

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
QUEBRADA LA FLORIDA, MUNICIPIO DE ARMENIA
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, Abril de 2015

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1. GENERALIDADES | 4 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 4 |
| 1.2 OBJETIVOS | 5 |
| 1.3 ALCANCE..... | 5 |
| 1.4 MARCO NORMATIVO..... | 6 |
| 2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA..... | 9 |
| 2.1 LOCALIZACIÓN | 9 |
| 2.2 CALIDAD DEL AGUA | 12 |
| 3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL QUAL2K | 15 |
| 3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES..... | 15 |
| 3.2 METODOLOGÍA | 16 |
| 4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO..... | 18 |
| 4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES A MODELAR | 19 |
| 4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE | 23 |
| 4.3 DATOS HIDROMÉTRICOS Y MORFOLÓGICOS | 24 |
| 4.4 CONDICIONES DE BORDE | 24 |
| 4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN..... | 25 |
| 4.6 CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO | 26 |
| 5. MODELACIÓN: COMPONENTE CALIDAD..... | 29 |
| 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL LABORATORIO | 29 |
| 5.2 CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN..... | 35 |
| 5.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL COMPONENTE DE CALIDAD..... | 37 |
| 6. VERIFICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN..... | 41 |
| 7. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE SANEAMIENTO..... | 42 |
| 7.1 ESCENARIO 1: REDUCCIÓN DE HASTA UN 60% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO ₅ EN LOS CUATRO (4) VERTIMIENTOS DE AGUA RESIDUAL IDENTIFICADOS, ASÍ COMO LA REDUCCIÓN DE UN 99% DE CF SOBRE LOS MISMOS. | 42 |
| 7.2 ESCENARIO 2: REDUCCIÓN DE HASTA UN 80% DE LOS NIVELES DE SST Y DBO ₅ EN LOS CUATRO (4) VERTIMIENTOS DE AGUA RESIDUAL IDENTIFICADOS, ASÍ COMO LA REDUCCIÓN DE UN 99% DE CF SOBRE LOS MISMOS. | 43 |
| 7.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES: ESCENARIOS 1 Y 2 | 44 |
| 7.4 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS | 46 |
| 8. CONCLUSIONES | 50 |
| 9. BIBLIOGRAFIA..... | 51 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. NORMA PARA VERTIMIENTOS A UN CUERPO DE AGUA PARA USUARIOS NUEVOS | 6 |
| TABLA 2. CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA DESTINACIÓN DEL RECURSO | 6 |
| TABLA 3. VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES RESOLUCIÓN 0631 DE 2015 QUE HACEN REFERENCIA AL ESTUDIO DE MODELACIÓN – QUEBRADA LA FLORIDA..... | 7 |
| TABLA 4. OBJETIVOS DE CALIDAD QUEBRADA LA FLORIDA, CRQ..... | 8 |
| TABLA 5. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA LA FLORIDA | 9 |
| TABLA 6. BARRIOS E INSTITUCIONES LOCALIZADAS EN JURISDICCIÓN A LA QUEBRADA LA FLORIDA..... | 10 |
| TABLA 7. ASPECTOS MORFOLÓGICOS DE LA UNIDAD HIDROGRÁFICA QUEBRADA LA FLORIDA | 11 |
| TABLA 8. RESUMEN TOTAL DE VERTIMIENTOS HACIA LA QUEBRADA LA FLORIDA | 12 |
| TABLA 9. REPORTES HISTÓRICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN LA QUEBRADA LA FLORIDA ANTES DE SU DESEMBOCAR AL RIO QUINDÍO, CRQ | 13 |
| TABLA 10. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS A MODELAR SOBRE LA QUEBRADA LA FLORIDA | 18 |
| TABLA 11. CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE FORO Y MUESTREO SOBRE LA QUEBRADA LA FLORIDA | 20 |
| TABLA 12. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 2 DE MARZO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE | 23 |
| TABLA 13. TIEMPOS DE VIAJE DE LA MASA DE AGUA PARA EL DÍA 24 DE MARZO DE 2015 | 23 |
| TABLA 14. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EL 24 DE MARZO DE 2015 DURANTE LA JORNADA DE AFORO Y MUESTREO | 24 |
| TABLA 15. CONDICIONES DE BORDE INTERNAS EN LA MALLA DE MODELACIÓN, QUEBRADA LA FLORIDA | 25 |
| TABLA 16. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES TRANSVERSALES DE LA MALLA DE MODELACIÓN PARA LA QUEBRADA LA FLORIDA | 26 |
| TABLA 17. RED ESQUEMATIZADA PARA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA, QUEBRADA LA FLORIDA | 26 |
| TABLA 18. FUENTES DIFUSAS INCLUIDAS COMO PARTE DEL BALANCE HÍDRICO DENTRO DE LA QUEBRADA LA FLORIDA..... | 27 |
| TABLA 19. VARIABLES HIDROMÉTRICAS OBTENIDAS EN LA CALIBRACIÓN HIDRÁULICA..... | 27 |
| TABLA 20. DATOS DE CALIDAD QUEBRADA LA FLORIDA (CRQ) – CAMPAÑA DE MUESTREO 24/03/2015..... | 29 |
| TABLA 21. ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD* | 32 |
| TABLA 22. CARGA CONTAMINANTE DE LOS VERTIMIENTOS IDENTIFICADOS EN LA MODELACIÓN | 34 |
| TABLA 23. CUMPLIMIENTO DE LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015, PARA LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES IDENTIFICADOS EN LA CAMPAÑA DE MUESTREO EL DÍA 24/03/2015..... | 34 |
| TABLA 24. CALIBRACIÓN DE LAS DESCARGAS DIFUSAS..... | 38 |
| TABLA 25. CONSTANTES CINÉTICAS DE REACCIÓN..... | 38 |
| TABLA 26. ESCENARIO 1 DE SANEAMIENTO..... | 42 |
| TABLA 27. ESCENARIO 2 DE SANEAMIENTO..... | 43 |
| TABLA 28. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA DBO, QUEBRADA LA FLORIDA: ESCENARIO 1 | 46 |
| TABLA 29. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA DBO, QUEBRADA LA FLORIDA: ESCENARIO 2 | 46 |
| TABLA 30. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS SST, QUEBRADA LA FLORIDA: ESCENARIO 1 | 47 |
| TABLA 31. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS SST, QUEBRADA LA FLORIDA: ESCENARIO 2 | 47 |
| TABLA 32. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS OD, QUEBRADA LA FLORIDA: ESCENARIO 1..... | 48 |
| TABLA 33. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS OD, QUEBRADA LA FLORIDA: ESCENARIO 2..... | 48 |
| TABLA 34. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS CF, QUEBRADA LA FLORIDA: ESCENARIO 2 | 49 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. LOCALIZACIÓN QUEBRADA LA FLORIDA, DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO | 10 |
| FIGURA 2. LOCALIZACIÓN QUEBRADA LA FLORIDA, ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE ARMENIA..... | 11 |
| FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA | 16 |
| FIGURA 4. UBICACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES DE AFORO Y MUESTREO, QUEBRADA LA FLORIDA..... | 19 |
| FIGURA 5. MAPA DE PUNTOS DE AFORO Y MUESTREO, SUBCUENCA RIO SANTO DOMINGO | 22 |
| FIGURA 6. CALIBRACIÓN COMPONENTE HIDRÁULICO, PERFILES LONGITUDINALES: CAUDAL, PROFUNDIDAD Y VELOCIDAD DEL CAUCE - CALIBRADAS VS OBSERVADAS | 28 |
| FIGURA 7. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA LA FLORIDA..... | 39 |
| FIGURA 8. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA – QUEBRADA LA FLORIDA..... | 40 |
| FIGURA 9. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SANEAMIENTO: DBO, OD Y PH | 44 |
| FIGURA 10. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SANEAMIENTO: SST | 45 |
| FIGURA 11. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2 CON DESINFECCIÓN PARA LOS CF | 45 |

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 las corrientes hídricas, 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 auto depuración por dilución, dispersión longitudinal y procesos de transferencia y/o reacción físico-químicas y biológicas en las fuentes receptoras, dimensionándolas y seleccionando soluciones estructurales (e.j, plantas de tratamiento) y no estructurales (e.j, tecnologías de producción más limpias) requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua en la fuente receptora bajo diferentes niveles de contaminación y/o tratamiento. Para esto, se requiere seguir una metodología rigurosa en la implementación y aplicación de los modelos de calidad del agua para que puedan ser utilizados efectivamente como herramientas útiles en la toma de decisiones de saneamiento y manejo de vertimientos.

El presente estudio denominado “Modelación de la Calidad del agua en la quebrada La Florida”, 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 en esta información tomada en diferentes puntos de aforo y muestreo ubicados a lo largo de la quebrada La Florida, donde se incluyen igualmente, vertimientos puntuales de aguas residuales a lo largo de esta vertiente del sector Nororiental de la ciudad de Armenia.

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

1.2 OBJETIVOS

General

- Realizar la modelación de la calidad del agua en la quebrada La Florida en un tramo cercano a los 10.3 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 la fuente receptora.
- Elaborar escenarios de saneamiento partiendo de información existente.

1.3 ALCANCE

El estudio considera el muestreo en diferentes puntos sobre la quebrada La Florida, iniciando bajo el puente vehicular de la vía que conduce de Armenia al municipio de Calarcá denominada Variante Chagualá (zona rural ente los municipios de Armenia y Salento) hasta la desembocadura de la quebrada La Florida con el rio Quindío, localizado cerca del perímetro urbano del municipio de Armenia.

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

Trabajo de campo,

- Determinación de tiempos de viaje
- Campaña de aforo y muestreo puntual 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 derogados e integrados en el decreto único reglamentario del sector ambiental, número 1076 de mayo 26 de 2015 y la Resolución 0631 de marzo del 2015, en donde se establecen las normas de vertimiento a un cuerpo de agua.

El Decreto 3930 de 2010, deroga el Decreto 1594 de 1984 excepto los Artículos 20 y 21. El Artículo 73 todo derogado y el Artículo 74 parcialmente derogado por la Resolución 0631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.

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

| PARÁMETRO | DECRETO 1594 / 84 |
|---------------------|-------------------------|
| pH (min-max) | 5.0 – 9.0 |
| Temperatura | ≤40 ºC |
| DBO 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.

Tabla 2. Criterios de calidad para la destinación del recurso

| Parámetro | Expresado como | Consumo Humano y doméstico (1) | Uso Agrícola(3) | Uso Recreativo(2) |
|--------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| pH | Unidades | 5 – 9 | 4.5 – 9.0 | 5.0 – 9.0 |
| Oxígeno Disuelto | mg O ₂ /L | - | - | 70% de la concentración de saturación |
| 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) cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto

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 Suspendidos 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 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 – quebrada La Florida

| 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 ₅ |
|------------------|---------------------|--|--|
| pH | unidades | 6.0 a 9.0 | 6.0 a 9.0 |
| DQO | mg/l O ² | 200 | 180 |
| DBO ₅ | mg/l O ² | | 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 quebrada La Florida, CRQ

| TRAMO | PARAMETRO DE CALIDAD | UNIDAD | OBJETIVO DE CALIDAD ESPERADO PARA EL AÑO 2017 |
|--|--|------------------------|---|
| Comprendido entre el casco urbano y la desembocadura en el río Quindío | Oxígeno disuelto | (mg/l O ₂) | > 5.0 |
| | DBO | (mg/l O ₂) | <20 |
| | SST | (mg/l) | < 30 |
| | pH | unidades | [6.5-9.0] |
| | Material flotante y espumas, proveniente de actividad humana | | Ausente |
| | Sustancia que produzca color | | Ausente |
| | Sustancia que produzca olor | | Ausente |

Fuente: Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, CRQ.

2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

2.1 LOCALIZACIÓN

La unidad hidrográfica quebrada La Florida es un sistema fluvial de primer orden hidrológico tributario del río Quindío¹, está localizada principalmente en la zona urbana de la ciudad de Armenia en el departamento del Quindío. En la zona urbana, la quebrada cruza la ciudad por el costado oriental, en sentido norte – sur, con un rango altitudinal que varía entre los 1351.5 y 1595 m.s.n.m, una temperatura promedio de 20.04°C y una precipitación media mensual de 211. 1 mm (CRQ, 2014). La Quebrada cuenta con un afluente principal denominada la Quebrada San Pedro. La quebrada La Florida posee una longitud de 14.12 Kilómetros² desde su afloramiento en los límites de Armenia con el Municipio de Salento y Circasia (Vereda San Juan, cerca al predio La Paz) hasta su desembocadura con el río Quindío, aguas arriba del puente San Nicolás.

Tabla 5. Localización geográfica unidad hidrográfica quebrada La Florida

| | Latitud (norte) | Longitud (oeste) | Altitud (m.s.n.m) |
|----------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| <i>Nacimiento</i> | 4° 36' 12" | 75° 38' 02" | 1770 |
| <i>Desembocadura</i> | 4° 31' 29" | 75° 40' 34" | 1350 |

Fuente: SIGQuindío

¹ La unidad hidrográfica del río Quindío hace parte de la subzona hidrográfica del río La Vieja, localizada esta en la zona hidrográfica del Cauca.

² Medida tomada en SIGQuindío.

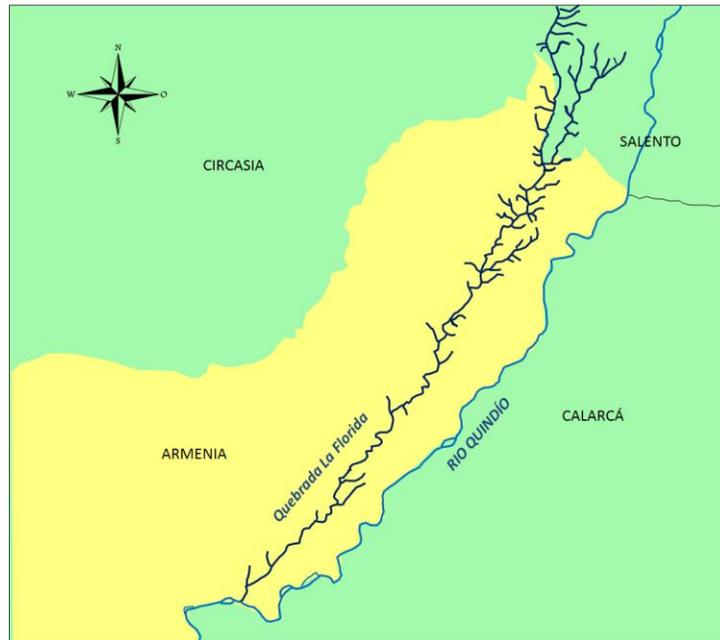


Figura 1. Localización quebrada La Florida, departamento del Quindío

La unidad de drenaje La Florida dentro de la ciudad está delimitada por la Avenida 14 (Simón Bolívar) y la Avenida Centenario, actuando como unidad de drenaje para una treintena de barrios e instituciones.

Tabla 6. Barrios e Instituciones localizadas en jurisdicción a la quebrada La Florida

- | | | | | |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|
| • Salvador Allende | • Buenos Aires Alto | • ICA | • La Castilla | • La Castellana |
| • El Nogal | • Buenos Aires Bajo | • Tigreros | • Rincón Santo | • El Retiro |
| • Vélez | • Guayaquil | • Octava Brigada | • Patio Bonito | • Escuela |
| • María Cristina | • Coinca | • Colegio Oficial | • Puerto Rico | • SENA |
| • Fundadores | • La Alquería | • Hospital San Juan de Dios | • Uribe | • Planta EPA |
| • La Campiña | • La Mariela | • La Hacienda | | |

Fuente: PSMV, Armenia 2009

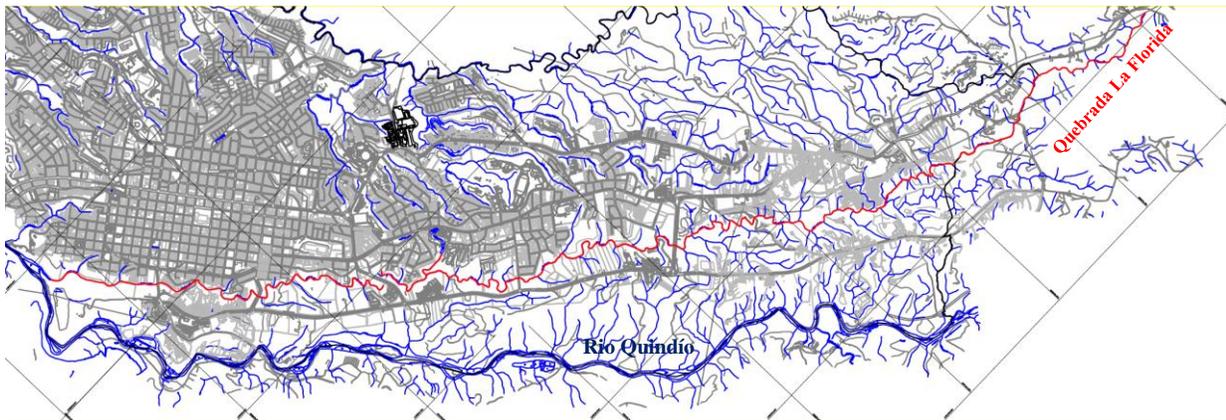


Figura 2. Localización quebrada La Florida, zona urbana del municipio de Armenia

Tabla 7. Aspectos morfológicos de la unidad hidrográfica Quebrada La Florida

| Unidad de drenaje | Característica | Ítem | Parámetro | Símbolo | Valor | Unidades |
|---------------------|---------------------------|------|------------------------------|---------|-------|-----------------|
| QUEBRADA LA FLORIDA | 1. Área | 1.1 | Superficie | A | 6.09 | Km ² |
| | | 1.2 | Perímetro | P | 21.99 | Km |
| | 2. Posición y Orientación | 2.1 | Posición | - | ZLT | |
| | | 2.2 | Orientación | - | N-E | |
| | 3. Forma | 3.1 | Coefficiente de Forma | Kf | 0.05 | |
| | | 3.2 | Coefficiente de Compacidad | Kc | 2.49 | |
| | | 3.3 | Índice de Alargamiento | Ia | 8.9 | |
| | 4. Pendiente Cuenca | 4.1 | Pendiente Media de la Cuenca | Sm | 2.97 | % |
| | 5. Cauce principal | 5.1 | Longitud | L | 14.12 | Km |
| | | 5.2 | Pendiente Media de Cauce | Sc | 2.83 | % |

Fuente: Valores calculados con la ayuda de la plataforma SIGQuindío.

- **Coefficiente de Forma (Kf):** Como el valor del índice es de 0.05 (menor a 1), se hace la consideración que la unidad de drenaje es muy poco acharada, es decir alargada, con una corriente principal larga y por ende con poca tendencia a concentrar el escurrimiento superficial.
- **Coefficiente de Compacidad (Kc):** La unidad de drenaje de la quebrada La Florida tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga, índice igual a 2.49 (Jiménez E.,H., 1992); la anterior clasificación indica que tiene poca tendencia a concentrar grandes crecidas.
- **Índice de Alargamiento:** Se obtiene un índice de 8.9, el cual es mayor que 1 e indica que la unidad de drenaje es muy alargada y tiene una gran capacidad de amortiguar crecidas.

2.2 CALIDAD DEL AGUA

La ciudad de Armenia presenta un patrón de drenaje subparalelo y muy denso, dividiéndose la ciudad en dos (2) unidades hidrográficas principales: río Espejo y río Quindío. La unidad hidrográfica del río Quindío recibe dos importantes afluentes urbanos como las quebradas La Florida y San Nicolás (nombrada también quebrada El Cafetero).

La quebrada La Florida, es la fuente receptora directa de aportes de aguas residuales del sistema de alcantarillado de la ciudad de Armenia. Desde su nacimiento (fuera del perímetro urbano) hasta el barrio Salvador Allende (entrada norte ciudad de Armenia), sus aguas vienen provistas de vida, en cuanto al poco impacto que recibe. Lamentablemente respecto a su salida (disposición final, río Quindío), está quebrada llega con un caudal promedio de 280 lt/s, siendo aproximadamente la mitad de sus aguas, aguas residuales³.

De acuerdo al estudio realizado por la Universidad del Quindío en el año 2009 denominado “Estudio de calidad ambiental en la quebrada La Florida, unidad de manejo de cuenca del río Quindío Armenia – Quindío, Colombia”⁴, los índices ICA⁵ calculados para la quebrada La Florida, mostraron que sus aguas presentaban mediana contaminación por materia orgánica y baja contaminación por mineralización y sólidos suspendidos. Para este entonces, los coliformes totales registraron valores de 1.50×10^5 UFC/100ml a través de la quebrada y, de algún modo los valores de la DBO₅ (cerca de 20 mg/l O₂) incidieron en la disminución de la saturación y concentración de oxígeno, lo que a su vez se relaciona directamente con la poca capacidad de autodepuración de la fuente hídrica (Bennet, 1978).

- **Vertimientos líquidos**

La cantidad de vertimientos generados directamente hacia la Quebrada La Florida equivalen a un 24.6% del total de los habitantes del sector urbano de la ciudad de Armenia⁶, lo que implica un alto impacto ecológico en este sector. Actualmente la quebrada continúa en condiciones similares.

Tabla 8. Resumen total de vertimientos hacia la quebrada La Florida

| | Área perímetro urbano (ha) | Población (hab) | # Vertimientos Aguas Residuales |
|---------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Quebrada La Florida | 324,9 | 67.969 | 59 |

Fuente: Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, EPA 2007.

³ Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, EPA 2007.

⁴ Grupo de Investigación BIOEDUQ, programa Académico Licenciatura en Biología y Educación Ambiental, Universidad del Quindío.

⁵ Índices de Calidad del Agua.

⁶ Población cabecera para el año 2007 = 276,296 habitantes, fuente DANE.

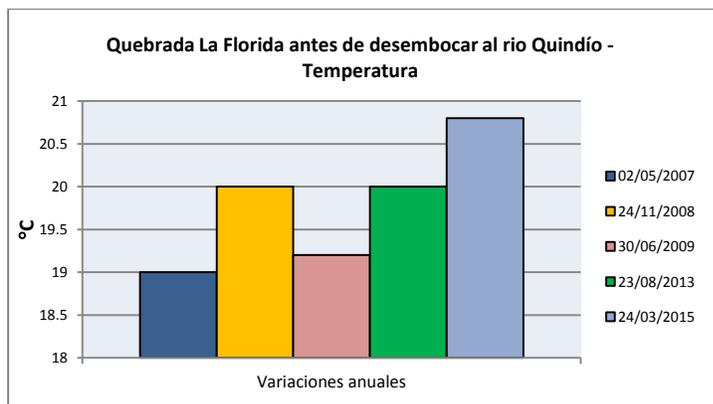
- Reportes históricos de calidad del agua en la quebrada La Florida antes de su desembocar al río Quindío**

Se presenta a continuación el análisis de los datos de calidad del agua obtenidos a través de los años en la estación “Desembocadura” localizada antes de desembocar la quebrada La Florida al río Quindío y luego de haber transitado a lo largo de la ciudad de Armenia.

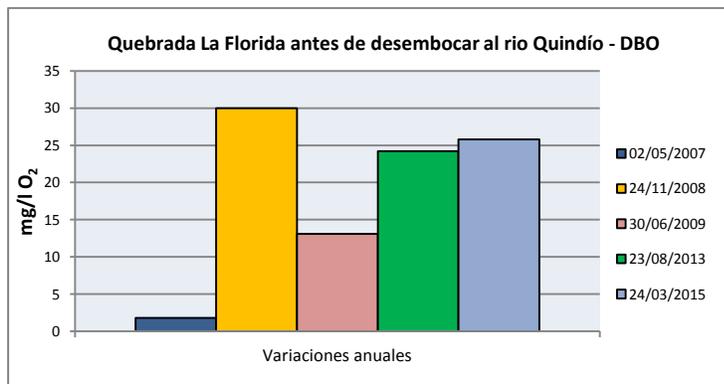
Tabla 9. Reportes históricos de calidad del agua en la quebrada La Florida antes de su desembocar al río Quindío, CRQ

| Fecha | Tramo | CAUDAL (l/s) | T (°C) | pH (unidades) | DBO (mg/l O ₂) | DQO (mg/l O ₂) | SST (mg/l) | OD (mg/l O ₂) | CT (NMP/100ml) | CF (NMP/100ml) |
|------------|------------------------------------|--------------|--------|---------------|----------------------------|----------------------------|------------|---------------------------|----------------|----------------|
| 02/05/2007 | Antes de desembocar al Río Quindío | 173 | 19 | 6.37 | 1.8 | 36.5 | 43.9 | 8.05 | 2.40E+06 | 2.40E+06 |
| 24/11/2008 | | 164 | 20 | 7.83 | 30 | 53 | 31.7 | 6.1 | 1.60E+07 | 1.60E+07 |
| 30/06/2009 | | | 19.2 | 7.86 | 13.1 | 52.4 | 49.1 | 7.16 | 1.60E+11 | 1.60E+11 |
| 23/08/2013 | | 222 | 20 | 7.78 | 24.2 | 96 | 54 | 5.47 | | |
| 24/03/2015 | | 260 | 20.8 | 7.22 | 25.8 | 68.5 | 51.1 | 5.81 | 1.60E+11 | 3.50E+10 |

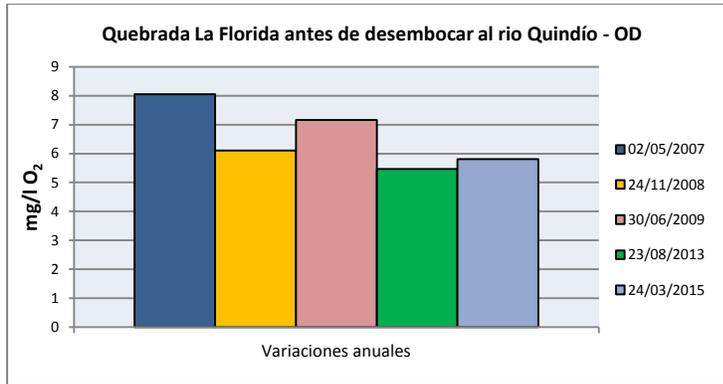
Fuente: registros CRQ.



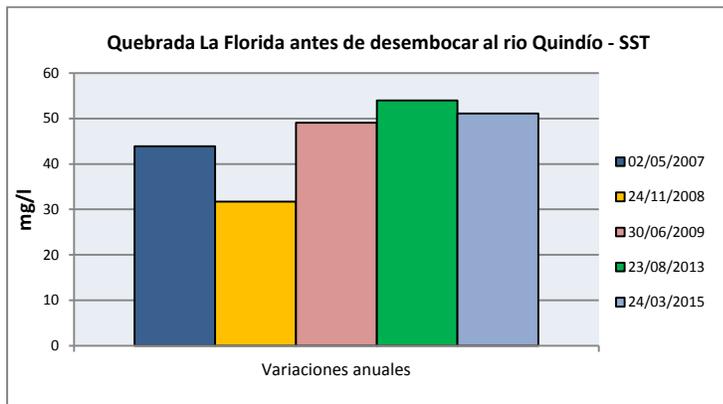
TEMPERATURA DEL AGUA: Se presenta un incremento de este parámetro entre el año 2007 y 2015 cercana al 8%. Su efecto podría ser relacionado con el aumento de la carga contaminante generada por la ciudad de Armenia que vierte a este cuerpo de agua. Es de recordar que la temperatura del agua residual es normalmente más elevada que el agua propia del cuerpo de agua, debido a la adición de agua caliente proveniente de las viviendas y procesos industriales.



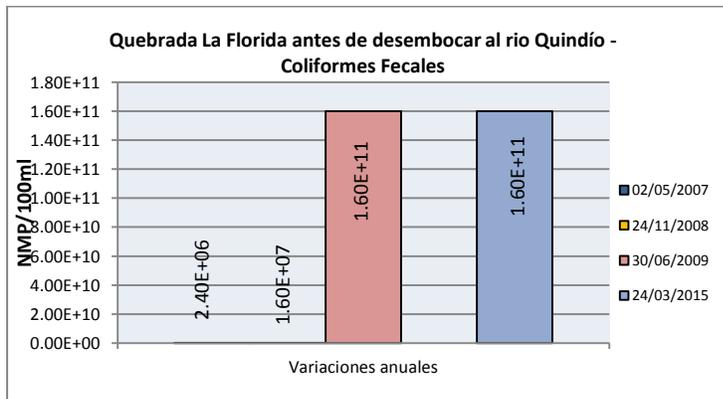
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO: Los niveles reportados, evidencian un mínimo de 1.8 mg/lO₂ (año 2007) y un máximo de 30 mg/lO₂ para el siguiente año (2008), incrementando su concentración (carga contaminante) en un 94% en menos de un año. Para los dos últimos años de registro, la quebrada La Florida posee en promedio un valor de 25 mg/lO₂, incrementándose a través de los años, lo que la identifica como una quebrada en estado de contaminación.



OXIGENO DISUELTO: Inversamente proporcional a la DBO, este parámetro tiende a disminuir su concentración a lo largo de los años. Es evidente la disminución del oxígeno ante el aumento de la DBO para los últimos tres años de registro, posiblemente a causa del incremento de las descargas de aguas residuales a este cuerpo de agua.



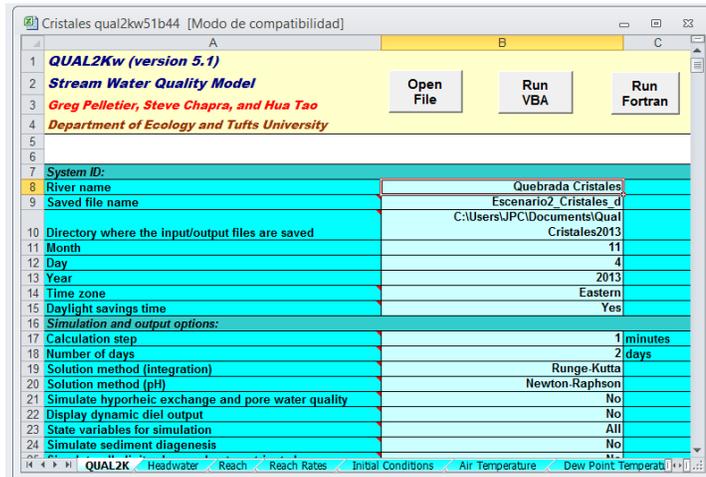
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES: Se presenta un promedio cercano a los 51.4 mg/l de este parámetro en los últimos tres años de registro. La fuente hídrica en este punto presenta un alto grado de turbidez, asociada probablemente a la materia en suspensión de los diferentes vertimientos de aguas residuales y procesos erosivos de origen antrópico dentro de la unidad de drenaje.



COLIFORMES FECALES: Se evidencia para los dos últimos años de registro, un aumento del 100% de la concentración de este parámetro respecto a los años 2007 y 2008. La descomposición de la materia orgánica es proporcional a la disminución de la concentración de oxígeno disuelto como se presentó en el gráfico anterior.

3. MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL Qual2K

El modelo matemático Qual2k es una herramienta para estimar la respuesta de las corrientes hídricas ante diferentes condiciones hidrológicas, tratamientos de aguas residuales y el impacto de fuentes puntuales y difusas.



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

Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología empleada



Inicialmente se realizó la recopilación de información cartográfica con el fin de localizar la corriente principal. A su vez, se evaluaron las diferentes estaciones a monitorear seleccionadas de acuerdo a su importancia geográfica y usos actuales (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 QUAL2Kw. Para el presente estudio, se realizó una campaña de aforo y muestreo el día 24 de Marzo 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 (dilución).

Luego de ingresar los datos que requiere el modelo, se realiza el proceso de calibración, donde se pretende aproximar los valores modelados con los valores reales tomados en la fuente hídrica, siendo esta la parte más importante en la implementación de esta herramienta. Por último se efectúa la simulación de

escenarios de saneamiento en relación con los objetivos de calidad esperados para el año 2017 (Resolución No. 1035 de Noviembre de 2008, CRQ).

4. MODELACION: COMPONENTE HIDRAULICO

El tramo de estudio inicia aproximadamente a unos 3.8 kilómetros del nacimiento de la quebrada La Florida (vereda San Juan, municipio de Salento) hasta su desembocadura con el río Quindío entre los municipios de Armenia y Calarcá. Hidrológicamente la longitud natural del cauce es de 14.12 Km, con una diferencia de nivel de 400 metros y una pendiente media del cauce de 2.83 %.

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 vertimientos directos).

Tabla 10. Localización de puntos a modelar sobre la quebrada La Florida

| SECCION No. | NOMBRE | CODIGO | ABSCISA (Km) | DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m) | COORDENADAS | | |
|-------------|-------------------|--------|--------------|--|-------------|-------------|---------|
| | | | | | Latitud | Longitud | a.s.n.m |
| 1 | Variante Chagualá | F1 | K 00+000 | - | 4° 35' 5" | 75° 38' 26" | 1600 |
| 2 | La Mariela | V1 | K 01+596 | 1595.78 | 4° 34' 21" | 75° 38' 32" | 1550 |
| 3 | ICA | F2 | K 02+663 | 1067.07 | 4° 33' 57" | 75° 38' 49" | 1540 |
| 4 | Coinca | V2 | K 03+646 | 1680.65 | 4° 33' 26" | 75° 39' 8" | 1530 |
| 5 | El Silencio | F3 | K 05+326 | 982.57 | 4° 33' 2" | 75° 39' 15" | 1510 |
| 6 | Parque de la Vida | V3 | K 06+234 | 907.85 | 4° 31' 38" | 75° 40' 31" | 1500 |
| 7 | Champagnat | F4 | K 07+923 | 1688.81 | 4° 32' 17" | 75° 39' 53" | 1470 |
| 8 | Parque Uribe | V4 | K 08+175 | 2145.6 | 4° 31' 36" | 75° 40' 31" | 1370 |
| 9 | Desembocadura | F5 | K 10+320 | 251.86 | 4° 31' 29" | 75° 40' 34" | 1350 |

F: Estación sobre la quebrada La Florida
V: Vertimiento
a.s.n.m.: altura sobre el nivel del mar

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

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

Figura 4. Ubicación espacial de las estaciones de aforo y muestreo, quebrada La Florida



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 11. Características de los puntos de foro y muestreo sobre la quebrada La Florida

| ESTACION | ACCESO | ESTADO DEL RECURSO | REGISTRO FOTOGRAFICO |
|---|--|--|--|
| <p>F1 Variante Chagualá</p> | <p>Vía principal que comunica la zona urbana del municipio de Calarcá con la autopista del Café al norte del municipio de Armenia. El punto de aforo está ubicado aguas arriba de un Box Couvert</p> | <ul style="list-style-type: none"> · Agua en aparente buen estado rodeada por vegetación |  |
| <p>V1 La Mariela</p> | <p>Barrio La Mariela al norte de Armenia</p> | <ul style="list-style-type: none"> · Olor a agua residual y turbiedad en la quebrada. · Quebrada rodeada de pastizales y siembra de plátano. |  |
| <p>F2 ICA</p> | <p>Vía terciaria que comunica la avenida Centenario con la avenida Bolívar en la ciudad de Armenia, cerca al Instituto Colombiano Agropecuario, ICA</p> | <ul style="list-style-type: none"> · Olor a agua residual, color turbio y rodeada por vegetación (guadua). |  |

| ESTACION | ACCESO | ESTADO DEL RECURSO | REGISTRO FOTOGRAFICO |
|---------------------------------|---|---|--|
| V2 Coinca | Vertimiento localizado en el barrio Coinca cerca al parque | <ul style="list-style-type: none"> · Olor a agua residual, color turbio y rodeada por vegetación (guadua). |  |
| | | <ul style="list-style-type: none"> · Quebrada visualmente contaminada. | |
| F3 El Silencio | Punto localizado ente la via que conduce de la avenida Centenario con el barrio La Castellana en la zona urbana del municipio de Armenia. Estacion de aforo aguas arriba de un Box Coulvert | <ul style="list-style-type: none"> · Sobre la margen derecha (en sentido aguas abajo) la quebrada presenta cobertura vegetal, principalmente guadua. Sobre la margen izquierda, se aprecia muy poca cobertura vegetal. |  |
| | | <ul style="list-style-type: none"> · Fuerte olor a agua residual y color turbio en ella. | |
| V3 Parque de la Vida | Acceso por el Parque de la Vida en dirección al patinodromo | <ul style="list-style-type: none"> · Vertimiento de aguas residuales que transita a través de una pequeña quebrada hacia la quebrada La Florida. |  |
| | | <ul style="list-style-type: none"> · Fuerte olor a agua residual y color turbio en ella. | |

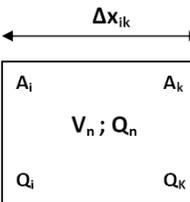
| ESTACION | ACCESO | ESTADO DEL RECURSO | REGISTRO FOTOGRAFICO |
|---|---|--|---|
| <p>F4 Champagnat</p> | <p>Vía de acceso hacia el barrio Florida Norte</p> | <ul style="list-style-type: none"> Quebrada en mal estado, con olor a agua residual y color turbio. |  |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Se encuentra rodeada de pastizales y viviendas en estado precario. | |
| <p>V4 Parque Uribe</p> | <p>Barrio Uribe en dirección con la quebrada La Florida, acceso por el parque.</p> | <ul style="list-style-type: none"> Zona de fuerte pendiente donde se observan diferentes puntos de vertimientos que convergen en un tramo principal. Olor a aguas residuales, rodeado por viviendas, residuos sólidos y cultivos de café. |  |
| <p>F5 Desembocadura</p> | <p>Acceso por el puente La Florida hacia un asentamiento de casas en límites con el municipio de Calarcá.</p> | <ul style="list-style-type: none"> Quebrada con olor a agua residual, color turbio y espuma flotando sobre la superficie de esta. La quebrada se encuentra rodeada por guadua. Se observa presencia de ganado en la zona. |  |

4.2 OBTENCIÓN DE LOS TIEMPOS DE VIAJE

Se requiere la obtención de los tiempos de viaje en los diferentes puntos del cauce principal de la quebrada La Florida 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 & 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 12. Variables hidrométricas obtenidas el 2 de marzo de 2015 durante la jornada de aforo para la obtención de los tiempos de viaje

| Abscisa | Estación | Velocidad (m/s) | Área Total (m ²) | Prof. Media (m) | Ancho (m) | Caudal (m ³ /s) |
|----------|-------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------|
| K 00+000 | Variante | 0.288 | 0.168 | 0.08 | 2.1 | 0.05 |
| K 02+663 | ICA | 0.359 | 0.449 | 0.14 | 3.4 | 0.17 |
| K 05+326 | El Silencio | 0.415 | 0.644 | 0.18 | 3.7 | 0.25 |
| K 07+923 | Champagna | 0.439 | 0.713 | 0.18 | 4.35 | 0.35 |

Tabla 13. Tiempos de viaje de la masa de agua para el día 24 de marzo 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 |
|-------------|--------------------|--------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Variante | 0.168 | 0 | 0.050 | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ICA | 0.449 | 2500 | 0.171 | 771.00 | 0.1 | 6973.18 | 116.22 | 116.22 | 1.94 | 1.94 |
| El Silencio | 0.644 | 4500 | 0.254 | 2459.11 | 0.2 | 11557.24 | 192.62 | 308.84 | 5.15 | 3.21 |
| Champagnat | 0.713 | 2250 | 0.351 | 1527.23 | 0.3 | 5048.39 | 84.14 | 392.98 | 6.55 | 3.34 |

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 14. Variables hidrométricas obtenidas el 24 de marzo de 2015 durante la jornada de aforo y muestreo

| Punto | Abscisa | Nombre | Velocidad (m/s) | Área Total (m ²) | Prof. Media (m) | Ancho (m) | Caudal (m ³ /s) |
|-------|----------|-------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------|----------------------------|
| F1 | K 00+000 | Variante Chagualá | 0.299 | 0.180 | 0.080 | 2.250 | 0.0538 |
| V1 | K 01+596 | La Mariela* | | | | | 0.0018 |
| F2 | K 02+663 | ICA | 0.008 | 0.030 | 0.300 | 0.0173 | 2.196 |
| V2 | K 03+646 | Coinca | 0.528 | 0.164 | 3.350 | 0.1410 | 0.267 |
| F3 | K 05+326 | El Silencio | 0.022 | 0.088 | 0.270 | 0.0067 | 0.301 |
| V3 | K 06+234 | Parque de la Vida | 0.368 | 0.154 | 2.600 | 0.1855 | 0.504 |
| F4 | K 07+923 | Champañat | 0.003 | 0.030 | 0.150 | 0.0025 | 0.737 |
| V4 | K 08+175 | Uribe | 1.017 | 0.277 | 3.800 | 0.2603 | 0.256 |
| F5 | K 10+320 | Desembocadura | 0.008 | 0.030 | 0.300 | 0.0173 | 2.196 |

* Aforo volumétrico

4.4 CONDICIONES DE BORDE

- **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 Variante Chagualá 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.

- **Condiciones de borde internas**

Las condiciones de borde internas de la corriente hídrica a modelar, corresponden a los diferentes vertimientos de aguas residuales (agrícolas y domésticas). 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 Florida. En la Tabla 14 se presentan todas las condiciones de borde internas correspondientes a la quebrada incluidas en la modelación matemática.

- Vertimientos de aguas residuales.

Vertimientos con mayor área de aferencia para un determinado sector de la ciudad de Armenia, los cuales a su vez contienen mayor volumen de agua a verter (caudal) reportados en el PSMV de Armenia para el año 2009. Estos vertimientos directos fueron seleccionados dada la anterior condición y fácil acceso al descole o punto final de vertimiento sobre la quebrada La Florida.

- Concesiones de agua

No existen concesiones agua que capten directamente de esta quebrada.

Tabla 15. Condiciones de borde internas en la malla de modelación, quebrada La Florida

| PUNTO | CODIGO | ESTACION | ABSCISA (km) | CAUDAL (m ³ /s) | CONDICION |
|-------|--------|-------------------|--------------|----------------------------|-------------|
| | F1 | Variante Chagualá | K 00+000 | 0.0538 | Estación |
| 1 | V1 | La Mariela | K 01+596 | 0.0018 | Vertimiento |
| 2 | V2 | Coinca | K 04+344 | 0.0173 | Vertimiento |
| 3 | V3 | Parque de la Vida | K 06+234 | 0.0067 | Vertimiento |
| 4 | V4 | Parque Uribe | K 10+068 | 0.0025 | Vertimiento |
| | F5 | Desembocadura | K 10+320 | 0.2603 | Estación |

C: Estación sobre la quebrada La Florida
V: Vertimiento

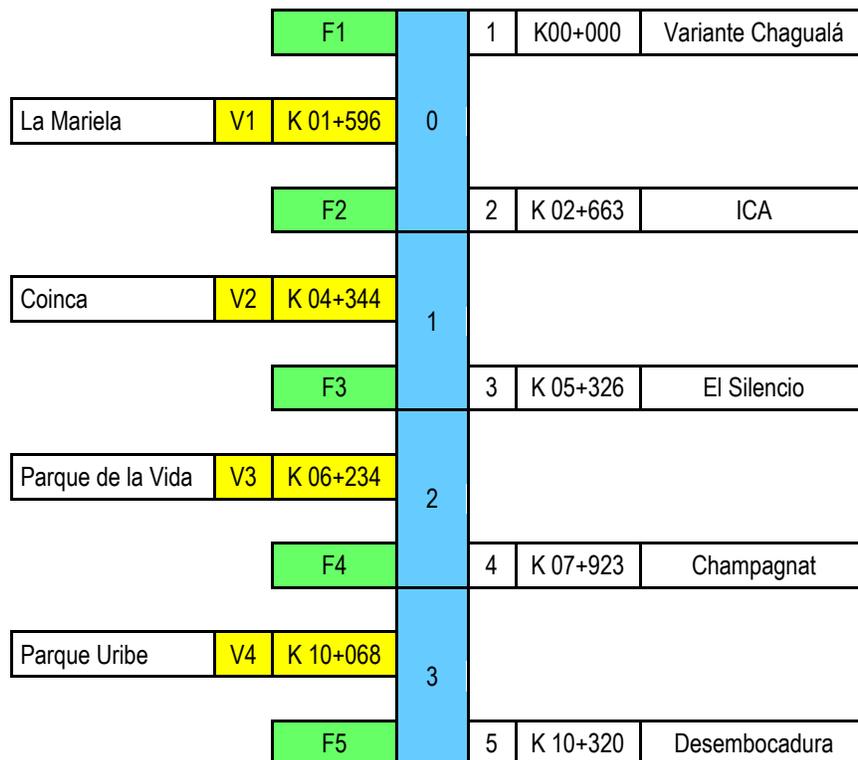
4.5 RED FINAL DE MODELACIÓN

El grid o malla de modelación, quedó conformada por 5 secciones transversales, correspondientes 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 la quebrada La Florida, donde se especifican las distancias entre las secciones a implementar.

Tabla 16. Localización de las estaciones transversales de la malla de modelación para la quebrada La Florida

| SECCION N° | NOMBRE | ESTACION | ABSCISA (Km) | DISTANCIA ENTRE SECCIONES Δx (m) | COORDENADAS | | m.s.n.m |
|------------|-------------------|----------|--------------|--|-------------|-------------|---------|
| | | | | | Latitud | Longitud | |
| 1 | Variante Chagualá | F1 | K 00+000 | 0 | 4° 35' 5" | 75° 38' 26" | 1600 |
| 2 | ICA | F2 | K 02+663 | 2663 | 4° 33' 57" | 75° 38' 49" | 1540 |
| 3 | El Silencio | F3 | K 05+326 | 2663 | 4° 33' 2" | 75° 39' 15" | 1510 |
| 4 | Champagnat | F4 | K 07+923 | 2597 | 4° 32' 17" | 75° 39' 53" | 1470 |
| 5 | Desembocadura | F5 | K 10+320 | 2397 | 4° 31' 29" | 75° 40' 34" | 1350 |

Tabla 17. Red esquematizada para modelación de calidad del agua, quebrada La Florida



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 vertimientos de mayor interés en la quebrada La Florida, debido a su localización y caudal vertido. 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, correspondientes en su mayoría, a vertimientos de aguas residuales a través de la quebrada La Florida que no pudieron ser identificados de acuerdo al criterio ya mencionado.

Tabla 18. Fuentes Difusas incluidas como parte del balance hídrico dentro de la quebrada La Florida

| Fuente Difusa | | Localización entre la abscisa (km) | | Diffuse Abstraction | Diffuse Inflow |
|-----------------|----|------------------------------------|-------|---------------------|----------------|
| | | | | m ³ /s | |
| Fuente Difusa 1 | D1 | 0 | 2.72 | - | 0.0450 |
| Fuente Difusa 2 | D2 | 2.82 | 5.32 | - | 0.0230 |
| Fuente Difusa 3 | D3 | 5.52 | 7.92 | - | 0.0380 |
| Fuente Difusa 4 | D4 | 8.02 | 10.32 | - | 0.0720 |

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 19 se presentan los resultados de las variables hidrométricas, obtenidas después de la calibración hidráulica. Asimismo, en las Figura 6 se muestran los perfiles longitudinales de las variables observadas comparadas con las calculadas por el modelo (calibradas).

Tabla 19. 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 | 0.08 | 2.25 | 2.42 | 0.19 | 0.29 | 0.05 |
| 2.66 | 0.41 | 1.65 | 2.47 | 0.68 | 0.15 | 0.10 |
| 5.32 | 0.15 | 3.35 | 3.66 | 0.52 | 0.27 | 0.14 |
| 7.916 | 0.14 | 2.60 | 2.89 | 0.37 | 0.50 | 0.19 |
| 10.32 | 0.26 | 3.80 | 4.33 | 1.00 | 0.26 | 0.26 |

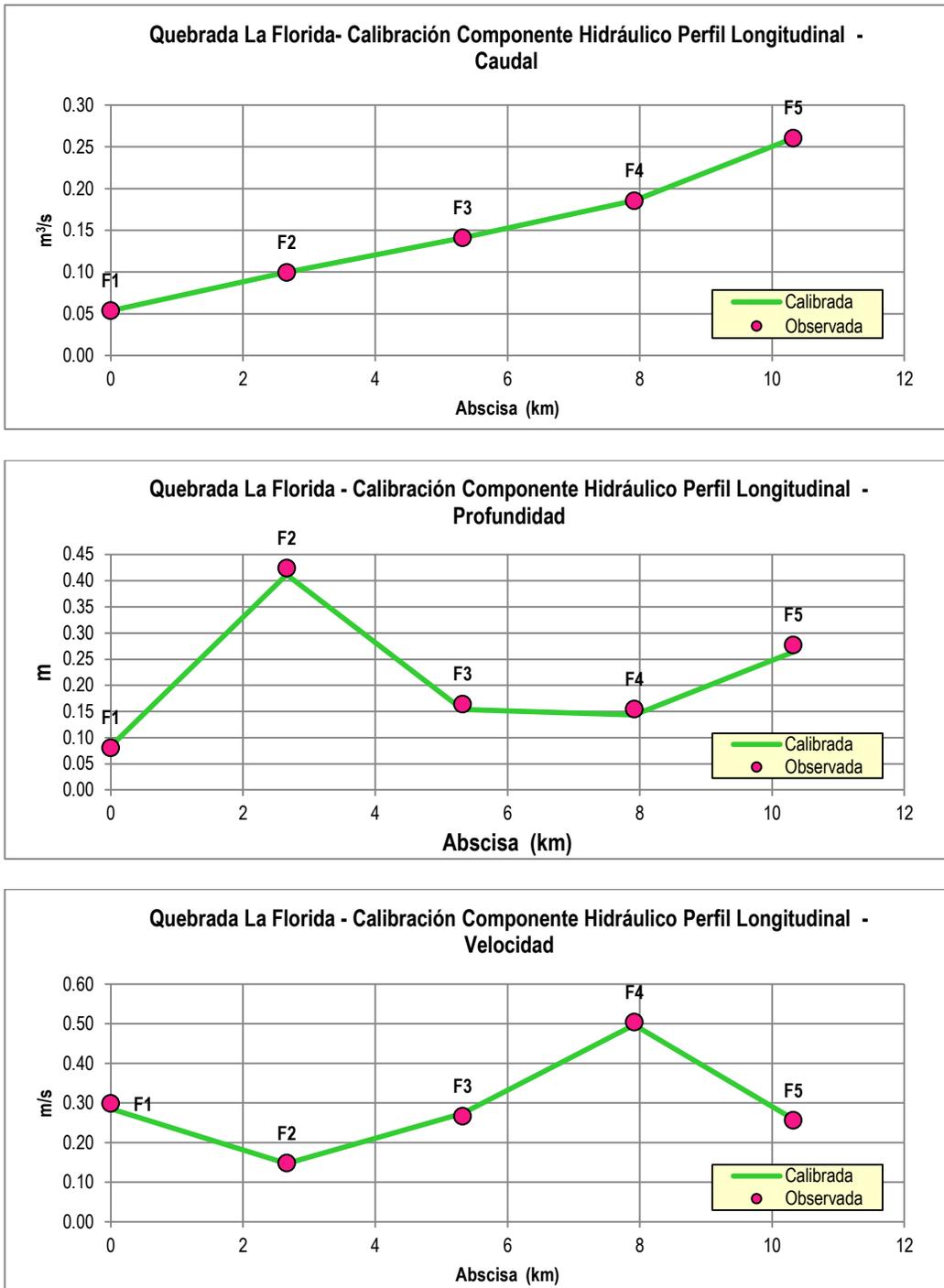


Figura 6. Calibración componente hidráulico, perfiles longitudinales: Caudal, profundidad y velocidad del cauce - Calibradas vs Observadas

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 Florida, fueron obtenidos por medio de la toma de muestras en el cauce principal y cuatro vertimientos, de forma simultánea, siguiendo la masa de agua de acuerdo a los horarios establecidos (tiempos de viaje). Estas muestras fueron posteriormente analizadas en el laboratorio de aguas de la CRQ.

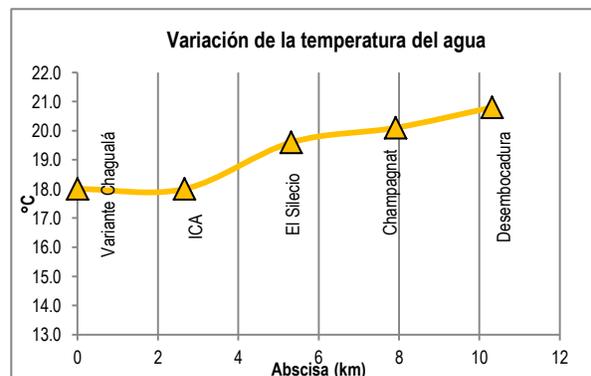
Tabla 20. Datos de calidad quebrada La Florida (CRQ) – Campaña de muestreo 24/03/2015

| PUNTO DE MONITOREO | | Caudal (m ³ /s) | Temp. (°C) | SST (mg/l) | OD (mg/l O ₂) | DBO ₅ (mg/l O ₂) | DQO (mg/l O ₂) | pH (unidades) | Coliformes Totales | Coliformes Fecales |
|--------------------|----|-------------------------------|---------------|---------------|------------------------------|--|-------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | | NMP/100ml | NMP/100ml |
| Variante Chagualá | F1 | 0.054 | 18.0 | 1.62 | 7.14 | 0.61 | 2.2 | 5.17 | 9.20E+02 | 3.90E+03 |
| La Mariela | V1 | 0.002 | 20.2 | 450 | 3.48 | 434 | 1008 | 7.7 | | |
| ICA | F2 | 0.100 | 18.0 | 10.3 | 4.84 | 8.5 | 14.8 | 6.82 | 3.90E+05 | 1.60E+07 |
| Coinca | V2 | 0.017 | 22.7 | 116 | 3.96 | 183 | 446 | 7.24 | | |
| El Silencio | F3 | 0.141 | 19.6 | 37.6 | 5.29 | 35.5 | 78.5 | 7.06 | 3.90E+09 | 1.60E+11 |
| Parque de la Vida | V3 | 0.007 | 22.2 | 117.0 | 3.62 | 152 | 371 | 7.16 | | |
| Champagnat | F4 | 0.185 | 20.1 | 98.6 | 5.32 | 31.6 | 88.5 | 7.20 | 4.70E+09 | 1.60E+11 |
| Parque Uribe | V4 | 0.002 | 22.8 | 219.0 | 3.54 | 242 | 526 | 7.09 | | |
| Desembocadura | F5 | 0.260 | 20.8 | 51.1 | 5.81 | 25.8 | 68.5 | 7.22 | 3.50E+10 | 1.60E+11 |

- **Observaciones Generales de los reportes de calidad**

- **Temperatura**

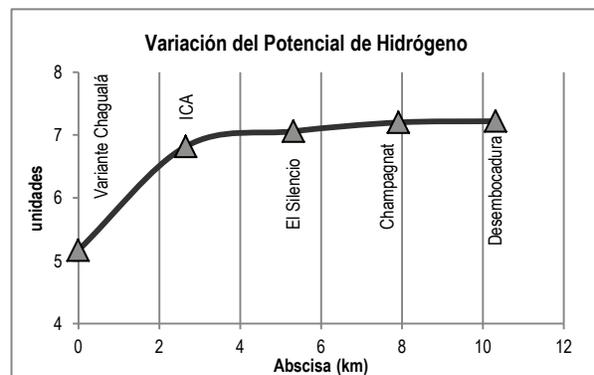
La temperatura influye directamente en la disociación de sales y gases, por lo tanto en la conductividad eléctrica y el pH. Así mismo, la relación entre densidad del agua y su temperatura, pueden modificar los movimientos de mezcla de diferentes



masas en función de la alteración de la temperatura. A mayores temperaturas, se tiene mayor descomposición de los microorganismos que allí habitan y menor capacidad de solubilidad del oxígeno. En los tramos ICA-Desembocadura, se evidencia un incremento del 13% en la temperatura del agua equivalente a 2.8°C, por ser este el tramo con mayores vertimientos de agua residual provenientes de la ciudad de Armenia. Igualmente es importante evidenciar que la quebrada La Florida posee algunos tramos canalizados (box couvert) a lo largo de su recorrido, por lo cual se tiene poca incidencia directa de los rayos solares y por consiguiente, el proceso desinfectante que ofrece la luz solar contra las bacterias patógenas, no estaría favoreciendo en gran medida la calidad del agua en la quebrada.

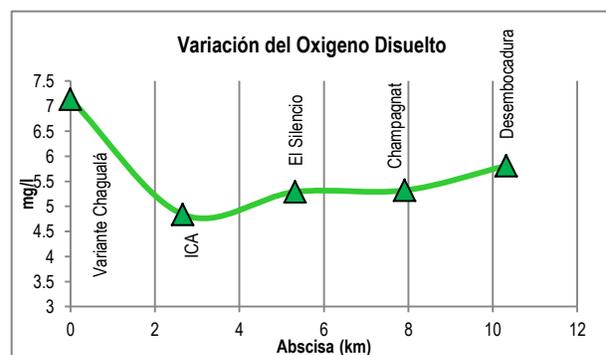
- pH

El análisis de esta variable es fundamental para establecer la calidad del agua, debido a que permite identificar las condiciones acidas o alcalinas de una corriente cuyos valores extremos puede repercutir seriamente en la flora y fauna acuáticas. Los valores determinados se encuentran dentro de los establecidos por la Decreto 1594 de 1984 (entre 5 a 9 unidades): 6.82 a 7.22 unidades, para la destinación del recurso para consumo humano-doméstico y recreativo.



- OD

Indicador importante de la calidad del agua ambiental. El oxígeno disuelto en el agua proviene del oxígeno en el aire que se ha disuelto en el agua, por lo que están muy relacionados por las turbulencias de la fuente hídrica (que aumentan el OD) o 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 (vertidos 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.



La principal función de la quebrada La Florida es la *evacuación por dilución* de las aguas residuales de la ciudad de Armenia sin ningún tratamiento previo. Esta quebrada es receptora de 59 vertimientos directos de aguas residuales⁷, por lo cual se evidencia en la gráfica la poca capacidad de reoxigenación en ella. Como ejemplo, la quebrada La Florida luego de un recorrido de 2.4 kilómetros entre las estaciones Champagnat y Desembocadura, recupera solo un 8.4% del oxígeno perdido en la estación Champagnat.

El nivel más bajo de OD encontrado el día del muestreo se halla localizado en la segunda estación “ICA” con 4.84 mg/l O₂. En cuanto a los vertimientos identificados, se tiene en promedio un valor de 3.65 mg/l O₂. En relación a lo anterior, se evidenciaron formas de vida como gusanos rojos e insectos (mosquitos y moscas), característicos de aguas contaminadas con baja concentración de oxígeno disuelto y alta materia orgánica.

- **DBO**

Este parámetro químico 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. Las sustancias orgánicas de las aguas residuales urbanas, están constituidas mayormente por materia fecal, siendo la contribución diaria de la DBO₅, por parte de un adulto de 39 a 42 g; de los cuales aproximadamente el 25% corresponden a la orina, el 68% a materia fecal y el 7% a materia de limpieza anal (Droste, 1997). Además, también contienen hidratos de carbono (celulosa, almidón y azúcares), grasas y jabones (sales metálicas de ácidos grasos), detergentes sintéticos, proteínas y sus productos de descomposición (urea, glicina y cisteína) así como hidróxido de amonio y sales amoniacaes procedentes de la descomposición de complejos orgánicos nitrogenados (Rivas Mijares, 1978).

La quebrada La Florida presenta su máxima concentración de DBO₅ en el punto intermedio del tramo evaluado (estación “El Silencio”) con un valor igual a 35.5 mg/lO₂. Luego del punto anterior, la quebrada disminuye un 27.3% su concentración hasta el punto antes de desembocar al río Quindío (25.8 mg/lO₂). Sin embargo aguas abajo del punto anterior, se observa una leve recuperación de la quebrada (estación Desembocadura), lo que hace que el agua se vea un poco más clara, con menor proporción de turbidez que el tramo anterior. Esta restauración se denomina *autodepuración* y se desarrolla en función de la distancia que se encuentre el punto de otra fuente de contaminación, de la velocidad de la corriente (pendientes y choques con material particulado, rocas) para restablecer su ciclo normal.

⁷ PSMV Armenia, 2009.

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

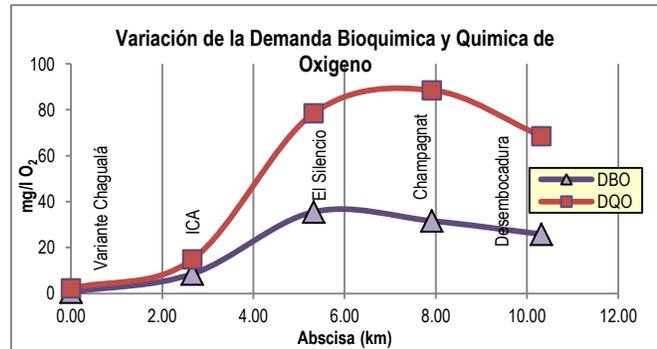


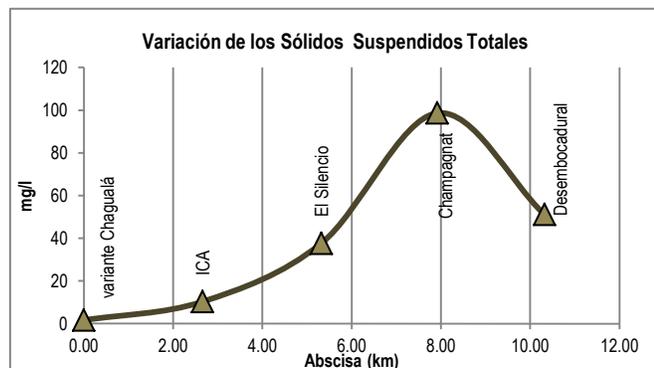
Tabla 21. Índice de biodegradabilidad*

| PUNTO DE MONITOREO | DQO | DQO/DBO | OBSERVACIÓN |
|--------------------|------|---------|--------------------------|
| Variante Chagualá | 2.2 | 3.61 | moderadamente degradable |
| ICA | 14.8 | 1.74 | muy degradable |
| El Silencio | 78.5 | 2.21 | moderadamente degradable |
| Champagnat | 88.5 | 2.80 | moderadamente degradable |
| Desembocadura | 68.5 | 2.66 | 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 un parámetro físico 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



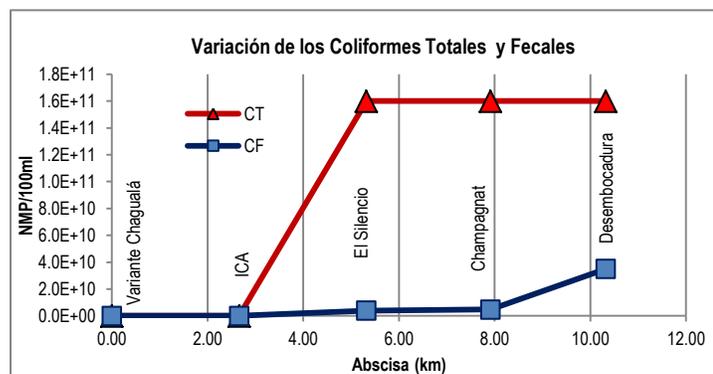
metabólica y proporcionan un área de superficie para la absorción y el transporte de una gran variedad de componentes.

La quebrada La Florida presenta su máxima concentración en la estación Champagnat con un valor de 98.6 mg/l. Este valor se relaciona directamente con el incremento de las descargas de aguas residuales hacia la quebrada, lo que dificulta la asimilación por parte de esta para dichas concentraciones. Hacia el punto final cerca a la desembocadura con el río Quindío, la quebrada La Florida reduce en un 48% la concentración de SST respecto al punto anterior, favoreciendo en cierta medida su calidad.

- **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.

El vertido incontrolado de las aguas residuales sin tratar produce la muerte del medio acuático afectado debido a la gran cantidad de materia orgánica aportada, que dicho medio no es capaz de asimilar.



La materia orgánica presente en la quebrada La Florida, es uno de los principales causantes de la degradación de la calidad del agua en dicha corriente hídrica, puesto que la mayor parte de la materia orgánica que contiene el agua residual urbana es biodegradable y los microorganismos la utilizan como alimento, para lo cual necesitan consumir oxígeno. En su recorrido por la ciudad de Armenia, la quebrada La Florida posee en promedio una concentración de coliformes fecales de $1.45E+10$ NMP/100ml y totales de $1.60E+11$ NMP/100ml.

- **Análisis de las concentraciones obtenidas en los vertimientos puntuales identificados en la quebrada La Florida 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 de la quebrada La Florida), se evalúa previamente la carga contaminante en kg/día de DBO_5 con el fin de identificar la Tabla de los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles a cumplir.

Tabla 22. Carga contaminante de los vertimientos identificados en la modelación

| ESTACION | DBO5 (mg/l O ₂) | Caudal (m ³ /s) | Caudal (l/s) | Carga Contaminante kg/día DBO ₅ | Resolución 0631 de 2015 (Capítulo V, Art. 8) |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------|--|--|
| La Mariela | 434 | 0.0018 | 1.76 | 66.151 | 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 ₅ |
| Coinca | 183 | 0.0173 | 17.30 | 273.484 | |
| Parque de la Vida | 152 | 0.0067 | 6.75 | 88.614 | |
| Parque Uribe | 242 | 0.0025 | 2.49 | 51.996 | |

La carga contaminante calculada para los vertimientos puntuales identificados en la campaña de muestreo el día 24 de marzo de 2015, no supera los 625 kg/día. De acuerdo a lo anterior, se toma la primera tabla que aparece en el Capítulo V, Artículo 8 de la mencionada Resolución para el análisis de los valores límites máximos permisibles a cumplir.

Tabla 23. Cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015, para los vertimientos puntuales identificados en la campaña de muestreo el día 24/03/2015

| PUNTO DE MONITOREO | | SST (mg/l) | DBO ₅ (mg/l O ₂) | DQO (mg/l O ₂) | pH (unidades) |
|--------------------|--------------------------------------|----------------|---|----------------------------|---------------|
| La Mariela | V1 - Concentración | 450 | 434 | 1008 | 7.7 |
| | Cumplimiento Resolución 0631 de 2015 | < 90 NO CUMPLE | < 90 NO CUMPLE | < 180 NO CUMPLE | (6-9) CUMPLE |
| Coinca | V2 - Concentración | 116 | 183 | 446 | 7.24 |
| | Cumplimiento Resolución 0631 de 2015 | < 90 NO CUMPLE | < 90 NO CUMPLE | < 180 NO CUMPLE | (6-9) CUMPLE |
| Parque de la Vida | V3 - Concentración | 117.0 | 152 | 371 | 7.16 |
| | Cumplimiento Resolución 0631 de 2015 | < 90 NO CUMPLE | < 90 NO CUMPLE | < 180 NO CUMPLE | (6-9) CUMPLE |
| Parque Uribe | V4 - Concentración | 219.0 | 242 | 526 | 7.09 |
| | 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).

- **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⁻¹

- **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_e : Constante de desoxigenación (base e), día⁻¹
 Kd : 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 varios métodos para determinar la constante de desoxigenación - el método de mínimos cuadrados, método de Thomas, método de la pendiente de Thomas, método de los puntos de Rhame - para llevar a cabo la modelación se decide por la metodología del cálculo de tramos, método más intuitivo y de mayor facilidad de manejo, y el cual permite obtener las constantes entre cada tramo (estaciones de muestreo), lo que da una representación muy aproximada de los valores de decaimiento que se dan en el cauce.

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

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

- **Constante de reaireación (K₂)**

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.

- **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, día^{-1} |
| K_{B1} | : Decaimiento por salinidad, día^{-1} |
| K_{Bluz} | : Decaimiento por la luz, día^{-1} |
| $K_{B(sed)}$ | : Decaimiento por sedimentación, día^{-1} |
| $K_{a(\text{crecimiento})}$ | : Tasa de crecimiento de los coliformes, día^{-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 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 de la quebrada La Florida.

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

Tabla 24. Calibración de las descargas difusas

| Fuente Difusa | | Localización entre la abscisa (m) | | Caudal (m ³ /s) | Temp. Agua°C | SST (mg/l) | DBO ₅ (mg/l O ₂) | pH (unidades) | Coliformes Fecales (NMP/100ml) |
|-----------------|----|-----------------------------------|-------|----------------------------|--------------|------------|---|---------------|--------------------------------|
| Fuente Difusa 1 | D1 | 0 | 2.72 | 0.0450 | 16.75 | 0.00 | 1.50 | 7.0 | 0.00E+00 |
| Fuente Difusa 2 | D2 | 2.82 | 5.32 | 0.0230 | 21.00 | 55.00 | 21.50 | 7.0 | 1.60E+10 |
| Fuente Difusa 3 | D3 | 5.52 | 7.92 | 0.0380 | 20.50 | 50.00 | 20.00 | 7.0 | 9.00E+08 |
| Fuente Difusa 4 | D4 | 8.02 | 10.32 | 0.0720 | 21.00 | 90.00 | 0.00 | 7.0 | 1.60E+10 |

Tabla 25. Constantes cinéticas de reacción

| Tramo (km) | | Constante de reaireación (1/d) | Velocidad de sedimentación (m/d) | Tasa de Oxidación (1/d) |
|------------|-------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 0 | 2.66 | 8.850 | - | - |
| 2.66 | 5.32 | 40.000 | 0.05 | 0.1 |
| 5.32 | 7.916 | 40.000 | 0.1 | 0.5 |
| 7.916 | 10.32 | 40.000 | 0.1 | 0.2 |

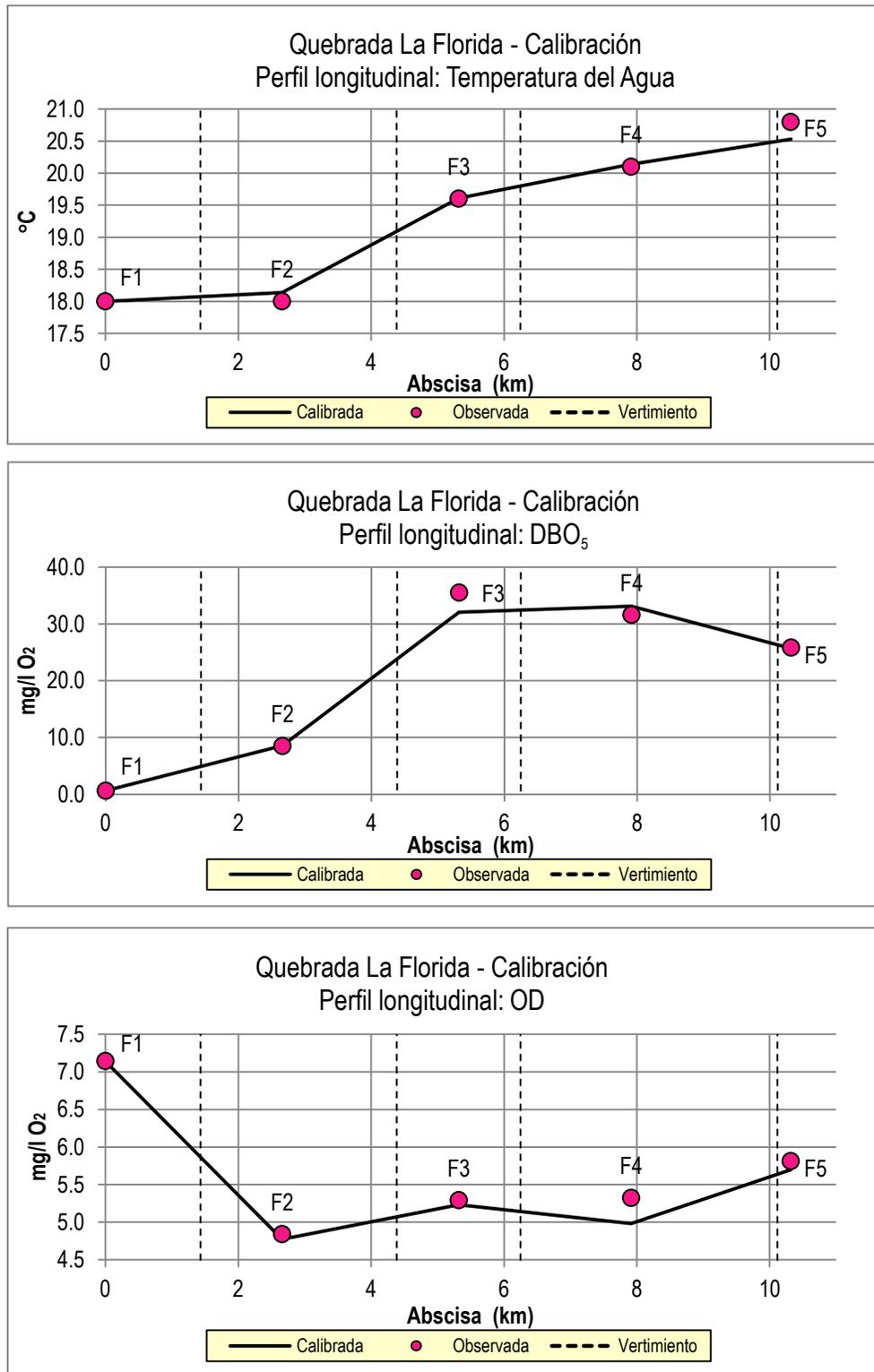


Figura 7. Modelo de calidad del agua – quebrada La Florida
Perfil longitudinal de Temperatura, DBO₅ y OD

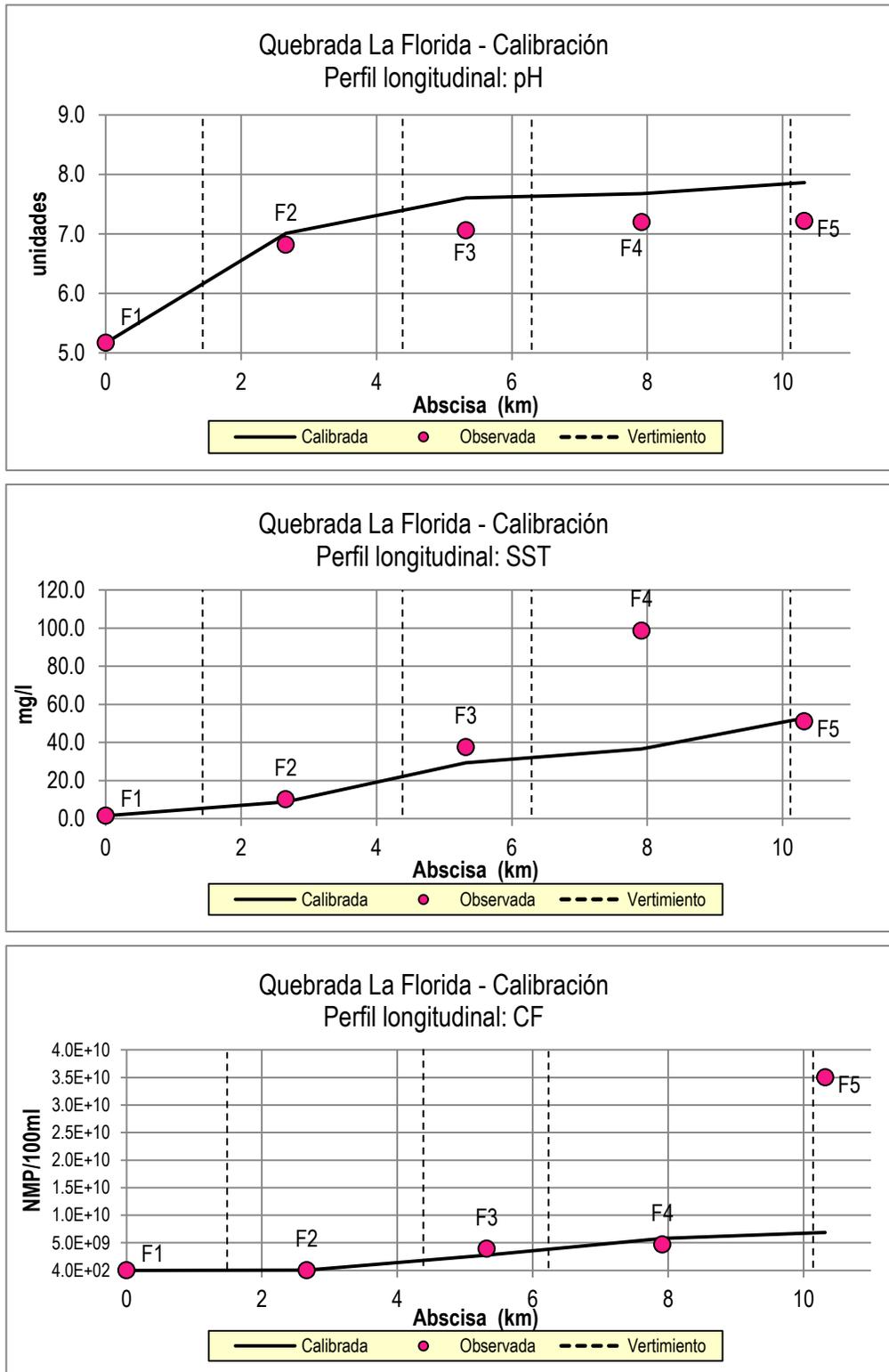


Figura 8. Modelo de calidad del agua – quebrada La Florida
Perfil longitudinal de SST y CF

6. VERIFICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

La 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. Sin embargo, no es posible la realización de esta verificación dada la ausencia de información de calidad y cantidad en la mayoría de las estaciones modeladas.

La falta de muestreos sincronizados y reportes de caudal instantáneo, hace imposible la verificación de cualquier modelo de simulación en una época específica. Sin embargo, la información aquí presentada puede ser utilizada, como en el caso de la calibración del modelo, para mostrar tendencias del comportamiento de los parámetros de calidad o para iniciar una base estadística de ellos.

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 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 la quebrada La Florida, 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 la quebrada.

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 DBO₅, SST y CF y aumento en el OD.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los escenarios de saneamiento propuestos para la temporada de caudales medios a bajos.

7.1 Escenario 1: Reducción de hasta un 60% de los niveles de SST y DBO₅ en los cuatro (4) vertimientos de agua residual identificados, así como la reducción de un 99% de CF sobre los mismos.

Se proponen reducciones del 60% en los vertimientos analizados dentro del estudio de modelación para la quebrada La Florida. Sumado a lo anterior, se pretende reducir en un 99% CF en el tramo de análisis, con el fin de evaluar tramos dentro de la quebrada que pudieran cumplir con el Decreto 1594/84 para la destinación del recurso. Con lo anterior se pretende evidenciar el comportamiento en la quebrada si se llegara a implementar algún sistema de tratamiento o mejorar los existentes que lograra reducir estos niveles de contaminación actuales.

Tabla 26. Escenario 1 de saneamiento

| | Sin Remoción (reportado el día del muestreo) | | 60% Remoción | |
|-------------------|--|-----|--------------|------|
| | DBO | SST | DBO | SST |
| La Mariela | 434 | 450 | 173.6 | 180 |
| Coinca | 183 | 116 | 73.2 | 46.4 |
| Parque de la Vida | 152 | 117 | 60.8 | 46.8 |
| Parque Uribe | 242 | 219 | 96.8 | 87.6 |

7.2 Escenario 2: Reducción de hasta un 80% de los niveles de SST y DBO₅ en los cuatro (4) vertimientos de agua residual identificados, así como la reducción de un 99% de CF sobre los mismos.

Se proponen reducciones del 80% en los vertimientos analizados dentro del estudio de modelación para la quebrada La Florida (porcentaje de remoción en carga propuesto a través del Decreto 1595 de 1984 para vertimientos a un cuerpo). Al igual que el Escenario 1, se pretende reducir en un 99% CF en el tramo de análisis, con el fin de evaluar tramos dentro del río que pudieran cumplir con el Decreto 1594/84 para la destinación del recurso.

Tabla 27. Escenario 2 de saneamiento

| | Sin Remoción (reportado el día del muestreo) | | 80% Remoción | |
|-------------------|--|-----|--------------|------|
| | DBO | SST | DBO | SST |
| La Mariela | 434 | 450 | 86.8 | 90 |
| Coinca | 183 | 116 | 36.6 | 23.2 |
| Parque de la Vida | 152 | 117 | 30.4 | 23.4 |
| Parque Uribe | 242 | 219 | 48.4 | 43.8 |

7.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES: Escenarios 1 y 2

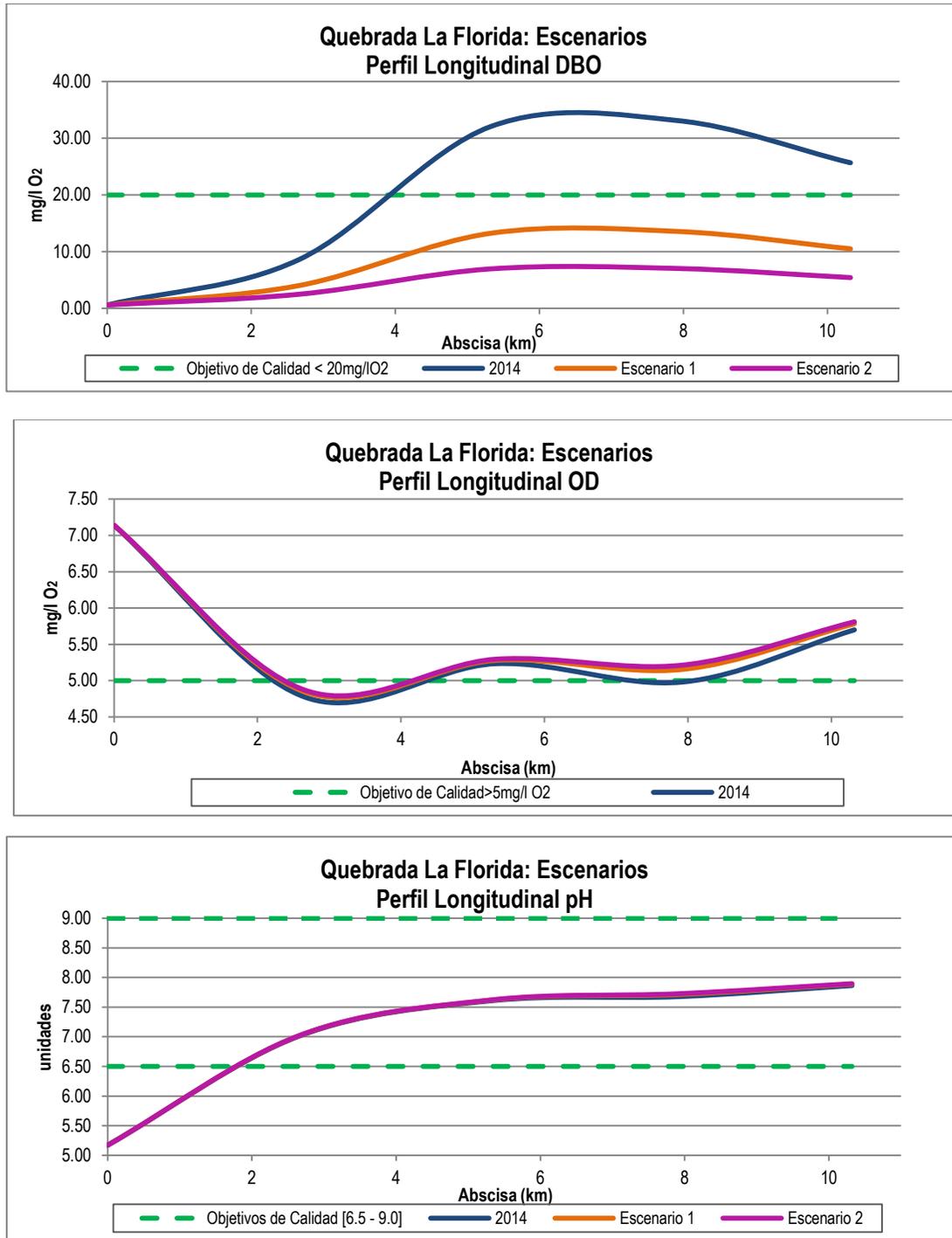


Figura 9. Resultados de la aplicación de los escenarios de saneamiento: DBO, OD y pH

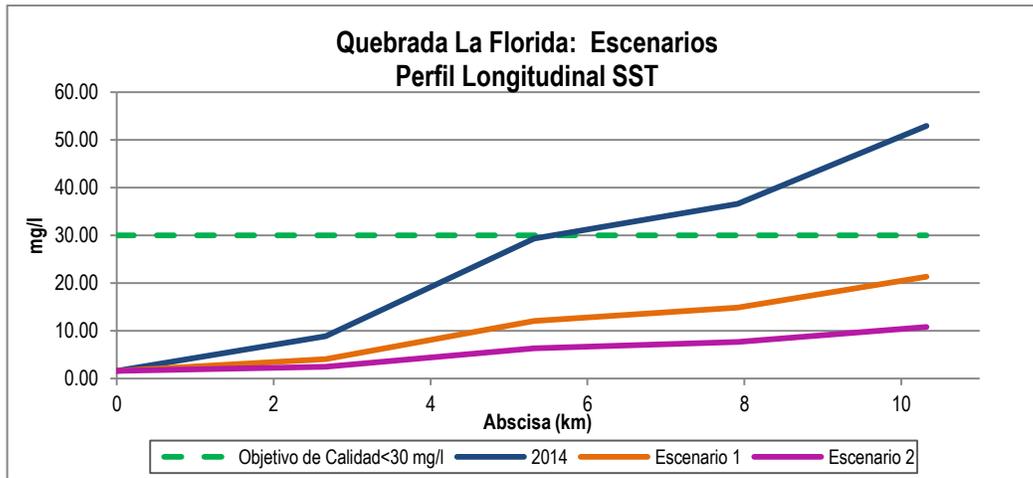


Figura 10. Resultados de la aplicación de los escenarios de saneamiento: SST

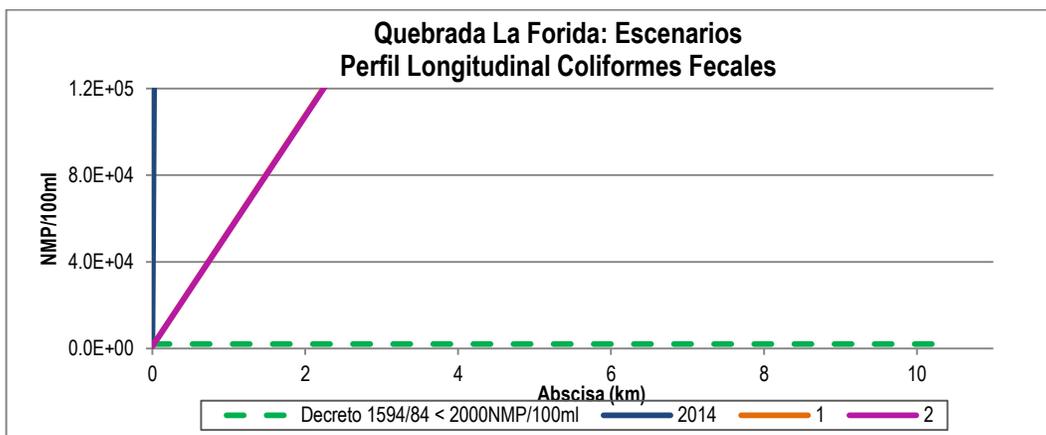
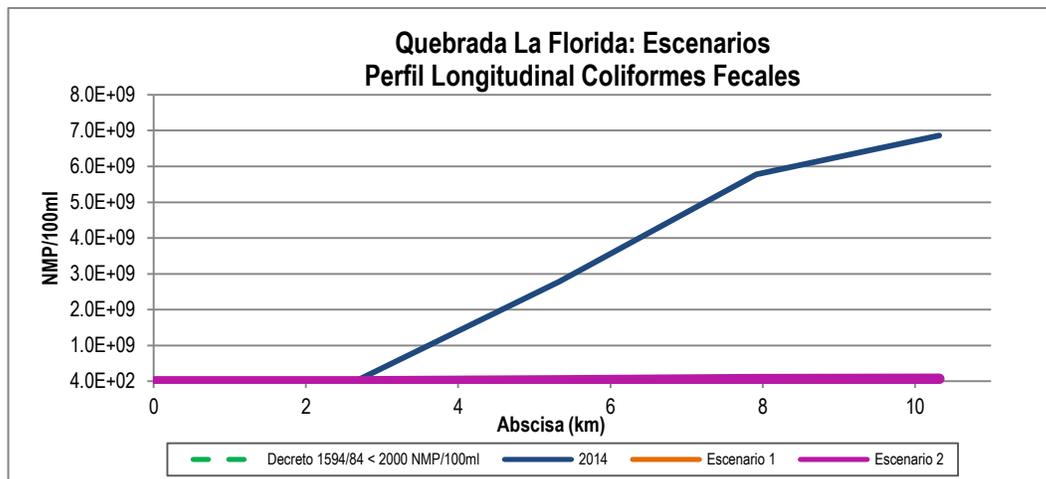


Figura 11. Resultados de la aplicación de los escenarios 1 y 2 con desinfección para los CF

7.4 OBSERVACIONES DE LOS RESULTADOS

- **DBO**

- Cumplimiento de los Objetivos de Calidad, CRQ.** En los primeros 6 kilómetros del tramo en análisis, el modelo de simulación calibrado para el año 2015 presenta valores por debajo de 20 mg/IO₂, valor propuesto dentro de los Objetivos de Calidad por la Corporación para la DBO. A partir del kilómetro 6 en adelante, la DBO asciende a un máximo de 33.13 mg/IO₂ (estación Champagnat) donde se encuentra la zona de mayor degradación en la quebrada. Con la reducción de un 80% de la DBO en los vertimientos analizados, este parámetro cumple con el Objetivo de Calidad menor a 20 mg/IO₂.
- Escenarios de saneamiento.** La reducción del 60% y 80% en los niveles de este parámetro para los vertimientos involucrados, evidencia una reducción del 46% y 77% entre el promedio de valores de la condición actual y la obtenida en los escenarios 1 y 2 respectivamente.

Tabla 28. Porcentaje de reducción de la DBO, quebrada La Florida: Escenario 1

| Abscisa (m) | DBO: Condición año 2015 (mg/IO ₂) | Escenario 1 (mg/IO ₂) | % de Reducción |
|-------------|--|--------------------------------------|-------------------|
| 0 | 0.61 | 0.61 | 0.00% |
| 2.66 | 8.59 | 4.02 | 53.17% |
| 5.32 | 32.05 | 13.24 | 58.68% |
| 7.916 | 33.13 | 13.58 | 59.01% |
| 10.32 | 25.68 | 10.51 | 59.09% |

Tabla 29. Porcentaje de reducción de la DBO, quebrada La Florida: Escenario 2

| Abscisa (m) | DBO: Condición año 2015 (mg/IO ₂) | Escenario 2 (mg/IO ₂) | % de Reducción DBO |
|-------------|--|--------------------------------------|--------------------------|
| 0 | 0.61 | 0.61 | 0.00% |
| 2.66 | 8.50 | 2.49 | 70.95% |
| 5.32 | 35.50 | 6.97 | 78.26% |
| 7.916 | 31.60 | 7.05 | 78.73% |
| 10.32 | 25.80 | 5.44 | 78.84% |

- **SST**

a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ. Para la condición inicial, año 2015, se cumplen los objetivos de calidad menor a 30 mg/l en los primeros 5.3 kilómetros del tramo en análisis. Luego el tramo anterior, estos ascienden a un nivel máximo de 52.9 mg/l al final de la quebrada La Florida (estación Desembocadura). Con remociones del 60% y 80% en los vertimientos directos hacia la quebrada, se estarían cumpliendo los Objetivos de Calidad propuestos por la CRQ.

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

Tabla 30. Porcentaje de reducción de los SST, quebrada La Florida: Escenario 1

| Abscisa (m) | SST: Condición año 2015 (mg/l) | Escenario 1 (mg/l) | % de Reducción |
|-------------|--------------------------------|--------------------|----------------|
| 0 | 1.62 | 1.62 | 0.00% |
| 2.66 | 8.86 | 4.06 | 54.16% |
| 5.32 | 29.37 | 12.11 | 58.76% |
| 7.916 | 36.59 | 14.91 | 59.24% |
| 10.32 | 52.90 | 21.36 | 59.63% |

Tabla 31. Porcentaje de reducción de los SST, quebrada La Florida: Escenario 2

| Abscisa (m) | SST: Condición año 2015 (mg/l) | Escenario 2 (mg/l) | % de Reducción |
|-------------|--------------------------------|--------------------|----------------|
| 0 | 1.62 | 1.62 | 0.00% |
| 2.66 | 8.86 | 2.46 | 72.21% |
| 5.32 | 29.37 | 6.36 | 78.34% |
| 7.916 | 36.59 | 7.69 | 78.99% |
| 10.32 | 52.90 | 10.84 | 79.50% |

- **OD**

a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ. Para la condición actual (año 2015) no se cumplen los objetivos de calidad mayores a 5mg/l O₂ sobre los siguientes dos tramos: del kilómetro 2.6 al 4.5 y del kilómetro 7.5 al 8.3, con valores mínimos de 4.5mg/l O₂ para el primer tramo y de 4.9 para el segundo tramo. En caso de realizarse tratamientos con remociones de hasta un 80% en

los vertimientos sobre la quebrada La Florida, los Objetivos de Calidad propuestos por la CRQ no se estarían cumpliendo igualmente para el primer tramo.

- b) Escenario 2 de saneamiento.** Con esta remoción levemente es posible evidenciar la capacidad de amortiguación de los agentes contaminantes producidos por los diferentes vertimientos hacia la quebrada La Florida, para lo cual se tendrían un aumento del 4.5% de oxígeno disuelto en la estación de mayor impacto (Champagnat).

Tabla 32. Porcentaje de reducción de los OD, quebrada La Florida: Escenario 1

| Abscisa (m) | OD: Condición año 2015 (mg/l O ₂) | Escenario 1 (mg/l) | % de Reducción |
|-------------|---|--------------------|----------------|
| 0 | 7.14 | 7.14 | 0.00% |
| 2.66 | 4.77 | 4.85 | 1.48% |
| 5.32 | 5.23 | 5.28 | 0.87% |
| 7.916 | 4.98 | 5.15 | 3.38% |
| 10.32 | 5.70 | 5.78 | 1.44% |

Tabla 33. Porcentaje de reducción de los OD, quebrada La Florida: Escenario 2

| Abscisa (m) | OD: Condición año 2015 (mg/l O ₂) | Escenario 2 (mg/l) | % de Reducción |
|-------------|---|--------------------|----------------|
| 0 | 7.14 | 7.14 | 0.00% |
| 2.66 | 4.77 | 4.87 | 1.97% |
| 5.32 | 5.23 | 5.30 | 1.16% |
| 7.916 | 4.98 | 5.21 | 4.46% |
| 10.32 | 5.70 | 5.81 | 1.91% |

- **pH**

a) Cumplimiento Objetivos de Calidad CRQ. No se cumplen los objetivos de calidad mayores a 6.5 unidades en el primer tramo de estudio sobre la quebrada La Florida. Su valor es de 5.17 unidades, menor al establecido por la normatividad ambiental.

b) Escenarios de saneamiento. No se aprecia aumento significativo de este parámetro con la aplicación de los escenarios de saneamiento propuestos.

- **Coliformes Fecales**

a) Cumplimiento Decreto 1594/84. El primer punto o estación analizada (Variante Chagualá) posee un valor menor a 2000 NMP/100ml requerido por la normatividad ambiental para la destinación del recurso para diferentes usos. A partir de este punto en adelante, las condiciones de calidad en la quebrada La Florida desmejoran llegando a tener valores entre los $1.44E+07$ y $6.86E+09$ NMP/100ml, por lo cual no se cumple con lo establecido por el Decreto 1594/84 en la destinación del recurso para consumo humano y doméstico y otros usos.

b) Escenario 2 de saneamiento. Con la reducción de un 99% de los CF en los vertimientos directos hacia la quebrada La Florida, mejora levemente las condiciones de calidad en esta, observándose una disminución entre la condición actual y la simulada (escenario 2) de hasta un 99.04%; los CF pasan de $3.861E+09$ a $1.5E+08$ NMP/100ml.

Tabla 34. Porcentaje de reducción de los CF, quebrada La Florida: Escenario 2

| Abscisa (m) | Condición año 2015 (NMP/100ml) | Escenario 2 (NMP/100ml) | % de Reducción |
|-------------|--------------------------------|-------------------------|----------------|
| 0 | $9.20E+02$ | $9.20E+02$ | 0.00% |
| 2.66 | $1.44E+07$ | $1.42E+05$ | 99.01% |
| 5.32 | $2.78E+09$ | $2.74E+07$ | 99.01% |
| 7.916 | $5.78E+09$ | $5.69E+07$ | 99.02% |
| 10.32 | $6.86E+09$ | $6.59E+07$ | 99.04% |

8. CONCLUSIONES

- Se contó con una campaña de monitoreo con propósitos de calibración en cinco (5) estaciones sobre la quebrada La Florida. Según los resultados, al aplicar el modelo puede observarse la poca asimilación de la quebrada La Florida en autodepurar los contaminantes que recibe a través de las diferentes descargas de aguas residuales. Cada parámetro físico-químico y bacteriológico analizado a través de la corriente principal, evidenciaron una quebrada contaminada.
- En general, se tiene una quebrada dentro del perímetro urbano en malas condiciones de calidad, donde cerca de un 50% del caudal en la quebrada es atribuido a las diferentes descargas de aguas residuales a lo largo de ella (antes del perímetro urbano 100 l/s y al desembocar con el río Quindío, 260 l/s). La quebrada La Florida no posee ningún afluente natural importante que minimice de cierta forma la contaminación allí presente. Como consecuencia de ello, la quebrada por si sola con es capaz de recuperarse (autodepuración).
- Sin embargo, a partir del kilómetro 4 hasta el final del tramo de estudio (desembocadura con el río Quindío), es posible mejorar las condiciones de calidad del agua aplicando una remoción del 80% a los vertimientos de las aguas residuales que se distribuyen a lo largo de la quebrada La Florida y que vierten directamente a esta, cumpliendo de esta manera con los objetivos de calidad propuestos para la DBO, OD y SST.
- De acuerdo a los resultados arrojados por el modelo de simulación, es posible comprender el impacto causado por los contaminantes en la calidad del agua de la quebrada La Florida. De acuerdo a lo anterior, es posible planificar o diseñar obras de tratamiento puedan reducir estos contaminantes a un nivel aceptable.
- Se aconseja continuar con la realización de muestreos sincronizados y reportes de caudal instantáneo (época de estiaje) tomados al menos en dos puntos o tramos señalados dentro del presente estudio, como soporte para la validación del modelo.

9. BIBLIOGRAFIA

- Adela L.; Gloria G, (2010). Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Universidad Nacional de Colombia.
- Bustamante & Toro, (2011). Estudio de calidad ambiental en la quebrada La Florida, Unidad de Manejo de Cuenca del río Quindío. Armenia – Quindío, Colombia. Universidad del Quindío-Programa Licenciatura en Biología y Educación Ambiental.
- Chapra, S. (1997). Surface water-quality modeling. The McGraw Hill Inc. NY
- CRQ, CARDER, CVC, UAESPNN, IDEAM, GTZ. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río La Vieja- Resumen documento plan 2008-2019.
- CRQ, CARDER, CVC, Universidades del Valle, Tecnológica de Pereira y del Quindío, Definición línea base, Ordenación del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río la Vieja Mediante el Desarrollo de una Metodología con Criterios de Eficiencia Económica e Implementación de Herramientas de Apoyo a la Decisión, 2011.
- Ven Te Chow. Hidrología Aplicada: Bogotá, McGraw-Hill, 1988.
- www.epa.gov/Athens/wwqtsc/html/qual2k.htm.