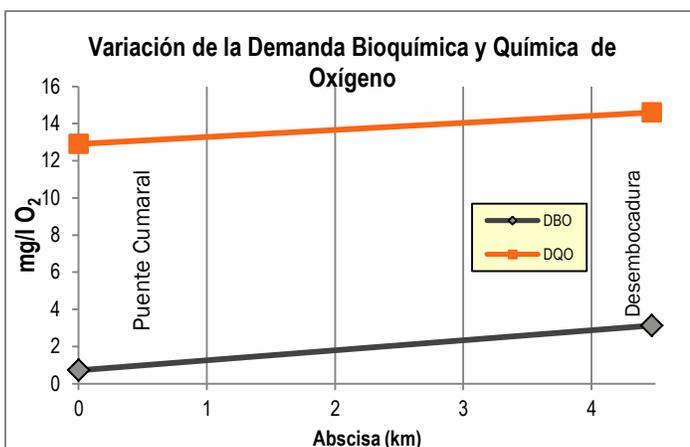
Indicador importante de la calidad del agua. El oxígeno disuelto en el agua proviene del oxígeno en el aire que se ha disuelto en el agua, por lo que están muy influenciados por las turbulencias del río (que aumentan el OD) o ríos sin velocidad (en los que baja el OD). Los niveles de oxígeno disuelto típicamente pueden variar entre 7 y 12 mg/l O<sub>2</sub>. Los niveles bajos de OD pueden encontrarse en áreas donde el material orgánico (vertimientos de plantas de tratamiento, granjas, plantas muertas y materia animal) está en descomposición. Las bacterias requieren oxígeno para descomponer desechos orgánicos y, por lo tanto, disminuyen el oxígeno del agua. Igualmente este indicador depende de la temperatura del agua, puesto que el agua más fría puede guardar más oxígeno en ella, que el agua más caliente. El nivel de OD en el río San Juan varía en un 14% entre las estaciones Puente Cumaral y Desembocadura (7.99 mg/l O<sub>2</sub> y 6.91 mg/l O<sub>2</sub>); estos valores permiten la existencia de vida acuática.



• **DBO y DQO**

Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana, hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales.

**DBO<sub>5</sub>:** Este parámetro mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en el agua. Es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos, entre mayor valor se presente mayor nivel de contaminación existe.



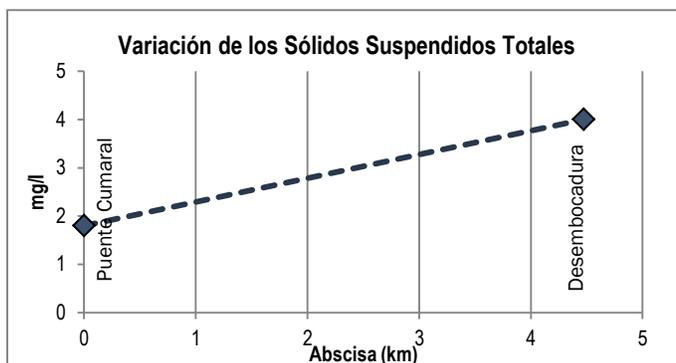
El río San Juan en su cuenca baja presenta niveles de DBO bajos, representativo este de aguas limpias con bajo contenido de materia orgánica biodegradable, valores que se encuentran entre los 0.72 y 3.13 mg/l O<sub>2</sub>.

**DQO:** Este parámetro estima la cantidad de materia orgánica en el agua que es oxidada o degradada por medios químicos, al igual que la DBO, entre mayor valor se presente mayor nivel de contaminación existe.

El río San Juan en su cuenca baja presenta niveles de DQO entre 10 y 20 mg/l O<sub>2</sub>, equivalente a aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, (18.5 y 11.9 mg/l O<sub>2</sub>) lo que se clasifica como “Buena calidad del agua” (Tomado de: Escala de clasificación de la calidad del agua, CONAGUA, México).

• **SST**

La concentración de sólidos suspendidos totales es importante para los ecosistemas fluviales por razones de calidad ecológica y del agua, los sólidos inorgánicos en suspensión atenúan la luz, principalmente a través del proceso de dispersión lo cual disminuye el proceso fotosintético en la flora acuática. Se ha demostrado las

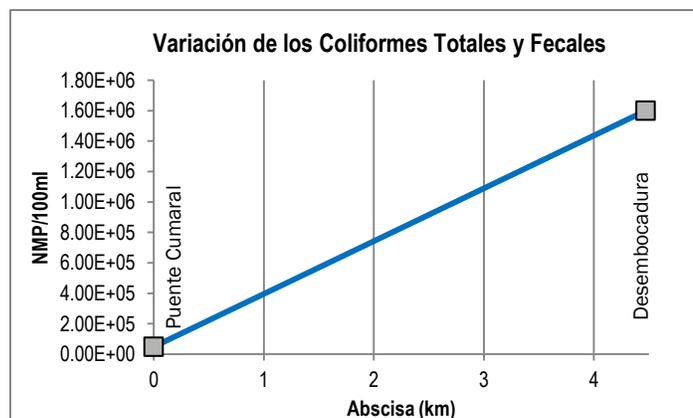


alteraciones en las relaciones depredador-presa (por ejemplo el agua turbia podría hacer difícil para los peces para ver a su presa – insectos). Los sólidos en suspensión también influyen en la actividad metabólica y proporcionan un área de superficie para la absorción y el transporte de una gran variedad de componentes.

Los resultados arrojan una concentración de sólidos suspendidos totales (SST) al final del tramo igual a 4 mg/l; valor aceptable para la calidad del agua, luego de su paso por el casco urbano del municipio de Génova.

- **Coliformes Totales y Fecales**

Esta variable se relaciona directamente con la presencia de bacterias procedentes del intestino humano y de animales de sangre caliente, pero también ampliamente distribuidas en la naturaleza, especialmente en suelos, semillas y vegetales. En su trayecto, aumentan los niveles de coliformes Totales y Fecales en un 97% respecto al punto inicial (de 4.9E+04 NMP/100ml a 1.6E+06 NMP/100ml).



En relación con la normatividad colombiana, los Coliformes Totales y Fecales no estarían cumpliendo con el criterio de calidad establecido en el Decreto 1594/84 en cuanto a la destinación del recurso para consumo humano y doméstico<sup>1</sup> y otros usos, debido a que estos superan los valores permitidos por la normatividad de 20000 NMP/100m y 2000 NMP/100ml para CT y CF respectivamente.

### 5.1.2 Análisis de las concentraciones obtenidas en los vertimientos puntuales identificados en el río San Juan con relación a la Resolución 0631 de 2015

Para la identificación de los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas de los prestadores del servicio público de alcantarillado (caso río San Juan), se evalúa previamente la carga contaminante en kg/día de DBO<sub>5</sub> con el fin de identificar la Tabla de los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles a cumplir.

<sup>1</sup> Utilizando para su potabilización tratamiento convencional.

Tabla 17. Carga contaminante de los vertimientos identificados en la modelación

ESTACION	DBO5 (mg/l O <sub>2</sub> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (l/s)	Carga Contaminante kg/día DBO5	Resolución 0631 de 2015 (Capítulo V, Art. 8)
Polideportivo	349.0	0.0009	0.93	28.039	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS -ARD Y DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PUBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES CON UNA CARGA MENOR O IGUAL A 625.00 Kg/día DBO <sub>5</sub>
Nueva Esperanza	141.0	0.0489	48.87	595.383	

Tabla 18. Cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, para los vertimientos puntuales identificados en la campaña de muestreo el día 06/08/2015

PUNTO DE MONITOREO		SST (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	pH (unidades)
Polideportivo	V1 - Concentración	196	349	668	7.69
	Cumplimiento Resolución 0631 de 2015	< 90 NO CUMPLE	< 90 NO CUMPLE	< 180 NO CUMPLE	(6-9) CUMPLE
Nueva Esperanza	V3 - Concentración	114	141	301	8.2
	Cumplimiento Resolución 0631 de 2015	< 90 NO CUMPLE	< 90 NO CUMPLE	< 180 NO CUMPLE	(6-9) CUMPLE

## 5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN

En el modelo se hace fundamental conocer las distintas constantes que determinan la tasa a la que reaccionan los diferentes parámetros de calidad. Las constantes que serán necesarias hallar son las siguientes:

- Constante de decaimiento de la DBO (Kd)
- Constante de reaireación (K<sub>2</sub>).
- Constante de decaimiento de los coliformes (K<sub>b</sub>).

### 5.2.1 Constante de decaimiento de la DBO (Kd)

- **Método de la cinética de primer orden**

La tasa de remoción de la materia orgánica es proporcional a la cantidad de esta que se encuentre presente en el instante del análisis. Además se ha demostrado que la cinética de esta reacción se puede suponer para efectos prácticos como de primer orden, es decir:

$$dL/dT = -KdL \quad (1)$$

Dónde:

L = Cantidad de Materia orgánica oxidable en el tiempo t, mg/L  
Kd = Coeficiente promedio de remoción de la DBO en el río, día<sup>-1</sup>

- **Método de cálculo entre tramos**

La constante de desoxigenación se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Romero, 2004):

$$Kd_e = [(1/\Delta t) \ln (L_A/L_B)] \quad (2)$$

$$Kd = (Kd_e/2.3) \quad (3)$$

Dónde:

Kd<sub>e</sub> : Constante de desoxigenación (base e), día<sup>-1</sup>  
Kd : Constante de desoxigenación (base 10), día<sup>-1</sup>  
L<sub>A</sub> : DBOC en el punto A, mg/l  
L<sub>B</sub> : DBOC en el punto B, mg/l  
 $\Delta t$  : Tiempo de viaje entre A y B, días  
A : Punto localizado aguas arriba  
B : Punto localizado aguas abajo

Si bien es cierto, que existen varios métodos para determinar la constante de desoxigenación - el método de mínimos cuadrados, método de Thomas, método de la pendiente de Thomas, método de los puntos de Rhame - para llevar a cabo la modelación se decide por la metodología del cálculo de tramos, método más intuitivo y de mayor facilidad de manejo, y el cual permite obtener las constantes entre cada tramo (estaciones de muestreo), lo que da una representación muy aproximada de los valores de decaimiento que se dan en el cauce.

Además, la bondad de este método frente al método de cinética de primer orden, es que no hace falta estimar la constante de desoxigenación a los 20 días, ya que no es representativo de la situación que ocurre en la quebrada, en general, las fuentes de montaña tienen una alta capacidad de reaireación por la turbulencia que se genera en rápidos y caídas, y por lo tanto el nivel de oxígeno disuelto se mantiene alto favoreciendo la degradación aerobia de la materia orgánica y la nitrificación de las diferentes especies de nitrógeno. Adicionalmente, por la baja profundidad de la corriente, la luz solar penetra la columna facilitando la mortalidad de sustancias patógenas. A su vez, en las piscinas y zonas muertas o de almacenamiento de las fuentes de montaña, bajo condiciones de caudal bajo, la materia orgánica particulada

y los sólidos suspendidos se sedimentan y pueden quedar temporalmente atrapados, aumentando la capacidad efectiva de autopurificación.

Así pues, un método empírico como es el método de cálculo entre tramos, permite obtener valores de la constante de desoxigenación similares a los obtenidos después del proceso de calibración del modelo.

- **Constante de reaireación (K<sub>2</sub>)**

Se ha demostrado que la tasa de transferencia de oxígeno a las corrientes por el fenómeno de reaireación depende de la hidrodinámica de los dos medios, de la intensidad, de la turbulencia y la superficie del agua, además de la relación entre el área superficial y el volumen del agua, como se muestra a continuación:

$$\frac{dC}{dt} = K_L A (C_s - C) / V = K_2 (C_s - C) \quad (4)$$

Donde  $K_L$  es el coeficiente de absorción o de transferencia de masa y  $K_2$  es el coeficiente de reoxigenación.

### 5.2.2 Constante de decaimiento de los coliformes (K<sub>b</sub>)

Se utilizará la siguiente fórmula:

$$K_B = K_B = K_{B1} + K_{Bluz} + K_{B(sed)} - K_{a(crecimiento)} \quad (5)$$

Dónde:

$K_B$	: Constante de decaimiento de los coliformes, día <sup>-1</sup>
$K_{B1}$	: Decaimiento por salinidad, día <sup>-1</sup>
$K_{Bluz}$	: Decaimiento por la luz, día <sup>-1</sup>
$K_{B(sed)}$	: Decaimiento por sedimentación, día <sup>-1</sup>
$K_{a(crecimiento)}$	: Tasa de crecimiento de los coliformes, día <sup>-1</sup>

La concentración de coliformes en aguas naturales se viene usando como indicador de contaminación potencial por patógenos desde 1890. Los factores que afectan a la

aparición y desaparición de coliformes son múltiples, factores físicos, físico-químicos y bioquímicos-biológicos.

Tradicionalmente la desaparición de coliformes se trata como una cinética de primer orden (como casi todas las tasas relacionadas en el proceso de modelación). Lombardo va un poco más allá, y en un esfuerzo por describir la dinámica de los coliformes separa la cinética en tres ecuaciones de primer orden para Coliformes totales (CT), Coliformes fecales (CF) y estreptococos fecales (SF).

Existen muchos planteamientos sobre el decaimiento de los coliformes, otro interesante es la que propuesta por Lantrip (1983), en la cual propone una ecuación que modela el decaimiento, siendo este una combinación de la combinación de modelos que dependen de la intensidad lumínica y de los que no. La dificultad para la aplicación de este modelo, sería el conocimiento del valor de la intensidad lumínica y la temperatura para sustituir en la ecuación de Lantrip.

### 5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD

Una vez definidos los parámetros de calibración que tienen mayor sensibilidad además del ajuste manual de los valores de calidad para las descargas difusas, se inició el proceso de calibración del modelo seleccionado. Los parámetros con los menores efectos se dejaron fijos durante el proceso teniendo como base los valores reportados en la literatura científica.

La temperatura fue el primer parámetro de calidad del agua en ajustarse, y posteriormente se procedió con el ajuste de la  $DBO_5$ , el OD, los SST y los CF. Con este ajuste manual preliminar de los parámetros de calibración, se realizaron las corridas del modelo. La calibración se efectuó comparando los resultados del modelo con los datos medidos en las estaciones sobre el cauce principal del río San Juan.

A continuación se presentan los valores óptimos de los diferentes parámetros de calibración, además de los diferentes perfiles longitudinales para las variables temperatura del agua,  $DBO_5$ , OD, SST, pH y CF.

Tabla 19. Constantes cinéticas de reacción utilizadas para la calibración

Tramo	Constante de Reaireación (1/d)	Velocidad de sedimentación (m/d)	Tasa de Oxidación Rápida (1/d)	Constante de decaimiento de los coliformes	Velocidad de sedimentación de la materia orgánica particulada (m/d)
Desembocadura	63.0	28.4	12.0	95.0	95.0

Figura 9. Modelo de calidad del agua – río San Juan  
 Perfil longitudinal de Temperatura del agua

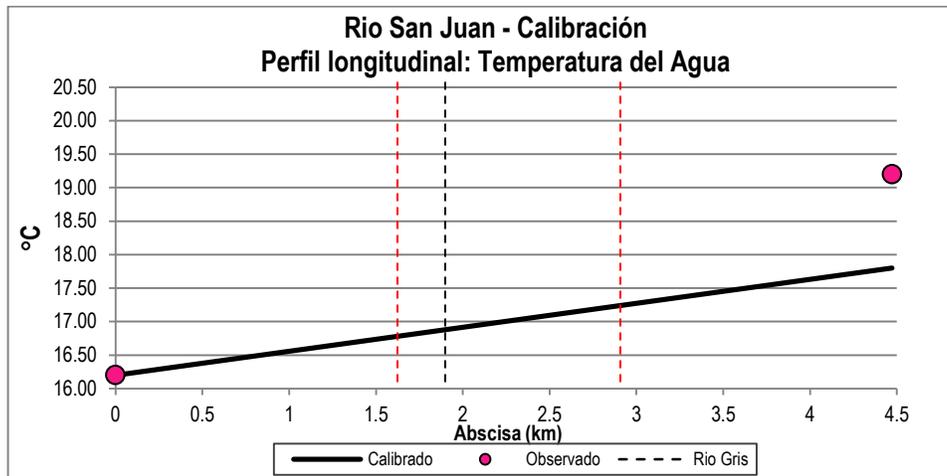


Figura 10. Modelo de calidad del agua – río San Juan  
 Perfil longitudinal DBO<sub>5</sub>

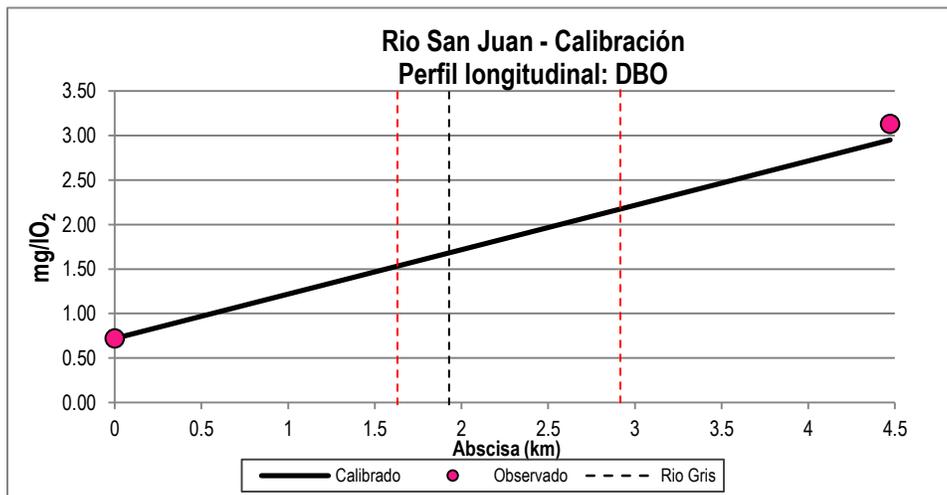


Figura 11. Modelo de calidad del agua – río San Juan  
 Perfil longitudinal OD

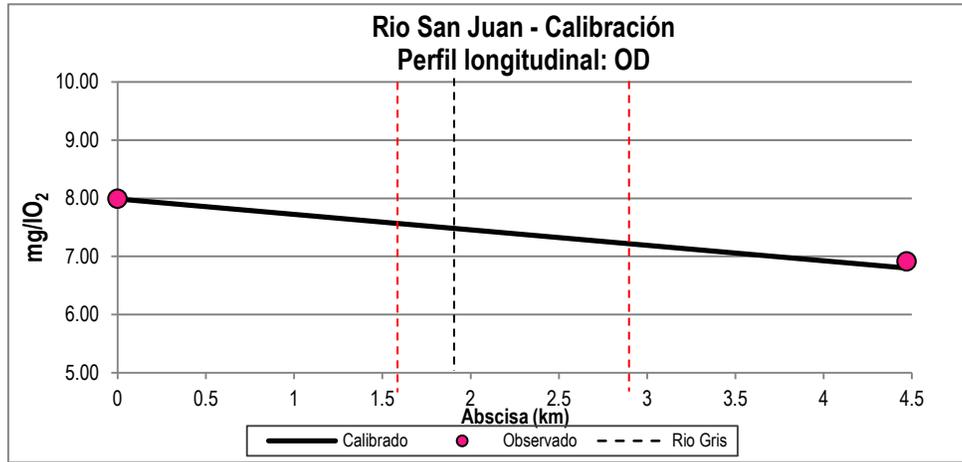


Figura 12. Modelo de calidad del agua – río San Juan  
 Perfil longitudinal pH

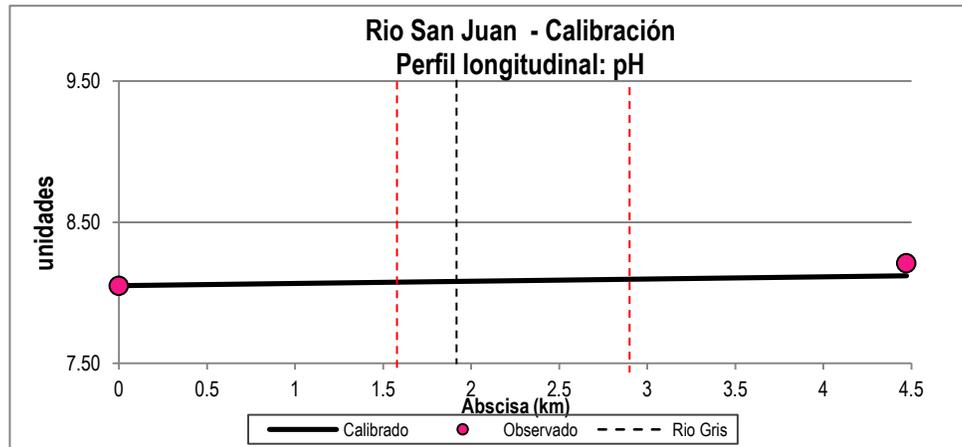


Figura 13. Modelo de calidad del agua – río San Juan  
 Perfil longitudinal SST

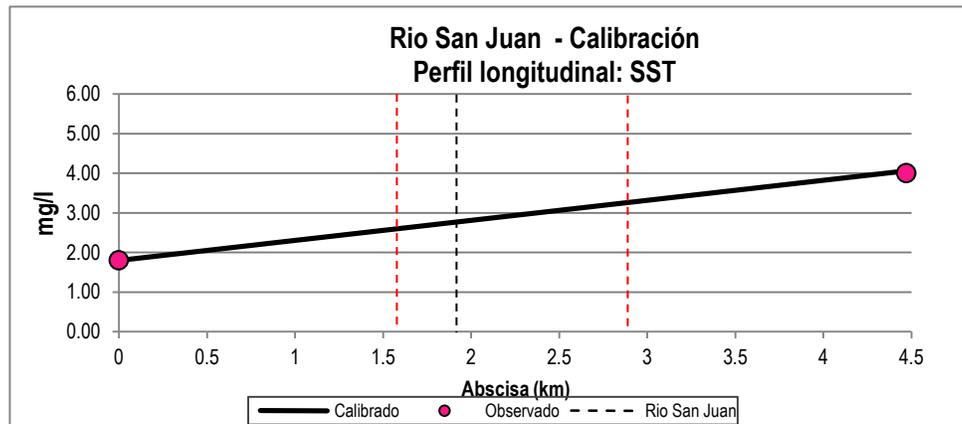
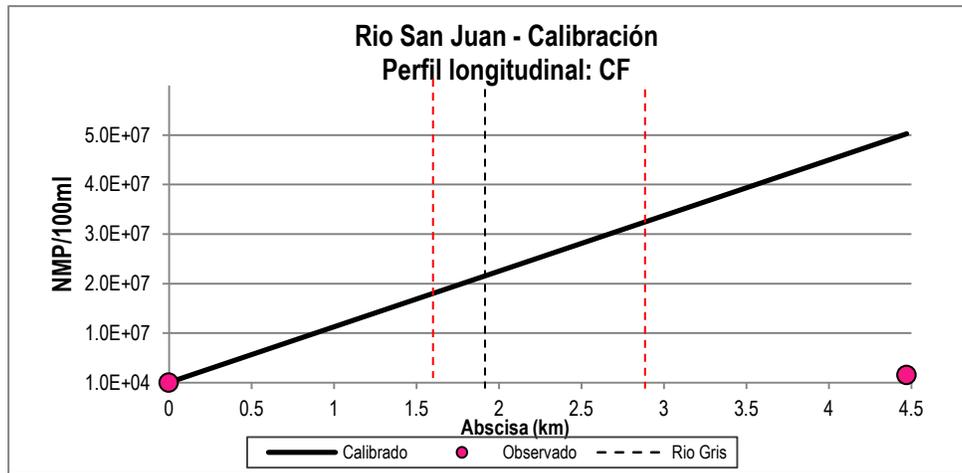


Figura 14. Modelo de calidad del agua – río San Juan  
Perfil longitudinal CF



## 6. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

---

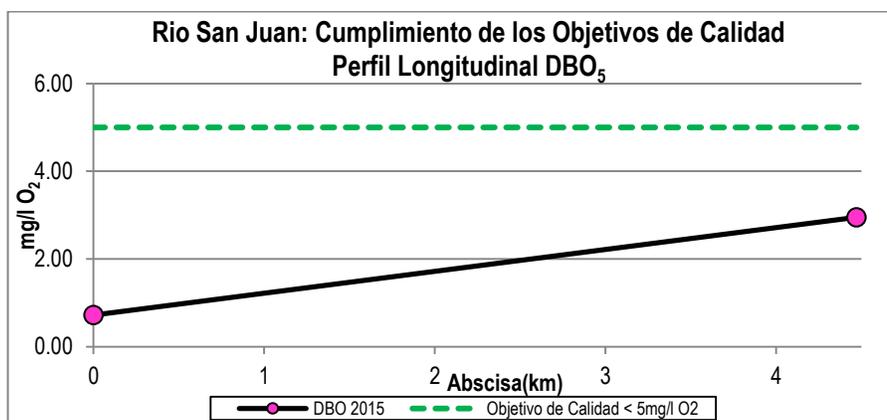
La validación o verificación del modelo de simulación, como su nombre lo indica, pretende certificar o garantizar que los resultados obtenidos de un modelo calibrado para una época específica, sirva para otras épocas cuando las condiciones sean similares. Con ello se pretende identificar un rango máximo o mínimo de los datos de calidad sobre cada punto monitoreado a partir de la información histórica. Sin embargo, no se cuenta con datos históricos sobre los puntos o estaciones de control en la corriente principal del río San Juan, por lo que no es posible realizar la validación del modelo.

Dado lo anterior, es necesario continuar con los muestreos sincronizados y reportes de caudal instantáneo, lo cual hace posible la verificación de cualquier modelo de simulación en una época específica. La información puede ser utilizada, como en el caso de la calibración del modelo, para mostrar tendencias del comportamiento de los parámetros de calidad o para tener una base estadística de estos.

## 7. CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD PARA EL RIO SAN JUAN

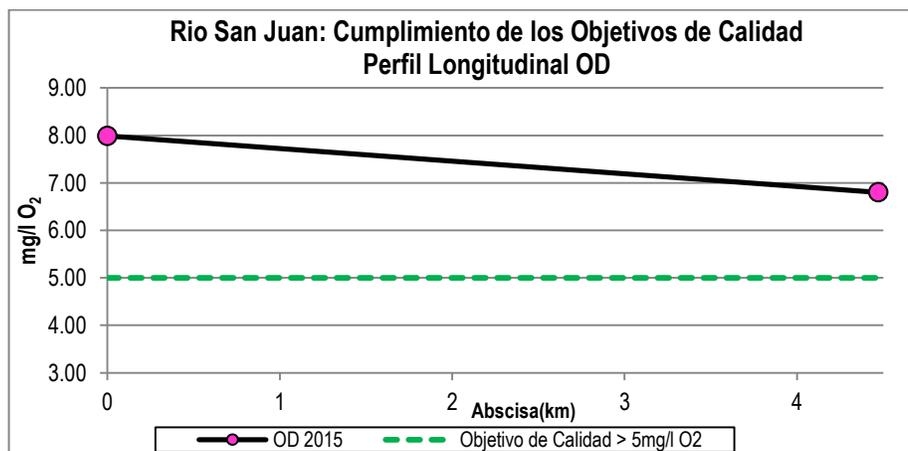
A continuación se presenta gráficamente el cumplimiento de los Objetivos de Calidad establecidos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008.

Figura 15. Perfil longitudinal DBO<sub>5</sub> año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



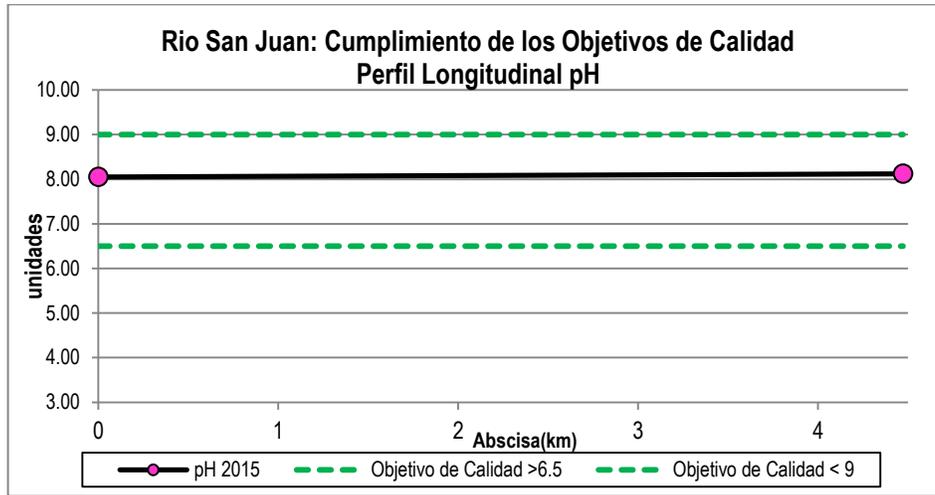
En todo momento se cumple con este objetivo menor a 5mg/l.

Figura 16. Perfil longitudinal de los OD, año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



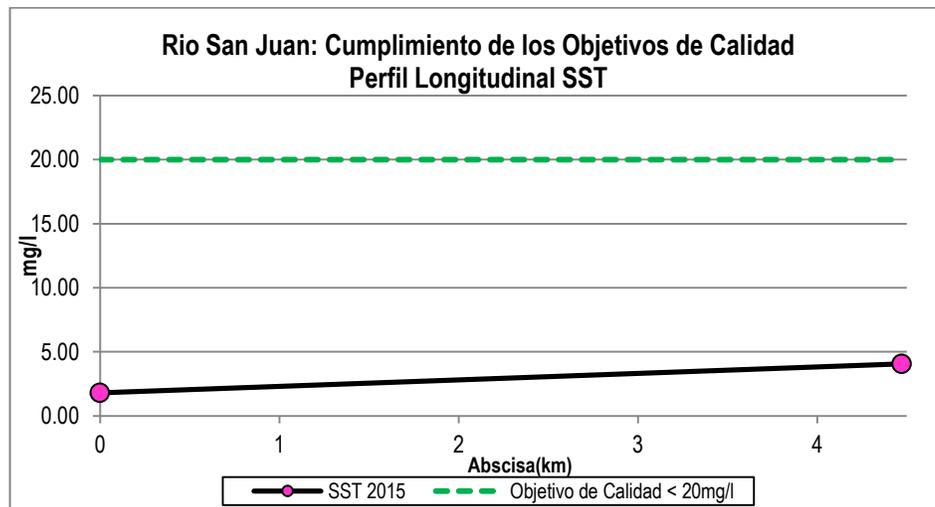
En todo momento se cumple con este objetivo mayor a 5mg/l O<sub>2</sub>.

Figura 17. Perfil longitudinal de los pH, año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



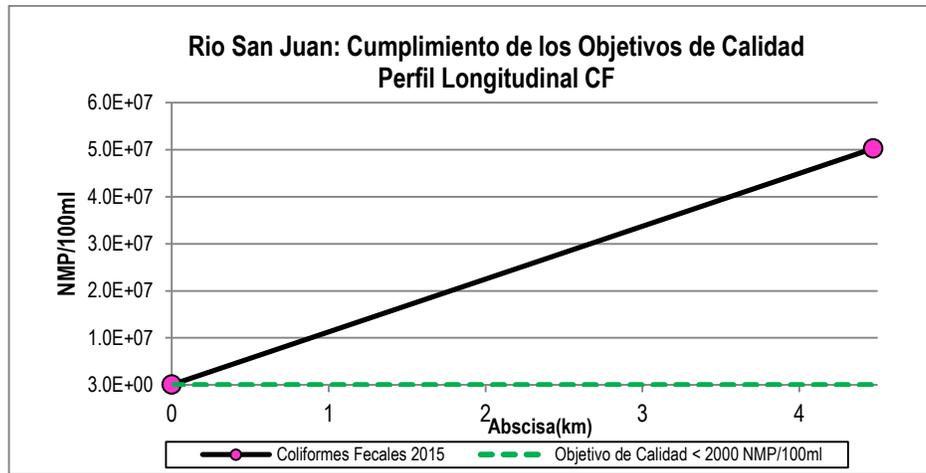
En todo momento se cumple con este objetivo entre los 6.5 a 9 unidades.

Figura 18. Perfil longitudinal de los SST, año 2015 en cumplimiento de los Objetivos de Calidad CRQ



En todo momento se cumple con este objetivo menor a 20 mg/l.

Figura 19. Perfil longitudinal de los CF, año 2015 en cumplimiento del Decreto 1594/84 para su destinación al consumo humano



La concentración de CF en el tramo analizado sobre el río San Juan no cumple con el criterio de calidad para los usos: consumo humano y doméstico, recreativo con contacto primario y secundario y uso agrícola para riego de frutas, se requeriría la desinfección de las aguas residuales vertidas por el municipio y fuentes difusas para tratar de reducir este parámetro a lo largo del cauce.

## 8. PLANTEAMIENTO ESCENARIO DE SANEAMIENTO: COLIFORMES FECALES

Luego de haber ejecutado y calibrado el modelo de simulación, se ha decidido por parte del modelador plantear un escenario de desinfección dado que los Coliformes Fecales no cumplen con el Decreto 1594/84 en el tramo de análisis sobre el río San Juan. Es por ello que se realizará una reducción del 99% (desinfección) de los CF en los puntos identificados como vertimientos (incluido el río Gris) los cuales poseen concentraciones entre 1.60E+06 NMP/100ml y 1.60E+11 NMP/100ml.

Tabla 20. Porcentaje de reducción de los CF, río San Juan

Abscisa (m)	Condición Modelo año 2015 (NMP/100ml)	Escenario 99% (NMP/100ml)	% de Reducción	Objetivo de Calidad CRQ
0	4.90E+04	4.90E+04		No cumple
4.472	5.03E+07	5.64E+05	99%	

De acuerdo a lo evidenciado en la tabla anterior, una reducción del 99% de los CF en los vertimientos y tributario que descargan sus aguas al río San Juan, no darían cumplimiento con lo establecido en el Decreto 1594/84 en la destinación del recurso para consumo humano y doméstico y otros usos.

## 9. CONCLUSIONES

- En términos generales, el modelo de calidad del agua del río San Juan reproduce en forma aceptable los valores de Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Sólidos Suspendidos Totales (SST), pH, Temperatura y Coliformes Fecales en las estaciones Puente Cumaral y Desembocadura ubicadas a lo largo de la corriente principal. Para ello, se contó con una campaña de monitoreo con propósitos de calibración en dos (2) estaciones sobre el cauce principal para el mes de agosto; periodo en el cual los caudales descienden por la reducción de las aguas de escorrentía superficial (lluvias).
- La calidad del agua en el río San Juan registrada el día 6 de Agosto de 2015, cumple con los objetivos de calidad propuestos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008. Opuesto a los anterior, los Coliformes Fecales y Totales no cumplen con los criterios de calidad admisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984 para consumo humano, agrícola y recreativo (menores a 2000 NMP/100ml y 20000 NMP/100ml, respectivamente).
- Los resultados obtenidos en las tres estaciones de estudio, arrojan un alto contenido de sólidos suspendidos totales (hasta 36.4 mg/l), esto debido probablemente al arrastre de partículas al lecho de la quebrada a causa de las lluvias de días anteriores. De igual forma, los Coliformes Fecales y Totales podrían verse incrementados por la anterior condición.
- Luego de haber ejecutado y calibrado el modelo de simulación, se ha decidido por parte del modelador, no plantear escenarios de saneamiento dado que se estarían cumpliendo con los objetivos de calidad propuestos por la CRQ en los parámetros de calidad como el OD, DBO, pH y SST. Se observa que los dos vertimientos de agua residual doméstica no aumentan de forma significativa la calidad de la fuente receptora, sin embargo es importante realizar un recorrido entre la zona urbana y rural del municipio (antes de tributar el río San Juan al río Rojo) dado que se presenta un aumento de la DBO al final del tramo el cual no es atribuido a la última descarga de ARD monitoreada.
- En cuanto a los Coliformes Fecales, se decide aplicar una remoción del 99% de los CF en los vertimientos identificados en campo, para lo cual se obtiene como resultado un valor todavía superior al exigido por el Decreto 1594 de 1984 en la destinación del agua para consumo humano y otros usos.

## 10. BIBLIOGRAFIA

---

- Adela L.; Gloria G.(2010). Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Universidad Nacional de Colombia.
- Chapra, S. (1997). Surface water-quality modeling. The McGraw Hill Inc. NY
- CRQ, CARDER, CVC, UAESPNN, IDEAM, GTZ. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río La Vieja- Resumen documento plan 2008-2019.
- CRQ, CARDER, CVC, Universidades del Valle, Tecnológica de Pereira y del Quindío, Definición línea base, Ordenación del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río la Vieja Mediante el Desarrollo de una Metodología con Criterios de Eficiencia Económica e Implementación de Herramientas de Apoyo a la Decisión, 2011.
- Ven Te Chow. Hidrología Aplicada: Bogotá, McGraw-Hill, 1988.