

# **MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA RIO ROBLE MUNICIPIOS DE CIRCASIA Y MONTENEGRO, 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, Octubre de 2015**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>5</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	5
1.2 OBJETIVOS .....	6
1.3 ALCANCE .....	6
1.4 MARCO NORMATIVO.....	7
<b>2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.....</b>	<b>10</b>
2.1 LOCALIZACIÓN .....	10
2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL .....	10
2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL.....	12
2.4 DEMANDA HÍDRICA .....	12
2.5 CALIDAD DEL AGUA .....	13
2.1.1 Disposición de aguas residuales .....	13
<b>3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2K .....</b>	<b>19</b>
2.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	19
2.7 METODOLOGÍA .....	20
<b>4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO.....</b>	<b>22</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR .....	24
4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE .....	28
4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS .....	29
4.4 CONDICIONES DE BORDE .....	30
4.4.1 Condiciones de borde externas.....	30
4.4.2 Condiciones de borde internas .....	31
4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN.....	32
4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO .....	33
4.6.1 Resultados de la modelación del componente hidráulico .....	33
<b>5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD.....</b>	<b>36</b>
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO .....	36
5.1.1 Observaciones Generales de los reportes de calidad .....	36
5.1.1.1 Análisis de las concentraciones obtenidas en los vertimientos puntuales identificados en el río Roble con relación a la Resolución 0631 de 2015.....	40
5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN.....	41
5.2.1 Constante de decaimiento de la DBO (Kd).....	42
5.2.2 Constante de decaimiento de los coliformes (Kb) .....	43
5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD.....	44
<b>6. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....</b>	<b>49</b>
<b>7. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS PARA EL RIO ROBLE .....</b>	<b>53</b>
7.1 ESCENARIO 1: REDUCCIÓN DE HASTA UN 60% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO EN LA QUEBRADA CAJONES Y LOS VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN LA STAR LA ISABELA Y PABLO VI. REDUCCIÓN DE UN 99% DE LOS CF EN LOS TRIBUTARIOS Y VERTIMIENTOS. ....	53

7.2	ESCENARIO 2: REDUCCIÓN DE HASTA UN 80% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO EN LA QUEBRADA CAJONES Y LOS VERTIMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN LA STAR LA ISABELA Y PABLO VI. REDUCCIÓN DE UN 99% DE LOS CF EN LOS TRIBUTARIOS Y VERTIMIENTOS. ....	54
7.3	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	55
7.4	OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS .....	57
7.4.1	DBO <sub>5</sub> .....	57
7.4.2	SST.....	57
7.4.3	OD .....	58
7.4.4	pH.....	58
7.4.5	Coliformes Fecales.....	58
8.	CONCLUSIONES .....	60
9.	BIBLIOGRAFIA.....	61

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. NORMA PARA VERTIMIENTOS A UN CUERPO DE AGUA PARA USUARIOS NUEVOS .....	7
TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA DESTINACIÓN DEL RECURSO .....	7
TABLA 3. VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES RESOLUCIÓN 0631 DE 2015 QUE HACEN REFERENCIA AL ESTUDIO DE MODELACIÓN – RIO ROBLE .....	8
TABLA 4. OBJETIVOS DE CALIDAD RIO ROBLE– CRQ .....	9
TABLA 5. LOCALIZACIÓN UNIDAD HIDROGRÁFICA DEL RIO ROBLE .....	10
TABLA 6. RESUMEN CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS – UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROBLE .....	10
TABLA 7. FUENTES HÍDRICAS IMPACTADAS POR VERTIMIENTO DE AGUAS SERVIDAS URBANAS DENTRO DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROBLE .....	13
TABLA 8. CALIDAD DEL AGUA EN EL CAUCE PRINCIPAL DEL RIO ROBLE .....	14
TABLA 9. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS A MODELAR SOBRE EL RIO ROBLE .....	23
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE FORO Y MUESTREO .....	24
TABLA 11. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 22 DE MAYO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE .....	28
TABLA 12. TIEMPOS DE VIAJE DE LA MASA DE AGUA PARA EL DÍA 22 DE MAYO DE 2015 .....	29
TABLA 13. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 2 DE SEPTIEMBRE DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO Y MUESTREO .....	29
TABLA 14. CONDICIONES DE BORDE INTERNAS EN LA MALLA DE MODELACIÓN, RIO ROBLE .....	31
TABLA 15. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES TRANSVERSALES DE LA MALLA DE MODELACIÓN PARA EL RIO ROBLE .....	32
TABLA 16. RED ESQUEMATIZADA PARA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROBLE .....	32
TABLA 17. FUENTES DIFUSAS INCLUIDAS COMO PARTE DEL BALANCE HÍDRICO DENTRO DEL RIO ROBLE .....	33
TABLA 18. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EN LA CALIBRACIÓN HIDRÁULICA .....	34
TABLA 19. DATOS DE CALIDAD RIO ROBLE (CRQ) – CAMPAÑA DE MUESTREO 02/09/2015 .....	36
TABLA 20. ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD* DE LOS VERTIMIENTOS .....	39
TABLA 21. CARGA CONTAMINANTE DE LOS VERTIMIENTOS IDENTIFICADOS EN LA MODELACIÓN .....	41
TABLA 22. CUMPLIMIENTO DE LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015, PARA LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES IDENTIFICADOS EN LA CAMPAÑA DE MUESTREO EL DÍA 02/09/2015 .....	41
TABLA 23. CALIBRACIÓN DE LAS DESCARGAS DIFUSAS .....	45
TABLA 24. CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN .....	45
TABLA 25. RELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LOS DATOS HISTÓRICOS OBSERVADOS Y EL MODELO SIMULADO PARA EL AÑO 2015	52
TABLA 26. ESCENARIO 1 .....	54
TABLA 27. ESCENARIO 2 .....	54
TABLA 28. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA DBO, RIO ROBLE: ESCENARIO 2 .....	57
TABLA 29. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS SST, RIO ROBLE: ESCENARIO 2 .....	57
TABLA 30. PORCENTAJE DE AUMENTO DEL OD, RIO ROBLE: ESCENARIO 2 .....	58
TABLA 31. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS CF, RIO ROBLE: ESCENARIO 2 .....	59

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PRINCIPALES CORRIENTES IDENTIFICADAS – UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROBLE .....	11
FIGURA 2. VARIACIÓN DEL PROMEDIO DE CAUDALES MENSUALES MULTIANUALES, RIO ROBLE .....	12
FIGURA 3. PORCENTAJES DEL CAUDAL DEMANDADO, UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROBLE .....	13
FIGURA 4. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD, RIO ROBLE .....	15
FIGURA 5. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD, RIO ROBLE .....	16
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA .....	20
FIGURA 7. PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, RIO ROBLE .....	23

---

FIGURA 8. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES, UNIDAD HIDROGRÁFICA RIO ROBLE .....	30
FIGURA 9. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUDAL - SIMULADO VS OBSERVADO .....	34
FIGURA 10. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: VELOCIDAD - SIMULADO VS OBSERVADO .....	34
FIGURA 11. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: PROFUNDIDAD DEL CAUCE - SIMULADO VS OBSERVADO .....	35
FIGURA 12. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROBLE.....	45
FIGURA 13. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROBLE.....	46
FIGURA 14. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROBLE.....	47
FIGURA 15. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – RIO ROBLE.....	48
FIGURA 16. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN: TEMPERATURA AGUA Y PH .....	49
FIGURA 17. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN: DBO, OD Y SST .....	50
FIGURA 18. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN: CF Y CAUDAL .....	51
FIGURA 19. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SANEAMIENTO: DBO <sub>5</sub> , OD Y PH .....	55
FIGURA 20. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SANEAMIENTO: SST Y CF.....	56

## 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 actual estudio de modelación denominado “Modelación de la Calidad del agua del río Roble”, es realizado mediante la aplicación del software QUAL2K 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 sus distintos usos a lo largo de 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. Durante los años 2010, 2013, 2014 y 2015 se ha monitoreado el río Roble en los municipios de Circasia, Montenegro y Quimbaya, 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 Roble, en un tramo cercano a los 41.4 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 Roble, dando inicio en la captación de agua para el acueducto de la zona urbana del municipio de Circasia hasta la vereda La Española, municipio de Quimbaya, antes de la confluencia con el río La Vieja; se tiene un total de 41.4 kilómetros.

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 muestreos 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 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 °C
DBO <sub>5</sub>	Remoción en carga ≥ 80%
Sólidos Suspendidos	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.

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 O <sub>2</sub> /L	-	-	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.

La Resolución 0631 de 2015, establece en su Capítulo V los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas (ARD) y de las aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, a cumplirse a partir del 01 de enero del 2016.

Tabla 3. Valores límites máximos permisibles Resolución 0631 de 2015 que hacen referencia al estudio de modelación – río Roble

PARAMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS -ARD DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	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 MENOS O IGUAL A 625.00 Kg/día DBO <sub>5</sub>
pH	unidades	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
DQO	mg/l O <sup>2</sup>	200	180
DBO <sub>5</sub>	mg/l O <sup>2</sup>		90
SST	mg/l	100	90

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 4. Objetivos de calidad rio Roble– CRQ

TRAMO DEL RIO	PARÁMETRO DE CALIDAD	OBJETIVO DE CALIDAD ESPERADA PARA EL AÑO 2017
Tramo I Comprendido entre la bocatoma de Circasia y la bocatoma de Montenegro	Oxígeno disuelto (mg/l)	Mayor o igual a 7.5
	DBO (mg/l O <sub>2</sub> )	Menor a 5.0
	SST (mg/l)	Menor a 20
	DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	7.8
	Coliformes totales (NMP/100 m)	20000
	Coliformes fecales (NMP/100 m)	2000
	pH (unidades)	Mayor a 6.5 y menor a 9
Tramo II Comprendido entre el casco urbano de Montenegro y la desembocadura en el Rio La Vieja	pH (unidades)	Mayor a 6.5 y menor a 9

## 2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

### 2.1 LOCALIZACIÓN

El río Roble nace a los 2.100 m.s.n.m. y luego de cruzar 21.8 Km por el bosque muy húmedo premontano en 13.2 Km y 5.0 Km por el bosque húmedo tropical (según Holdridge), descarga su caudal a 50 Km de su origen en el río La Vieja. Esta unidad hidrográfica se encuentra entre los municipios de Filandia, Circasia, Montenegro y Quimbaya, donde finalmente va a entregar sus aguas al río La Vieja a una altura de 900 m.s.n.m. Su cauce principal se encuentra al noroeste del departamento del Quindío y desemboca en el río La Vieja al oeste del departamento.

La cuenca se encuentra localizada entre las siguientes coordenadas:

Tabla 5. Localización unidad hidrográfica del río Roble

Latitud	Longitud
4° 40" 37' N	75° 36" 9' W
4° 34" 32' N	75° 52" 5' W

Fuente: SIG Quindío

### 2.2 RED HIDROGRÁFICA SUPERFICIAL

A continuación se presentan las principales características fisiográficas de la unidad hidrográfica río Roble como son: área, perímetro y forma las cuales se encuentran resumidas en la siguiente tabla.

Tabla 6. Resumen Características Fisiográficas – unidad hidrográfica río Roble

Unidad Hidrográfica	Característica	Ítem	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
<b>RIO ROBLE</b>	1. Área	1.1	Superficie	A	115.539	Km <sup>2</sup>
		1.2	Perímetro	P	79.016	Km
	2. Posición y Orientación	2.1	Posición	-	ZLT	
		2.2	Orientación	-	N-SW	
	3. Forma	3.1	Factor de Forma	Kf	0.12	
		3.2	Coefficiente de Compacidad	Kc	2.06	

Unidad Hidrográfica	Característica	Ítem	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
4. Elevación		4.1	Elevación Mediana	Em	1575	m.s.n.m
		4.2	Elevación Media	Hm	1517.2	m.s.n.m
		4.3	Coefficiente de Masividad	Km	11.28	m/Km <sup>2</sup>
5. Pendiente Cuenca		5.1	Pendiente Media de la Cuenca	Sm	8	%
7. Cauce Principal		7.1	Orden del Cauce		6	
		7.2	Longitud	L	50.1	Km
		7.4	Pendiente Media de Cauce	Sc	2.24	%

Fuente: Elaboración propia con datos SIGQuindío

En su trayecto, el río Roble recibe gran cantidad de tributarios, siendo los más representativos los que se indican a continuación.

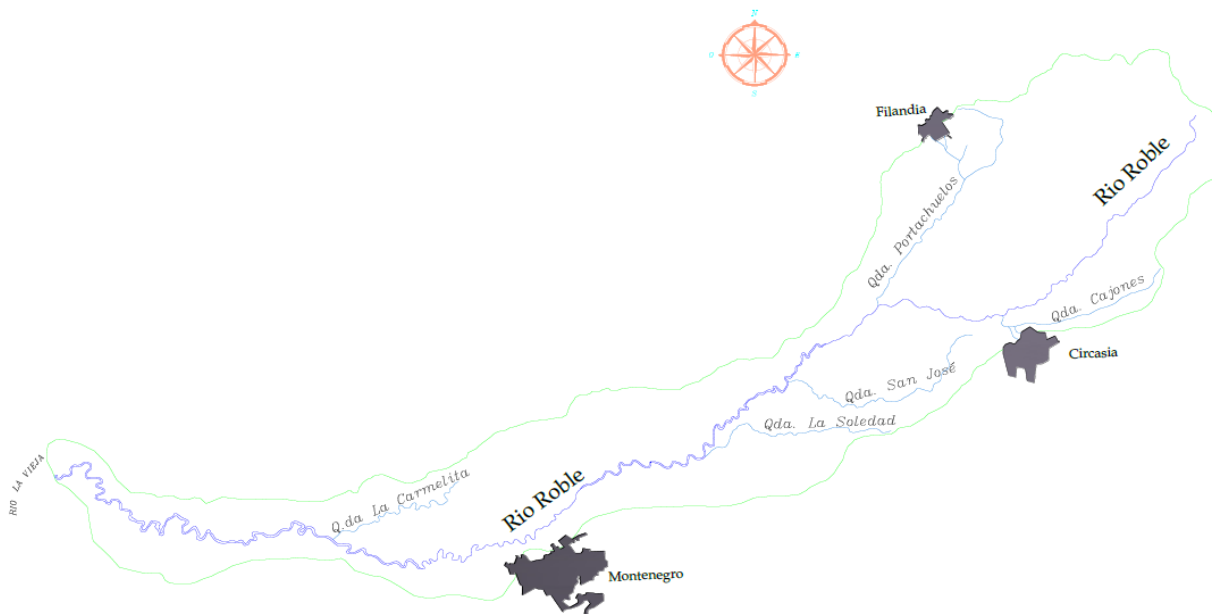


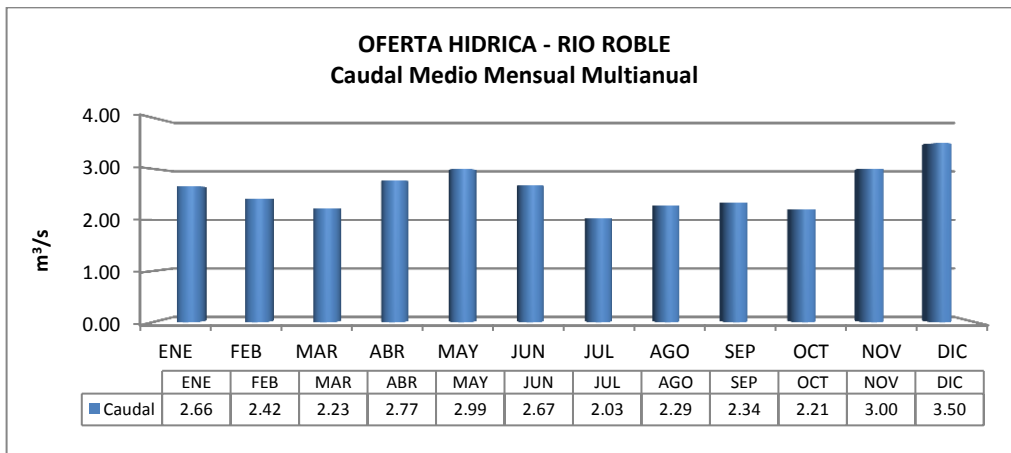
Figura 1. Principales corrientes identificadas – unidad hidrográfica río Roble

Los afluentes principales del río Roble son las quebradas: Cajones en límites con el municipio de Circasia, al Occidente la quebrada Portachuelo en límites con el municipio de Filandia, en la parte media de la cuenca recibe las aguas de las quebradas San José y la quebrada La Soledad y finalmente en su parte baja, recibe las aguas de la quebrada La Carmelita en límites con el municipio de Quimbaya.

### 2.3 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

Del estudio de balances hídricos de las principales fuentes hídricas del departamento del Quindío realizado anualmente por la Corporación Autónoma Regional del Quindío se presenta la siguiente información de caudales medios anuales en la unidad hidrográfica del río Roble.

Figura 2. Variación del promedio de caudales mensuales multianuales, río Roble

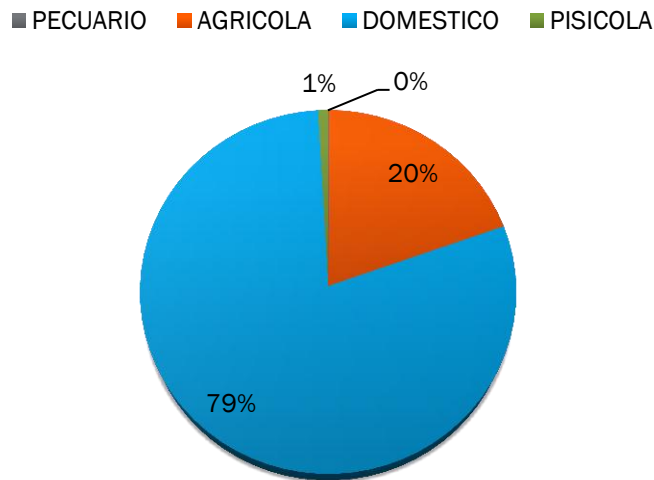


Fuente: Índice de Escasez, CRQ 2014

### 2.4 DEMANDA HÍDRICA

La principal demanda hídrica para la unidad hidrográfica del río Roble es para consumo humano y doméstico representando el 79 % de toda la demanda, seguido por el uso agrícola con un 20% del total del caudal demandado (*Base de datos Concesiones CRQ 2014*).

Figura 3. Porcentajes del caudal demandado, unidad hidrográfica rio Roble



## 2.5 CALIDAD DEL AGUA

Inicialmente el Rio Roble recibe las aguas residuales sin tratamiento de los municipios de Circasia y Filandia a través de las quebradas Cajones y Portachuelos. Luego en su cuenca media, el municipio de Montenegro vierte las aguas residuales al rio Roble provenientes de los barrios La Isabela, Pablo VI<sup>1</sup> y barrios cercanos a la antigua central de sacrificio.

### 2.1.1 Disposición de aguas residuales

Cada uno de los centros urbanos ubicados dentro de la unidad hidrográfica descarga sus vertimientos líquidos de forma directa o indirecta, provenientes de actividades domésticas, comerciales e industriales al Rio Roble o a sus afluentes. La Tabla 7 muestra las fuentes de contaminación del rio Roble.

Tabla 7. Fuentes hídricas impactadas por vertimiento de aguas servidas urbanas dentro de la unidad hidrográfica Rio Roble

ÁREA URBANA	FUENTE RECEPTORA
Filandia (Casco urbano, zona sur)	Quebrada. Portachuelo (81% de la población)
Circasia (Casco urbano, zona noroccidental)	Quebrada Cajones (27.1% de la población)
Montenegro	Rio Roble (Directo rio Roble 9,3%)

Fuente: Línea Base, CRQ 2011.

<sup>1</sup> El área es utilizada de forma poco intensiva para la recreación por bañistas y de forma muy puntual para la pesca.

Tabla 8. Calidad del agua en el cauce principal del río Roble

Fecha	Tramo	Longitud (km)	CAUDAL (L/s)	CAUDAL (m³/s)	T (°C)	pH (unidades)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	ST (mg/L)	OD (mg/L)	CT (NMP/100mL)	CF (NMP/100mL)
jul-11	Nacimiento	0.5	202	0.2	17.1	7.26	0.66		4.4		8	1.80E+02	1.80E+02
	Parte Media	23.2	S.D	S.D	20.2	7.42	1.66		4.4		7.37	2.80E+04	2.20E+04
	Desembocadura	41.4	2416	2.42	22	7.34	0.78		7.2		6.2	7.80E+02	7.80E+02
sep-11	Nacimiento	0.5	110	0.11	17.4	7.43	1.25	2.16	1.25	51.8	6	1.80E+02	1.80E+02
	Parte Media	23.2	1246	1.25	20	7.85	1.08	9.4	4.5	84	6	1.60E+05	1.60E+05
	Desembocadura	41.4	1485	1.49	18	7.8	1.03	10.2	6	129	7.4	7.80E+02	7.80E+02
mar-10	Nacimiento	0.5	181	0.181	18.2	6.33	<5.7	<9.4			9.4	2.00E+02	2.00E+02
	Parte Media	23.2	828	0.828	19.9	7.79	<5.7	13.8			5.7	7.90E+04	7.90E+04
	Desembocadura	41.4	1317	1.317		7.05	<5.7	12.9			6.1	1300	180
sep-13	Nacimiento	0.5	125	0.125	16	7.61	<5.7	<9.4	<4.4	61.9	7.97	3300	780
	Parte Media	23.2	1108	1.108	21	7.67	<5.7	<9.4	4.6	86.9	6.27	1.60E+07	1.60E+06
	Desembocadura	41.4	1222	1.22	22	8.9	<5.7	<9.4	<4.4	107	7.66	2.40E+05	4.90E+04
jun-14	Nacimiento	0.5	104	0.104	17.5	7.13	0.48	6.6	0.95	67.7	7.5	2.40E+04	2.70E+03
	Parte Media	23.2	1846	1.846	22.3	7.74	1.45	5	9.1	72.3	7	1.60E+05	1.60E+05
	Desembocadura	41.4	2641	2.641	21.8	7.92	1.01	13.7	6.5	93.9	7.3	7.90E+04	2.70E+04
sep-15	Nacimiento*	0.5	55	0.055	16.9	6.17	0.4	9.55	0.93	9.55	6.64	4.90E+03	2.30E+03
	Parte Media	23.2	371.36	0.37136	24.1	7.91	6.2	19.8	2.7	19.8	6.1	9.20E+05	3.50E+05
	Desembocadura	41.4	747.6	0.7476	25.7	8.64	2.18	21.9	2.2	21.9	5.52	2.30E+04	4.50E+03

\*Aguas arriba de la bocatoma Circasia ESAQUIN.

Fuente: Línea Base CRQ 2011, registros CRQ 2010, 2013, 2014 y 2015.

Figura 4. Variación de los parámetros de calidad, rio Roble

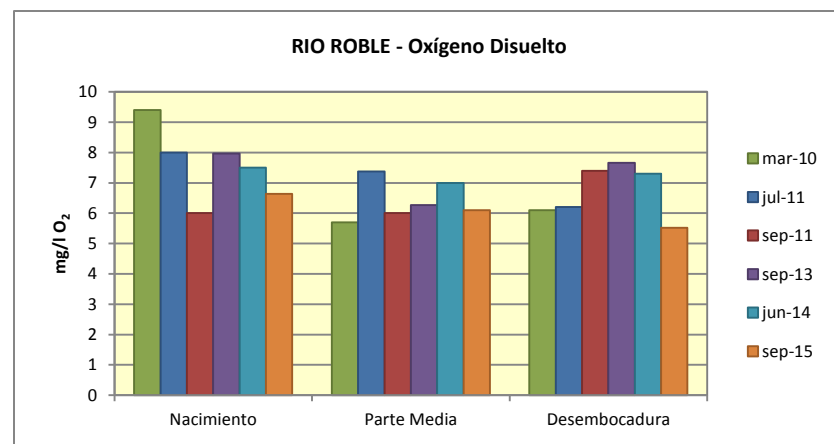
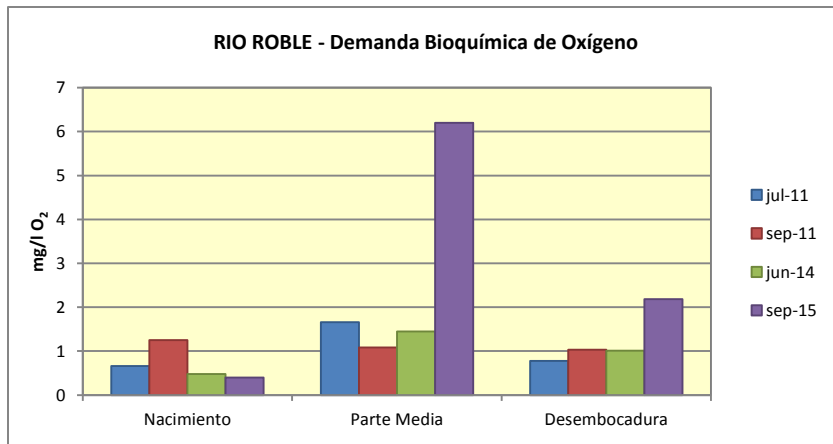
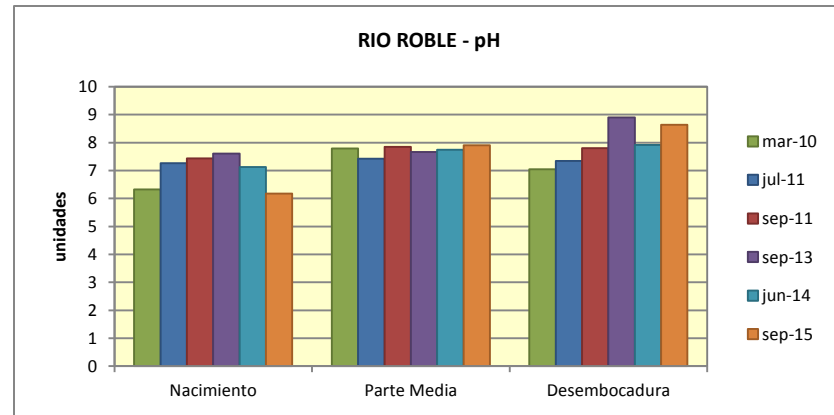
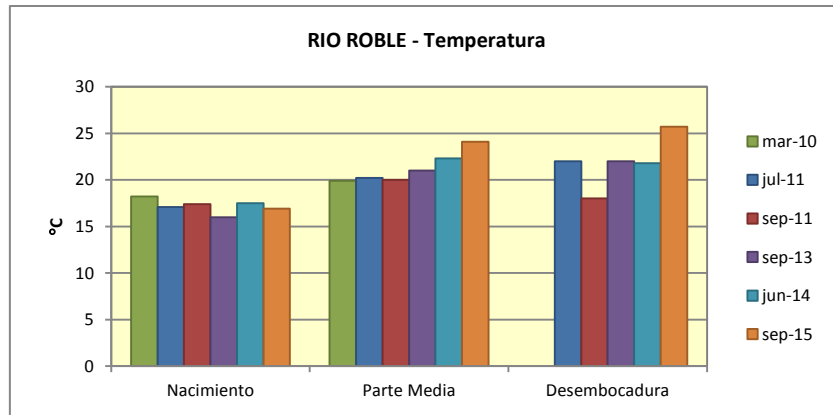
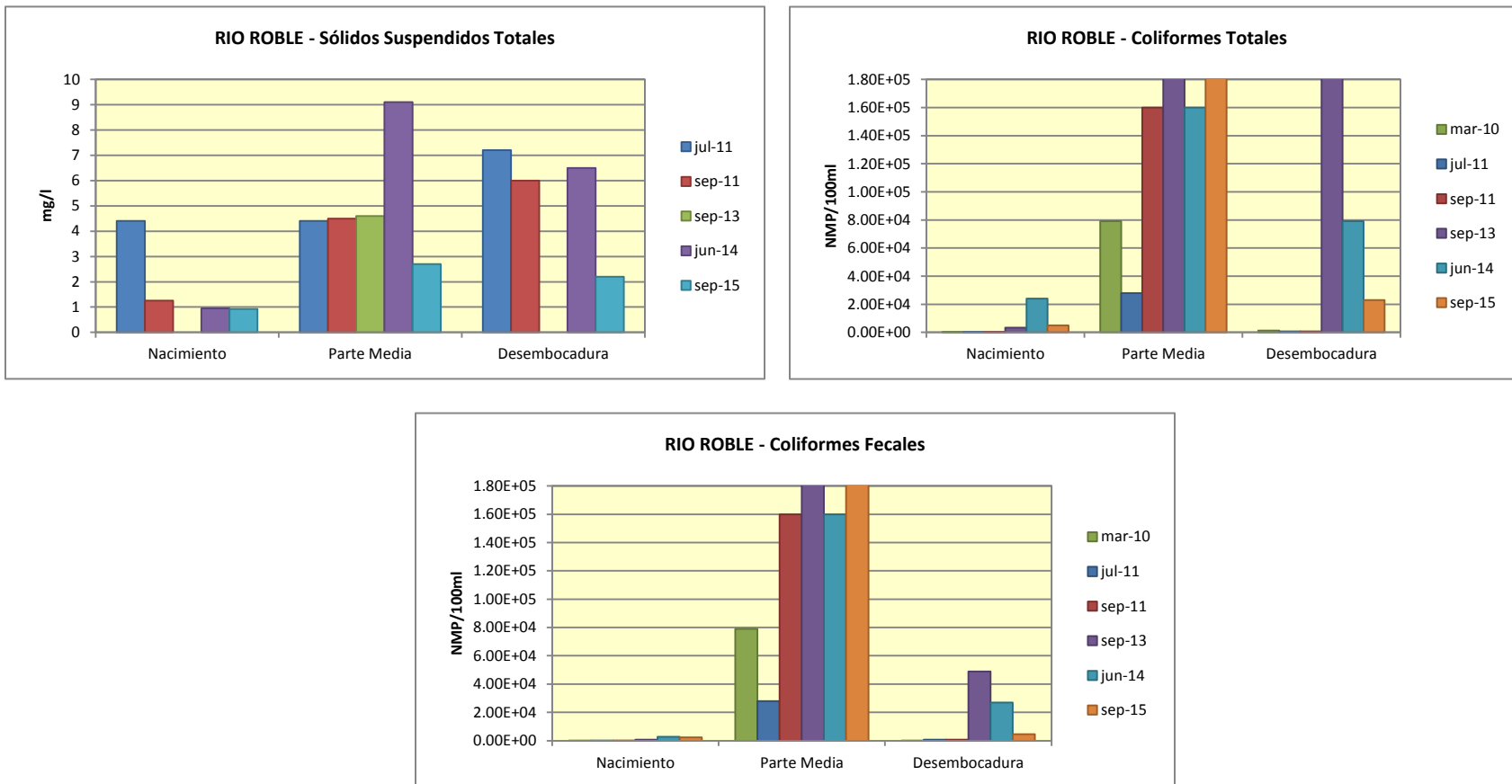




Figura 5. Variación de los parámetros de calidad, rio Roble

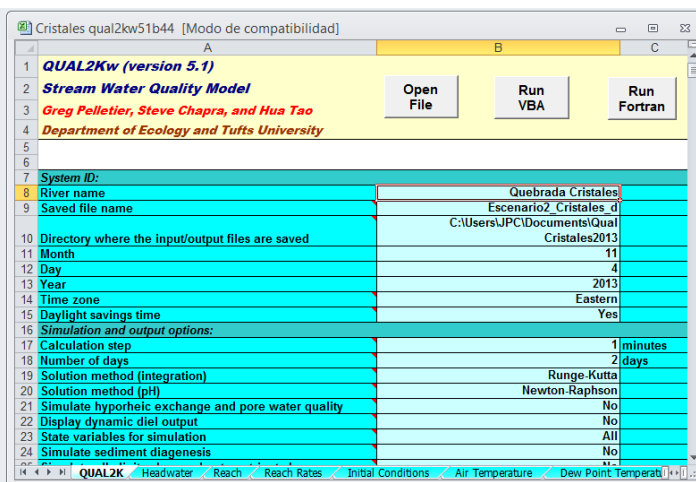


- **Temperatura del agua:** Se presenta una tendencia creciente de esta variable relacionada directamente con la altura sobre el nivel del mar lo que hace que vaya en aumento hacia límites con el Valle del Cauca. En su cuenca media para el último año de muestreo se ve incrementada la temperatura 3.4°C respecto al promedio de los últimos cuatro años, dada la presencia del fenómeno de variabilidad climática El Niño en Colombia.
- **pH:** En todo momento los valores se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84 (entre 5-9 unidades), estos toman valores de 6.17 a 8.9 unidades, lo que se asume como valores aceptables para la mayoría de la fauna acuática. Se observa en promedio un valor de 7.57 unidades para el último periodo de registro medido en el cauce principal del río Roble, año 2015.
- **DBO<sub>5</sub>:** Este parámetro se encuentra entre 0.4 y 6.2 mg/IO<sub>2</sub> medidos antes y después de los vertimientos de la zona urbana de los municipios de Circasia y Montenegro, donde el valor más alto (6.2 mg/IO<sub>2</sub>) obedece al reportado en la cuenca media para el año 2015. En general se considera buena capacidad de dilución de los agentes contaminantes dentro del río Roble.
- **Sólidos Suspendidos Totales:** Existe una tendencia en incrementarse los valores de este parámetro hacia el final del tramo, cerca de la confluencia con el río La Vieja. El mayor valor registrado se observa en la campaña de muestreo realizada en junio de 2014 con 9.1 mg/l sobre la cuenca media, luego de recibir parte de los vertimientos de aguas residuales del municipio de Circasia y Montenegro. Para el último año de registro (2015) se tiene la concentración más baja de este parámetro donde se presentan velocidades bajas y reducción significativa del caudal.
- **Oxígeno Disuelto:** Se evidencia una tendencia decreciente de este parámetro, medido desde su inicio hasta el puente que conduce a Quimbaya (cuenca alta a media), luego de recibir los vertimientos de las zonas urbanas de los municipios de Circasia y Montenegro, con valores que oscilan entre los 5.52 y 9.4 mg/IO<sub>2</sub>. La menor concentración se ve evidenciada para el año 2015 con una reducción del 24% en la estación “Desembocadura” respecto al año anterior.
- **Coliformes Totales y Fecales:** Se presentan concentraciones de hasta 1.6E+07 NMP/100ml para los Coliformes Totales (CT) y 1.6E+06 UMP/100ml para los Coliformes Fecales (CF), sobre la cuenca media en cercanías a los vertimientos del casco urbano del municipio de Montenegro, dato medido para el año 2013. Respecto a los dos últimos años de muestreo, sobre la cuenca media se ve incrementado los CT y CF un 83% y 54% respecto al año 2014. En general, se evidencia ceca de la desembocadura con el río La Vieja una notable disminución de este parámetro, lo que muestra síntomas de autodepuración de los agentes contaminantes en el río debido a los procesos

naturales que se producen en ella, al igual que la inexistencia de vertimientos significativos.

### 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 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).



#### 2.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES

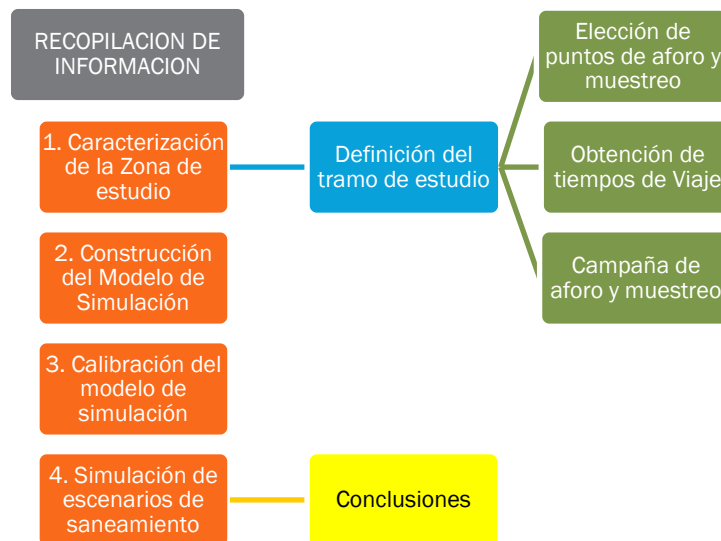
El modelo presenta características útiles para la simulación de los ríos y quebradas de montaña (cauces con pendiente longitudinal mayor al 1.0 %, Parraga 2004.) propios de nuestra región. A continuación se detallan algunas de sus cualidades:

- 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)

## 2.7 METODOLOGÍA

La Figura 6, representa esquemáticamente la metodología aplicada para la modelación de la calidad del agua para una corriente hídrica.

Figura 6. 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.

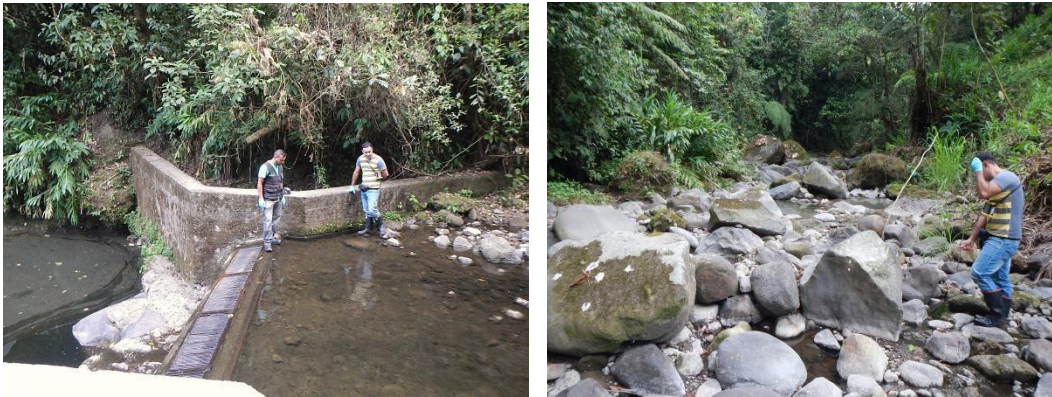
Definido el tramo, las secciones y los valores fisicoquímicos e hidrológicos a modelar, se construye el modelo de simulación teniéndose como objetivo, la identificación del comportamiento de los parámetros a modelar mediante el software QUAL2K. Para el presente estudio, se realizó una campaña de aforo y muestreo de la calidad del agua el 2 de Septiembre 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

Debido a la presencia del fenómeno de variabilidad climática El Niño (reducción de las precipitaciones por debajo de lo normal), se decide omitir el punto o estación inicial “Bocatoma Circasia” debido a la disminución del caudal en este punto y luego de la estructura de captación. Los valores de caudal arrojaron valores de 55 l/s y 3 l/s antes y después de dicha estructura, lo cual hizo evidente observar zonas sin agua y pequeños represamientos dentro del lecho del río.



Fotografía 1. Rio Roble, aguas arriba y abajo de la estructura de captación Bocatoma Circasia - ESAQUIN

Por la condición antes expuesta, el tramo de estudio inicia a 25 metros aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Cajones con el rio Roble y se extiende hasta el sitio conocido como La Española, (zona rural limítrofe entre el municipio de Quimbaya y el departamento del Valle del Cauca), con una longitud aproximada de 41.4 Km. Se tiene una diferencia de nivel entre las estaciones cabecera y desembocadura de 680 metros y una pendiente media del 1.76 %, por lo que se puede clasificar como rio de montaña (Parraga 2004).

A continuación se presentan las coordenadas de los puntos a modelar conformados por 4 secciones transversales sobre la fuente principal y 4 vertimientos (identificados como afluentes naturales, quebradas y vertimientos puntuales de aguas residuales).

Tabla 9. Localización de puntos a modelar sobre el río Roble

SECCION No.	ESTACION	CODIGO	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES $\Delta x$ (m)	COORDENADAS		
					X	Y	a.s.n.m.
1	Antes quebrada Cajones	RB1	K00+000	0	4°37'28"	75°38'47"	1610
2	Quebrada Cajones	V1	K00+025	25	4°37'27"	75°38'47"	1610
3	Quebrada. Portachuelo	V2	K04+880	4855	4°37'39"	75°40'30"	1480
4	Bocatoma - Montenegro	RB2	K13+936	9056	4°35'48"	75°42'48"	1320
5	STAR La Isabela	V3	K20+879	6943	4°34'22"	75°44'49"	1250
6	Pablo VI	V4	K22+076	1197	4°34'9"	75°45'8"	1230
7	Puente	RB3	K23+216	1140	4°34'9"	75°45'27"	1220
8	La Española	RB4	K41+395	18179	4°34'35"	75°51'1"	980

STAR: Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

RB: Estación sobre el río

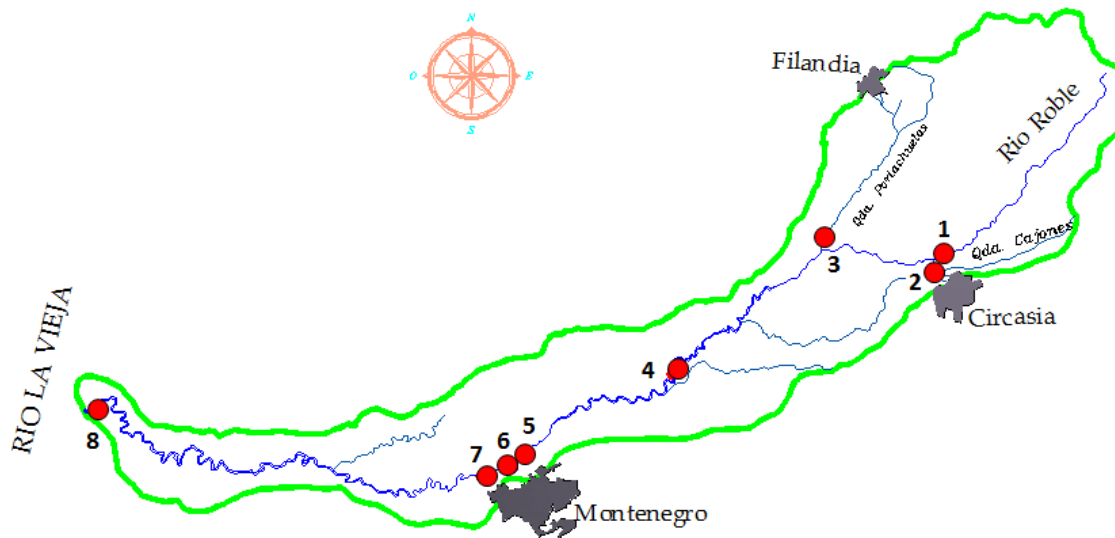
V: Vertimiento

a.s.n.m.: altura sobre el nivel del mar

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

- Accesibilidad
- Seguridad del personal
- Condiciones hidráulicas

Figura 7. Puntos de aforo y muestreo, río Roble







#### 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 10. Características de los puntos de foro y muestreo

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO 2015
<b>RB1</b> Antes quebrada Cajones	Vía rural a la vereda Barcelona Alta, después del cementerio Libre	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rio con poco caudal en aparente buenas condiciones, rodeado por bosque.</li> </ul>	
<b>V1</b> Quebrada Cajones	Vía rural a la vereda Barcelona Alta, después del cementerio Libre	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Zona boscosa, de muy fuerte pendiente.</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Olor a agua residual, presencia de moscos y color turbio (tonalidad gris).</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Residuos sólidos en las márgenes de la quebrada.</li> </ul>	

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO 2015
<p><b>V2</b>  <b>Quebrada</b>  <b>Portachuelo</b></p>	<p>Ubicada en jurisdicción del municipio de Filandia, se extiende hasta el municipio de Circasia, donde desemboca al río Roble en la vereda Membrillal</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Quebrada en aparente buen estado, rodeada de cultivos de plátano y bosque.</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Presencia de peces.</li> </ul>	
<p><b>RB2</b>  <b>Bocatoma</b>  <b>Montenegro</b></p>	<p>Ubicada en jurisdicción del municipio de Montenegro, vereda Barcelona Baja</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Río en aparente buenas condiciones.</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rodeada de bosque y cultivos de plátano.</li> </ul>	

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO 2015
<p><b>V3 STAR La Isabela</b></p>	<p>Ubicada en jurisdicción de la zona urbana del municipio de Montenegro, en el barrio La Isabela</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Vertimiento de color gris y fuerte olor a agua residual.</li> </ul>	
<p><b>V4 Pablo VI</b></p>	<p>Ubicada en jurisdicción de la zona urbana del municipio de Montenegro, en el barrio Pablo VI</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Vertimiento de color gris y fuerte olor a agua residual.</li> </ul>	

ESTACION	ACCESO	ESTADO DEL RECURSO	REGISTRO FOTOGRAFICO 2015
<p><b>RB4</b>  <b>Puente vía</b>  <b>Montenegro -</b>  <b>Quimbaya</b></p>	<p>Vía principal hacia la zona urbana del municipio de Quimbaya</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rodeada de bosque y viviendas aledañas al río. El punto seleccionado se encuentra debajo de este puente, donde es utilizado por algunos pobladores para arrojar residuos sólidos.</li> </ul>	
<p><b>RB5</b>  <b>La Española</b></p>	<p>Vereda la Española, límites con el Valle del Cauca</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rodeada de bosque, en aparente buen estado.</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 Roble 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 11. Variables hidrométricas obtenidas el 22 de mayo de 2015 durante la jornada de aforo para la obtención de los tiempos de viaje

Punto	Abscisa	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
RB1	K 00+000	Después Bocatoma Circasia	0.163	0.631	0.371	1.70	0.103
RB3	K23+216	Puente vía Montenegro-Quimbaya	0.273	3.325	0.284	11.70	0.909
RB4	K41+395	La Española	0.245	6.348	0.372	17.05	1.557



Tabla 12. Tiempos de viaje de la masa de agua para el día 22 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
Después Bocatoma Circasia	0.631	0.000	0.103	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pte Montenegro-Quimbaya	3.325	23216	0.909	45919.80	0.51	90760.71	1512.68	1512.68	25.21	25.21
La Española	6.348	18179	1.557	87923.04	1.23	71299.36	1188.32	2701.00	45.02	19.81

### 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 13. Variables hidrométricas obtenidas el 2 de septiembre de 2015 durante la jornada de aforo y muestreo

Punto	Nombre	Velocidad (m/s)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (l/s)
0	Bocatoma Circasia	0.46	0.09	0.14	0.70	43.67	0.044
		0.51	0.02	0.11	0.20	11.52	0.012
1*	Después Bocatoma	0.30	0.01	0.15	0.12	2.73	0.003
1	Antes quebrada Cajones	0.40	0.08	0.14	0.55	30.39	0.030
2	Quebrada Cajones	0.33	0.53	0.24	2.20	173.62	0.174
3	Quebrada Portachuelo	0.54	0.97	0.21	4.60	525.44	0.525
4	Bocatoma Montenegro	0.26	1.26	0.35	3.63	324.45	0.324
4**	Canal	0.13	0.72	0.38	1.85	93.87	0.094
5	STAR La Isabela						0.624
6	Pablo VI						0.508
7	Puente Montenegro-Quimbaya	0.15	2.55	0.23	11.22	371.36	0.371
8	La Española	0.17	4.45	0.25	17.92	747.60	0.748

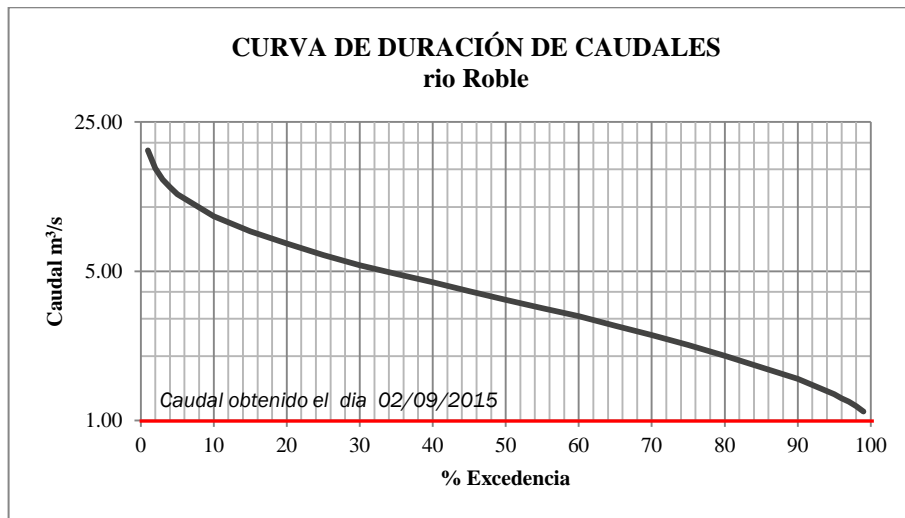
\*Río Roble con poco caudal, se omite el punto inicial “Bocatoma Circasia”.

\*\*Agua captada del río Roble, medida en el canal-acequia.

- Caudal de muestreo

Con el fin de conocer el tipo de caudal (máximo, medio o bajo) obtenido el día del muestreo, se determinó a partir de los registros históricos de caudal medio mensual de la estación limnigráfica “La Española”, la *Curva de Duración de Caudales*. 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 8. Curva de Duración de Caudales, unidad hidrográfica rio Roble



Fuente: Línea Base, CRQ 2011.

El valor del caudal arrojado el día del muestreo (2 de septiembre de 2015) en la estación La Española fue de **0.748 m³/s**, equivalente a un 100% de probabilidad de excedencia considerado como caudal de sequía.

#### 4.4 CONDICIONES DE BORDE

##### 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 Antes quebrada Cajones y La Española). 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 quebradas tributarias, vertimientos de aguas residuales (domésticas para el caso de estudio), concesiones y retornos de agua. Los caudales y las características de calidad para las condiciones de borde internas son las obtenidas durante el día de muestreo en el río Roble. En la Tabla 14 se presentan todas las condiciones de borde internas correspondientes a la quebrada incluidas en la modelación matemática.

- Tributarios

Como afluentes de la corriente principal, son evaluados aquellos que poseen mayor impacto a nivel de calidad sobre la corriente principal definidas como fuentes receptoras de aguas residuales o de mayor aporte en su caudal. Estas son las quebradas Portachuelo y Cajones.

- Concesiones de agua

Existen dos concesiones de aguas que otorgan un caudal considerable sobre el río Roble. Estas son para los acueductos de los municipios de Circasia y Montenegro. Para el año en curso se procedió a omitir la estación Bocatoma Circasia debido a la escasez de agua en este tramo, lo que imposibilita el arrastre de agua luego de la concesión de aguas.

Tabla 14. Condiciones de borde internas en la malla de modelación, río Roble

PUNTO	ESTACION	CODIGO	ABSCISA	CAUDAL	CONDICION
			(Km)	(m <sup>3</sup> /s)	
	RB1	Antes quebrada Cajones	K 00+000	0.030	Estación
1	V1	Quebrada Cajones	K 00+025	0.174	Tributario
2	V2	Quebrada Portachuelo	K 04+880	0.525	Tributario
3	CON1	Bocatoma Montenegro	K 13+936	0.094	Concesión
4	V3	STAR La Isabela	K 20+879	0.624*	Vertimiento
5	V4	Pablo VI	K 22+076	0.508*	Vertimiento
	RB4	La Española	K 41+395	0.748	Estación

\* medida en l/s

RB: estación sobre el río Roble

CON: Concesión de aguas

V: Vertimiento



#### 4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN

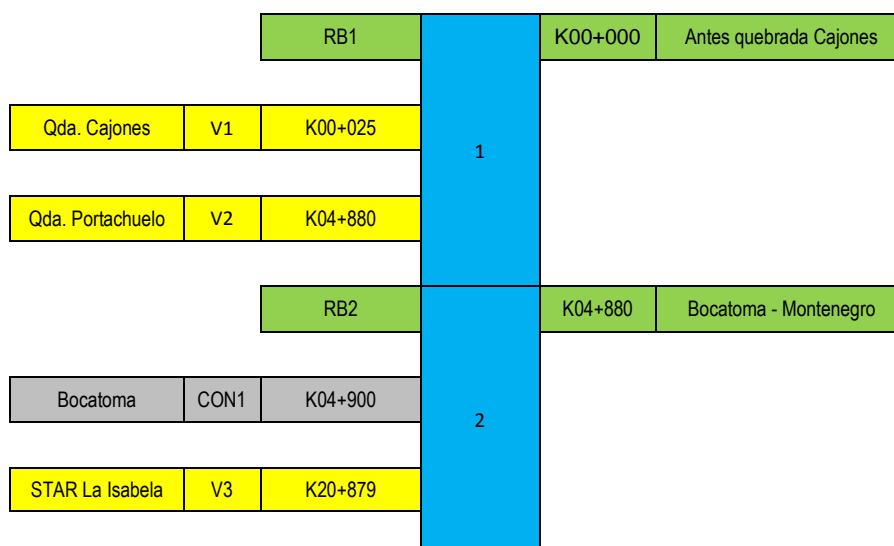
El grid o malla de modelación, quedó conformada por 4 secciones transversales, las cuales corresponden a las secciones localizadas en las salidas de campo como estaciones de aforo y de toma de muestras de agua. En la siguiente tabla se representa la malla de modelación para el río Roble, donde se especifican las distancias entre las secciones a implementar.

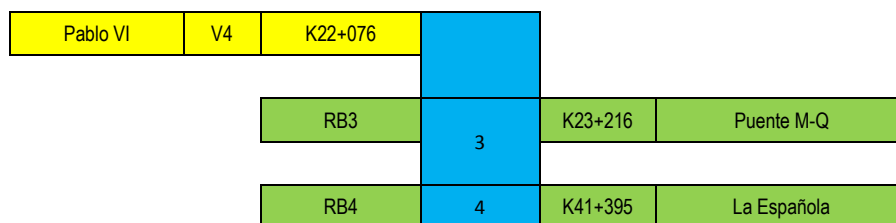
Tabla 15. Localización de las estaciones transversales de la malla de modelación para el río Role

SECCION N°	ESTACION	ABSCISA (Km)	DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m)	COORDENADAS		m.s.n.m	ESTACION
				Latitud	Longitud		
1	RB1	K 00+000	0.0	4°37'28"	75°38'47"	1610	Antes quebrada Cajones
2	RB2	K 13+936	9056	4°35'48"	75°42'48"	1320	Buenos aires bajo
3	RB3	K 23+216	1140	4°34'9"	75°45'27"	1220	Puente/vía Quimbaya
4	RB4	K 41+395	18179	4°34'35"	75°51'11"	980	La Española

Con base en los diferentes análisis efectuados, la red esquematizada para el río Roble para fines de la modelación numérica, queda definida de la siguiente manera, (ver Tabla 16): 2 condiciones de borde externas (estación Antes quebrada Cajones y estación La Española) y 6 fronteras internas (tributarios, concesiones y vertimientos puntales a el río Roble).

Tabla 16. Red esquematizada para modelación de calidad del agua – río Roble





## 4.6 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 en el río Roble, 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 17. Fuentes Difusas incluidas como parte del balance hídrico dentro del río Roble

Fuente Difusa		Diffuse Abstraction	Diffuse Inflow	Localización entre la abscisa (m)	
		m <sup>3</sup> /s			
Fuente Difusa 1	D1	0.310	–	0.0	4.0
Fuente Difusa 2	D2	–	0.045	11.4	22.0
Fuente Difusa 3	D3	–	0.376	28.4	41.4

### 4.6.1 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 18 se presentan los resultados de las variables hidrométricas, obtenidas después de la calibración hidráulica. Asimismo, en las Figuras 9 y 10 se muestran los perfiles longitudinales de las variables observadas comparadas con las calculadas por el modelo (simuladas).

Tabla 18. Variables hidrométricas obtenidas en la calibración hidráulica

Abscisa (km)	Profundidad media (m)	Ancho Cauce (m)	Perímetro mojado (m)	Área húmeda (m <sup>2</sup> )	Velocidad media (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0.0	0.14	0.55	0.83	0.08	0.39	0.03
13.9	0.46	3.63	4.55	1.66	0.26	0.43
23.2	0.22	11.22	11.66	2.44	0.15	0.37
41.4	0.25	17.92	18.42	4.50	0.17	0.75

Figura 9. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal del caudal - Simulado vs Observado

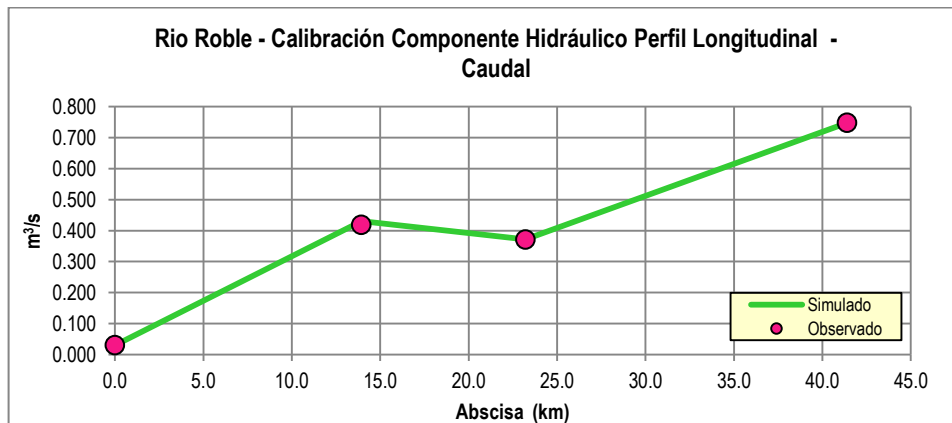


Figura 10. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: velocidad - Simulado vs Observado

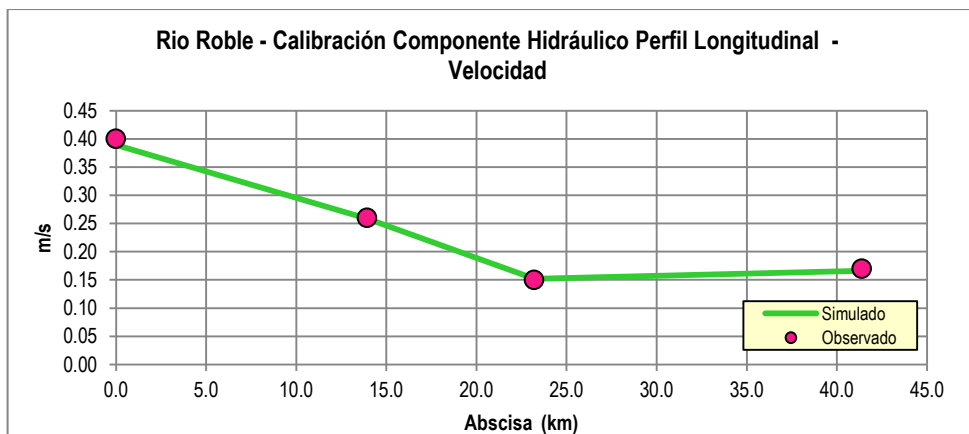
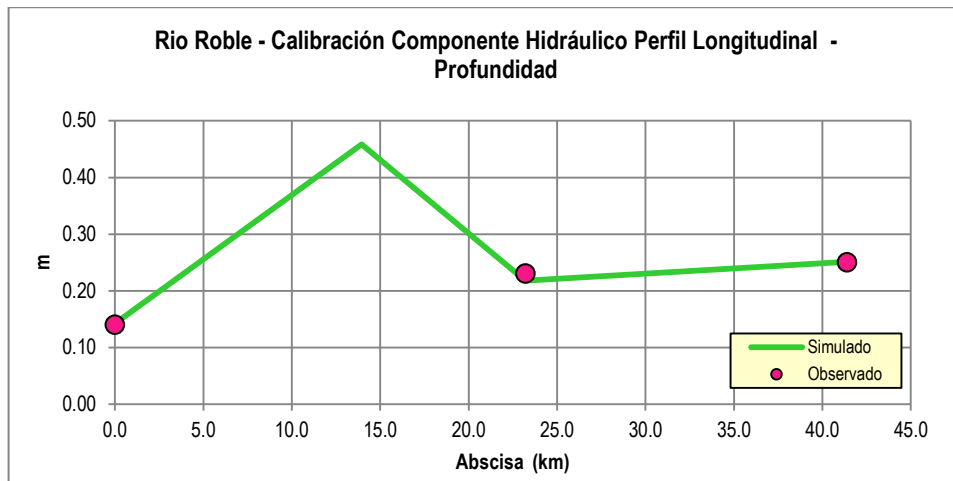


Figura 11. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: profundidad del cauce - Simulado vs Observado



## 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 Roble, fueron obtenidos por medio de la toma de muestras en el cauce principal y dos tributarios de mayor interés hídrico, de forma simultánea. Estas muestras fueron posteriormente analizadas en el laboratorio de aguas de la CRQ.

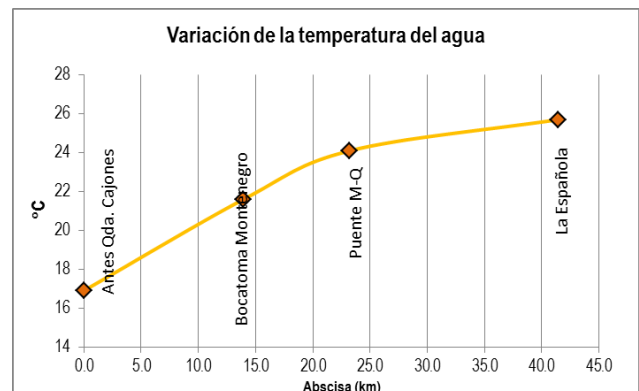
Tabla 19. Datos de calidad río Roble (CRQ) – Campaña de muestreo 02/09/2015

PUNTO DE MONITOREO		Caudal (m³/s)	Temp. Agua (°C)	SST (mg/l)	Solidos Totales (mg/l)	OD (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DQO (mg/l)	PH (unidades)	Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Coliformes Totales (NMP/100ml)
Antes Quebrada Cajones	RB1	0.0304	16.9	0.93	66.3	6.64	0.4	9.55	6.17 (16.9°C)	2.30E+03	4.90E+03
Quebrada Cajones	V1	0.1736	18.1	37.5	299	4.99	64.8	111	7.96 (18.1°C)	1.70E+1	1.70E+10
Quebrada Portachuelo	V2	0.5254	16.9	1.99	85.1	8.44	0.8	4.5	8.58 (16.9°C)	4.90E+03	4.90E+03
Bocatoma - Montenegro	RB2	0.4183	21.6	4.3	103	8.53	0.9	10.7	8.73 (21.6°C)	1.70E+03	1.70E+03
STAR La Isabela	V3	0.0006	24.2	294	823	3.63	570	1046	7.78 (24.2°C)		
Pablo VI	V4	0.0005	23.7	444	891	3.63	602	1092	8.25 (23.7°C)		
Puente Montenegro -Quimbaya	RB3	0.3714	24.1	2.7	95	6.1	6.2	19.8	7.91 (24.1°C)	3.50E+05	9.20E+05
La Española	RB4	0.7476	25.7	2.2	124	5.52	2.18	21.9	8.64 (25.7°C)	4.50E+03	2.30E+04

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

- **Temperatura**

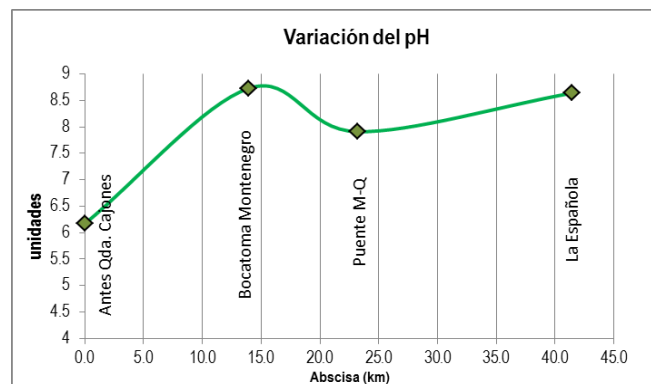
Existe una tendencia creciente de esta variable relacionada directamente con la altura sobre el nivel del mar lo que hace que esta vaya en aumento de tramo a tramo, debido a que el punto final se encuentra próximo al río La Vieja (límites con el Valle del Cauca). Además, y muy importante es que las mediciones 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. Se aprecia un aumento de la temperatura del 22% entre las estaciones Bocatoma Circasia y Bocatoma Montenegro, lo cual posiblemente es atribuido a dos factores: la diferencia de alturas (1610 a 1320 m.s.n.m) y los vertimientos de aguas residuales que llegan a la quebrada Cajones, tributaria del río Roble localizada a una distancia de 13.9 km aguas arriba de la estación Bocatoma Montenegro.

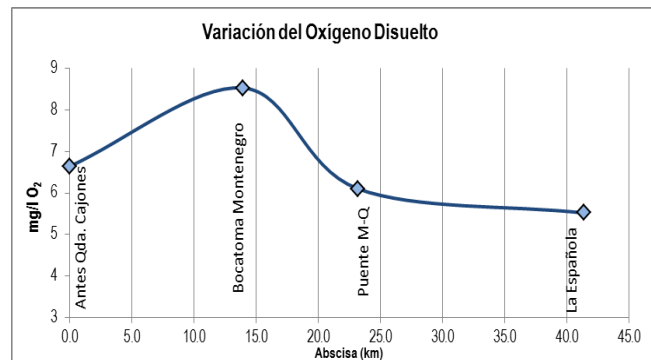
- pH

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: de 6.17 a 8.73 unidades aceptables para la mayoría de la fauna y flora acuática.



- 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 de 7 y 12 mg/l. 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. Algunos tipos de larvas de mosca y mosquito se hallan localizados entre los 4mg/l a 1mg/l. El nivel más bajo de OD encontrado el día del muestreo se encuentra localizado en la última estación de muestreo sobre el río Roble con 5.52 mg/l O<sub>2</sub>.



## • DBO<sub>5</sub> 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 Roble en gran parte de su trayecto presenta niveles de DBO<sub>5</sub> bajos, representativo este de aguas no contaminadas, valores que se encuentran entre los 0.4 a 2.18 mg/l O<sub>2</sub>. Se tiene una concentración mayor de 6.2 mg/l O<sub>2</sub> en la estación Puente M-Q, luego de recibir los vertimientos de la zona urbana de Montenegro, es decir, sobre este tramo se consideran aguas superficiales con indicio de contaminación.

**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.

A lo largo del río Roble se presentan concentraciones de DQO entre 9.55 mg/l O<sub>2</sub> y 21.9 mg/l O<sub>2</sub>, equivalente a aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, lo que se clasifica como "Buena Calidad"; valores entre 10 < DQO < 20 mg/l O<sub>2</sub>. (Tomado de: Escala de clasificación de la calidad del agua, CONAGUA, México).

## • Relación DQO/DBO

La relación entre la DQO y DBO biodegradable, permite identificar si la materia orgánica presente en el agua es muy biodegradable, moderadamente o poco biodegradable.

Índice de biodegradabilidad:

- DQO/DBO = 1.5 Materia orgánica muy degradable
- DQO/DBO = 2 Materia orgánica moderadamente degradable
- DQO/DBO = 10 Materia poco degradable

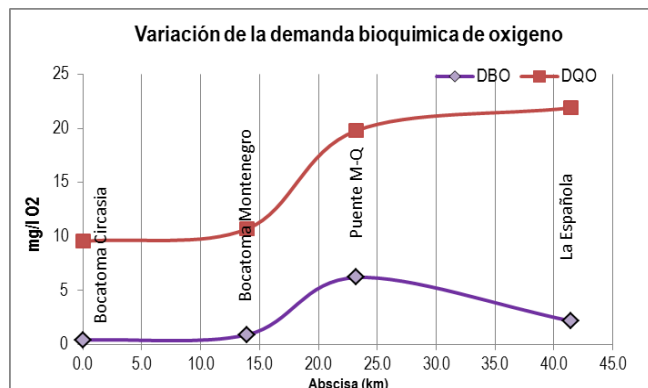


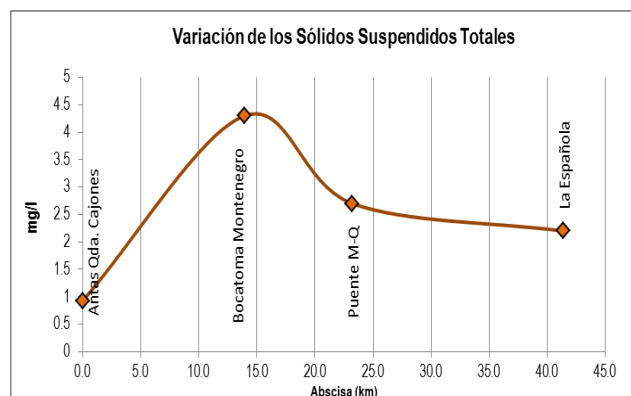
Tabla 20. Índice de biodegradabilidad\* de los vertimientos

PUNTO DE MONITOREO	DQO/DBO	OBSERVACIÓN
Quebrada Portachuelo	1.71	De muy degradable a moderadamente degradable
Quebrada Cajones	5.63	De moderadamente a poco degradable
STAR La Isabela	1.84	De muy degradable a moderadamente degradable
Pablo VI	1.81	De muy degradable a moderadamente degradable

\*Biodegradables: Sustancias que pueden ser degradadas o transformadas por los microorganismos (bacterias y hongos). Por ejemplo tenemos al papel, al cartón, algunos detergentes y desechos orgánicos (excremento, alimentos).

### • 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.

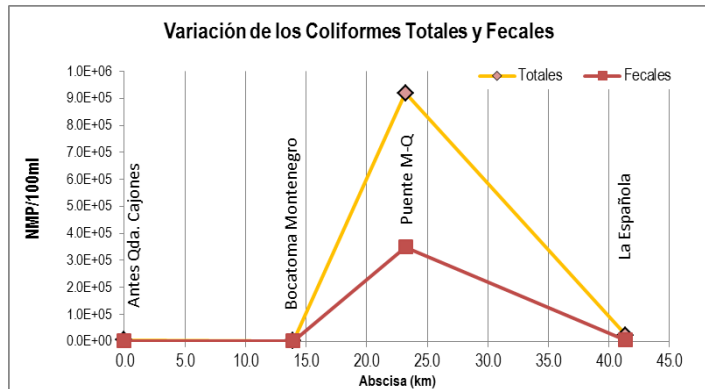


El río Roble presenta niveles de SST entre 0.93 y 4.3 mg/l. Los mayores niveles se registran luego del paso del río por el casco urbano del municipio de Circasia. Ya cerca a la desembocadura con el río La Vieja (estación La Española), la concentración de SST se ve reducida a 2.2 mg/l.



• **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. La mayor concentración de este parámetro se encuentra en el tramo Puente Montenegro-Quimbaya (RB2-RB3), donde el río recibe parte de los vertimientos de aguas residuales domésticas del casco urbano de Circasia y Montenegro. Por otro lado, se observa para la última estación (La Española) una reducción de los coliformes fecales y totales de hasta un 99% y 98% respectivamente, debido principalmente a los procesos naturales que se producen en el río ante la inexistencia de vertimientos significativos en el último tramo antes de su desembocadura con el río La Vieja.



En relación con la normatividad colombiana, los Coliformes Totales y Fecales estarían cumpliendo con el Decreto 1594/84 en cuanto a la destinación del recurso para consumo humano en la captación de agua para el acueducto del municipio de Montenegro; los valores deberán ser menores a 20000 NMP/100ml y 2000 NMP/100ml respectivamente. Es interesante evidenciar la capacidad de autodepuración o eliminación de agentes patógenos en el río Roble luego de que este ha recibido una concentración de 1.70E+10 NMP/100ml a través de la quebrada Cajones a tan solo 13.9 km entre este vertimiento y la bocatoma para el municipio de Montenegro.

**5.1.1.1 Análisis de las concentraciones obtenidas en los vertimientos puntuales identificados en el río Roble 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 Roble), 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.

Tabla 21. Carga contaminante de los vertimientos identificados en la modelación

ESTACION	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (l/s)	Carga Contaminante kg/día DBO <sub>5</sub>	Resolución 0631 de 2015 (Capítulo V, Art. 8)
Quebrada Cajones	64.8	0.1736	173.62	972.026	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS -ARD Y DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS PUBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES CON UNA CARGA PRESTADORES DEL SERVICIO MAYOR A 625.00 Kg/día Y MENOR O IGUAL A 3000 Kg/día DBO <sub>5</sub>
STAR La Isabela	570	0.0006	0.62	30.731	AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS -ARD Y DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS PUBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES CON UNA CARGA PRESTADORES DEL SERVICIO MENOR O IGUAL A 625.00 Kg/día DBO <sub>5</sub>
Pablo VI	602	0.0005	0.51	26.423	

Tabla 22. Cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, para los vertimientos puntuales identificados en la campaña de muestreo el día 02/09/2015

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)
Quebrada Cajones	V1 - Concentración	37.5	64.8	111	7.96
	Cumplimiento Resolución 0631 de 2015	< 90 CUMPLE	< 90 CUMPLE	< 180 CUMPLE	(6-9) CUMPLE
STAR La Isabela	V3 - Concentración	294	570	1046	7.78
	Cumplimiento Resolución 0631 de 2015	< 90 NO CUMPLE	< 90 NO CUMPLE	< 180 NO CUMPLE	(6-9) CUMPLE
Pablo VI	V4 - Concentración	444.0	602	1092	8.25
	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 (K2).
- Constante de decaimiento de los coliformes (Kb).

### 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  
 Δt : Tiempo de viaje entre A y B, días  
 A : Punto localizado aguas arriba  
 B : Punto localizado aguas abajo

Si bien es cierto, que existen otro muchos 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:

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

Dónde:

$K_B$	: Constante de decaimiento de los coliformes, $\text{dia}^{-1}$
$K_{B1}$	: Decaimiento por salinidad, $\text{dia}^{-1}$
$K_{Bluz}$	: Decaimiento por la luz, $\text{dia}^{-1}$
$K_{B(sed)}$	: Decaimiento por sedimentación, $\text{dia}^{-1}$
$K_{a(\text{crecimiento})}$	: Tasa de crecimiento de los coliformes, $\text{dia}^{-1}$

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  $\text{DBO}_5$ , 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 del rio Role.

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<sub>5</sub>, OD, SST, pH y CF.

Tabla 23. Calibración de las descargas difusas

Fuente Difusa		Localización entre la abscisa (m)		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Temp. Agua °C	SST (mg/l)	OD (mg/l O <sub>2</sub> )	DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	pH (unidades)	Coliformes Fecales (NMP/100ml)
Fuente Difusa 1	D1	0.0	4.0	-0.310	-	-	-	-	-	-
Fuente Difusa 2	D2	11.4	22.0	0.045	23.40	-	8.0	35.00	8.0	-
Fuente Difusa 3	D3	28.4	41.4	0.376	24.00	3.25	-	1.50	8.0	-

Tabla 24. Constantes cinéticas de reacción

Tramo (km)	Constante de reaireación (1/d)	Velocidad de sedimentación (m/d)	Tasa de Oxidación (1/d)	Constante de decaimiento de los coliformes	Velocidad de sedimentación de los coliformes
Antes Qda. Cajones	40.00	16.500	45.000	90.00	78.00
Bocatoma Montenegro	-	2.987	0.001	100.00	98.00
Puente M-Q	3.578	-	-	38.00	15.00

Figura 12. Modelo de calidad del agua – río Roble  
Perfil longitudinal de Temperatura

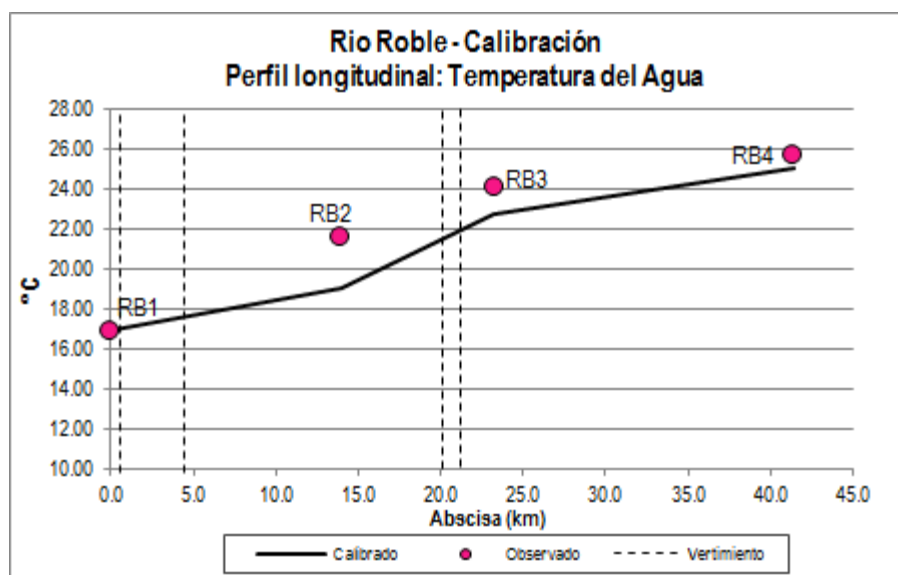


Figura 13. Modelo de calidad del agua – río Roble  
 Perfil longitudinal de DBO<sub>5</sub> y OD

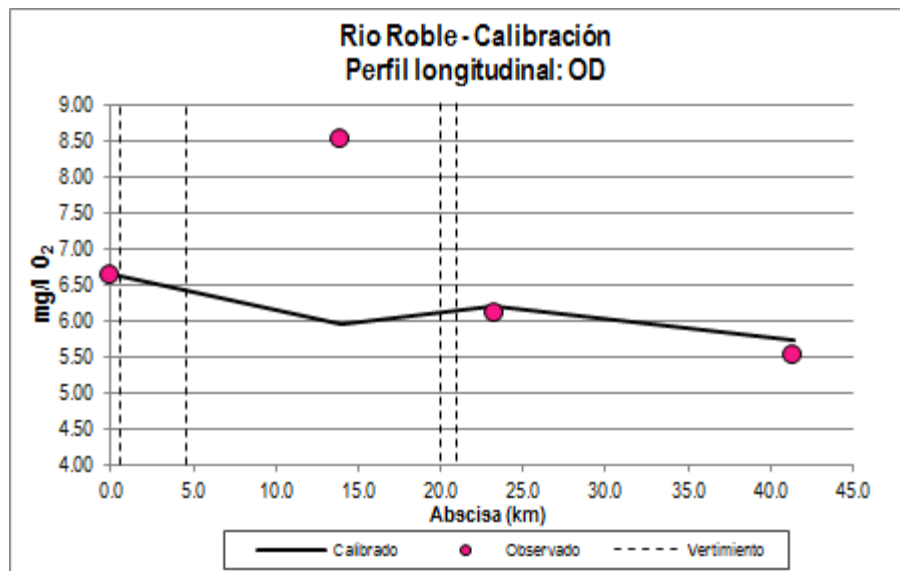
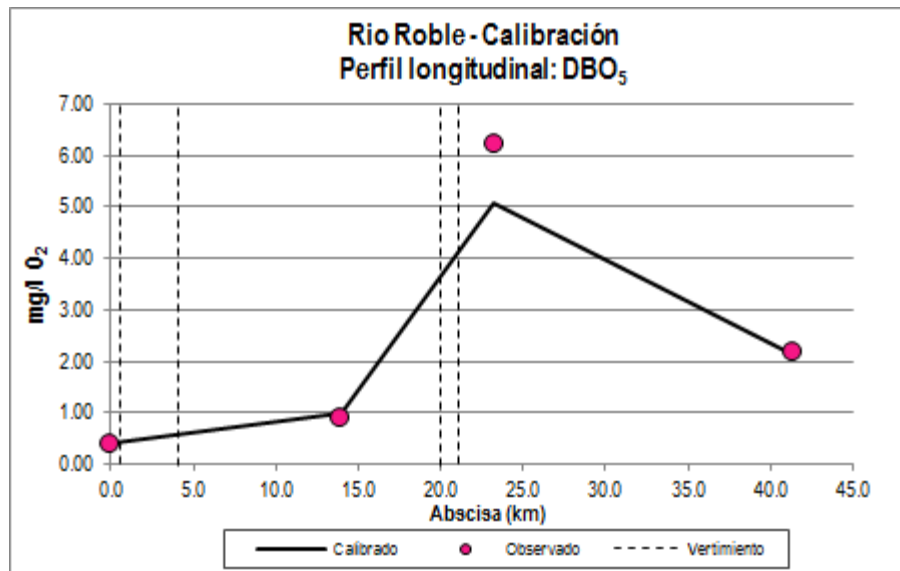


Figura 14. Modelo de calidad del agua – río Roble  
 Perfil longitudinal de pH y SST

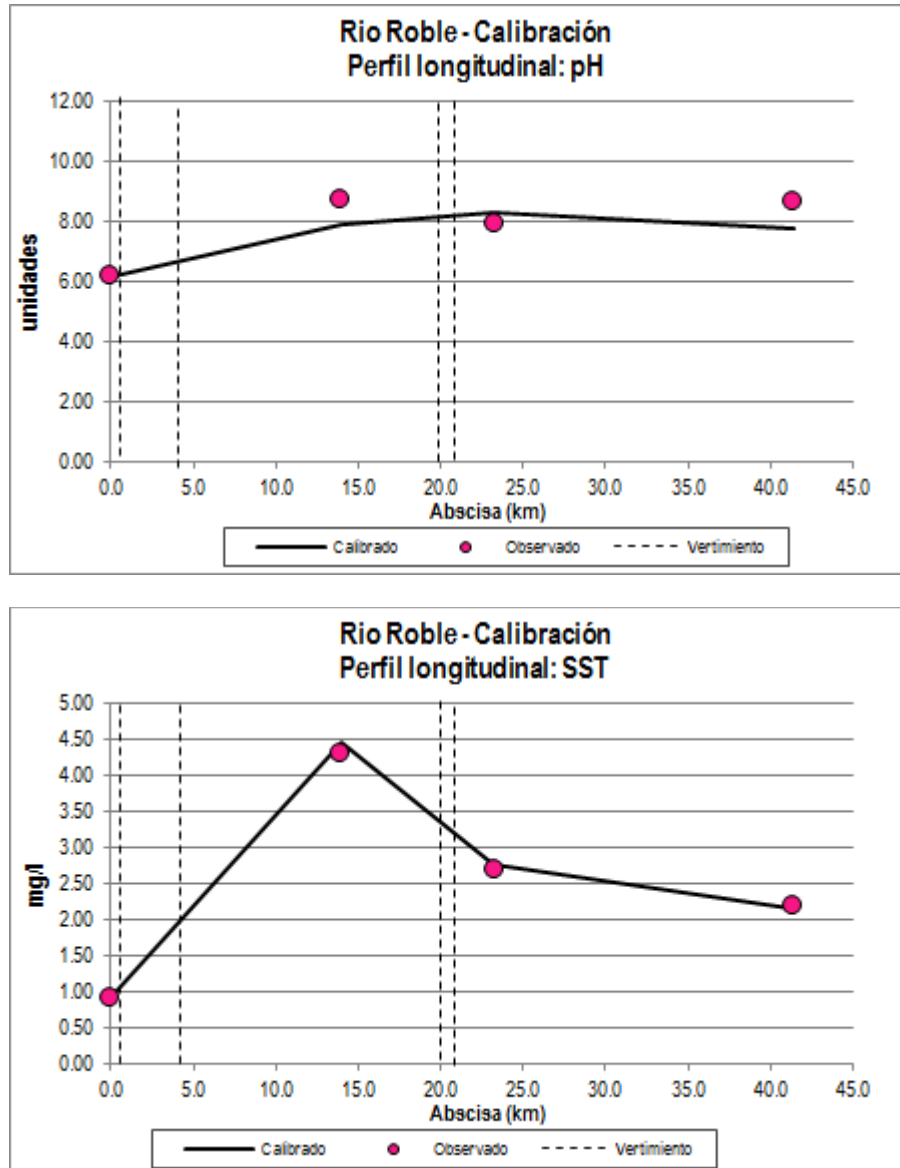
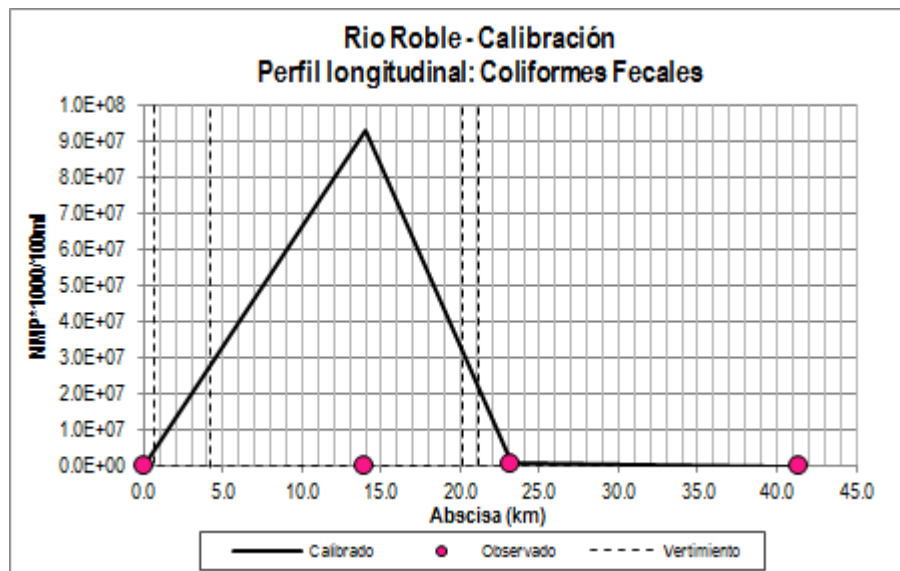




Figura 15. Modelo de calidad del agua – río Roble  
 Perfil longitudinal Coliformes Fecales (CF)



## 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. Para lo anterior, los diferentes modelos de calidad simulados para el año 2015 serán comparados con los valores obtenidos en las campañas de muestreo de los años 2010, 2013 y 2014 realizadas por la Corporación Autónoma Regional del Quindío sobre las mismas estaciones de estudio.

Figura 16. Validación del modelo de simulación: Temperatura Agua y pH

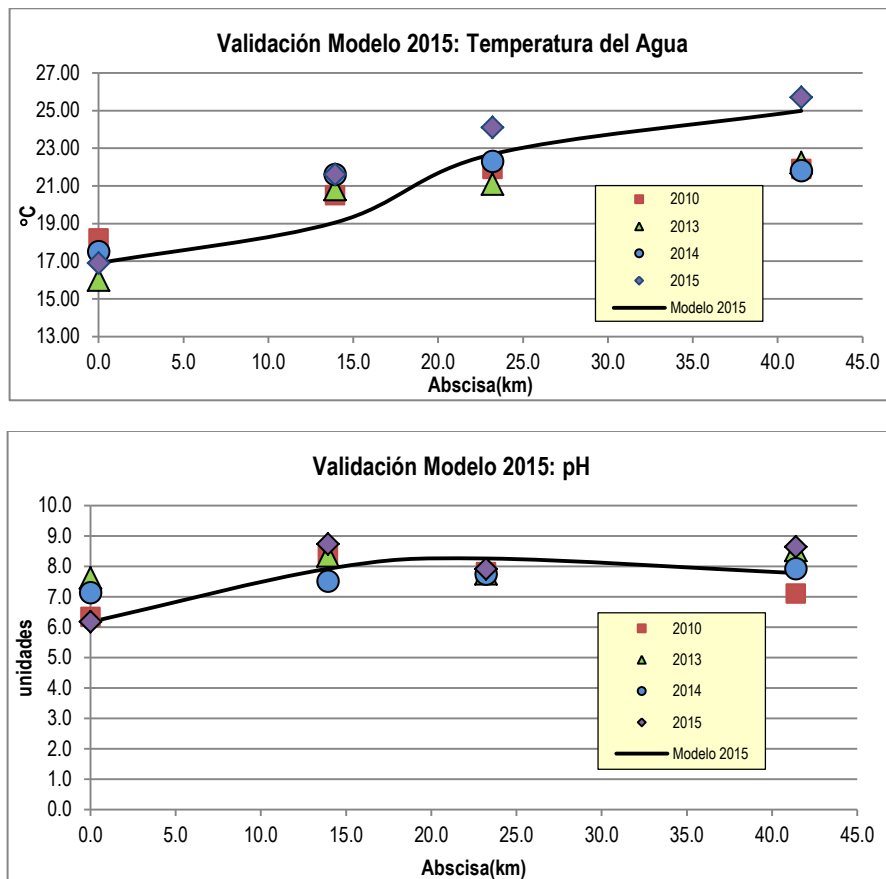


Figura 17. Validación del modelo de simulación: DBO, OD y SST

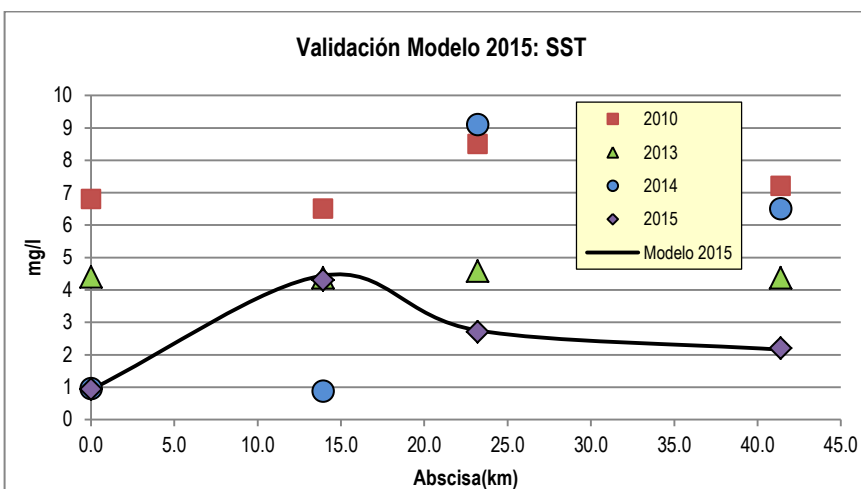
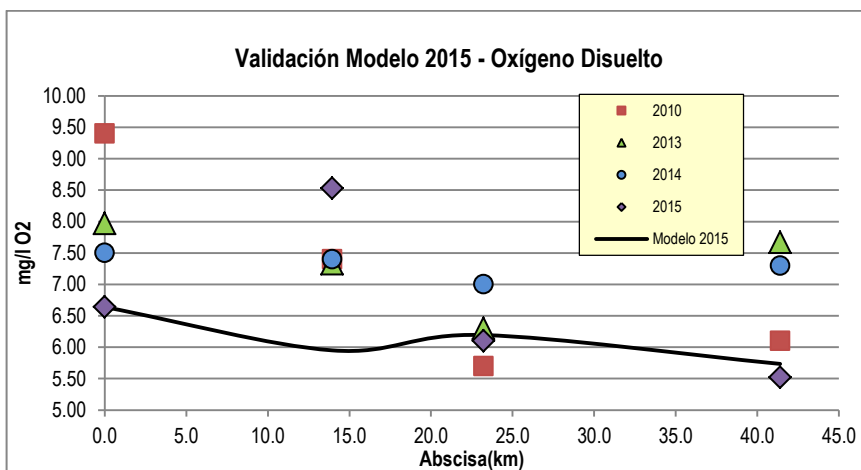
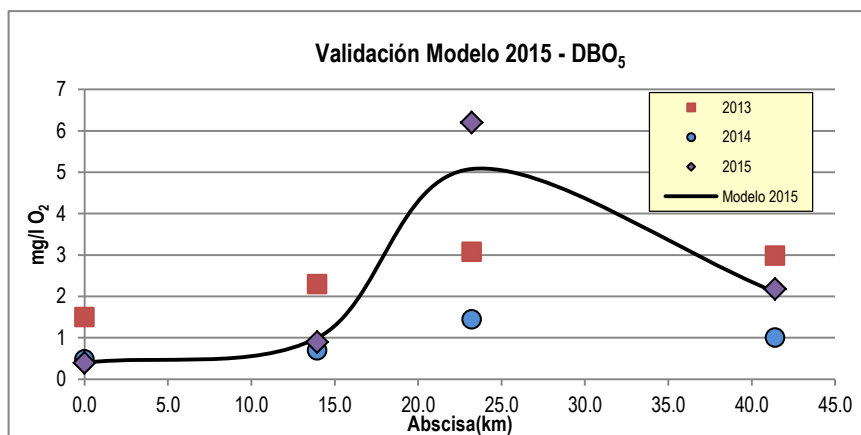
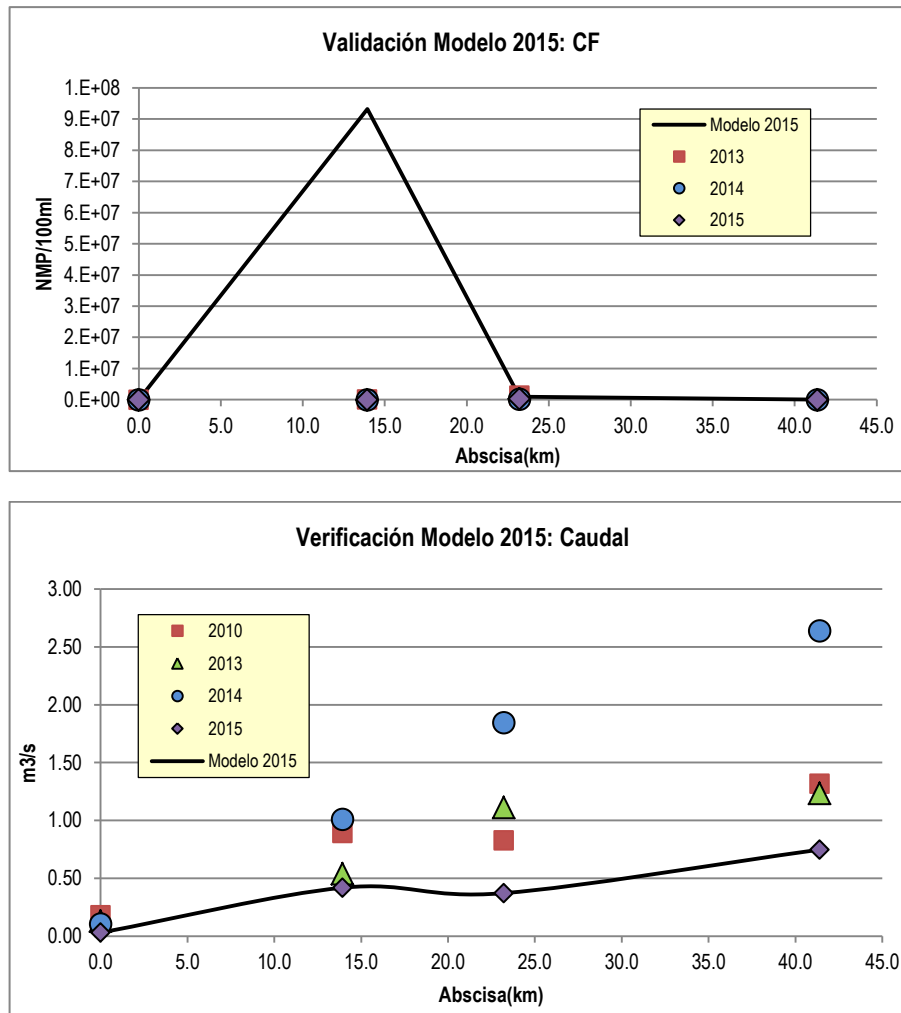


Figura 18. Validación del modelo de simulación: CF y Caudal



Gráficamente se puede observar que los diferentes modelos de calidad y cantidad calculados para el año 2015 poseen cierta similitud en cuanto a la variación entre tramos a lo largo del cauce principal y los obtenidos a través de los años; tendencias crecientes o decrecientes.

De acuerdo a lo anterior se presenta la siguiente tabla, los parámetros estadísticos medidos para cada una de las variables físicas y químicas en cada estación de muestreo, en ella se relaciona el coeficiente de variación respecto a la media de los valores obtenidos.

Tabla 25. Relación estadística entre los datos históricos observados y el modelo simulado para el año 2015

Parámetro calidad	Estación	2010	2013	2014	2015	Modelo simulado 2015	Media de los datos observados	Desv. Estándar	Coef. de Variación
Temperatura del Agua	RB1	18.20	16.00	17.50	16.90	16.90	17.10	0.82	5%
	RB2	20.50	20.81	21.60	21.60	19.05	20.71	1.05	5%
	RB3	21.90	21.10	22.30	24.10	22.69	22.42	1.11	5%
	RB4	21.90	22.23	21.80	25.70	24.99	23.32	1.87	8%
pH	RB1	6.33	7.61	7.13	6.17	6.17	6.68	0.65	10%
	RB2	8.40	8.34	7.51	8.73	7.92	8.18	0.47	6%
	RB3	7.80	7.75	7.74	7.91	8.26	7.89	0.22	3%
	RB4	7.10	8.52	7.92	8.64	7.78	7.99	0.62	8%
OD	RB1	9.40	7.97	7.50	6.64	6.64	7.63	1.14	15%
	RB2	7.40	7.33	7.40	8.53	5.95	7.32	0.92	13%
	RB3	5.70	6.30	7.00	6.10	6.19	6.26	0.47	8%
	RB4	6.10	7.67	7.30	5.52	5.73	6.46	0.96	15%
DBO <sub>5</sub>	RB1		1.50	0.48	0.40	0.40	0.70	0.54	77%
	RB2		2.30	0.70	0.90	1.00	1.22	0.73	59%
	RB3		3.08	1.45	6.20	5.08	3.95	2.11	53%
	RB4		2.99	1.01	2.18	2.11	2.07	0.81	39%
SST	RB1	6.80	4.40	0.95	0.93	0.93	2.80	2.69	96%
	RB2	6.50	4.37	0.87	4.30	4.44	4.10	2.03	49%
	RB3	8.50	4.58	9.10	2.70	2.75	5.53	3.09	56%
	RB4	7.20	4.37	6.50	2.20	2.16	4.49	2.35	52%
Caudal	RB1	0.18	0.13	0.10	0.03	0.03	0.09	0.07	69%
	RB2	0.89	0.54	1.01	0.42	0.42	0.66	0.28	42%
	RB3	0.83	1.11	1.85	0.37	0.37	0.91	0.61	68%
	RB4	1.32	1.23	2.64	0.75	0.75	1.34	0.78	58%

Los parámetros de calidad como la temperatura del agua, pH y Oxígeno Disuelto, poseen un coeficiente de variación bajo respecto a la media. Esto se relaciona con cierta similitud entre los parámetros a través de los años, lo que hace pensar que la calidad del agua en relación a estos varía poco en condiciones de caudales medios a bajos. Respecto a los demás parámetros (DBO, SST y Caudal), se tienen coeficientes de variación Altos, es decir, son más sensibles a las variaciones físico-químicas que alteren el comportamiento natural del río.

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 ellos.

---

## 7. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS PARA EL RIO ROBLE

---

Los escenarios de saneamiento son representaciones hipotéticas del comportamiento de una sustancia contaminante en un cuerpo de agua, que ha sido modelada por medio de un programa de computador o técnicas matemáticas, y a la cual se le aplica un tratamiento que también es simulado por el programa o las técnicas matemáticas.

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 el río Roble, 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, tanto de contaminación como de saneamiento en el río.

Es así como se estima un porcentaje de tratamiento para cada una de las descargas puntuales que se han introducido previamente, para lo cual el modelo hará la presunción de que estas cargas tienen algún tipo de tratamiento y efectuará las operaciones respectivas con una disminución en la carga de DBO<sub>5</sub>, SST y un aumento en la concentración de OD.

Las variables que se tomarán para el planteamiento de la mayoría de escenarios serán el OD, la DBO<sub>5</sub> y los SST como principales indicadores de la contaminación de las aguas.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los escenarios de saneamiento propuestos para la temporada de pocas lluvias.

### **7.1 Escenario 1: Reducción de hasta un 60% de los niveles de SST y DBO en la quebrada Cajones y los vertimientos de aguas residuales en la STAR La Isabela y Pablo VI. Reducción de un 99% de los CF en los tributarios y vertimientos.**

Se proponen reducciones del 60% en los vertimientos analizados dentro del estudio de modelación para el río Roble. Sumado a lo anterior, se pretende reducir en un 99% CF en el tramo bocatoma de Montenegro – Puente con el fin de dar cumplimiento a los objetivos de calidad propuestos para el primer tramo, así como en los vertimientos puntuales de la zona urbana de Montenegro. Con ello se pretende evidenciar el comportamiento en el río si se llegara a implantar algún sistema de tratamiento o mejorar el existente que lograra reducir estos niveles de contaminación.

Tabla 26. Escenario 1

	Sin Remoción (reportado el día del muestreo)		60% Remoción	
	DBO	SST	DBO	SST
Quebrada Cajones	64.8	37.5	25.92	15
STAR La Isabela	570	294	228	117.6
Pablo VI	602	444	240.8	177.6

**7.2 Escenario 2: Reducción de hasta un 80% de los niveles de SST y DBO en la quebrada Cajones y los vertimientos de aguas residuales en la STAR La Isabela y Pablo VI. Reducción de un 99% de los CF en los tributarios y vertimientos.**

Se proponen reducciones del 80% en los vertimientos analizados dentro del estudio de modelación para el río Roble. Sumado a lo anterior, se proyecta reducir en un 99% los CF en el tramo bocatoma de Montenegro - Puente con el fin de dar cumplimiento a los objetivos de calidad propuestos para el primer tramo, así como en los vertimientos puntuales de la zona urbana de Montenegro. Con ello se pretende evidenciar el comportamiento en el río si se llegara a implantar algún sistema de tratamiento o mejorar el existente que lograra reducir estos niveles de contaminación.

Tabla 27. Escenario 2

	Sin Remoción (reportado el día del muestreo)		80% Remoción	
	DBO	SST	DBO	SST
Quebrada Cajones	64.8	37.5	12.96	7.5
STAR La Isabela	570	294	114	58.8
Pablo VI	602	444	120.4	88.8

### 7.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Figura 19. Resultados de la aplicación de los escenarios de saneamiento: DBO<sub>5</sub>, OD y pH

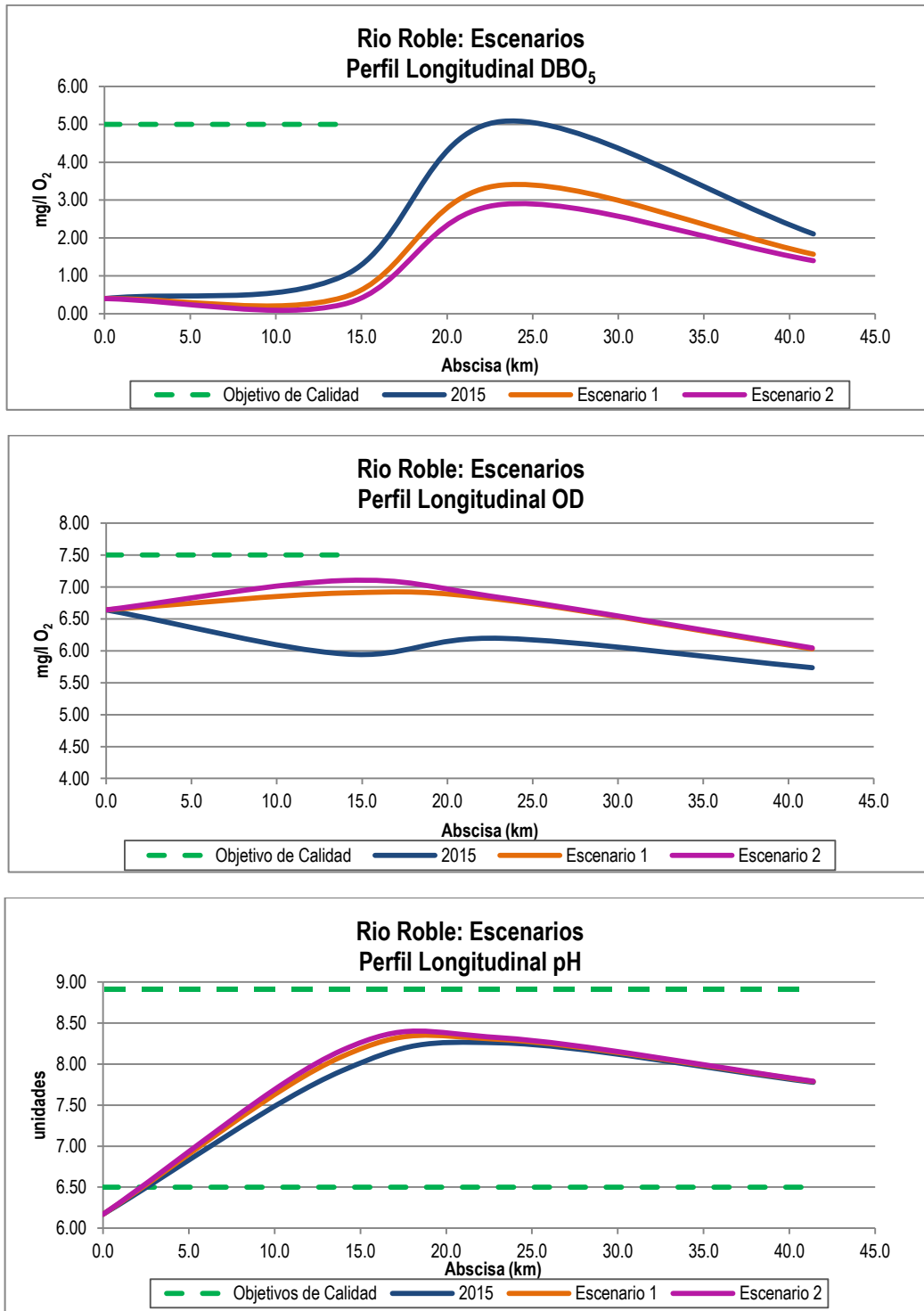
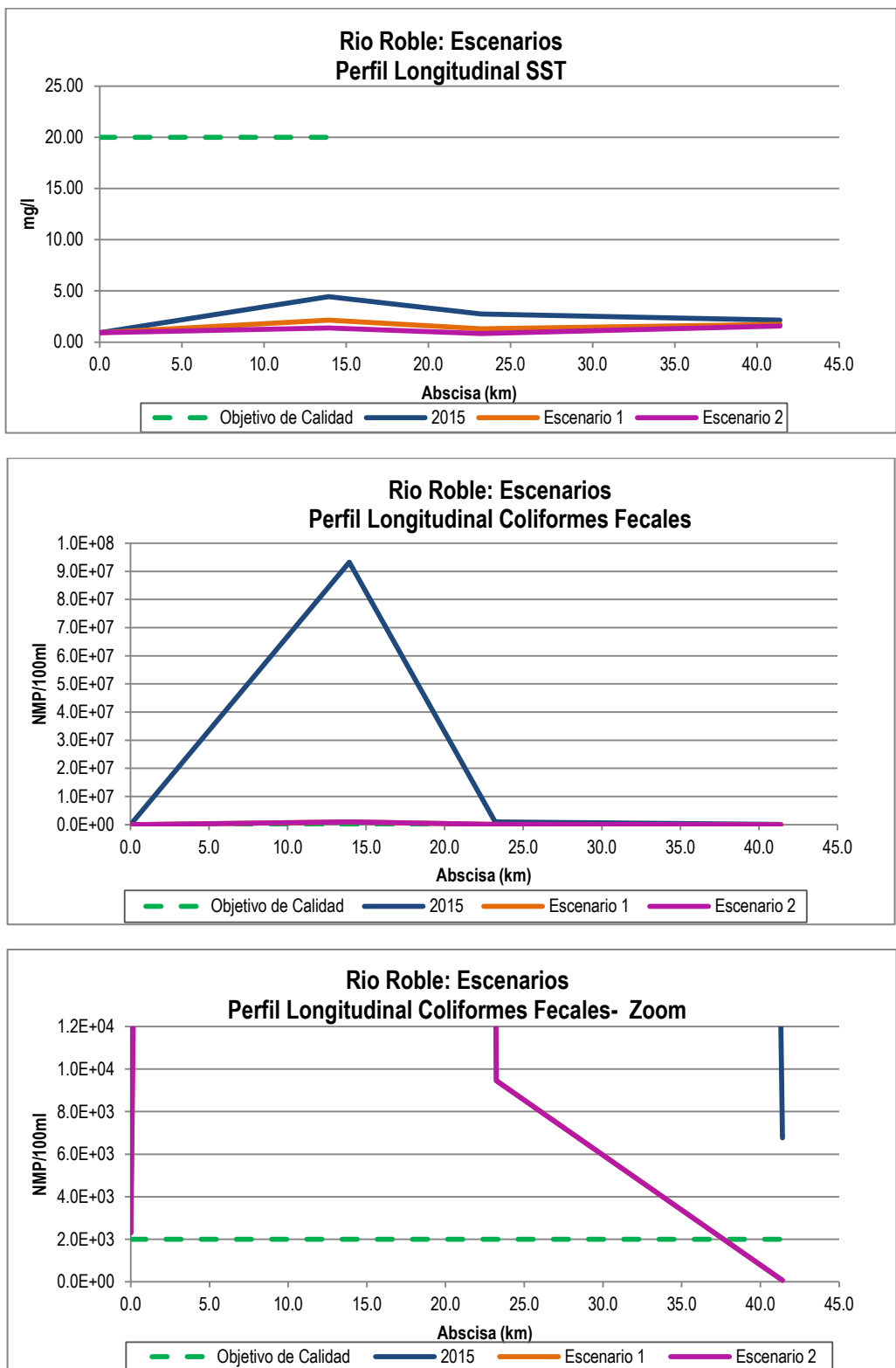




Figura 20. Resultados de la aplicación de los escenarios de saneamiento: SST y CF



## 7.4 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS

### 7.4.1 DBO<sub>5</sub>

**a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** En la estación Puente Montenegro-Quimbaya, este parámetro es mayor al propuesto por la Corporación (menor a 5.0 mg/l O<sub>2</sub>), es decir no cumple con el objetivo de calidad sobre este tramo (dato medido en campo 6.2 mg/lO<sub>2</sub>, dato simulado igual a 5.08 mg/lO<sub>2</sub>). Con la reducción del 80% de la concentración sobre este punto, los valores descienden a 2.89 mg/lO<sub>2</sub>.

**b) Escenario 2 de saneamiento.** La reducción del 80% en los niveles de este parámetro, evidencia una reducción del 50.6% entre el promedio de valores de la condición actual y la obtenida en el escenario 2. (Condición actual =2.15mg/lO<sub>2</sub> y Escenario 2= 1.23 mg/lO<sub>2</sub>).

Tabla 28. Porcentaje de reducción de la DBO, río Roble: Escenario 2

Abscisa (km)	Condición año 2015 (mg/lO <sub>2</sub> )	Escenario 2 (mg/lO <sub>2</sub> )	% de Reducción
0.0	0.40	0.40	0.00%
13.9	1.00	0.25	75.00%
23.2	5.08	2.89	43.11%
41.4	2.11	1.40	33.65%

### 7.4.2 SST

**a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** Como se observa en la gráfica, se cumplen los objetivos de calidad menor a 20mg/l en todo el tramo del río Roble.

**b) Escenario 2 de saneamiento.** La reducción del 80% en los niveles de este parámetro, evidencia una reducción del 69% entre el promedio de valores de la condición actual y la obtenida en el escenario 2. (Condición actual =2.15mg/lO<sub>2</sub> y Escenario 2= 1.23 mg/lO<sub>2</sub>).En general se mantienen valores bajos de los SST en el cauce principal del río Roble.

Tabla 29. Porcentaje de reducción de los SST, río Roble: Escenario 2

Abscisa (km)	Condición año 2015 (mg/l)	Escenario 2 (mg/l)	% de Reducción
0.0	0.93	0.93	0.00%
13.9	4.44	1.39	68.69%
23.2	2.75	0.83	69.82%
41.4	2.16	1.59	26.39%

### 7.4.3 OD

**a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** No se cumple el objetivo de calidad mayor a 7.5 mg/IO<sub>2</sub> en todo el tramo del río Roble. Para la condición actual y simulada por el escenario 2 (80%) se tiene un promedio de 6.13 mg/IO<sub>2</sub> y 6.65 mg/IO<sub>2</sub> respectivamente.

**b) Escenario 2 de saneamiento.** No se aprecia aumento significativo de este parámetro con la aplicación de los escenarios de saneamiento propuestos. Para el escenario 2 se tiene en promedio un aumento del 10.23% donde no se alcanzan el objetivo de calidad propuesto en todos los tramos del modelo.

Tabla 30. Porcentaje de aumento del OD, río Roble: Escenario 2

Abscisa (km)	Condición año 2015 (mg/IO <sub>2</sub> )	Escenario 2 (mg/IO <sub>2</sub> )	% de Aumento
0.0	6.64	6.64	0.00%
13.9	5.95	7.10	16.20%
23.2	6.19	6.83	9.37%
41.4	5.73	6.04	5.13%

### 7.4.4 pH

**a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** Como se observa en la gráfica, en casi todos los tramos se cumple el objetivo de calidad entre 6.5 a 9 unidades, a excepción del primer punto el cual posee un valor de 6.17 unidades.

**b) Escenarios de saneamiento.** No se aprecia aumento significativo de este parámetro con la aplicación de los escenarios de saneamiento propuestos. Estos se mantienen entre 6.17 y 8.32 unidades.

### 7.4.5 Coliformes Fecales

**a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** No se cumplen los objetivos de calidad en todo el tramo del río Roble. Según el modelo, estos arrojan valores mayores a 2000 NMP/100ml.

**b) Escenario 2 de saneamiento.** Con la reducción de un 99% de los CF en la quebrada Cajones localizada aguas arriba de la bocatoma que abastece al municipio de Montenegro, se obtuvo un valor de 9460 NMP/100ml el cual no garantiza el cumplimiento del Objetivo de Calidad propuesto por la CRQ y el decreto 1594 de 1984 en la destinación del agua para consumo humano<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional

Tabla 31. Porcentaje de reducción de los CF, rio Roble: Escenario 2

Abscisa (km)	Condición año 2015 (NMP/100ml)	Escenario 2 (NMP/100ml)	% de Reducción
0.0	2.30E+03	2.30E+03	0.00%
13.9	9.32E+07	9.30E+05	99%
23.2	9.48E+05	9.46E+03	99%
41.4	6.77E+03	6.76E+01	99%

## 8. CONCLUSIONES

---

- En términos generales, el modelo de calidad del agua del río Roble 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 diferentes estaciones ubicadas a lo largo de la corriente. Se contó con una campaña de monitoreo con propósitos de calibración en cuatro (4) estaciones sobre el cauce principal.
- La calidad del agua en el río Roble registrada el día 2 de septiembre de 2015, no cumple con los objetivos de calidad para el oxígeno disuelto y los coliformes fecales en todo el tramo de análisis. Igualmente se tiene un pH superior a 6.5 unidades en el primer tramo, y un valor superior a los definidos en los Objetivos de Calidad propuestos por la CRQ en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008. para la  $DBO_5$  en el tramo 3 ( $6.2 \text{ mg}/\text{IO}_2$ ).
- En cierta medida, una reducción del 80% de la  $DBO_5$  y SST en las quebradas Cajones y vertimientos PTAR La Isabela y Pablo VI planteado en el escenario 2, además de la reducción de un 99% en los valores de Coliformes Fecales de tributarios y vertimientos puntuales, podrían mejorar las condiciones de calidad del río Roble. Igualmente, las condiciones actuales de calidad y cantidad de la quebrada Portachuelo, garantizan una muy buena dilución de los agentes contaminantes generados por la zona urbana del municipio de Circasia sobre la quebrada Cajones.

## 9. 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, (2010, 2013 y 2014). Modelación de la calidad del agua en el río Roble.
- 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.