

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
QUEBRADA LA GATA, MUNICIPIO DE CALARCÁ 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

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| 1. GENERALIDADES | 3 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.2 OBJETIVOS | 4 |
| 1.3 ALCANCE | 4 |
| 1.4 MARCO NORMATIVO | 5 |
| 1.5 ANTECEDENTES | 7 |
| 2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA..... | 10 |
| 2.1 LOCALIZACIÓN | 10 |
| 2.1 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL | 11 |
| 2.2 DEMANDA HÍDRICA | 12 |
| 2.3 CALIDAD DEL AGUA | 12 |
| 3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2K | 16 |
| 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES..... | 16 |
| 3.2 METODOLOGÍA | 17 |
| 4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO..... | 19 |
| 4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR | 20 |
| 4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE | 23 |
| 4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS | 24 |
| 4.4 CONDICIONES DE BORDE | 26 |
| 4.4.1 Condiciones de borde externas..... | 26 |
| 4.4.2 Condiciones de borde internas | 26 |
| 4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN..... | 27 |
| 4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO | 28 |
| 4.6.1 Resultados de la modelación componente hidráulico | 28 |
| 5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD..... | 31 |
| 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO | 31 |
| 5.1.1 Observaciones Generales de los reportes de calidad | 31 |
| 5.1.2 Cumplimiento Resolución 0631 de 2015, vertimiento sistema de sedimentadores túneles piloto y principal | 35 |
| 5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN..... | 36 |
| 5.2.1 Constante de decaimiento de la DBO (Kd)..... | 36 |
| 5.2.2 Constante de decaimiento de los coliformes (Kb) | 38 |
| 5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD..... | 39 |
| 6. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN..... | 42 |
| 7. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE SANEAMIENTO | 47 |
| 7.1 ESCENARIO DE SANEAMIENTO | 47 |
| 7.2 RESULTADO DE LA SIMULACION..... | 48 |
| 8. CONCLUSIONES | 50 |
| 9. BIBLIOGRAFIA | 52 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. NORMA PARA VERTIMIENTOS A UN CUERPO DE AGUA PARA USUARIOS NUEVOS | 5 |
| TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA DESTINACIÓN DEL RECURSO | 5 |
| TABLA 3. VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA VERTIMIENTOS PUNTUALES, RESOLUCIÓN 0631 DE 2015 | 6 |
| TABLA 4. OBJETIVOS DE CALIDAD RIO SANTO DOMINGO, CRQ | 7 |
| TABLA 5. CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST) ANTES Y DESPUÉS DEL VERTIMIENTO TÚNELES PILOTO Y PRINCIPAL, 27/04/2015 CRQ | 9 |
| TABLA 6. ALGUNOS ASPECTOS MORFOLÓGICOS DEL SECTOR HIDROGRÁFICO QUEBRADA LA GATA..... | 11 |
| TABLA 7. CAUDAL OTORGADO PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA – MUNICIPIO DE CALARCÁ, QUINDÍO | 12 |
| TABLA 8. HISTÓRICOS DE CALIDAD - QUEBRADA LA GATA..... | 13 |
| TABLA 9. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS A MODELAR, QUEBRADA LA GATA..... | 19 |
| TABLA 10. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR QUEBRADA LA GATA | 20 |
| TABLA 11. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 21 DE MAYO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE..... | 24 |
| TABLA 12. TIEMPOS DE VIAJE DE LA MASA DE AGUA PARA EL DÍA 21 DE MAYO DE 2015..... | 24 |
| TABLA 13. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 22 DE JULIO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO Y MUESTREO..... | 25 |
| TABLA 14. CONDICIONES DE BORDE INTERNAS EN LA MALLA DE MODELACIÓN, QUEBRADA LA GATA | 26 |
| TABLA 15. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES TRANSVERSALES DE LA MALLA DE MODELACIÓN PARA LA QUEBRADA LA GATA..... | 27 |
| TABLA 16. RED ESQUEMATIZADA PARA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA LA GATA..... | 27 |
| TABLA 17. FUENTES DIFUSAS INCLUIDAS COMO PARTE DEL BALANCE HÍDRICO DENTRO DE LA QUEBRADA LA GATA | 28 |
| TABLA 18. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EN LA CALIBRACIÓN HIDRÁULICA..... | 29 |
| TABLA 19. DATOS DE CALIDAD QUEBRADA LA GATA (CRQ) – CAMPAÑA DE MUESTREO 22/07/2015..... | 31 |
| TABLA 20. ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD DEL VERTIMIENTO* | 34 |
| TABLA 21. CUMPLIMIENTO RESOLUCIÓN 0631 DE 2015, VERTIMIENTO SISTEMA DE SEDIMENTADORES TÚNELES PILOTO Y PRINCIPAL..... | 35 |
| TABLA 22. CALIBRACIÓN DE LAS DESCARGAS DIFUSAS | 39 |
| TABLA 23. CONSTANTE CINÉTICA DE REACCIÓN UTILIZADA EN LA CALIBRACIÓN | 39 |
| TABLA 24. RELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LOS DATOS HISTÓRICOS OBSERVADOS Y EL MODELO SIMULADO PARA EL AÑO 2015 | 44 |
| TABLA 25. ESCENARIO PLANTEADO, SST | 48 |
| TABLA 26. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS SST, QUEBRADA LA GATA: ESCENARIOS DE SANEAMIENTO | 49 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. NUEVO TANQUE SEDIMENTADOR, TÚNEL DE LA LÍNEA..... | 8 |
| FIGURA 2. COMPACTADOR DE LODOS, TÚNEL DE LA LÍNEA | 8 |
| FIGURA 3. LOCALIZACIÓN QUEBRADA LA GATA, DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO | 10 |
| FIGURA 4. OFERTA HÍDRICA SECTOR HIDROGRÁFICO, QUEBRADA LA GATA..... | 11 |
| FIGURA 5. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA A TRAVÉS DE LOS AÑOS SOBRE LA ESTACIÓN: DESPUÉS VERTIMIENTO SEDIMENTADORES TÚNEL DE LA LÍNEA, QUEBRADA LA GATA..... | 14 |
| FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA | 17 |
| FIGURA 7. UBICACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES DE AFORO Y MUESTREO, UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA LA GATA | 23 |
| FIGURA 8. CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES, UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA LA GATA | 25 |
| FIGURA 9. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFILES LONGITUDINALES: CAUDAL Y VELOCIDAD DEL CAUCE..... | 29 |
| FIGURA 10. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFIL LONGITUDINAL: PROFUNDIDAD | 30 |
| FIGURA 11. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA LA GATA..... | 40 |
| FIGURA 12. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA LA GATA | 41 |
| FIGURA 13. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD 2015: TEMPERATURA DEL AGUA Y PH | 42 |
| FIGURA 14. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD 2015: OD, DBO ₅ Y CF..... | 43 |
| FIGURA 15. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD 2015: SST Y CAUDAL | 44 |
| FIGURA 16. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL ESCENARIO DE SANEAMIENTO QUEBRADA LA GATA, REMOCIÓN DEL 80% EN EL VERTIMIENTO DEL SISTEMA DE SEDIMENTADORES – TÚNELES PILOTO Y PRINCIPAL | 48 |

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.

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 2012, 2013, 2014 y 2015 se ha monitoreado un tramo representativo de la quebrada La Gata en el municipio de Calarcá, 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.

El presente estudio de modelación denominado “Modelación de la Calidad del agua en la quebrada La Gata”, 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 principalmente el vertimiento de aguas residuales originadas por las obras del Túnel de la Línea (túneles piloto y principal), localizado en la cuenca alta de la quebrada La Gata.

1.2 OBJETIVOS

General

- Realizar la modelación de la calidad del agua en la quebrada La Gata, en un tramo no mayor a 4.4 kilómetros, dando inicio aguas arriba del vertimiento de aguas residuales industriales proveniente de la construcción del Túnel de la Línea, localizado en la zona rural del municipio de Calarcá, Quindío.

Específicos

- Identificar los impactos de la calidad del agua que genera el vertimiento de agua residual industrial hacia la fuente receptora.
- Evidenciar la variación de los parámetros de calidad de la quebrada La Gata del año 2015 con los obtenidos en las campañas de muestreo para los años 2012, 2013 y 2014, en especial los relacionados con los Sólidos Suspendidos Totales.
- Determinar la capacidad de autodepuración de la corriente modelada, referente a los parámetros de DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y SST (Sólidos Suspendidos Totales).
- Elaborar escenarios de saneamiento partiendo de la información existente.

1.3 ALCANCE

El estudio considera el muestreo en diferentes puntos sobre la quebrada La Gata, iniciando 20 metros aguas arriba del vertimiento “túneles Piloto y Principal”, hasta su desembocadura con el río Santo Domingo.

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 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 ₅ | 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 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 O ₂ /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:

- DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a cinco (5) días.
- DQO: Demanda química de oxígeno.
- SST: Sólidos Suspendedos Totales.
- pH: Potencial del Ion hidronio, H⁺
- T: Temperatura.
- OD: Oxígeno disuelto.
- Q: Caudal.
- Datos Hidrobiológicos.
- Coliformes Totales y Fecales.

La Resolución 0631 de 2015, establece en su Capítulo VII los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas para las actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a los del Capítulo V y VI hacia los cuerpos de aguas superficiales, a cumplirse a partir del 01 de enero del 2016.

Tabla 3. Valores límites máximos permisibles para vertimientos puntuales, Resolución 0631 de 2015

| SST (mg/l) | DBO ₅ (mg/l O ₂) | DQO (mg/l O ₂) | pH (unidades) |
|---------------|--|-------------------------------|------------------|
| < 50 | < 50 | < 150 | Entre 6-9 |

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.

Dentro de la lista de fuentes hídricas que hacen parte de esta Resolución, la quebrada La Gata no cuenta con Objetivos de calidad específicos. Dado que esta quebrada es tributaria del río Santo Domingo y la calidad del mismo puede ser afectada por las fuentes hídricas que convergen hacia él, se decide tomar los Objetivos de Calidad establecidos para el río Santo Domingo.

Tabla 4. Objetivos de calidad río Santo Domingo, CRQ

| TRAMO | PARAMETRO DE CALIDAD | UNIDAD | OBJETIVO DE CALIDAD ESPERADO PARA EL AÑO 2017 |
|---|----------------------|------------------------|---|
| Comprendido entre la bocatoma Santo Domingo hasta la desembocadura al río Verde | Oxígeno Disuelto | (mg/l O ₂) | > 5.0 |
| | DBO | (mg/l O ₂) | < 15.0 |
| | SST | (mg/l) | < 40 |
| | pH | unidades | [6.5-9.0] |

1.5 ANTECEDENTES

Dada la problemática entorno al impacto generado sobre la quebrada La Gata por la construcción del túnel de La Línea y demás obras para su ejecución, la Corporación Autónoma Regional del Quindío ha empleado desde el año 2012 el modelamiento de la calidad del agua sobre esta quebrada, permitiendo así, conocer las características en cuanto a su cantidad y calidad, variabilidad temporal de los mismos y la verificación de ciertos acontecimientos como parte del soporte y justificación de lo evidenciado en ella.

El túnel de La Línea, ubicado en los límites de Tolima y Quindío, es una obra de 8,6 kilómetros que conectará a Cajamarca con Calarcá. La obra inicialmente en el año 2005 fue ejecutada por el consorcio CONLINEA pasando a finales del año 2009 a la UNIÓN TEMPORAL SEGUNDO CENTENARIO y en la actualidad por el consorcio CONLINEA 2. El sistema de tratamiento de aguas residuales evidenciado el día 22 de julio de 2015 cuenta con tres sedimentadores que funcionan en paralelo a los cuales se les adiciona un coagulante para aumentar el índice de sedimentación. El anterior sistema se encuentra en etapa de optimización donde entrará en funcionamiento un cuarto sedimentador. Además de ello, el sistema cuenta con un compactador de lodos que minimiza la cantidad de sólidos en suspensión que pudieran ser vertidos a la quebrada La Gata.



Figura 1. Nuevo tanque sedimentador, Túnel de la Línea



Figura 2. Compactador de lodos, túnel de la Línea

Tabla 5. Control y Seguimiento de las concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales (SST) antes y después del vertimiento túneles Piloto y Principal, 27/04/2015 CRQ

| PARAMETRO | QUEBRADA LA GATA | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | ANTES DEL VERTIMIENTO | DESPUÉS DEL VERTIMIENTO |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | 24.5 | 21.6 |
| CAUDAL (l/s) | 3 | 175 |

De los resultados consignados en la Tabla 5, se evidencia que el sistema de tratamiento funciona en forma aceptable manteniendo un valor de SST un poco menor a la obtenido aguas arriba del vertimiento. En cuanto al caudal vertido hacia el lecho de la quebrada, éste continúa siendo superior al volumen de agua propio de la quebrada antes de la inclusión del vertimiento.

2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

2.1 LOCALIZACIÓN

La quebrada La Gata nace a los 2400 m.s.n.m en las veredas El Túnel y Buenos Aires alto, zona rural del municipio de Calarcá en límites con el municipio de Salento, Quindío. Después de un recorrido de 5.9 km, la quebrada La Gata desemboca a 1620 m.s.n.m en el río Santo Domingo, cerca de la estructura de captación que surte de agua potable a el municipio de Calarcá sobre el río Santo Domingo.

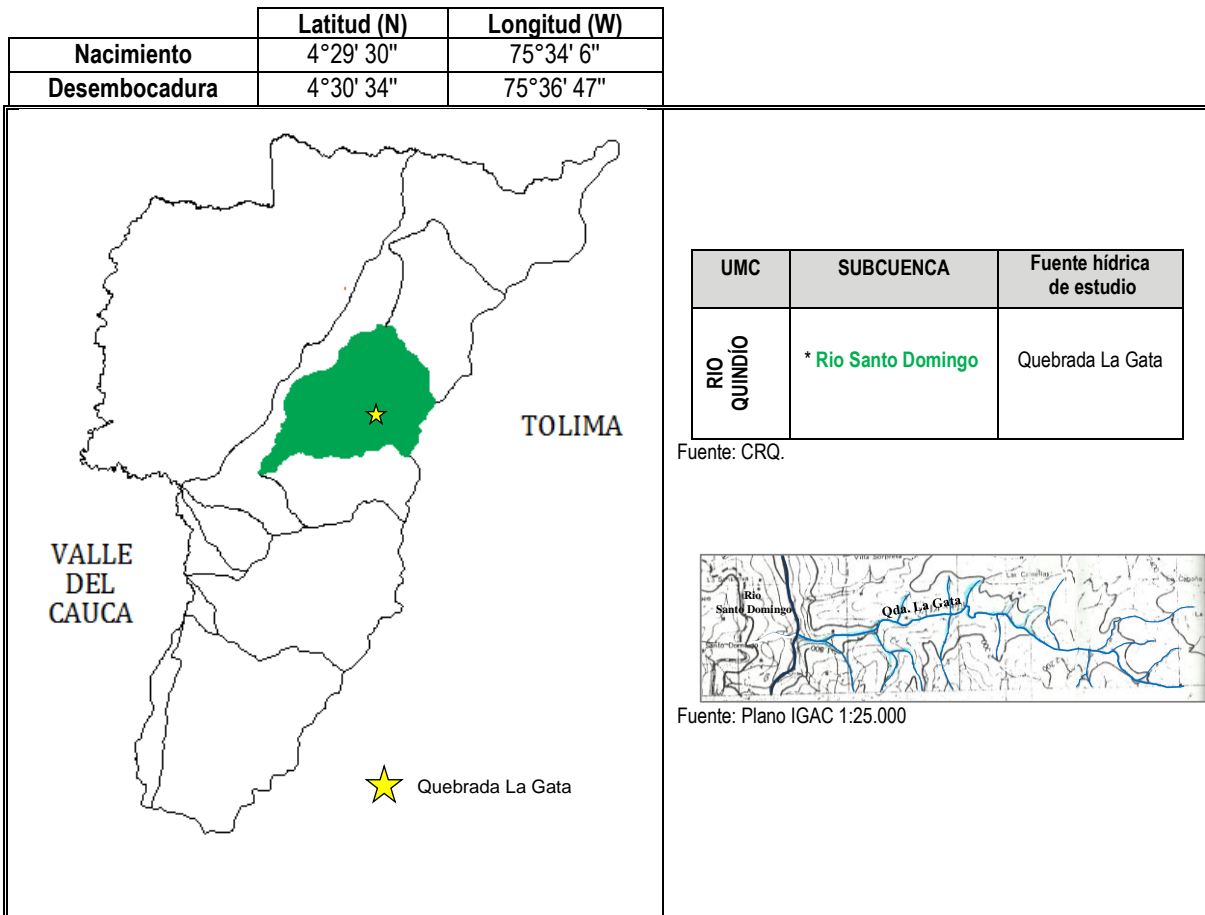


Figura 3. Localización Quebrada La Gata, Departamento del Quindío

Tabla 6. Algunos aspectos morfológicos del sector hidrográfico quebrada La Gata

| | |
|------------------------------|-----------------------|
| Área | 8.848 Km ² |
| Longitud del cauce principal | 5.809 Km |
| Perímetro | 14.675 Km |

Fuente: SIG Quindío

2.1 OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL

De acuerdo con los reportes históricos (años 1980-2010) de la estación pluviográfica Navarco localizada cerca nacimiento de la quebrada La Gata (2km aprox.), fue posible la obtención de la escorrentía total (Esc = P-ETR)¹, como resultado del flujo superficial (Caudal) perteneciente al sector hidrográfico.

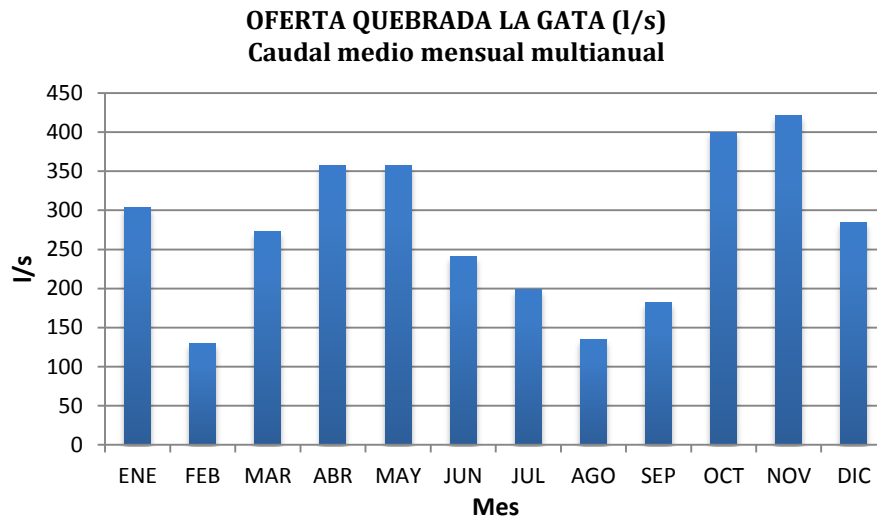


Figura 4. Oferta hídrica sector hidrográfico, quebrada La Gata

En la Figura 4 se observa la variación de caudales mes a mes obtenidos luego de la aplicación del Balance Hídrico; su promedio es cercano a los 274 l/s.

¹Método recomendado por la Unesco.

2.2 DEMANDA HÍDRICA

Para uso doméstico se tiene concesionado un caudal 70 l/s sobre la quebrada La Gata denominada bocatoma “El Salado” localizada cerca de la desembocadura con el río Santo Domingo. Esta bocatoma **NO** es utilizada desde Febrero de 2005 por la contaminación generada por el vertimiento de los túneles. Esta captación corresponde al 32% del consumo total de agua de la población del municipio de Calarcá (zona urbana).

Tabla 7. Caudal otorgado para el abastecimiento de agua – municipio de Calarcá, Quindío

| SUBCUENCA RIO SANTO DOMINGO | FUENTE HIDRICA | CAUDAL OTORGADO (l/s) |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------|
| | Quebrada Naranjal | 15 |
| | Quebrada San Rafael | 60 |
| | Rio Santo Domingo | 75 |
| | Quebrada El Salado* | 70 |

*No activa

Teniendo en cuenta lo anterior, no se presenta demanda alguna sobre la quebrada La Gata.

2.3 CALIDAD DEL AGUA

En la Tabla 8 se presenta el consolidado de los resultados de calidad de la red de vertimientos de agua realizadas por la CRQ en los últimos años sobre el cauce principal de la quebrada La Gata y tributarios.

En la Figura 5 se identifican las variaciones en el comportamiento de los parámetros de calidad sobre la quebrada La Gata estación: “Después vertimiento túnel de La Línea (sedimentadores)”.

A principios del año 2015, los vertimientos de los portales Chorros y Robles a cargo de INVIAS (obras anexas) y consorcio CONLINEA 2, fueron trasladados a un punto de vertimiento sobre la quebrada El Oso, tributario del río Santo Domingo. Este permiso de vertimiento se encuentra consignado en la Resolución 1872/2014 otorgada por la Corporación Autónoma Regional del Quindío, CRQ.

De acuerdo a lo anterior, para el año 2015 sólo se dispone de un único punto de vertimiento sobre la quebrada La Gata, asociado al vertimiento generado por los sedimentadores de los túneles piloto y principal.

Tabla 8. Históricos de calidad - quebrada La Gata

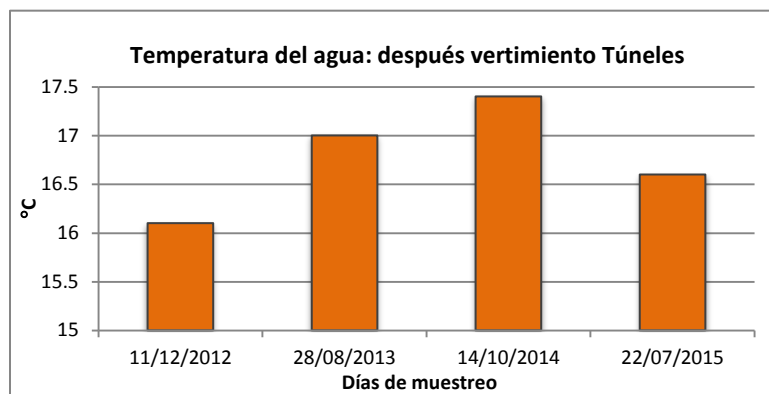
| CORRIENTE | FECHA | ESTACION | T (°C) | pH | DBO (mg/l O ₂) | DQO (mg/l O ₂) | SST (mg/l) | ST (mg/l) | OD (mg/l O ₂) | CE (uS/cm) | CT (NMP/100ml) | CF (NMP/100L) | Turbiedad (NTU) | Caudal (l/s) | |
|------------------|-------------|---------------------|-----------------|------|----------------------------|----------------------------|------------|-----------|---------------------------|------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|--|
| Quebrada La Gata | 11-dic-12 | Antes Vertimiento | 13.8 | 7.26 | <5.7 | — | 9.8 | 53.5 | 7.49 | 189 | — | — | 4.39 | 5.1 | |
| | | Después Vertimiento | 16.1 | 8.1 | <5.7 | — | 58.6 | 235 | 7.48 | 296 | — | — | 33.5 | 201 | |
| | | Portal Los Robles | 13.2 | 8.27 | <5.7 | — | 958 | 1100 | 6.42 | 233 | — | — | 678 | 5.2 | |
| | | Portal Chorros | 13.5 | 8.31 | <5.7 | — | 386 | 554 | 6.85 | 282 | — | — | 397 | 2.5 | |
| | 28-ago-13 | Antes Vertimiento | NO HABIA CAUDAL | | | | | | | | | | | | |
| | | Después Vertimiento | 17 | 8.52 | <5.7 | <9.4 | 64.8 | 249 | 6.27 | — | 3.30E+04 | 3.30E+04 | — | 74 | |
| | | Portal Los Robles | 14 | 8.39 | <5.7 | <9.4 | 46 | 246 | — | — | 3.30E+04 | 3.30E+04 | — | 0.9 | |
| | | Portal Chorros | 16.5 | 8.41 | <5.7 | 18.3 | 331 | 460 | 6.5 | — | 3.50E+05 | 3.50E+05 | — | 0.3 | |
| | 14-oct-14 | Antes Vertimiento | NO HABIA CAUDAL | | | | | | | | | | | | |
| | | Después Vertimiento | 17.4 | 8.28 | <5.7 | <9.4 | 82.7 | — | 6.51 | — | 1.30E+03 | 1.30E+03 | — | 67 | |
| | | Portal Los Robles | 13.7 | 8.4 | <5.7 | 10.1 | 4.9 | — | 7.35 | — | — | — | — | 3.06 | |
| | | Portal Chorros | 14.2 | 8.51 | <5.7 | <9.4 | 59.6 | — | 7.07 | — | — | — | — | 2.47 | |
| | 22-jul-2015 | Antes Vertimiento | 14.2 | 7.92 | 0.47 | 1.13 | 1.7 | 181 | 6.56 | — | 4.90E+03 | 4.90E+03 | — | 1.47 | |
| | | Después Vertimiento | 16.6 | 8.36 | 0.38 | 1.32 | 81.2 | 261 | 7.92 | — | 2.00E+02 | 1.80E+02 | — | 85 | |

Sobre la quebrada La Gata

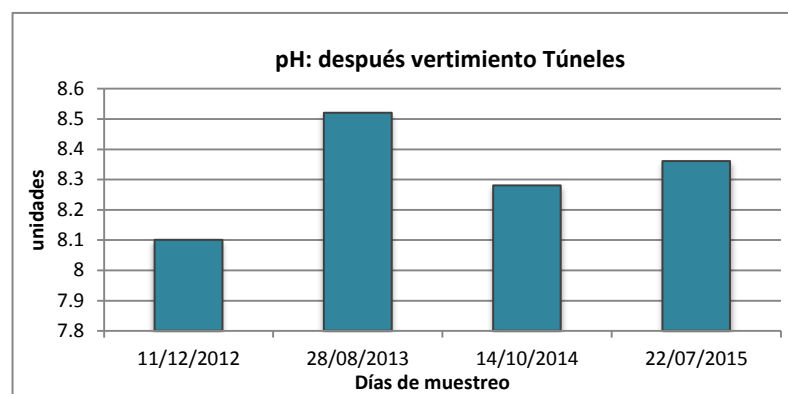
-: Sin Dato

Fuente: registros CRQ.

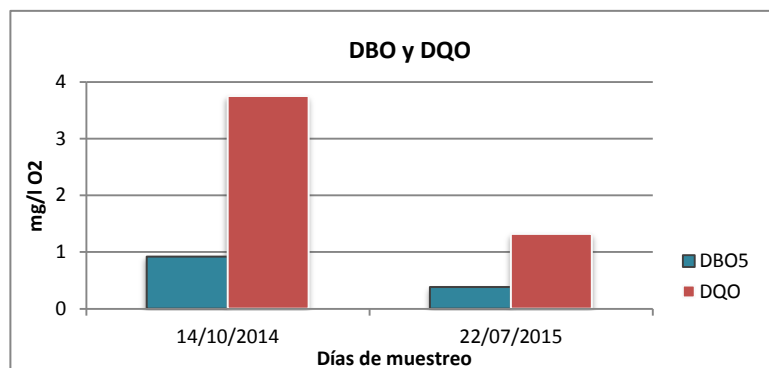
Figura 5. Variación de los parámetros de calidad del agua a través de los años sobre la estación: Después vertimiento sedimentadores Túnel de la Línea, quebrada La Gata



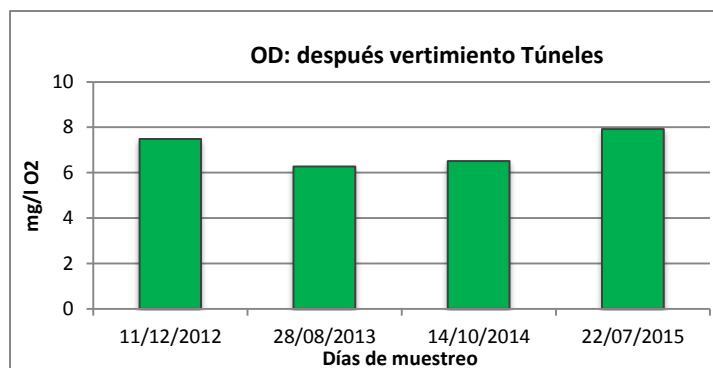
La temperatura del agua sobre este punto se encuentra entre los 16 y 17.4 °C, valores propios de esta zona ya que se encuentra a una altura aproximada de 2330 m.s.n.m.



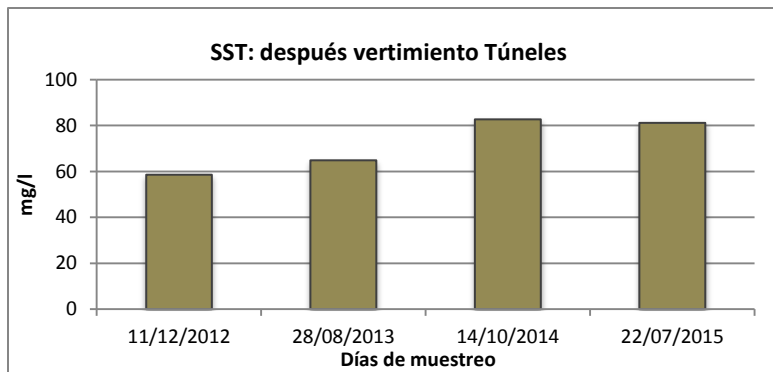
En todo momento los valores se encuentran dentro de los establecidos por el Decreto 1594/84, entre 5 y 9 unidades (valor promedio en el punto 8.3 unidades). Estos se consideran aceptables para la mayoría de la fauna acuática.



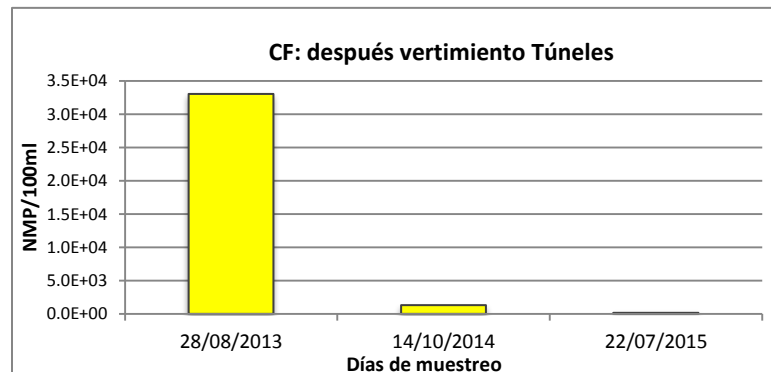
Las concentraciones de DBO5 poseen valores aceptables para el ambiente acuático. Estos se encuentran entre los 0.9 y 0.4 mg/l O₂.



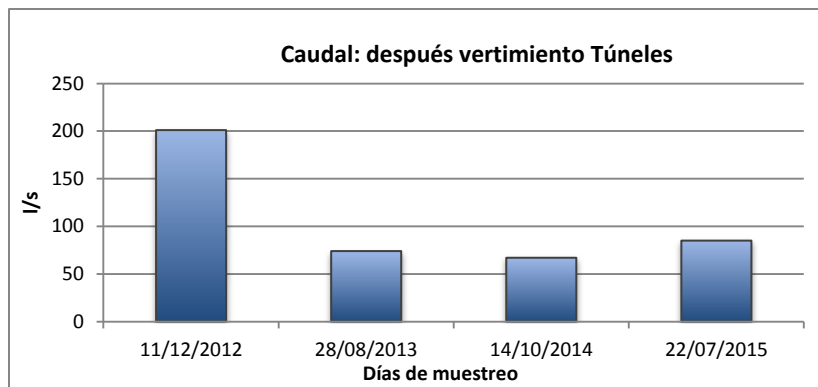
El comportamiento del oxígeno disuelto a través del tiempo se mantiene en óptimas condiciones con un valor promedio igual a 7 mg/l O₂.



Para los dos últimos años de registro los SST se mantienen cerca de los 80 mg/l, siendo estos los valores más altos a través de los últimos cuatro años. Es de recordar que a partir del año 2014 se viene mejorando el sistema de tratamiento para lo SST lo cual debería evidenciarse en los últimos reportes para este vertimiento.



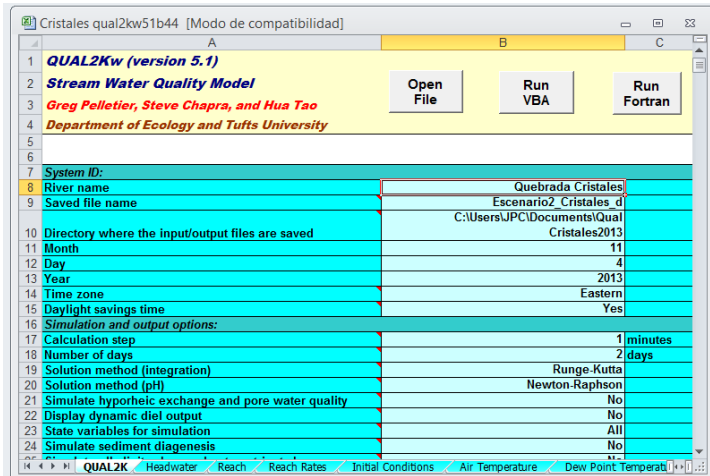
La mayor concentración de este parámetro se evidenció en año 2013 con 33000 NMP/100ml. Luego de ello se observa una notable reducción para los últimos años de registro, pasando de 1300 NMP/100ml a 200 NMP/100ml.



Para los tres últimos años de registro, el caudal vertido a través del sistema de tratamiento (Sedimentadores), se mantiene en promedio cerca de los 75 l/s.

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 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 (DBOC₅) y lenta (DBOC₂₀ o DBOC_{ultima}).
- Simula la anoxia.
- Simula las bacterias (Coliformes totales o fecales)

3.2 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/o 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 22 de Julio 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

fuentes hídricas, 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 (río Santo Domingo, Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, CRQ).

4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO

El tramo de estudio inicia en el lecho de la quebrada La Gata a 20 metros aguas arriba del vertimiento generado por los túneles Piloto y Principal y se extiende hacia la desembocadura con el río Santo Domingo. Hidrológicamente la longitud natural del cauce es de 5.8 Km, con una diferencia de nivel entre las estaciones cabecera y desembocadura de 720 metros y una pendiente mayor a 1% (quebrada La Gata 7.8%), por lo que se puede clasificar como una corriente 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 1 vertimiento (identificado como vertimiento de tipo industrial).

Tabla 9. Localización de puntos a modelar, quebrada La Gata

| SECCION No. | NOMBRE | CODIGO | ABSCISA (Km) | DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m) | COORDENADAS | | |
|----------------|------------------------------------|--------|-----------------|---|---------------|----------------|----------|
| | | | | | Latitud | Longitud | a.s.n.m. |
| 1 | Antes vertimiento Sedimentadores | G1 | K 00+000 | 0 | 4° 30' 0.1" | 75° 34' 37.91" | 2330 |
| 2 | Vertimiento Sedimentadores | V1 | K 00+020 | 20 | 4° 30' 0.1" | 75° 34' 37.91" | 2330 |
| 3 | Después vertimiento Sedimentadores | G2 | K 00+220 | 200 | 4° 30' 4.0" | 75° 34' 38.0" | 2318 |
| 4 | Jamaica | G3 | K 02+519 | 2299 | 4° 30' 34.03" | 75° 35' 45.79" | 1920 |
| 5 | Viaducto (INVIAS) | G4 | K 03+450 | 931 | 4° 37' 27" | 75° 36' 19.15" | 1710 |
| 6 | Desembocadura | G5 | K 04+406 | 956 | 4° 30' 33" | 75° 36' 46" | 1620 |

G: Estación sobre la quebrada La Gata

V: Vertimiento

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



Las diferentes secciones transversales de la quebrada se fijaron en función de:



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

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 generales de las estaciones a modelar quebrada La Gata

| ESTACIÓN | CARACTERÍSTICAS | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
|---|--|--|
| <p>G1 Antes vertimiento sedimentadores</p> | <p>– Se observa un pequeño afloramiento de agua que surge a través de las rocas sobre el lecho de la quebrada La Gata.</p> |  |
| <p>V1 Vertimiento sedimentadores</p> | <p>– Luego del proceso de tratamiento de las aguas residuales provenientes de los trabajos de perforación del túnel principal y las aguas de infiltración del túnel Piloto, llegan a un canal disipador hacia el lecho de la quebrada La Gata.</p> |  |

| ESTACIÓN | CARACTERÍSTICAS | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
|---|--|--|
| <p>G2</p> <p>Después vertimiento sedimentadores</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El caudal vertido hasta este punto, supera el 100% del caudal que lleva la quebrada La Gata antes de este punto. - Se observa un color grisáceo dentro y fuera del lecho de la quebrada, producto del vertimiento proveniente de las perforaciones al túnel Principal y agua de infiltración que discurre por las paredes del túnel Piloto. |  |
| <p>G3</p> <p>Jamaica</p> | <ul style="list-style-type: none"> - A esta distancia se continúa observando un color grisáceo dentro y fuera del lecho de la quebrada, aunque en menor proporción al observado en el año 2014. |  |
| <p>G4</p> <p>Viaducto INVIAS</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Tomado como punto intermedio entre la estación Jamaica y Desembocadura, este punto presenta condiciones similares de calidad vistas en el punto anterior. |  |


| ESTACIÓN | CARACTERÍSTICAS | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
|---|---|--|
| <p>G5 Desembocadura</p> | <p>– Punto final del tramo de estudio, donde la quebrada La Gata vierte sus aguas al río Santo Domingo.</p> |  |



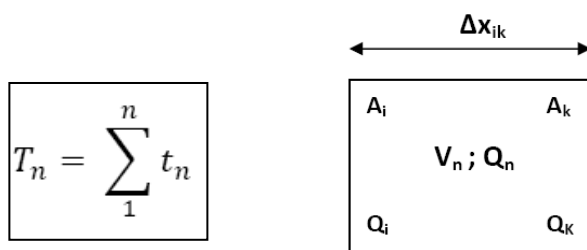
Figura 7. Ubicación espacial de las estaciones de aforo y muestreo, unidad hidrográfica quebrada La Gata

4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE

Se requiere la obtención de los tiempos de viaje en los diferentes puntos en el cauce principal de la quebrada La Gata con el fin de 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:



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 21 de mayo de 2015 durante la jornada de aforo para la obtención de los tiempos de viaje

| PUNTO | Velocidad (m/s) | Área Total (m ²) | Prof. Media (m) | Ancho (m) | Caudal (m ³ /s) |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------|
| Después vertimiento sedimentadores | 0.508 | 0.198 | 0.153 | 1.300 | 0.101 |
| Jamaica | 0.466 | 0.321 | 0.153 | 2.100 | 0.150 |
| Desembocadura (Bocatoma El Salado) | 0.464 | 0.367 | 0.073 | 5.000 | 0.170 |

Tabla 12. Tiempos de viaje de la masa de agua para el día 21 de mayo de 2015

| ESTACIÓN | A(m ²) | Δx (m) | Q (m ³ /s) | Volumen (m ³) | Q medio (m ³ /s) | T viaje (seg) | T viaje (min) | ΣT viaje (min) | ΣT viaje (hora) | Horas parciales |
|------------------------------------|--------------------|--------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Después vertimiento sedimentadores | 0.198 | 0 | 0.101 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jamaica | 0.321 | 2519 | 0.150 | 654.37 | 0.13 | 5228.28 | 87.14 | 87.14 | 1.45 | 1.45 |
| Desembocadura (Bocatoma El Salado) | 0.367 | 1887 | 0.170 | 649.10 | 0.16 | 4058.98 | 67.65 | 154.79 | 2.58 | 1.13 |

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 22 de julio de 2015 durante la jornada de aforo y muestreo

| Estación No. | PUNTO | Velocidad (m/s) | Área Total (m ²) | Prof. Media (m) | Ancho (m) | Caudal (m ³ /s) |
|--------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------|
| 1 | Antes vertimiento sedimentadores | 0.095 | 0.016 | 0.052 | 0.300 | 0.001 |
| 2 | Después vertimiento sedimentadores | 0.480 | 0.178 | 0.162 | 1.100 | 0.085 |
| 3 | Jamaica | 0.394 | 0.266 | 0.148 | 1.800 | 0.105 |
| 4 | Viaducto | 0.461 | 0.302 | 0.151 | 2.000 | 0.139 |
| 5 | Desembocadura | 0.509 | 0.338 | 0.056 | 6.000 | 0.172 |

- 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 del balance hídrico la Curva de Duración de Caudales de la quebrada La Gata. 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.

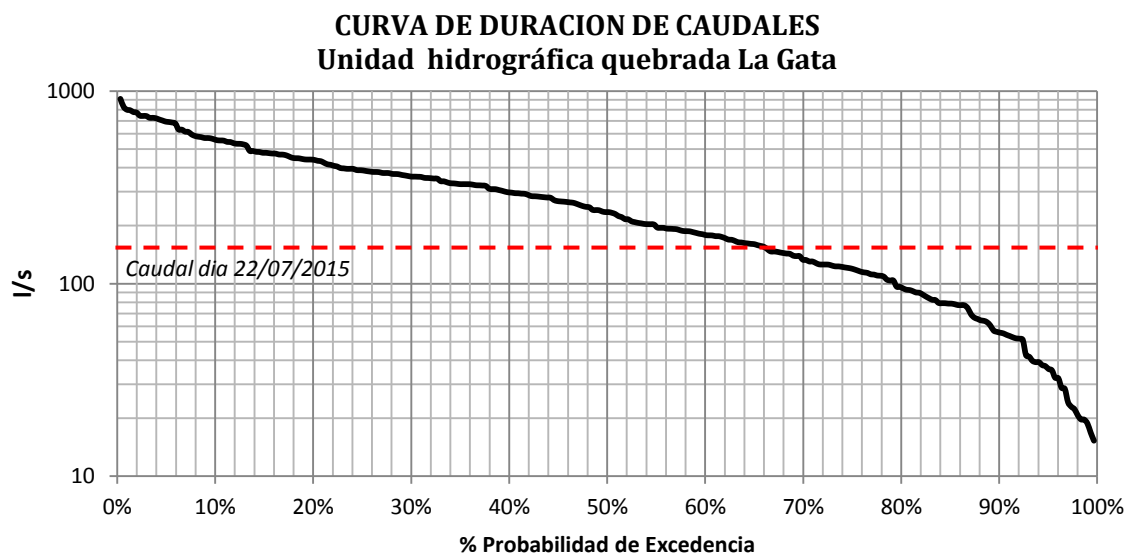


Figura 8. Curva de Duración de Caudales, unidad hidrográfica quebrada La Gata

El valor del caudal obtenido el día del muestreo (22 de julio de 2015) sobre el punto antes de la desembocadura con el río Santo Domingo fue de 172 l/s, encontrándose cerca al caudal medio.

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 (estaciones Antes vertimiento sedimentadores 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; para el caso de estudio será el vertimiento de aguas residuales industriales proveniente de las obras de los túneles Piloto y Principal. Los caudales y las características de calidad para las condiciones de borde internas son las obtenidas durante el día de muestreo en la quebrada La Gata.

Tabla 14. Condiciones de borde internas en la malla de modelación, quebrada La Gata

| PUNTO | CODIGO | ESTACION | ABSCISA (km) | CAUDAL (l/s) | CONDICION |
|-------|--------|----------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| | G1 | Antes vertimiento sedimentadores | K 00+000 | 1.48 | Estación |
| 1 | V1 | Vertimiento sedimentadores | K 00+020 | 85.37 | Vertimiento |
| | G5 | Desembocadura | K 04+406 | 171.91 | Estación |

G: estación sobre la quebrada La Gata

V: Vertimiento

4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN

Con base en los diferentes análisis efectuados, la red esquematizada para la quebrada La Gata con fines de la modelación numérica queda definida de la siguiente manera, (ver Tabla 15): 5 secciones transversales, 2 condiciones de borde externas (estaciones Antes vertimiento sedimentadores y Desembocadura) y 1 frontera interna (vertimiento de aguas residuales).

Tabla 15. Localización de las estaciones transversales de la malla de modelación para la quebrada La Gata

| SECCION No. | NOMBRE | CODIGO | ABSCISA (Km) | DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m) | COORDENADAS | | |
|-------------|------------------------------------|--------|--------------|----------------------------------|---------------|----------------|---------|
| | | | | | Latitud | Longitud | A.S.N.M |
| 1 | Antes vertimiento sedimentadores | G1 | K 00+000 | 0 | 4° 30' 4.0" | 75° 34' 38.0" | 2318 |
| 2 | Después vertimiento sedimentadores | G2 | K 00+220 | 220 | 4° 30' 4.0" | 75° 34' 38.0" | 2318 |
| 3 | Jamaica | G3 | K 02+519 | 2299 | 4° 30' 34.03" | 75° 35' 45.79" | 1920 |
| 4 | Viaducto (INVIAS) | G4 | K 03+450 | 931 | 4° 37' 27" | 75° 36' 19.15" | 1710 |
| 5 | Desembocadura | G5 | K 04+406 | 956 | 4° 30' 33" | 75° 36' 46" | 1620 |

Tabla 16. Red esquematizada para modelación de calidad del agua – quebrada La Gata

| | | | | | |
|----------------------------|------------|---|---|---------|----------------------------------|
| | G1 | 0 | 1 | K00+000 | Antes vertimiento Sedimentadores |
| Vertimiento Sedimentadores | V1 K00-020 | | | | |
| | G2 | 1 | 2 | K00+220 | Después vertimiento |
| | G3 | | | 3 | K02+519 |
| | G4 | 2 | 4 | K03+450 | Viaducto (INVIAS) |
| | G5 | | | 5 | K04+406 |

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 la quebrada La Gata, 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 de la quebrada La Gata

| Fuente Difusa | | Localización entre la abscisa (m) | | Diffuse Abstraction | Diffuse Inflow |
|-----------------|----|-----------------------------------|-------|---------------------|----------------|
| | | | | m ³ /s | |
| Fuente Difusa 1 | D1 | 1.000 | 2.300 | – | 0.0180 |
| Fuente Difusa 2 | D2 | 2.600 | 3.406 | – | 0.0350 |
| Fuente Difusa 3 | D3 | 3.800 | 4.406 | – | 0.0320 |

4.6.1 Resultados de la modelación 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 la Figura 9 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 ²) | Velocidad media (m/s) | Caudal (m ³ /s) |
|--------------|-----------------------|-----------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 0.000 | 0.05 | 0.30 | 0.40 | 0.01 | 0.10 | 0.001 |
| 0.220 | 0.15 | 1.10 | 1.40 | 0.17 | 0.51 | 0.086 |
| 2.519 | 0.15 | 1.80 | 2.10 | 0.27 | 0.39 | 0.104 |
| 3.450 | 0.16 | 2.00 | 2.32 | 0.31 | 0.45 | 0.139 |
| 4.406 | 0.06 | 6.00 | 6.12 | 0.34 | 0.51 | 0.171 |

Figura 9. Calibración componente hidráulico, perfiles longitudinales: Caudal y velocidad del cauce

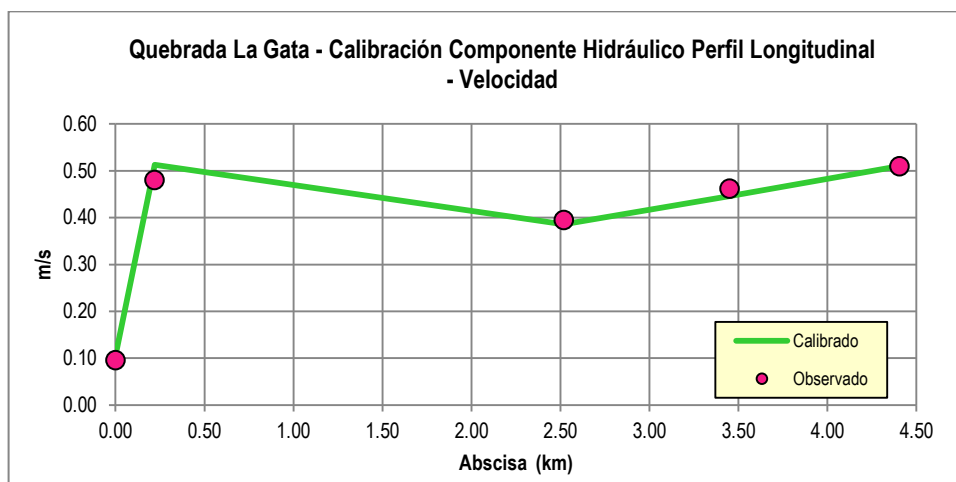
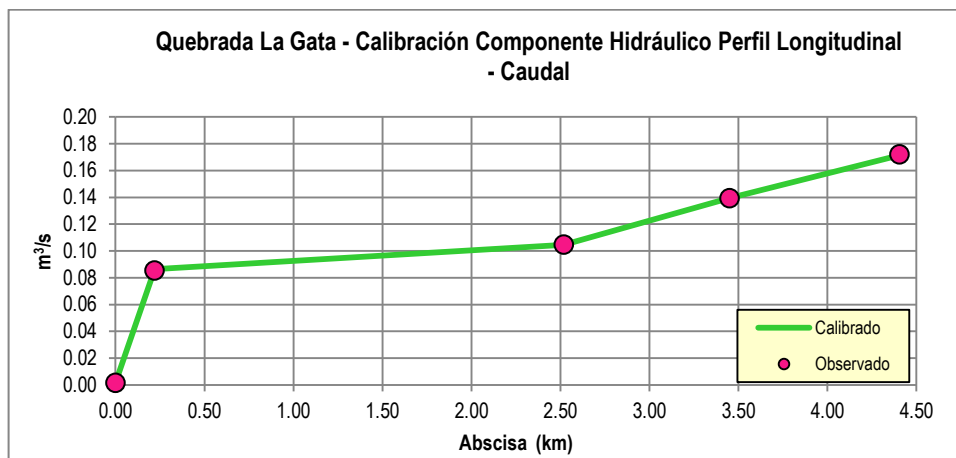
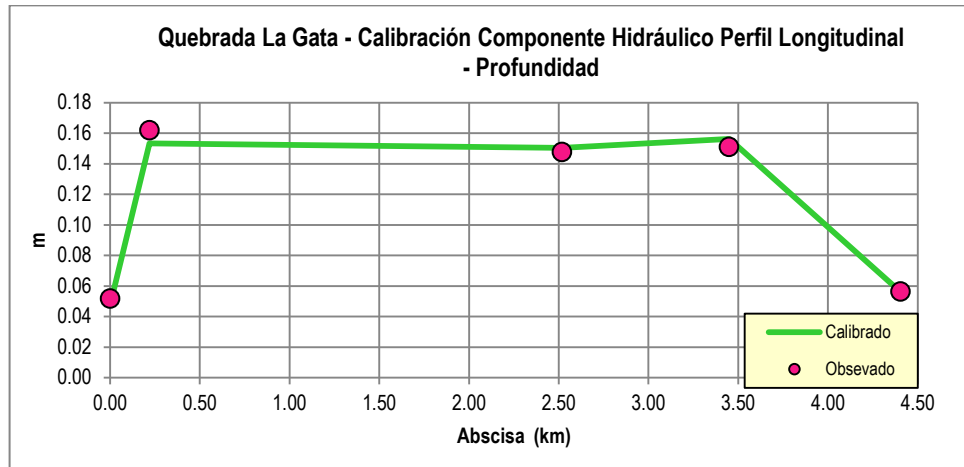


Figura 10. Calibración componente hidráulico, perfil longitudinal: Profundidad



5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO

Los datos de entrada (Inputs) para el modelo de calidad del agua en la quebrada La Gata, fueron obtenidos por medio de la toma de muestras en el cauce principal y el vertimiento de los sedimentadores de los túneles principal y piloto, de forma simultánea y con la probabilidad de seguir la misma masa de agua de acuerdo a horarios establecidos (tiempos de viaje). Estas muestras fueron posteriormente analizadas en el laboratorio de aguas de la CRQ.

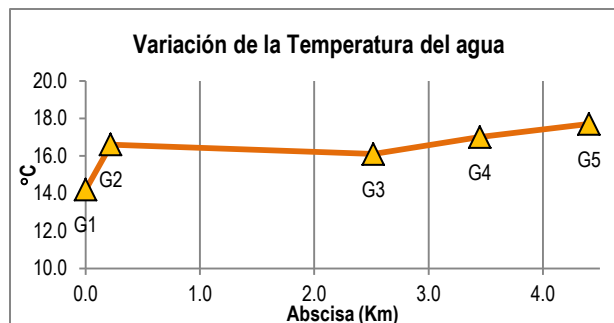
Tabla 19. Datos de calidad quebrada La Gata (CRQ) – Campaña de muestreo 22/07/2015

| PUNTO DE MONITOREO | | Caudal (m ³ /s) | Temp. (°C) | SST (mg/l) | OD (mg/l) | DBO ₅ (mg/l) | DQO (mg/l) | pH (unidades) | Coliformes Totales | Coliformes Fecales |
|------------------------------------|----|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------------|---------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | | NMP/100ml | NMP/100ml |
| Antes Vertimiento Sedimentadores | G1 | 0.001 | 14.2 | 1.7 | 6.56 | 0.47 | 1.13 | 7.92 (14.2°C) | 4.90E+03 | 4.90E+03 |
| Vertimiento Sedimentadores | V1 | 0.084 | 16.5 | 200.0 | 8.13 | 0.37 | 0.75 | 8.20 (16.5°C) | 2.00E+02 | 2.00E+02 |
| Después Vertimiento Sedimentadores | G2 | 0.085 | 16.6 | 81.2 | 7.92 | 0.38 | 1.32 | 8.36 (16.6°C) | 2.00E+02 | 1.80E+02 |
| Jamaica - Edén | G3 | 0.105 | 16.1 | 29.0 | 8.02 | 0.47 | 1.89 | 8.57 (16.1°C) | - | - |
| Viaducto (INVIAS) | G4 | 0.139 | 17.0 | 28.0 | 8.49 | 0.65 | 3.78 | 8.62 (17.0°C) | - | - |
| Desembocadura | G5 | 0.172 | 17.7 | 26.1 | 8.86 | 0.6 | 4.23 | 8.60 (17.7°C) | 3.50E+04 | 2.10E+03 |

5.1.1 Observaciones Generales de los reportes de calidad

- **Temperatura**

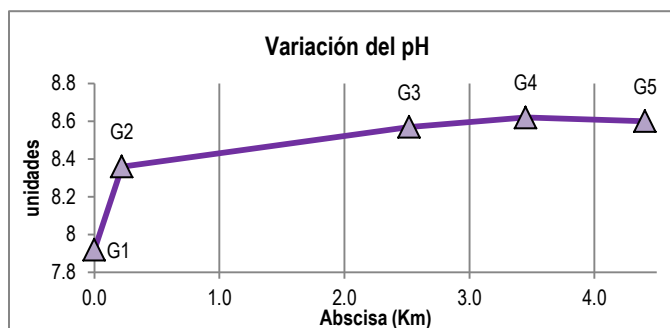
Las mediciones de temperatura en las estaciones van asociadas al aumento o disminución de la temperatura ambiente que se produce en el transcurso del día, así como la altura sobre el nivel del mar de las estaciones a muestrear. La temperatura influye directamente en la



disociación de sales y gases, por lo tanto en la conductividad eléctrica y el pH. Asimismo, la relación entre densidad del agua y su temperatura, pueden modificar los movimientos de mezcla de diferentes masas en función de la alteración de la temperatura. Por lo anterior, luego del vertimiento de los sedimentadores, la temperatura del agua se ve incrementada un 14% (de 14.2 °C a 16.6 °C). Finalmente, este parámetro de calidad asciende a 17.7 °C al final del tramo de estudio (estación Desembocadura). En general, se tienen valores de temperatura del agua aceptables para el ambiente acuático en la quebrada.

- **pH**

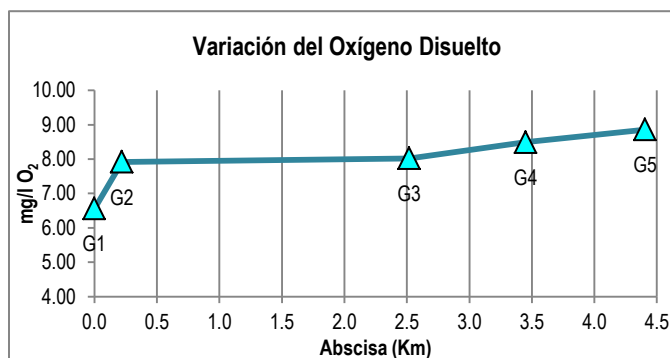
El análisis de esta variable es fundamental para establecer la calidad del agua, pues permite identificar las condiciones acidas o alcalinas de una corriente cuyos valores extremos puede repercutir seriamente en la flora y fauna acuáticas. En todo momento los valores se encuentran dentro del rango establecido por el Decreto 1594/84, entre 7.2 a 8.6 unidades, lo que permiten la preservación de la flora y fauna.



El análisis de esta variable es fundamental para establecer la calidad del agua, pues permite identificar las condiciones acidas 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 del rango establecido por el Decreto 1594/84, entre 7.2 a 8.6 unidades, lo que permiten la preservación de la flora y fauna.

- **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 O₂. 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. El nivel más bajo de OD encontrado el día del muestreo se encuentra localizado en la primera estación de muestreo denominada "Antes vertimiento Sedimentadores" con 6.56 mg/l O₂. En general, las concentraciones de OD en la quebrada La Gata son aceptables para la preservación de la 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.

DBO₅: 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.

La quebrada La Gata en todo su trayecto presenta niveles de DBO₅ bajos, representativo este de aguas no contaminadas, valores que se encuentran entre los 0.38 y 0.65 mg/l O₂.

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 de la quebrada La Gata se presentan concentraciones de DQO entre 1.13 mg/l O₂ y 4.23 mg/l O₂, equivalente a aguas superficiales no contaminadas es decir, DQO ≤ 10 mg/l O₂, lo que se clasifica como “Excelente” (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 del vertimiento.

Índice de biodegradabilidad:

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

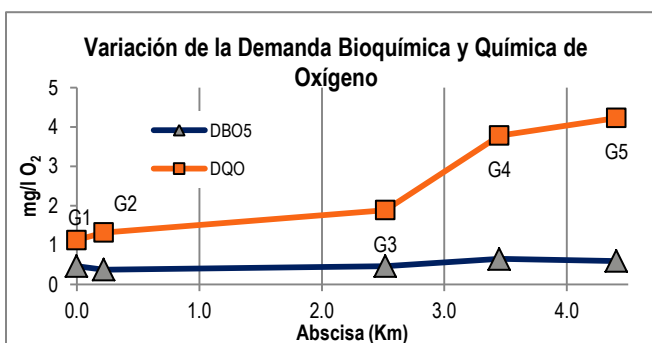


Tabla 20. Índice de biodegradabilidad del vertimiento*

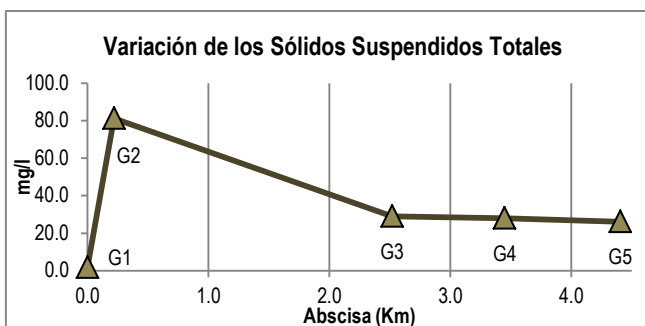
| PUNTO DE MONITOREO | DQO | DQO/DBO | OBSERVACIÓN |
|----------------------------|------|---------|--------------------------|
| Vertimiento Sedimentadores | 0.75 | 2.02 | moderadamente degradable |

*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).

Estos resultados son consecuentes con el tipo de vertimiento, el cual proviene de la perforación del túnel que contiene poca materia orgánica.

• SST

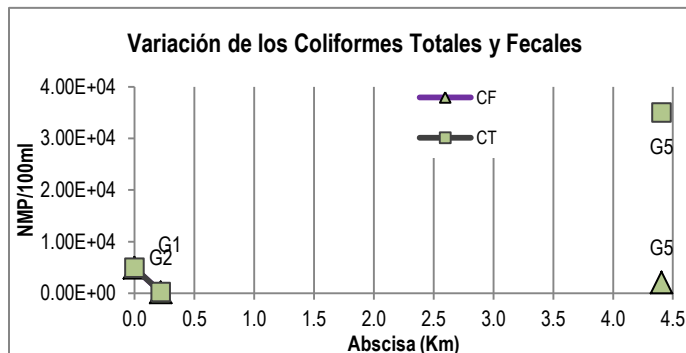
La concentración de sólidos suspendidos totales es importante para los ecosistemas fluviales por razones de calidad ecológica y del agua, los sólidos inorgánicos en suspensión atenúan la luz, principalmente a través del proceso de dispersión lo cual disminuye el proceso fotosintético en la flora acuática.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



La quebrada La Gata presenta concentraciones de SST entre los 1.7 mg/l y 81.2 mg/l, siendo el menor valor el tomado aguas arriba de vertimiento de los sedimentadores y su mayor concentración se encuentra en la estación “Después vertimiento Sedimentadores” luego de recibir la descarga de aguas residuales tratadas de los túneles Piloto y Principal. Igualmente, se observa la disminución de este parámetro a medida que avanza la quebrada a través de los tres últimos puntos de muestreo seleccionados, de 29 a 26.1 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 al final del tramo de estudio, estación Desembocadura con $2.10E+03$ y $3.50E+04$ NMP/100ml para los CF y CT respectivamente.



En relación con la normatividad colombiana, los Coliformes Totales y Fecales no estarían cumpliendo con el Decreto 1594/84 (CT=20000 y CF=2000 NMP/100ml) en cuanto a la destinación del recurso para consumo humano en la que sería la bocatoma El Salado, localizada en la estación Desembocadura, antes de su confluencia con el río Santo Domingo.

5.1.2 Cumplimiento Resolución 0631 de 2015, vertimiento sistema de sedimentadores túneles piloto y principal

Tabla 21. Cumplimiento Resolución 0631 de 2015, vertimiento sistema de sedimentadores túneles piloto y principal

| PUNTO DE MONITOREO | | SST (mg/l) | DBO ₅ (mg/l O ₂) | DQO (mg/l O ₂) | pH (unidades) |
|----------------------------|--------------------------------------|----------------|--|-------------------------------|------------------|
| Vertimiento Sedimentadores | Concentración | 200 | 0.37 | 0.75 | 8.2 |
| | Cumplimiento Resolución 0631 de 2015 | < 50 NO CUMPLE | < 50 CUMPLE | < 150 CUMPLE | (6-9) CUMPLE |

*Para este caso no es necesario conocer su concentración, la tabla a utilizar en dicha Resolución sólo establece el valor del límite máximo de la concentración a cumplir. Es de aclarar que este vertimiento no hace parte del sistema de alcantarillado público del municipio, por tal motivo los límites máximos permisibles fueron tomados del Capítulo VII - Resolución 0631/2015.

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 (K_d)
- Constante de reaireación (K_2).
- Constante de decaimiento de los coliformes (K_b).

5.2.1 Constante de decaimiento de la DBO (K_d)

- **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:

$$dL/dT = -K_d L \quad (1)$$

Dónde:

L = Cantidad de Materia orgánica oxidable en el tiempo t , mg/L
 K_d = Coeficiente promedio de remoción de la DBO en el río, día⁻¹

- **Método de cálculo entre tramos**

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

$$K_{d_e} = [(1/\Delta t) \ln (L_A/L_B)] \quad (2)$$

$$K_d = (K_{d_e}/2.3) \quad (3)$$

Dónde:

K_{d_e} : Constante de desoxigenación (base e), día⁻¹
 K_d : Constante de desoxigenación (base 10), día⁻¹
 L_A : DBOC en el punto A, mg/l
 L_B : 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 otros 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 reaeración 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 reaeración (K₂)**

Se ha demostrado que la tasa de transferencia de oxígeno a las corrientes por el fenómeno de reaeración 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_b)

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, dia^{-1} |
| K_{B1} | : Decaimiento por salinidad, dia^{-1} |
| K_{Bluz} | : Decaimiento por la luz, dia^{-1} |
| $K_{B(sed)}$ | : Decaimiento por sedimentación, dia^{-1} |
| $K_{a(crecimiento)}$ | : Tasa de crecimiento de los coliformes, 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 DBO₅, 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 de la quebrada La Gata.

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, DBO₅, OD, SST, pH y CF.

Tabla 22. Calibración de las descargas difusas

| Fuente Difusa | | Localización entre la abscisa (m) | | Temp. Agua°C | SST (mg/l) | OD (mg/l O ₂) | DBO ₅ (mg/l O ₂) | pH (unidades) | CF (NMP/100ml) |
|-----------------|----|-----------------------------------|-------|--------------|------------|---------------------------|---|---------------|----------------|
| Fuente Difusa 1 | D1 | 1 | 2.3 | 14.5 | - | 8 | 1 | 8.5 | 3200 |
| Fuente Difusa 2 | D2 | 2.6 | 3.406 | 17.7 | - | 8.5 | 1.2 | 8.5 | 5000 |
| Fuente Difusa 3 | D3 | 3.8 | 4.406 | 18 | - | 8.5 | 0.43 | 8.5 | 6500 |

Tabla 23. Constante cinética de reacción utilizada en la calibración

| Tramo (km) | | Constante de reoxigenación ² (1/d) | Velocidad de sedimentación (m/d) |
|------------|-------|---|----------------------------------|
| 0.000 | 1.500 | - | 45.000 |
| 1.500 | 2.519 | 0.700 | 45.000 |
| 2.519 | 3.450 | 0.700 | - |
| 3.450 | 4.406 | 1.150 | - |

² Utilizando la ecuación (empírica) de O'Connor-Dobbins, la constante de reoxigenación, que indica el ritmo al cual se produce la transferencia de oxígeno desde la atmósfera al agua.

Figura 11. Modelo de calidad del agua – quebrada La Gata
Perfil longitudinal de Temperatura del agua, DBO y OD

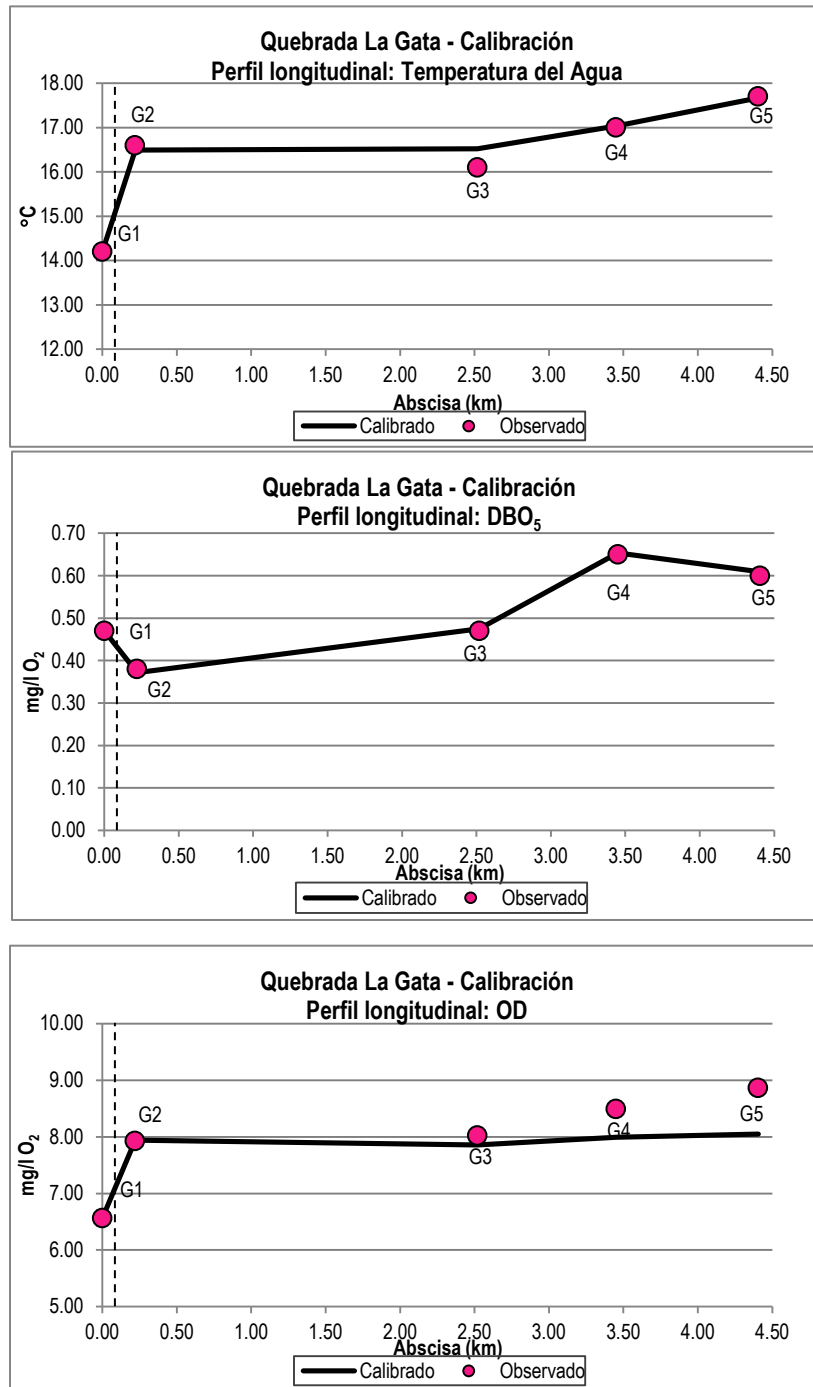
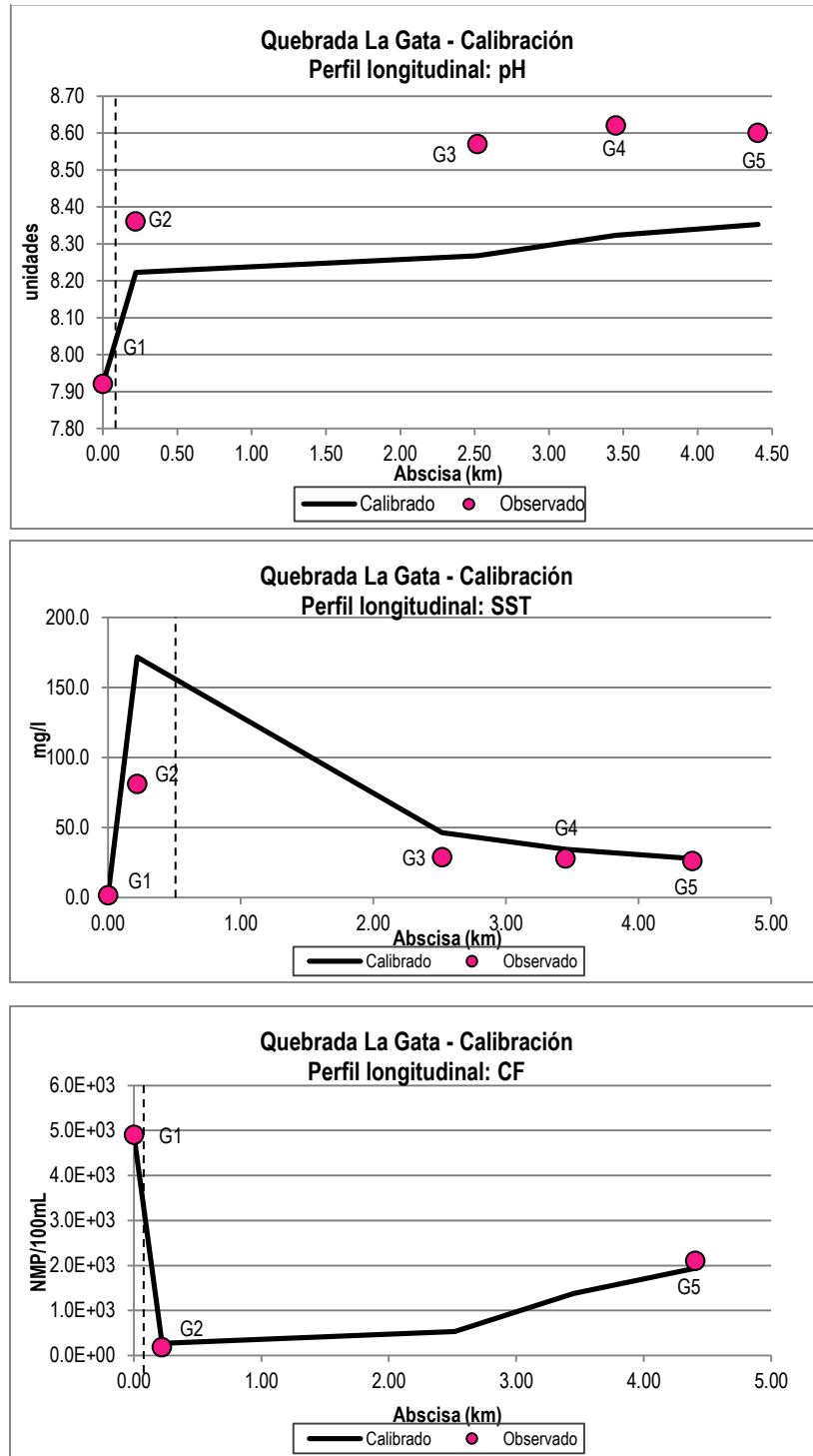


Figura 12. Modelo de calidad del agua – quebrada La Gata
Perfil longitudinal de pH, SST y CF



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 2012, 2013 y 2014 realizadas por la Corporación Autónoma Regional del Quindío sobre las mismas estaciones de estudio.

Figura 13. Validación del modelo de calidad 2015: Temperatura del agua y pH

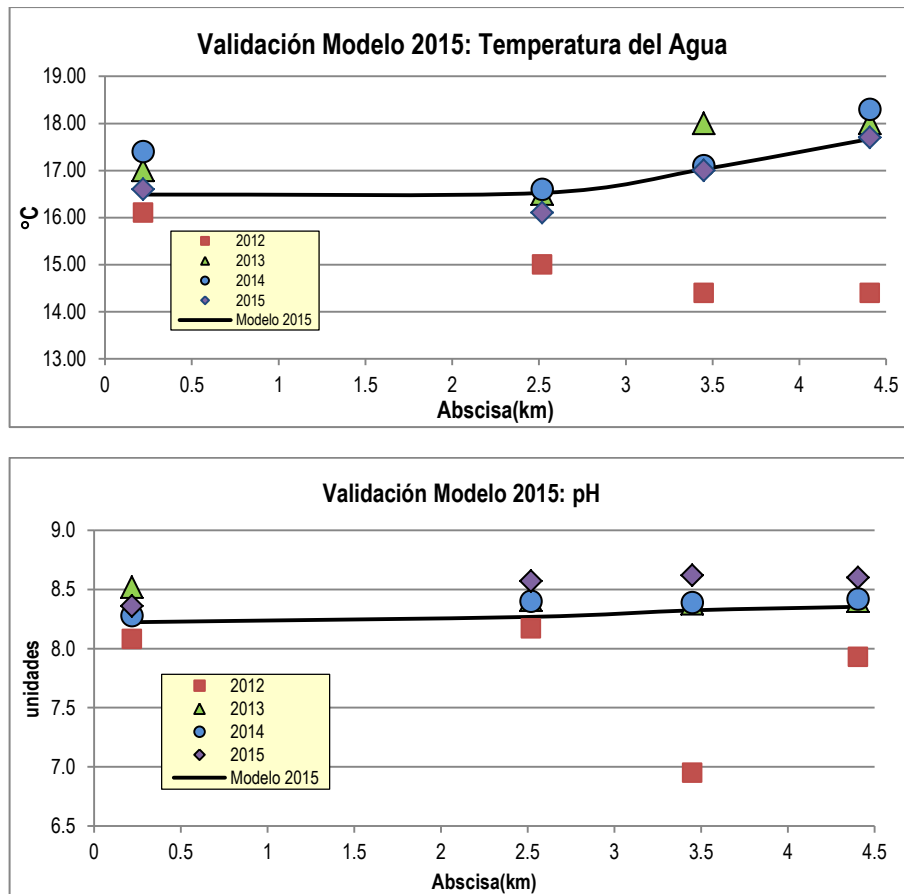


Figura 14. Validación del modelo de calidad 2015: OD, DBO₅ y CF

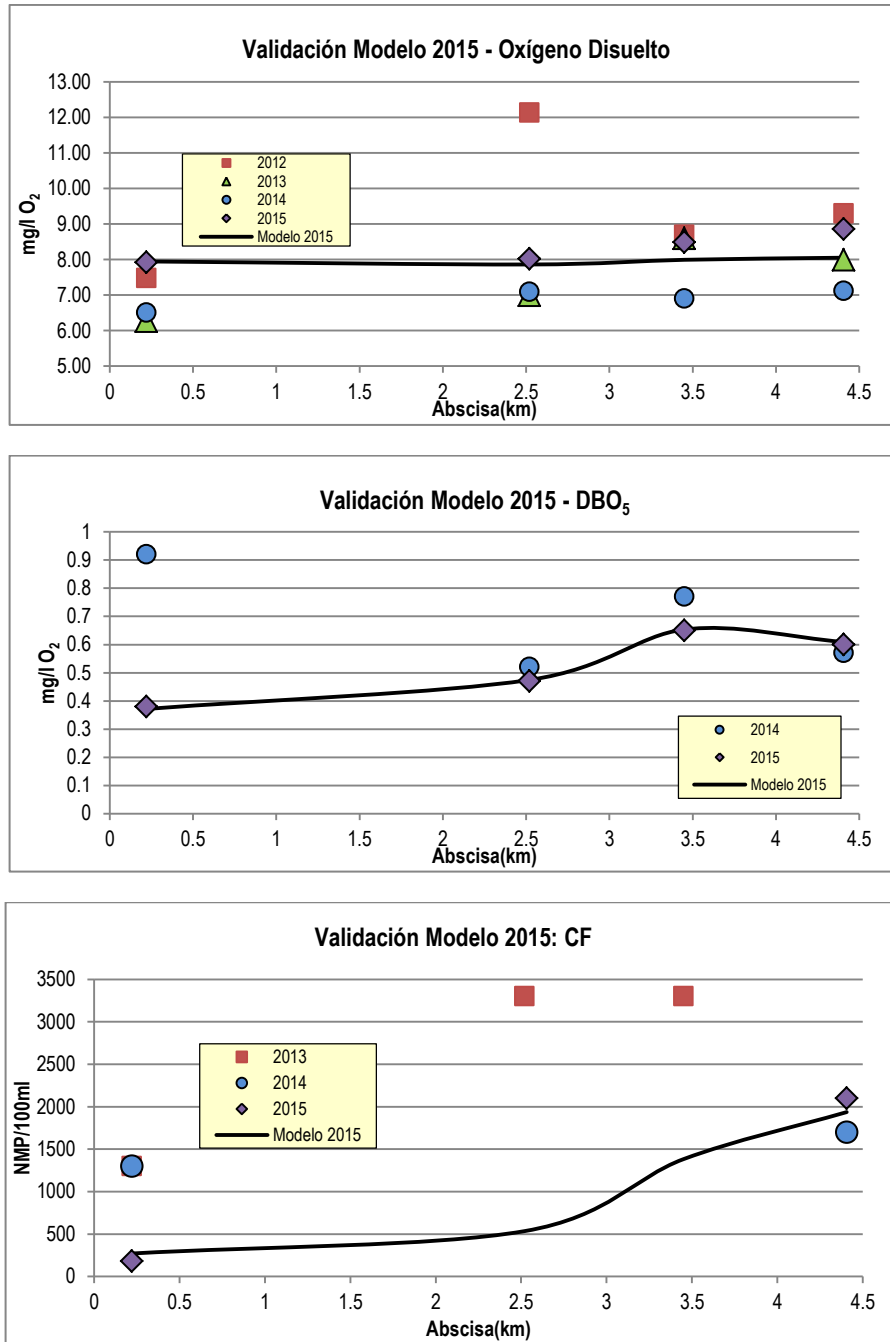
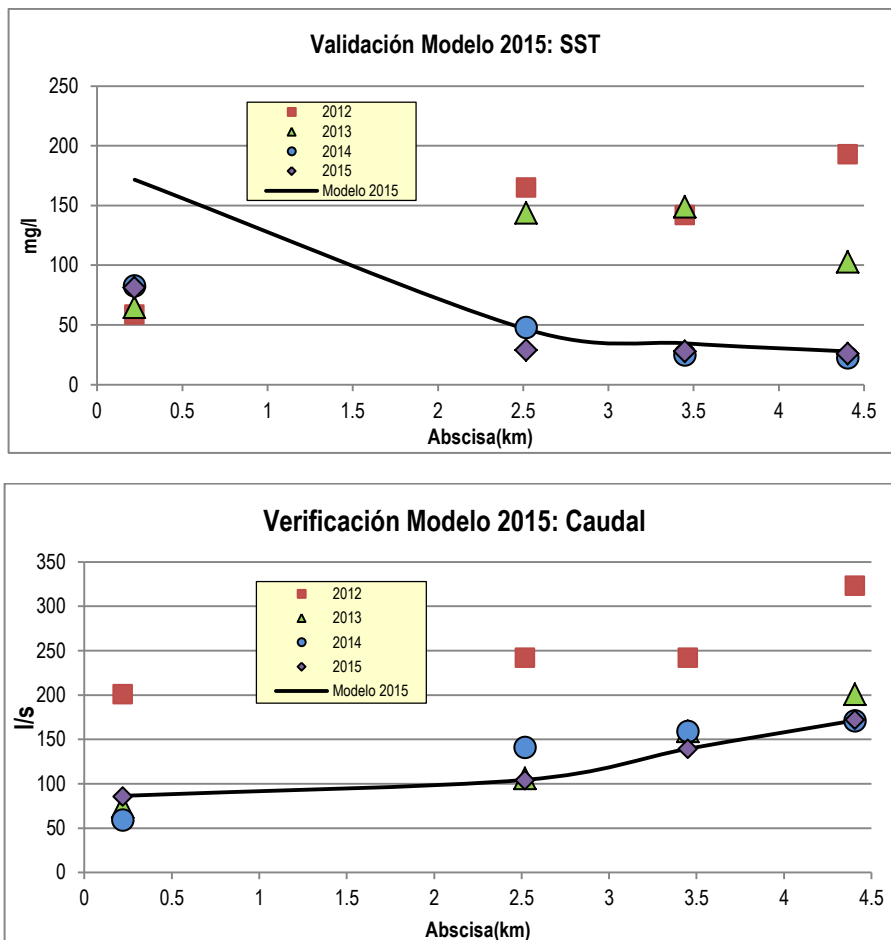


Figura 15. Validación del modelo de calidad 2015: SST y Caudal



Gráficamente se puede observar que los diferentes modelos de calidad y cantidad calculados para el año 2015 se asemejan a los datos observados en los años 2012, 2013, 2014 y 2015 donde se presentan variaciones y tendencias similares en la mayoría de los puntos o estaciones monitoreadas. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo, los valores de SST y Coliformes Fecales han ido disminuyendo conforme se han venido implementando nuevos tratamientos para el control y disminución de estos parámetros en la fuente hídrica receptora; quebrada La Gata.

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

| PARÁMETRO CALIDAD | ESTACIÓN | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | MODELO SIMULADO 2015 | MEDIA DE LOS DATOS OBSERVADOS | DESV. ESTÁNDAR | COEF. DE VARIACIÓN |
|----------------------|----------|-------|--------|--------|--------|----------------------|-------------------------------|----------------|--------------------|
| Temperatura del Agua | G2 | 16.10 | 17.00 | 17.40 | 16.60 | 16.49 | 16.72 | 0.50 | 3% |
| | G3 | 15.00 | 16.50 | 16.60 | 16.10 | 16.52 | 16.14 | 0.67 | 4% |
| | G4 | 14.40 | 18.00 | 17.10 | 17.00 | 17.03 | 16.71 | 1.35 | 8% |
| | G5 | 14.40 | 18.00 | 18.30 | 17.70 | 17.67 | 17.21 | 1.59 | 9% |
| pH | G2 | 8.08 | 8.52 | 8.28 | 8.36 | 8.22 | 8.29 | 0.16 | 2% |
| | G3 | 8.17 | 8.41 | 8.40 | 8.57 | 8.27 | 8.36 | 0.15 | 2% |
| | G4 | 6.95 | 8.38 | 8.39 | 8.62 | 8.32 | 8.13 | 0.67 | 8% |
| | G5 | 7.93 | 8.40 | 8.42 | 8.60 | 8.35 | 8.34 | 0.25 | 3% |
| OD | G2 | 7.48 | 6.27 | 6.51 | 7.92 | 7.94 | 7.22 | 0.79 | 11% |
| | G3 | | 7.00 | 7.10 | 8.02 | 7.86 | 7.50 | 0.52 | 7% |
| | G4 | 8.70 | 8.60 | 6.91 | 8.49 | 7.99 | 8.14 | 0.74 | 9% |
| | G5 | 9.30 | 8.00 | 7.12 | 8.86 | 8.05 | 8.27 | 0.84 | 10% |
| DBO5 | G2 | | | 0.92 | 0.38 | 0.37 | 0.56 | 0.31 | 56% |
| | G3 | | | 0.52 | 0.47 | 0.47 | 0.49 | 0.03 | 6% |
| | G4 | | | 0.77 | 0.65 | 0.65 | 0.69 | 0.07 | 10% |
| | G5 | | | 0.57 | 0.60 | 0.61 | 0.59 | 0.02 | 3% |
| SST | G2 | | | 82.70 | 81.20 | 171.60 | 111.83 | 51.77 | 46% |
| | G3 | | | 47.90 | 29.00 | 46.37 | 41.09 | 10.50 | 26% |
| | G4 | | | 25.00 | 28.00 | 34.58 | 29.19 | 4.90 | 17% |
| | G5 | | | 22.40 | 26.10 | 27.80 | 25.43 | 2.76 | 11% |
| Caudal | G2 | | 74.00 | 59.00 | 85.37 | 86.48 | 76.21 | 12.79 | 17% |
| | G3 | | 106.00 | 141.00 | 104.00 | 104.48 | 113.87 | 18.11 | 16% |
| | G4 | | 159.00 | 159.00 | 139.00 | 139.48 | 149.12 | 11.41 | 8% |
| | G5 | | 201.00 | 171.00 | 171.90 | 171.48 | 178.84 | 14.78 | 8% |

De los parámetros analizados en la tabla anterior, se observa cómo el dato simulado en la estación G2 (después sedimentadores) para los SST es mayor a la media o promedio entre los datos observados en los años 2014 y 2015. Lo anterior se debe a que el modelo calcula una concentración de 111.83 mg/l en la fuente hídrica luego de recibir un vertimiento igual a 200 mg/l proveniente del sistema de sedimentadores de los túneles piloto y principal (dato relacionado en la Tabla 21).

En relación con los demás parámetros, se observa que los datos tomados en campo guardan cierta similitud con el modelo simulado, estos tienden a variar poco cerca de la media.

Dado lo anterior, se aconseja 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. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE SANEAMIENTO

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 validado 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 la quebrada La Gata, de acuerdo a su calibración, tiene validez para niveles medios a bajos. Con esto, ya se tiene un modelo de simulación listo para la formulación de escenarios de saneamiento.

La variable que se tomará para el planteamiento de los escenarios, será los SST como principal indicador de la contaminación en el agua. Los escenarios estarán planteados de acuerdo a las variaciones de este parámetro encontrados el día del muestreo.

Como fue mencionado anteriormente, los de más parámetros de calidad como DBO₅, OD y CF presentaron valores aceptables de calidad a lo largo de la fuente hídrica, por lo que no se realizaron modificaciones en ellos.

7.1 ESCENARIO DE SANEAMIENTO

La importancia en reducir los valores elevados de Sólidos Suspendidos Totales provenientes del vertimiento industrial hacia la fuente hídrica, es que estos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias cuando los residuos no tratados son dispuestos al ambiente acuático. Sus principales consecuencias se ven evidenciadas en problemas de absorción de contaminantes, interferencia en el ingreso de la luz del sol y la transferencia de oxígeno afectando la actividad fotosintética, la flora y fauna acuática, además del impacto negativo de tipo estético.

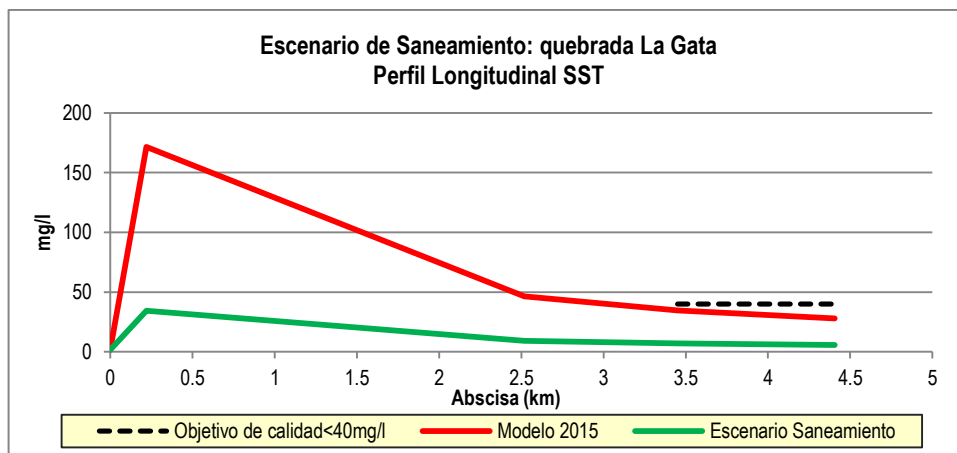
- **Escenario:** Durante la visita realizada al sistema de tratamiento de aguas residuales “Sedimentadores: Túneles Piloto y Principal” el día 22/07/2015, se observó la construcción y optimización de un cuarto sedimentador el cual será puesto en servicio a finales del segundo semestre del año 2015. Con este nuevo sistema se plantea entonces, una reducción del 80% más sobre las aguas provenientes de los túneles, con el fin de mitigar el impacto ambiental causado por las condiciones actuales del vertimiento.

Tabla 25. Escenario planteado, SST

| SST (mg/l) | |
|--------------------------|--------------|
| CONDICION: 22/07/2015 | REMOCIÓN 80% |
| 200 | 40 |

7.2 RESULTADO DE LA SIMULACION

Figura 16. Resultados de la aplicación del escenario de saneamiento quebrada La Gata, remoción del 80% en el vertimiento del sistema de sedimentadores – túneles piloto y principal



a) **Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ.** De acuerdo al objetivo de calidad propuesto para el río Santo Domingo en relación con los SST menores a 40 mg/l, se observa que el valor obtenido en la estación desembocadura sobre la quebrada La Gata, posee una concentración de 27.8 mg/l (valor modelado), lo cual estaría cumpliendo con el objetivo de calidad sobre el río Santo Domingo. Es de recordar que la quebrada La Gata es tributario del río Santo Domingo en su cuenca alta. De igual forma, al aplicarse una reducción del 80% en la concentración de SST sobre el vertimiento de los sedimentadores: túneles Piloto y Principal se cumpliría el objetivo de calidad sobre el río Santo Domingo sobre este parámetro de calidad; valor de 5.56 mg/l al final del tramo modelado.

b) **Escenarios de saneamiento.** Con la remoción del 80% en los niveles de este parámetro sobre el vertimiento del sistema de sedimentadores: túneles Piloto y

Principal, se tendría una reducción promedio del 95% de los SST en todo el tramo de estudio.

Tabla 26. Porcentaje de reducción de los SST, quebrada La Gata: Escenarios de saneamiento

| Abscisa (m) | Condición modelo año 2015 (mg/l) | Escenario (mg/l) | % de Reducción |
|-------------|----------------------------------|------------------|----------------|
| 0 | 1.7 | | |
| 0.22 | 171.6 | 34.34 | 80% |
| 2.519 | 46.4 | 9.28 | 100% |
| 3.45 | 34.6 | 6.92 | 100% |
| 4.406 | 27.8 | 5.56 | 100% |

8. CONCLUSIONES

- En términos generales, el modelo de calidad del agua de la quebrada La Gata para el día 22 de julio de 2015, reproduce en forma aceptable los valores de Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendedos Totales (SST), pH, Temperatura del agua 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 cinco (5) estaciones sobre el cauce principal.
- De igual forma, es posible identificar cierta similitud entre las concentraciones de SST en los años 2014 y 2015. Se tiene una desviación estándar promedio entre los datos de 4.79 mg/l.
- La calidad del agua en la quebrada La Gata registrada el día 22 de julio del año 2015, presenta aceptables niveles de calidad en los parámetros de DBO_5 , DQO, OD, pH, temperatura del agua, coliformes fecales y totales (este último para el inicio del tramo).
- La concentración de SST al final del tramo de estudio (confluencia con el río Santo Domingo), ha aumentado levemente en comparación al reporte obtenido en el año 2014; año 2014 = 22.4 mg/l y año 2015 = 26.1 mg/l.
- Debido a que la quebrada La Gata es tributario del río Santo Domingo, se plantea para este último un valor menor a 40 mg/l para los sólidos suspendidos totales sobre el lecho del río, esto según los Objetivos de Calidad propuestos por la Corporación Autónoma Regional del Quindío en su Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008. Por lo anterior y como consecuencia del aumento de este parámetro sobre la quebrada La Gata, los SST que son vertidos por esta al río Santo Domingo, presentan valores por debajo de lo establecido en dicha resolución, lo cual se estarían cumpliendo con este Objetivo de Calidad. (SST estación Desembocadura quebrada La Gata = 26.1 mg/l).
- En relación con la normatividad colombiana, los Coliformes Totales y Fecales no estarían cumpliendo con el Decreto 1594/84 en cuanto a la destinación del recurso para consumo humano y doméstico al final del tramo de estudio.

- Con una reducción del 80% en los niveles de SST en el vertimiento generado por el sistema de sedimentadores túneles piloto y principal, se evidencia a través del modelo de simulación la mejora en la calidad del agua sobre el cauce principal de la quebrada de hasta un 99%. Por lo anterior, se espera que con la activación del cuarto sedimentador y el buen funcionamiento de los demás sistemas de tratamiento (sedimentadores y sistema de compactación de lodos), se presente una notoria reducción de los SST que son vertidos al lecho de la quebrada La Gata, lo cual sería un avance en el proceso de disminuir el impacto ambiental causado por estas obras.

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, (2012). Modelación de la calidad del agua en la quebrada La Gata.
- CRQ, (2013). Modelación de la calidad del agua en la quebrada La Gata.
- Ven Te Chow. Hidrología Aplicada: Bogotá, McGraw-Hill, 1988