



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO PARA EVALUAR LA INCIDENCIA DEL LIXIVIADO  
GENERADO EN EL CARRASCO, SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA  
DE LA QUEBRADA LA IGLESIA Y UN TRAMO DEL RÍO DE ORO,  
EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.**

**Tesis de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil  
Con profundización en Recursos Hídricos y Suelos**

**JAVIER MAURICIO CARRILLO QUINTERO**

**Director  
Ph.D. Diego Martín Oviedo Salcedo**

**Visto Bueno Director \_\_\_\_\_**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2016**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Segundo Jurado**

---

**Tercer Jurado**

**Bucaramanga, agosto de 2016**

## **DEDICATORIA**

Con especial cariño, agradezco a:

Dios por llevarme a los lugares correctos en el momento preciso.

Mi familia por la formación espiritual y personal.

A mi esposa por estar siempre a mi lado en cada proyecto que inicio, por su comprensión y su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente estudio fue posible desarrollarlo gracias al aporte de las siguientes personas e instituciones:

A la Doctora Consuelo Ordoñez de Rincón, Directora del Área Metropolitana de Bucaramanga 2012 – 2015, por el amor y la protección a los recursos naturales; por permitir el desarrollo de esta investigación; y por su confianza depositada en mí.

A la Dirección General de Investigaciones por apoyar esta investigación mediante el valioso aporte científico, económico, uso de la infraestructura de la universidad; y por fomentar la investigación en el conociendo del comportamiento de los contaminantes en el agua.

Al director del proyecto Diego Martín Oviedo Salcedo Ing. PhD, por su persistencia y apoyo.

A los ingenieros y amigos Carlos Alberto Sierra Ramírez, Elkin Hernán Cataño y Adrián Emilio Rizo Ibáñez, quienes participaron mediante las profundas enseñanzas sobre el comportamiento de las corrientes hídricas en los aspectos de cantidad y calidad, y por la contribución en el direccionamiento del desarrollo del presente estudio.

Al equipo técnico de la Subdirección Ambiental y jurídico del Área Metropolitana de Bucaramanga, por su colaboración y excelente gestión.

## GLOSARIO

1.	GENERALIDADES	4
1.1	Planteamiento del problema .....	4
1.2	Alcance del estudio.....	4
1.3	Zona del Proyecto.....	4
1.4	Objetivos.....	6
1.4.1	Objetivo general	6
1.4.2	Objetivos específicos	6
1.5	Antecedentes.....	6
2	MARCO TEÓRICO	7
2.1	Característica del lixiviado .....	7
2.2	Cantidad de lixiviado.....	8
2.3	Parámetros requeridos para la modelación.....	8
2.3.1	Sustancias convencionales	8
2.3.2	Sustancias No Convencionales	10
2.4	Ensayo con trazador.....	11
2.5	Marco geográfico.....	12
3	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	16
3.1	Caracterización de la cuenca y zona de estudio .....	17
3.2	Descripción geológica .....	17
3.3	Estaciones en el área de estudio .....	17
3.4	Curvas Intensidad – Frecuencia – Duración (IDF).....	18
3.4.1	Vargas – Díaz Granados	19
3.4.2	Hargreaves	20
3.4.3	Bell	20
3.5	Caudal de diseño (Qdis) .....	26
3.5.1	Delimitación cuenca del Río de Oro	27
3.6	Curva Numero (CN).....	28
3.7	Valor de Tiempos de Desfase (T <sub>i</sub> ).....	31
3.8	Modelo hidrológico HEC-HMS .....	32
3.8.1	Modelo conceptual HEC-HMS cuenca del Río de Oro	32
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MONITOREO DE AGUA SUEPERFICIAL Y DE VERTIMIENTOS	37
5	MODELO DE SIMULACIÓN DE LA QUEBRADA LA IGLESIA	42
5.1	GENERALIDADES DEL SISTEMA HÍDRICO A MODELAR.....	43
5.1.1	Características de los cuerpos de agua localizados en el área de estudio	43
5.1.2	Información sobre calidad del agua	44
5.2	SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO .....	45
5.2.1	Selección de los parámetros por simular	47
5.3	SEGMENTACIÓN (TRAMOS) DE LOS CUERPOS DE AGUA.....	48
5.4	Resultados de prueba de trazadores.....	53
5.5	Calibración del modelo.....	59
5.6	Estrategia de modelación.....	59
5.6.1	Estrategia de modelación de contaminantes convencionales	61
5.6.2	Estrategia de modelación de sustancias de interés sanitario	62

6	MODELACIÓN DE LOS CONTAMINANTES CONVENCIONALES Y TÓXICOS	70
6.1	Generación de escenario base para la calibración .....	70
6.2	Calibración del modelo y cálculo de las constantes biocinéticas .....	80
6.2.1	Calibración del modelo para los parámetros convencionales .....	81
6.3	Generación de escenarios de simulación sustancias convencionales .....	86
6.3.1	Escenario DBO5 .....	95
6.3.2	Escenario Oxígeno Disuelto .....	98
6.3.3	Escenario Sólidos Suspendidos Totales .....	101
6.4	Generación de escenarios de simulación sustancias no convencionales .....	103
6.4.1	Escenario Mercurio .....	106
6.4.2	Escenario modelamiento Cromo .....	108
7	APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS	110
7.1	METODOLOGÍA ESTUDIO GEOFÍSICO.....	111
7.1.1	VISITAS DE CAMPO .....	111
7.1.2	TRABAJO DE CAMPO .....	111
7.1.3	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	112
7.1.4	VALORACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	112
7.2	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	113
7.2.1	Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) .....	113
7.2.2	Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo (SDET) .....	115
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
9	DOCUMENTOS DE CONSULTA	126
10	ANEXOS	128

### **CONTENIDO DE TABLAS**

Tabla 1.	Composición lixiviados de rellenos sanitarios fases Acética y Metanogénicas .....	8
Tabla 2.	Puntos de monitoreo columna de agua y de sedimentos .....	13
Tabla 3.	Puntos de monitoreo vertimientos líquidos .....	14
Tabla 4.	Estaciones utilizadas en el modelo hidrológico.....	18
Tabla 5.	Curvas de escorrentía para los complejos de suelo cobertura CN.....	30
Tabla 6.	Resumen de caudal (m <sup>3</sup> /s) permanente para el Río Oro .....	34
Tabla 7.	Caudal Medio y Mínimo. ....	36
Tabla 8.	Sustancias analizadas en laboratorio. ....	39
Tabla 9.	Nombre de los puntos de vertimientos analizados. ....	48
Tabla 10.	Nombre de los puntos sobre las corrientes hídricas .....	49
Tabla 11.	Distancias entre puntos de monitoreo en las corrientes hídricas .....	49
Tabla 12.	Distancias entre puntos de monitoreo y vertimientos.....	50
Tabla 13.	Distancia de ubicación de los puntos de medición de la Rodamina WT en la Quebrada La Iglesia y Río de Oro .....	54
Tabla 14.	Datos de lectura del trazador en la Quebrada La Iglesia para el primer punto de control.....	54
Tabla 15.	Datos de lectura del trazador en la Quebrada La Iglesia para el segundo punto de control.....	55

Tabla 16. Datos de lectura del trazador en el Río de Oro para el primer punto de control. .	57
Tabla 17. Datos de lectura del trazador en el Río de Oro para el segundo punto de control. .....	57
Tabla 18. Raíz del error cuadrático promedio (RMSE) para las sustancias de calidad del agua ajustadas con el modelo Qual2Kw.....	82
Tabla 19. Error relativo de los puntos de control en Quebrada La Iglesia y Río de Oro. ....	83
Tabla 20. Sustancias para autocalibrar. ....	85
Tabla 21. Escenarios de modelamiento sustancias convencionales. ....	87
Tabla 22. Porcentajes de remoción presuntiva de la nueva PTLX. ....	93
Tabla 23. Concentraciones de algunas sustancias de interés en el tren de tratamiento de la nueva PTLX.....	94
Tabla 24. Escenarios de modelamiento sustancias no convencionales. ....	104

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Tramo 1 Longitud de interés de la Quebrada La Iglesia .....	5
Figura 2. Tramo 2 Longitud de interés sobre Río de Oro.....	5
Figura 3. Subcuenca del Río de Oro.....	13
Figura 4. Localización geográfica de las cuencas de la Quebrada La Iglesia y Río de Oro	17
Figura 5. Estaciones usadas en el modelo hidrológico .....	18
Figura 6. Modelo Ráster de la cuenca del Río de Oro.....	27
Figura 7. Modelo de direcciones de flujo de la cuenca del Río de Oro.....	28
Figura 8. Mapa uso de suelo cuenca del Río de Oro .....	29
Figura 9. Distribución espacial de CN en la cuenca del Río de Oro .....	31
Figura 10. Modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del Río de Oro .....	33
Figura 11. Áreas de influencia de las estaciones meteorológicas determinadas mediante Polígonos de Thiessen .....	33
Figura 12. Etapas en el desarrollo de un estudio de modelación de la calidad del agua .....	42
Figura 13. Esquema de balance de masa según Pelletier and Chapra (2005) .....	45
Figura 14. Esquema hídrico del sistema en estudio.....	51
Figura 15. Numeración de tramos del sistema hídrico Esquema isométrico modelo WASP 7.52 .....	53
Figura 16. Estrategia de modelación .....	60
Figura 17. Ensamblaje del modelo WASP .....	63
Figura 18. Tren de tratamiento de la planta de lixiviado.....	94
Figura 19. Distribución de los SEDT y TRE realizados en la zona de estudio .....	112
Figura 20. Interpretación de resultados de la TRE01 .....	114
Figura 21. Interpretación de resultados de la TRE02 .....	115
Figura 22. Interpretación de resultados de la TRE03 .....	115

## CONTENIDO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva IDF Estación Picacho EL.....	21
Gráfica 2. Curva IDF Estación La Galvicia .....	22
Gráfica 3. Curva IDF Estación La Floresta .....	22
Gráfica 4. Curva IDF Estación Piedecuesta Granja .....	23
Gráfica 5. Curva IDF Estación Bucaramanga IDEAM .....	23
Gráfica 6. Curva IDF Estación Llano Grande .....	24
Gráfica 7. Curva IDF Estación Aeropuerto Palonegro.....	24
Gráfica 8. Curva IDF Estación Tope EL.....	25
Gráfica 9. Curva IDF Estación Laguna LA.....	25
Gráfica 10. Curva IDF Estación Palogordo.....	26
Gráfica 11. Porcentaje de cargas aportadas por entidades o empresas en la Quebrada La Iglesia.....	52
Gráfica 12. Porcentaje de cargas aportadas por entidades o empresas en Río de Oro. ....	52
Gráfica 13. Tiempo de viaje Quebrada La Iglesia.....	58
Gráfica 14. Tiempo de viaje quebrada para el Río de Oro .....	59

Gráfica 15. Comportamiento del flujo en la Quebrada La Iglesia.....	71
Gráfica 16. Comportamiento de la velocidad en la Quebrada La Iglesia.....	71
Gráfica 17. Comportamiento de la profundidad en la Quebrada La Iglesia.....	72
Gráfica 18. Comportamiento de la temperatura en la Quebrada La Iglesia .....	72
Gráfica 19. Comportamiento del pH en la Quebrada La Iglesia .....	73
Gráfica 20. Comportamiento del oxígeno disuelto en la Quebrada La Iglesia.....	73
Gráfica 21. Comportamiento de la DBO rápida en la Quebrada La Iglesia .....	74
Gráfica 22. Comportamiento de los Coliformes Fecales en la Quebrada La Iglesia.....	74
Gráfica 23. Comportamiento del Nitrógeno Total en la Quebrada La Iglesia .....	75
Gráfica 24. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos en la Quebrada La Iglesia .....	75
Gráfica 25. Comportamiento del flujo en el Río de Oro .....	76
Gráfica 26. Comportamiento de la velocidad del agua en el Río de Oro .....	76
Gráfica 27. Comportamiento de la profundidad en el Río de Oro .....	77
Gráfica 28. Comportamiento de la temperatura del agua en el Río de Oro .....	77
Gráfica 29. Comportamiento del pH en el Río de Oro.....	78
Gráfica 30. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en el Río de Oro .....	78
Gráfica 31. Comportamiento de la DBO5 en el Río de Oro.....	79
Gráfica 32. Comportamiento de los Coliformes Fecales en el Río de Oro .....	79
Gráfica 33. Comportamiento del Nitrógeno Total en el Río de Oro .....	80
Gráfica 34. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos Totales en el Río de Oro .....	80
Gráfica 35. Comportamiento de la DBO <sub>5</sub> en la Quebrada La Iglesia para todos los escenarios.....	95
Gráfica 36. Comportamiento de la DBO5 en la Quebrada La Iglesia para los escenarios 1, 2, 4, 5, 6. ....	96
Gráfica 37. Comportamiento de la DBO5 en la Quebrada La Iglesia para los escenarios 2, 4, 5, 6. ....	96
Gráfica 38. Comportamiento de la DBO5 en el Río de Oro para todos los escenarios.....	97
Gráfica 39. Comportamiento de la DBO5 en Río de Oro para los escenarios del 1 al 5. ...	98
Gráfica 40. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la Quebrada La Iglesia para todos los escenarios.....	99
Gráfica 41. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en el Río de Oro para todos los escenarios.....	100
Gráfica 42. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos en la Quebrada La Iglesia para todos los escenarios .....	101
Gráfica 43. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos en la Quebrada La Iglesia para los escenarios para una concentración inferior a 200 mg/l.....	102
Gráfica 44. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos en el Río de Oro para todos los escenarios.....	103
Gráfica 45. Concentración de fenoles en todos los vertimientos monitoreados.....	105
Gráfica 46. Modelamiento del Mercurio elemental en la Quebrada La Iglesia. ....	106
Gráfica 47. Modelamiento del Mercurio elemental en el Río de Oro. ....	107
Gráfica 48. Modelamiento del Cromo hexavalente en la Quebrada La Iglesia. ....	108
Gráfica 49. Modelamiento del Cromo hexavalente en el Río de Oro. ....	109

## CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1.	$X_t = \mu + \alpha Y_t$ .....	19
Ecuación 2.	$I = \alpha \frac{T_r^b}{t^c} M^d$ .....	19
Ecuación 3.	$X = K \left(\frac{d}{60}\right)^{-\frac{3}{4}} T_r^{\frac{1}{6}}$ .....	20
	$K = \frac{1}{24^{0.25} T_r^{\frac{1}{6}}}$ .....	20
Ecuación 4.	$P_{T_r}^t = (0.35 \ln T_r + 0.76)(0.54 t^{0.25} - 0.5) P_2^{60}$ .....	20
Ecuación 6.	.....	31
Ecuación 7.	$T_l = \frac{L^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * Y^{0.5}}$ .....	31
Ecuación 8.	$Q = (\bar{P} - \bar{E}) * A_i$ .....	34
Ecuación 9.	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}}$ .....	81

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ESTUDIO PARA EVALUAR LA INCIDENCIA DEL LIXIVIADO GENERADO EN EL CARRASCO, SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA QUEBRADA LA IGLESIA Y UN TRAMO DEL RÍO DE ORO, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

AUTOR(ES): JAVIER MAURICIO CARRILLO QUINTERO

FACULTAD: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): DIEGO MARTÍN OVIEDO SALCEDO

### RESUMEN

El sitio de disposición final de residuos sólidos el Carrasco ha sido considerado como una fuente contaminante importante en emisiones atmosféricas y en vertimientos líquidos principalmente. Sin embargo, en el seguimiento ambiental realizado por parte del Área Metropolitana de Bucaramanga como autoridad ambiental urbana, se evaluó la necesidad de elaborar un estudio de modelamiento de calidad del agua que permitiera conocer el comportamiento del lixiviado vertido a la quebrada la Iglesia, en diferentes escenarios naturales y de operación de la planta de tratamiento de lixiviados del Carrasco que pudieran presentarse. Para elaborar el estudio, se realizó la identificación de los aportantes de vertimientos líquidos en el tramo de interés de la quebrada la Iglesia y el río de Oro, se seleccionaron los modelos de calidad y cantidad de agua, las variables objeto de modelamiento, y mediante la caracterización fisicoquímica y bacteriológica de los vertimientos, de la columna de agua y del sedimento, se obtuvo la información de línea base para el modelamiento de la calidad del agua de variables convencionales y no convencionales, en un tramo de 8.6 kilómetros sobre las dos fuentes hídricas.

Como resultados del estudio, fue posible medir las grandes cargas de materia orgánica y de sólidos aportadas por los vertimientos de la red de alcantarillado municipal, los cuales influyen de manera importante sobre la calidad del agua de las corrientes hídricas. Se modelaron las variables según los objetivos de calidad de la corriente (oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno) y el mercurio y el cromo como sustancias de interés sanitario (variables no convencionales). Adicionalmente, se realizaron tomografías de resistividad eléctrica y sondeos electromagnéticos en dominio en el tiempo en las celdas de disposición de residuos sólidos, con el fin de poder conocer la ubicación del biogás, y la posible pluma contaminante del lixiviado en los flujos subterráneos.

### PALABRAS CLAVES:

Modelamiento calidad agua qual2kw WASP Carrasco lixiviado HecRAs quebrada Iglesia

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: STUDY TO ASSESS THE IMPACT OF LEACHATE GENERATED IN CARRASCO ON WATER QUALITY OF CREEK LA IGLESIA AND A STRETCH OF RIO DE ORO, IN THE AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

AUTHOR(S): JAVIER MAURICIO CARRILLO QUINTERO

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: DIEGO MARTÍN OVIEDO SALCEDO

### ABSTRACT

The site disposal of solid waste Carrasco has been considered as a major source of pollution in air emissions and liquid effluents mainly. However, in the environmental monitoring carried out by the Area Metropolitana de Bucaramanga and urban environmental authority, the need to develop a study modeling of water quality that would know the behavior of the leachate discharge into the creek La Iglesia in different evaluated natural and operation of the treatment plant leachate Carrasco scenarios that might arise. To prepare the study, identifying contributors of liquid discharges in the section of interest in Quebrada Church and Río de Oro was made, models of quality and quantity of water is selected, the variables object modeling, and by physicochemical and bacteriological characterization of dumps, of the water column and sediment, the baseline information for the modeling of water quality conventional variables and unconventional, in a stretch of 8.6 kilometers on the two sources was obtained water. As results of the study, it was possible to measure large loads of organic matter and solids provided by the discharges of municipal sewage system, which have an important influence on the water quality of water flows. variables were modeled according the quality objectives of the water (dissolved oxygen, biochemical oxygen demand) and mercury and chromium as substances of health interest (nonconventional variables). Additionally, electrical resistivity tomography and electromagnetic surveys were conducted in the time domain in the cells of solid waste disposal, in order to know the location of biogas and possible leachate contaminant plume in the groundwater flow.

### KEYWORDS:

Modeling quality water QUAL2KW WASP Carrasco leached HecRas creek Iglesia

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## INTRODUCCIÓN

El presente estudio se elaboró siempre bajo la directriz de poder contribuir al entendimiento del comportamiento de los contaminantes generados en el sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco, ya que este sitio ha sido catalogado como un importante punto de generación de impactos negativos para el Área Metropolitana de Bucaramanga - AMB. Sin embargo, en las entidades de control del Estado no se había abordado la situación de una manera, que permitiera conocer técnicamente lo que ocurre una vez se realiza el vertimiento del lixiviado sobre la quebrada La Iglesia, y de la misma manera, que permita también conocer qué ocurriría bajo diferentes escenarios ante fenómenos naturales y de operación de la planta de tratamiento de lixiviados, como el cambio de caudales de la fuente receptora, cambio en las concentraciones del lixiviado vertido, eliminación de vertimientos de la red de alcantarillado municipal, caudal en condiciones de fenómenos críticos climatológicos, entre otras.

Debido a que el proyecto consiste en la aplicación de ecuaciones de modelamiento de la calidad del agua, se utilizaron los modelos adecuados que permiten analizar y predecir el comportamiento de las sustancias principales generadas en El Carrasco, los cuales permitieron conocer las concentraciones máximas de los contaminantes en diferentes tramos de las corrientes hídricas analizadas, y evaluar el cumplimiento de los objetivos de calidad para las mismas.

Los modelos creados permitirán al Área Metropolitana de Bucaramanga - AMB, realizar seguimiento a la calidad del agua de las dos corrientes objeto de interés del estudio, Quebrada La Iglesia y Río de Oro y a los usuarios que realizan vertimientos líquidos a las mismas. De igual manera permitirá tener un conocimiento a las entidades de control sobre el comportamiento verdadero del lixiviado y cómo influyen los parámetros contenidos en el lixiviado sobre la calidad del agua de la quebrada La Iglesia y el Río de Oro. Se espera igualmente, que la comunidad pueda tener acceso a los resultados del modelamiento y pueda conocer el destino y transporte de los contaminantes de interés.

Así mismo, se estima que El Carrasco generará lixiviado aproximadamente durante 15 a 20 años, tiempo en el cual el uso de los modelos utilizados podrá soportar la toma de decisiones que permitan definir si el grado de tratamiento del lixiviado es el adecuado o por el contrario se requiere de unidades de tratamiento adicionales.

Debido a que los resultados del estudio son de interés general en la región, estos fueron socializados en el Área Metropolitana de Bucaramanga, mediante una presentación técnica en la cual fueron invitadas las siguientes entidades e instituciones, La Procuraduría Delegada para Asuntos Ambientales y Agrarios, a la Contraloría Municipal, A la Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga, a las Personerías de los cuatro municipios que conforman el área metropolitana, a la Defensoría del Pueblo, a la Empresa de Alcantarillado de Santander, y a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 Planteamiento del problema**

El desconocimiento del comportamiento de los contaminantes líquidos presentes en el lixiviado vertido a la Quebrada La Iglesia y el Río de Oro provenientes de El Carrasco ha generado diferentes apreciaciones por parte de entidades Estatales y de la población en general, presumiendo una afectación ambiental a las corrientes hídricas. Sin embargo, la posible afectación no ha sido medida ni cuantificada mediante estudios que permitan conocer cómo reaccionan las sustancias generadas en el lixiviado del Carrasco y cómo es su destino en la columna de agua y en el sedimento.

Con el desarrollo de este proyecto de modelamiento de calidad del agua, el AMB podrá conocer con una mayor precisión los efectos que pueden presentarse en la corriente una vez es vertido el lixiviado; por ello y considerando que se trata del desarrollo de actividades misionales del AMB en cumplimiento de sus funciones, se consideró necesario adelantar el presente estudio.

### **1.2 Alcance del estudio**

El presente estudio buscó modelar la calidad del agua en los parámetros correspondientes a lo establecido en los Objetivos de Calidad de las corrientes hídricas superficiales para el Tramo 5 Río de Oro, RO-4A – RO-01, según Acuerdo 1075 del 15 de diciembre de 2006 de la CDMB; y adicionalmente el Cromo, el fenol y el Mercurio. De igual manera, este estudio desea evaluar y cuantificar la incidencia de los parámetros de interés en el medio acuático para otorgar a la autoridad ambiental una herramienta que permita la toma de decisiones informadas en el ejercicio propio de sus funciones, y en el control y evaluación de las corrientes hídricas y vertimientos. De la misma manera, permitirá conocer al AMB las condiciones presentes y estimar escenarios futuros sobre la calidad del efluente del sistema de tratamiento de lixiviados. Por lo tanto, se hace necesario la generación de estrategias de trabajo colaborativo entre la universidad y el Estado, de manera que se generen soluciones pertinentes a problemáticas del entorno regional.

En principio, el estudio planteó modelar aproximadamente 2200 metros de la Quebrada La Iglesia, y 2000 metros sobre el Río de Oro; sin embargo, debido a la magnitud del aporte de carga de la quebrada la Iglesia en el río de Oro, se modeló 8827 metros aproximadamente como se aprecia en la figura 1 y 2.

### **1.3 Zona del Proyecto**

Como se indicó, el estudio se desarrolló en los últimos 2286.5 metros de la Quebrada La Iglesia, medido desde antes del Carrasco hasta la confluencia con el Río de Oro; y en 6541.6 metros del Río de Oro, contados desde antes de la confluencia de la Quebrada La Iglesia, para un total de 8827 metros en total.

Figura 1. Tramo 1 Longitud de interés de la Quebrada La Iglesia

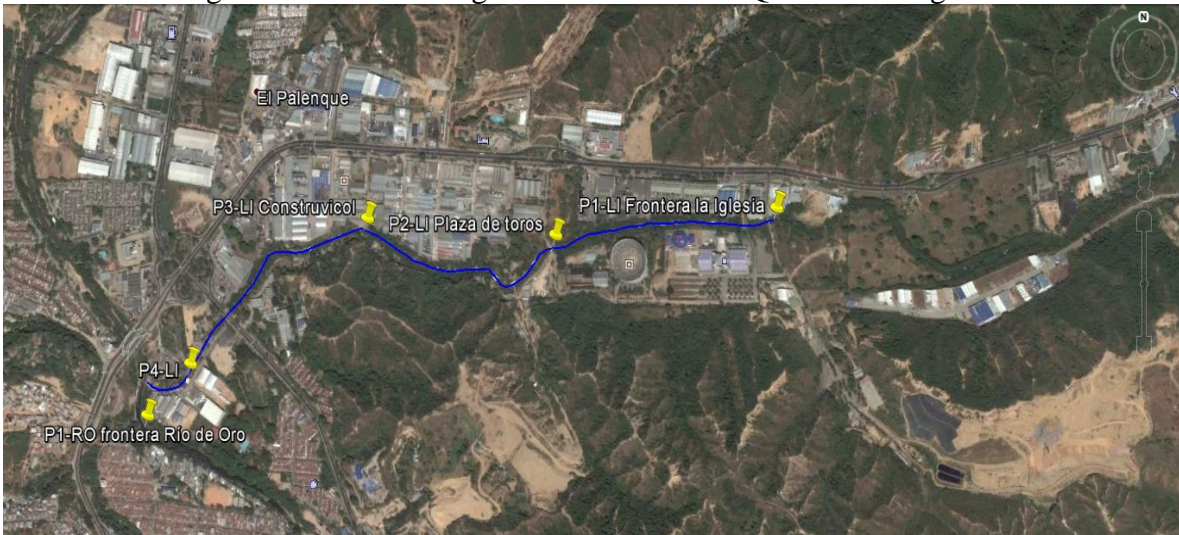
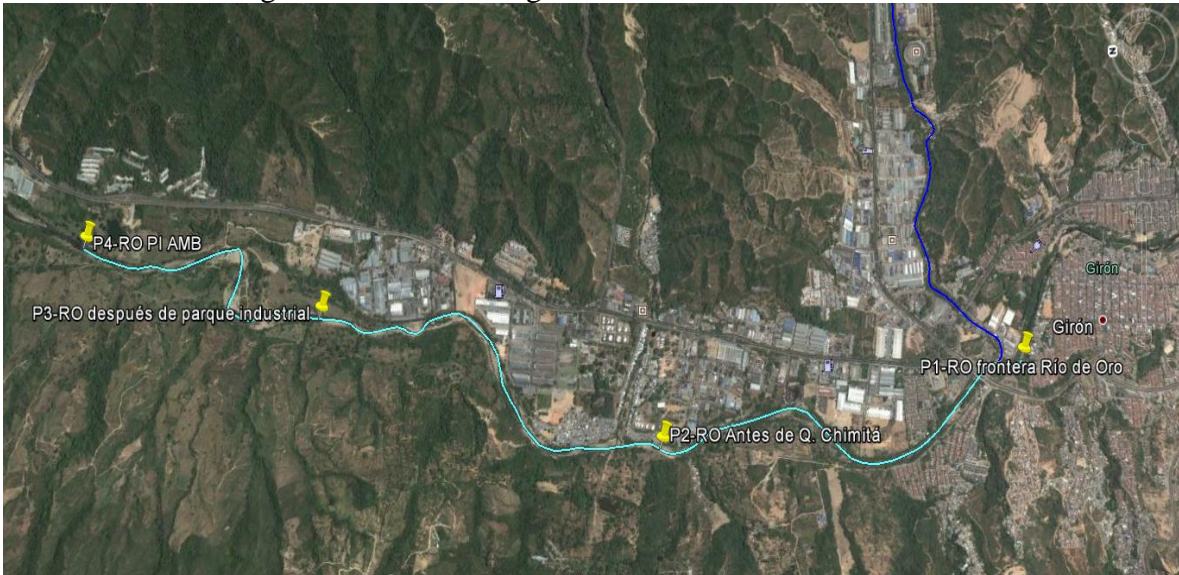


Figura 2. Tramo 2 Longitud de interés sobre Río de Oro



El tramo analizado obedece al interés existente sobre el comportamiento de las sustancias vertidas por el sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco. Así mismo, el tramo analizado corresponde a una zona donde se realizan vertimientos de la red de alcantarillado de los Municipios de Bucaramanga y de Girón por parte de la Empresa de Alcantarillado de Santander - EMPAS, por lo que las aguas residuales vertidas corresponden a agua doméstica y no doméstica.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar la incidencia de los lixiviados generados en el sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco sobre la calidad del agua de la Quebrada La Iglesia y un tramo del Río de Oro en el Área Metropolitana De Bucaramanga.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Identificar los vertimientos importantes en términos de cantidad y calidad sobre la Quebrada La Iglesia y el Río de Oro que puedan generar aportes considerables de carga contaminante.
- Seleccionar y utilizar los modelos de calidad del agua que permitan conocer el transporte y comportamiento de los parámetros convencionales y no convencionales.
- Seleccionar las sustancias objeto de modelamiento de calidad generados en un relleno sanitario, de acuerdo a lo establecido en la normatividad ambiental existente.
- Caracterizar la composición físico-química de la columna de agua y del sedimento de la Quebrada La Iglesia y del Río de Oro, en los puntos seleccionados

## **1.5 Antecedentes**

Para desarrollar el presente estudio, se requirió información relacionada con modelos matemáticos, información sobre la calidad del agua de las corrientes hídricas, las unidades del sistema de tratamiento de lixiviados del sitio El Carrasco, la identificación de los puntos de vertimientos, cartografía de la cuenca de interés, los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, entre otros. Para tal fin se utilizó información generada por el Área Metropolitana de Bucaramanga, la Empresa de Alcantarillado de Santander S.A E.S.P., la Procuraduría para Asuntos Agrarios y Ambientales, y el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales - CEIAM de la Universidad Industrial de Santander.

Debido a que no se habían realizado estudios sobre el modelamiento del lixiviado vertido por el sitio de disposición final de residuos sólidos a la quebrada la Iglesia, y que existían diferentes apreciaciones en el cual se indicaba que los lixiviados vertidos modificaban la calidad del agua de la quebrada la Iglesia, se creó la necesidad de poder encontrar las razones que generaban las afectaciones en la corriente, y a definir situaciones que pudieran influir sobre la calidad de la misma.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Característica del lixiviado

Las características de generación del lixiviado dependen del tipo de residuos que son depositados en el sitio de disposición de residuos, y de las condiciones reinantes en él, como temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, capacidad del suelo para remover contaminantes y la calidad y cantidad del agua que entra en contacto con la masa de residuos dispuestos (O'Leary y Tausel 1985).

Debido a que gran parte del porcentaje de los residuos sólidos corresponden a residuos orgánicos, la descomposición de la materia orgánica se presentará a través de cinco fases que corresponden a:

- **Hidrólisis Aerobia:** descomposición biológica bajo condiciones aerobias, formación de azúcares simples (como la glucosa), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua.
- **Hidrólisis y Fermentación:** debido a la disminución de oxígeno, se comienza a presentar condiciones anaerobias, y se presenta una transformación medida por enzimas (hidrólisis).
- **Acetogénesis:** El principal gas generado es el  $\text{CO}_2$ . Se presenta un incremento de la  $\text{DBO}_5$  y la DQO por la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado. Esta fase puede durar de 3 a 7 años y la biodegradabilidad del lixiviado es alta.
- **Metanogénesis:** Caracterizado por la generación de metano y  $\text{CO}_2$ , el incremento de pH del lixiviado y la reducción de la  $\text{DBO}_5$  y la DQO; y como el pH tiende a aumentar, la concentración de metales en el lixiviado se reduce. Las concentraciones de amonio se incrementan rápidamente, en rangos de 500 - 1500 mg/l  $\text{NH}_4$  en un período de 3 a 8 años y permaneciendo así por lo menos 50 años o más (Agudelo 1994).
- **Maduración y Estabilización:** La mayoría de los nutrientes se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores. El lixiviado contiene ácidos húmicos y fúlvicos, que son difíciles de degradar biológicamente. Los residuos con edad mayor a 10 años se encuentran en la etapa de estabilización por lo tanto estará en la fase de metanogénesis y de maduración, donde la carga orgánica es débil, se presenta ausencia de (AGV) y pH ligeramente superior a 7.5 .

En la tabla 1 se presentan las características del lixiviado según la fase acética y metanogénica.

Tabla 1. Composición lixiviados de rellenos sanitarios fases Acética y Metanogénicas

PARÁMETRO	VALOR PROMEDIO	RANGO
<b>FASE ACIDOGÉNICA</b>		
pH	6.10	4.5 – 7.5
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	13000	4000 – 40000
DQO (mg/l)	22000	6000 - 60000
DBO <sub>5</sub> /DQO (mg/l)	0.58	-----
SO <sub>4</sub> (mg/l)	500	70 – 1750
Ca (mg/l)	1200	10 – 2500
Mg (mg/l)	470	P
Fe (mg/l)	780	20 – 2100
Mn (mg/l)	25	0.3 – 65
Zn (mg/l)	5	0.1 - 120
<b>FASE METANOGENICA</b>		
pH	8.00	7.5 – 9
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	180	20 – 550
DQO (mg/l)	3000	500 – 4500
DBO <sub>5</sub> /DQO (mg/l)	0.06	-----
SO <sub>4</sub> (mg/l)	80	10 – 420
Ca (mg/l)	60	20 – 600
Mg (mg/l)	180	40 – 350
Fe (mg/l)	15	3 – 280
Mn (mg/l)	0.7	1q0.03 – 45
Zn (mg/l)	0.6	0.03 - 4

Fuente: Guía Ambiental Rellenos Sanitarios – Ministerio del Medio Ambiente, 2002

## 2.2 Cantidad de lixiviado

En cuanto a la cantidad de lixiviado, éste depende de la cantidad de residuos sólidos depositados, del equipo de compactación utilizado, las áreas que se encuentran expuestas en el relleno, las condiciones climatológicas como precipitación y evapotranspiración potencial; el espesor de los residuos, espesor y calidad del material de cobertura que permitirá evitar la infiltración del agua de escorrentía, y finalmente de la pendiente del terreno superficial.

## 2.3 Parámetros requeridos para la modelación

### 2.3.1 Sustancias convencionales

En cumplimiento de lo señalado en el párrafo del Artículo 7 del Decreto 3930 del 2010, y de los objetivos de calidad del tramo de interés, se modelarán los parámetros de DBO<sub>5</sub>, DQO, Sólidos Suspendidos, pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto, Coliformes Totales y Fecales. En el presente numeral se presentan las variables o sustancias que medidas en la campaña de monitoreo.

**DBO<sub>5</sub>:** Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y a 20 °C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable. (Ras 2000 Título E)

**Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Los sólidos suspendidos o no disueltos constituyen la diferencia entre los sólidos totales de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada. (Jairo Alberto Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principio de diseños. Año 1999. Escuela Colombiana de Ingeniería)

**pH:** Logaritmo, con signo negativo, de la concentración de iones hidrógeno, en moles por litro. (Ras 2000 Título E)

**Temperatura:** La temperatura afecta y altera la vida acuática, modifica la concentración de saturación de oxígeno disuelto y la velocidad de las reacciones químicas y de la actividad bacterial. (Jairo Alberto Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principio de diseños. Año 1999. Escuela Colombiana de Ingeniería)

**Oxígeno Disuelto (O.D):** Concentración de oxígeno medida en un líquido, por debajo de la saturación. Normalmente se expresa en mg/L. (Ras 2000 Título E). La medida de oxígeno disuelto provee información sobre las reacciones biológicas y bioquímicas que ocurren en las aguas, es un factor que afecta la vida acuática, además de ser necesario en muchas reacciones orgánicas e inorgánicas.

**Coliformes:** Las bacterias Coliformes son bacilos gram-negativos, aerobios y facultativos anaerobios. En general, se considera el género *Escherichia*, especie *E. Coli*, como la población de bacterias Coliformes más representativa de contaminación fecal. (Jairo Alberto Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principio de diseños.)

**Carbono Orgánico Disuelto (COD):** sustancia que se origina en la descomposición de planta y animales y productos de excreción de estos organismos. Los componentes principales son proteínas, carbohidratos, lípidos y compuestos húmicos. Las principales fuentes de COD en los sistemas acuáticos son las fuentes alóctonas, que son las más importantes, provienen de los suelos y la vegetación de la zona de captación; y las fuentes autóctonas, que provienen de la biota del río (como algas y macrófitas).

**Nitratos (NO<sub>3</sub>):** La importancia del nitrógeno en el agua radica en que es el componente fundamental de las proteínas. Dentro de las diferentes formas en las que se encuentra el nitrógeno, las más importantes son los nitratos y el ion amonio, pues constituyen la fuente principal de nitrógeno para los organismos acuáticos. El nitrato es la forma química bajo la cual las algas y las plantas pueden incorporar el nitrógeno y utilizarlo para la síntesis de proteínas (Roldán, 1992).

**Nitrógeno Amoniacal (NH<sub>3</sub>):** Es el producto natural de descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados. En el agua puede aparecer en forma molecular o como ion amonio, dependiendo del pH.

Las aguas superficiales no deben contener normalmente amoníaco. En general, la presencia de amoníaco libre o ion amonio es considerado como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa. Si el medio es aerobio, el nitrógeno amoniacal se transforma en nitritos. Recuperado de: <http://roble.pntic.mec.es/~mbedmar/iesao/quimica/nitrogen.htm>

**Clorofila (a):** La clorofila a es el pigmento común a todos los organismos que realizan fotosíntesis con liberación de oxígeno. Su concentración se usa como indicador de la biomasa del fitoplancton. Recuperado de:

<http://limno.fcien.edu.uy/pdf/course/PROTOCOLO-CLOROFILA-ALCOHOL.pdf>

**Fosforo Total (PT):** Actualmente se considera como uno de los nutrientes que controlan el crecimiento de algas, el fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y otros polifosfatos) y fosfatos orgánicos. Sanabria, Doris. FÓSFORO TOTAL EN AGUA POR DIGESTION ACIDA, MÉTODO DEL ACIDO ASCORBICO. SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA - GRUPO PROGRAMA DE FISICOQUÍMICA AMBIENTAL. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia. Recuperado de:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/F%C3%B3sforo+Total+en+Agua+M%C3%A9todo+del+Acido+Asc%C3%B3rbico.pdf/bf2f449b-4b9b-4270-b77e-159258d653e2>

**Potencial Redox (Eh):** Es una forma de medir la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica. El potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y negativo cuando se produce una reducción. Recuperado de:

<http://www.elaguapotable.com/Que%20es%20el%20ORP%20o%20potencial%20REDOX%20y%20para%20que%20sirve.pdf>

### 2.3.2 Sustancias No Convencionales

Las sustancias No Convencionales fueron seleccionadas para realizar el modelamiento en este estudio, debido a que se conoce que según la edad de un relleno sanitario, presentarán diferentes concentraciones de estas sustancias. Como antecedente, se conoce acerca de contingencias presentadas en el Carrasco, en la cual se han presentado vertimientos de lixiviado crudo a la corriente hídrica, y por esto ha sido investigada anteriormente. De acuerdo a lo anterior, se modelarán el Cromo hexavalente, el mercurio elemental y los fenoles.

**Cromo (Cr):** El cromo es un elemento químico de número atómico 24 que se encuentra en el grupo 6 de la tabla periódica, y se caracteriza por ser un metal de transición duro, frágil, de color gris acerado y muy resistente a la corrosión.

**Cromo Trivalente (CrIII):** El cromo (III) bajo la forma de óxidos, hidróxidos o sulfato, presenta menor movilidad y existe principalmente unido a la materia orgánica en ambientes acuáticos y en suelos (Cervantes et al., 2001)

**Cromo Hexavalente (CrVI):** Es considerada la especie más tóxica y carcinogénica (Codd et al., 2001), se encuentra combinado con el oxígeno formando iones cromato o dicromato (Cervantes et al., 2001). El cromo (VI) es un agente oxidante fuerte y, en presencia de materia orgánica, es reducido a cromo (III). Sin embargo, niveles elevados de cromo (VI) pueden superar la capacidad reductora del ambiente y persistir como contaminante. Ricardo

R. Azario, Susana A. Salvarezza, Alexis Ibarra y María del C. García. Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Concepción del Uruguay, Departamento de Materias Básicas. Información Tecnológica-Vol. 21 N°1-2010, pág.: 51-56 doi:10.1612/inf.tecnol.4150it.08. Recuperado de:  
[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642010000100009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642010000100009&script=sci_arttext)

**Metil Mercurio [CH<sub>3</sub>Hg]<sup>+</sup>:** Es una de las especies de mercurio más tóxicas para un número de seres vivos en el conjunto de la cadena trófica. El metil mercurio que se encuentra en el medio ambiente no tiene un origen antropogénico, sino que proviene de la conversión biótica y abiótica del mercurio inorgánico. Gaona, Xavier (2003). Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Química. Recuperado de:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf;jsessionid=D10930CAB8F43FF5248FFE13E1474E70.tdx1?sequence=1>

**Mercurio Hg(0):** El mercurio elemental es un metal blanco plateado brillante, en estado líquido a temperatura ambiente, que normalmente se utiliza en termómetros y en algunos interruptores eléctricos. A temperatura ambiente, y si no está encapsulado, el mercurio metálico se evapora parcialmente, formando vapores de mercurio. Los vapores de mercurio son incoloros e inodoros. Cuanta más alta sea la temperatura, más vapores emanarán del mercurio metálico líquido. Algunas personas que han inhalado vapores de mercurio indican haber percibido un sabor metálico en la boca. Recuperado de:  
<http://www.greenfacts.org/es/mercurio/n-3/mercurio-1.htm>

**Fenoles:** Los fenoles son compuestos orgánicos aromáticos que contienen el grupo hidroxilo (OH<sup>-</sup>) como grupo funcional. La débil acidez del grupo fenólico ha determinado que estas sustancias sean agrupadas químicamente junto a los ácidos carboxílicos y a los taninos, conformando así el grupo de los ácidos orgánicos. Las concentraciones naturales de compuestos fenólicos son usualmente inferiores a 1 µg/l y los más habituales son los fenoles, cresoles y los ácidos sirínigico, vainílicico y p-hidroxibenzoico. Recuperado de:  
<http://www.prtr-es.es/Fenoles,15658,11,2007.html>

## 2.4 Ensayo con trazador

Debido a que un modelo de simulación es la herramienta adecuada para la predicción del comportamiento de la calidad del agua en un río u otro cuerpo de agua, se requiere conocer las velocidades de los tramos seleccionados, así como los efectos advectivos y dispersivos del transporte de solutos, con el fin de conocer el momento del paso de la nube del contaminante o parámetro a analizar. Los estudios con trazadores permiten calibrar y evaluar modelos hidráulicos de flujo, así como calcular el tiempo de arribo del contaminante, y calcular los picos de concentración para obtener resultados precisos.

Las campañas con trazadores permiten:

- Determinar tiempo de viaje en los cuerpos de agua.
- Calcular la longitud de mezcla del contaminante o parámetro a analizar.

- Determinar coeficientes de dispersión y patrones de mezcla en agua debajo de las descargas de agua y tributarios.

Un trazador debe presentar las siguientes características que permitan realizar con efectividad la actividad:

- Soluble en Agua
- Detectable a bajas concentraciones por los equipos de medición.
- Tener baja interferencia con la concentración base o de fondo.
- No ser nocivo para la salud.
- No ser costoso.
- Estable o conservativo.

Los trazadores más importantes o más utilizados son:

- Rodamina WT (Etileno glycil).
- Rodamina base ácida.
- Sal de mesa NaCl.
- Litio.
- Bromo.
- Aminoácido.
- Materiales radioactivos como la Pyramnina.

Para el presente estudio, la aplicación del trazador fue de tipo instantánea. Cuando una sustancia trazadora es inyectada de esta forma, su concentración disminuye a medida que se desplaza por la corriente aguas abajo, debido a la dispersión longitudinal.

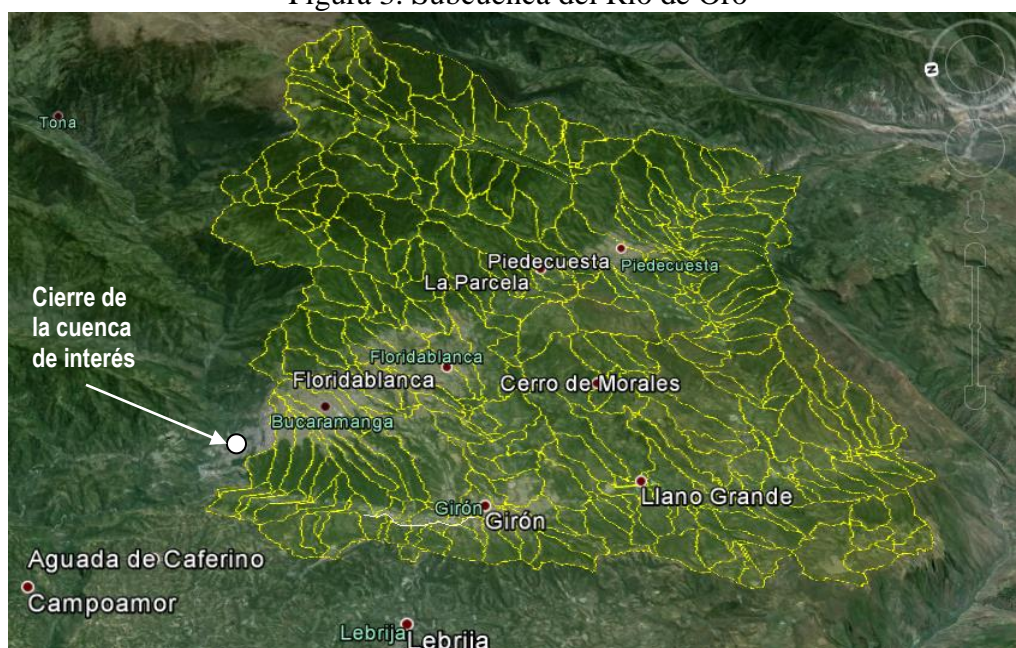
La inyección instantánea consiste en inyectar una masa conocida de trazador en un tiempo relativamente corto dentro de una corriente hídrica, para posteriormente tomar datos del movimiento de la nube del trazador. El movimiento del centroide de la nube del trazador define el tiempo de viaje, y el cambio en la distribución de la nube del trazador define la dispersión.

## **2.5 Marco geográfico**

El Río de Oro es una corriente ubicada en la cuenca del río Lebrija, cuenca que está conformada por las ocho subcuencas que corresponden a: 1. Cáchira del Espíritu Santo, 2. Lebrija Medio, 3. Cáchira del Sur, 4. Salamaga, 5. Río Negro, 6. Suratá, 7. Lebrija Alto y 8. Río de Oro. La subcuenca del Río de Oro presenta un área total de 56942 hectáreas y hace parte de la zona hidrográfica del Magdalena Medio. La subcuenca se encuentra en el corredor de alta montaña de la cordillera oriental, entre los 900 msnm y los 3500 msnm, y administrativamente hacen parte de ella cinco Municipios: Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta y Tona. (Ver Anexo 1).

En la figura 3 se presenta la cuenca objeto de estudio, donde se realizará el modelamiento hidrológico e hidráulico.

Figura 3. Subcuenca del Río de Oro



Una vez delimitada la región de estudio, se definieron los puntos de monitoreo a partir de la identificación de los aportes de carga contaminante por diferentes fuentes.

La ubicación y descripción de los puntos de monitoreo de vertimientos líquidos se presenta en la tabla 2, y la ubicación y descripción de los puntos de monitoreo de columna de agua y sedimentos se presenta en la tabla 3. La toma de muestras en campo fue llevada a cabo por ANTEK S.A.S. En el Anexo 2 se presenta la localización geográfica de estos puntos de monitoreo.

Tabla 2. Puntos de monitoreo columna de agua y de sedimentos

CORRIENTE	TRAMO	PUNTO	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	COORDENADAS GEOGRAFICAS	COORDENADAS PLANAS
<b>Q. La Iglesia</b>	Inicio tramo 1	P1-LI	Antes de confluencia de la quebrada el Carrasco	7° 4'59,04"N 73° 9'9,25"W	1275114,176 N 1102195,418 E
	Fin tramo 1 - Inicio tramo 2	P2-LI	Puente de acceso a plaza de toros	7° 4'57,22"N 73° 9'31,10"W	1275056,912 N 1101516,938 E
	Fin tramo 2 - Inicio tramo 3	P3-LI	Puente peatonal sector Construvicol	7° 4'58,90"N 73° 9'51,30"W	1275107,305 N 1100896,868 E
	Fin tramo 3	P4-LI	Zona de areneros, aprox. 180 m antes de confluir con río de Oro	7° 4'46,52"N 73° 10'9,61"W	1274725,847 N 1100335,651 E
<b>Río de Oro</b>	Inicio tramo 1	P1-RO	Antes de confluencia de la quebrada la Iglesia	7° 4'41,00"N 73° 10'13,70"W	1274556,008 N 1100210,453 E
	Fin tramo 1 - Inicio tramo 2	P2-RO	Antes de confluencia de la quebrada Chimitá	7° 5'48,60"N 73° 10'21,20"W	1276632,469 N 1099976,217 E
	Fin tramo 2 - Inicio tramo 3	P3-RO	Abajo de parque Industrial I, acceso por concreteras	7° 6'50,40"N 73° 9'53,30"W	1278532,865 N 1100828,741 E
	Fin tramo 3	P4-RO	Tienda de palo	7° 7'31,91"N 73° 9'38,55"W	1279809,099 N 1101278,881 E

Tabla 3. Puntos de monitoreo vertimientos líquidos

CORRIENTE	PUNTO	DESCRIPCIÓN DEL PUNTO	COORDENADAS GEOGRAFICAS	COORDENADAS PLANAS*
Q. LA IGLESIA		EFLUENTE PTLX CARRASCO EMAB	7° 4'42,10"N 73° 9'0,10"W	1274594,26 N 1102469,304 E
	PUNTO LI 1	VERTIMIENTO QUEBRADA EL CARRASCO	7° 4'58,84"N 73° 9'9,44"W	1275108,003 N 1102181,619 E
	PUNTO LI 2	VERTIMIENTO PUENTE SENA - EMPAS S.A E.S.P	7° 4'52,30"N 73°10'5,30"W	1274903,687 N 1100467,585 E
	PUNTO LI 3	VERTIMIENTO LA ESMERALDA - EMPAS S.A E.S.P	7° 4'47,10"N 73°10'9,50"W	1274743,673 N 1100338,992 E
	PUNTO LI 4	VERTIMIENTO COLECTOR LA IGLESIA - EMPAS S.A E.S.P	7° 4'45,50"N 73°10'12,00"W	1274694,365 N 1100262,359 E
RÍO DE ORO	PUNTO RO 1	VERTIMIENTO SENA MARGEN DERECHA - EMPAS S.A E.S.P	7° 4'44,82"N 73°10'13,79"W	1274673,366 N 1100207,462 E
	PUNTO RO 2	VERTIMIENTO RIO DE ORO MARGEN IZQUIERDA - EMPAS S.A E.S.P	7° 4'44,24"N 73°10'14,96"W	1274655,476 N 1100171,587 E
	PUNTO RO 3	VERTIMIENTO DISTRITO 4 - EMPAS S.A E.S.P	7° 5'3,00"N 73°10'25,40"W	1275231,225 N 1099850,045 E
	PUNTO RO 4	VERTIMIENTO BARRIO EL CARRIZAL - EMPAS S.A E.S.P	7° 5'9,80"N 73°10'27,90"W	1275439,996 N 1099772,911 E
	PUNTO RO 5	VERTIMIENTO ZONA INDUSTRIAL CHIMITÁ - EMPAS S.A E.S.P	7° 5'44,27"N 73°10'21,82"W	1276499,399 N 1099957,449 E
	PUNTO RO 6	VERTIMIENTO QUEBRADA CHIMITÁ	7° 5'49,10"N 73°10'1,70"W	1277952,008 N 1100737,817 E
	PUNTO RO 7	VERTIMIENTO PARQUE INDUSTRIAL I	7° 6'31,50"N 73° 9'56,30"W	1277952,008 N 1100737,817 E
	PUNTO RO 8	VERTIMIENTO QUEBRADA LA CUYAMITA	7° 7'2,00"N 73° 9'41,40"W	1278889,981 N 1101193,239 E

Para fines de modelamiento de la calidad del agua, se propuso una división en tramos de las corrientes, teniendo en cuenta la ubicación de los puntos de monitoreo y algunos criterios de tipo logístico. Es importante indicar que entre mayor información de calidad exista en el tramo, mejor serán los resultados del modelamiento. A continuación, se describe cada uno de los tramos definidos (3 en la quebrada la Iglesia y 3 en el río de Oro).

- **Primer tramo Quebrada La Iglesia:** Delimitado entre el punto ubicado antes del vertimiento de la quebrada El Carrasco (P1-LI), hasta el puente vehicular de acceso a la plaza de toros (P2-LI). Con este punto es posible conocer las condiciones fisicoquímicas y bacteriológicas de la quebrada, antes de la confluencia de la quebrada El Carrasco. No fueron identificados vertimientos ni de industrias ni de la red de alcantarillado municipal.
- **Segundo tramo Quebrada La Iglesia:** Delimitado entre el punto ubicado el puente vehicular de acceso a la plaza de toros (P2-LI), hasta el Puente peatonal sector Construvicol (P3-LI). Permite conocer el posible aporte de carga por parte del Carrasco, así como también de una zona de bodegas ubicadas en la margen derecha de la Quebrada La Iglesia. En este tramo no fueron identificados vertimientos adicionales de industrias o de la red de alcantarillado municipal.
- **Tercer tramo Quebrada La Iglesia:** Delimitado entre el punto ubicado el Puente peatonal sector Construvicol (P3-LI), hasta la Zona de areneros (P4-LI). En este tramo se

presentan las demás cargas contaminantes, correspondientes a la Empresa De Alcantarillado De Santander - EMPAS S.A E.S.P. La mayor carga se presenta por fuera del último punto, debido a que no existía una condición física para la toma de las muestras de manera representativa; sin embargo, en los modelos fueron incluidos dicho vertimiento como un tributario de la quebrada la Iglesia.

- **Primer tramo Río de Oro:** Delimitado entre el punto ubicado Antes de confluencia de la quebrada la Iglesia (P1-RO), hasta Antes de confluencia de la quebrada Chimitá (P2-RO). Consiste en el punto ubicado antes de la confluencia de la Quebrada La Iglesia, hasta antes de la confluencia de la quebrada Chimitá con el Río de Oro. Con este punto es posible conocer las condiciones fisicoquímicas y bacteriológicas del río, antes de la confluencia de la Quebrada La Iglesia. En este tramo se presentan aportes de carga contaminante muy importantes como son de la Empresa de Alcantarillado de Santander S.A E.S.P., pues contienen los vertimientos del municipio de Girón y parte de Bucaramanga mediante la entrega por parte del colector la Iglesia.
- **Segundo tramo Río de Oro:** Delimitado entre el punto ubicado Antes de confluencia de la quebrada Chimitá (P2-RO), hasta Abajo de parque Industrial I, acceso por concreteras (P3-RO). Este tramo es receptor de la quebrada Chimitá, la cual contiene una carga contaminante importante debido a que es receptora de vertimientos del municipio de Bucaramanga. De igual manera se vierten las aguas residuales del sector de Chimitá que es una zona industrial, así como el parque industrial de Bucaramanga primera etapa.
- **Tercer tramo Río de Oro:** Delimitado entre el punto ubicado Abajo de parque Industrial I, acceso por concreteras (P3-RO), hasta Tienda de palo (P4-RO). Este tramo permite conocer el comportamiento de los contaminantes, pues no existen aportes de carga importante en el mismo. Este tramo se caracteriza porque la presencia de areneros que ingresan vehículos a la corriente, para sacar el material de arrastre.

### 3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

La diversidad de ambientes geográficos, la variabilidad climática y la influencia antrópica cerca de los cauces de los ríos, son las principales causantes de afectaciones a los sistemas fluviales ya que producen cambios en la dinámica fluvial, alterando su topografía, dirección y volumen, dando lugar a fenómenos como inundación, socavamiento, sedimentación, entre otros, que si no son tratados oportunamente podrían ocasionar grandes problemas sociales, ambientales y económicos.

Conocer el funcionamiento de las cuencas hídricas y ríos tributarios asociados a éstas, con el fin de conocer los caudales de los mismos, requiere la creación de un modelo hidrológico e hidráulico que represente los diferentes procesos involucrados en la distribución y la generación de caudales, y al mismo tiempo, permita reproducir de la mejor forma posible las condiciones naturales de una cuenca.

El análisis hidrológico de una cuenca contempla el cálculo de varios parámetros que influyen directamente en la modelación e interpretación de los resultados, y que son la base de dicho modelamiento, tales como la precipitación, morfometría, pendiente, clima, uso del suelo, coeficiente de escorrentía, geología, entre otros. Esta información base permite el cálculo de la precipitación neta y la estimación de los diferentes caudales con el fin de determinar el caudal de diseño en la cuenca.

En el presente capítulo se evalúan las condiciones hidrológicas naturales de la cuenca hidrográfica del Río de Oro, de los diversos drenajes contenidos por el perímetro de división territorial del área de interés del estudio. Debido a la ausencia de información de los caudales históricos en las diferentes corrientes hídricas de la cuenca, se realizó el análisis hidrológico, que permitiera inferir el caudal permanente de las mismas, y de esta manera comparar los valores con el caudal medido en la campaña de monitoreo hidráulico.

Se elabora la construcción del modelo hidrológico para realizar la interpretación del proceso lluvia-escorrentía sobre el área de estudio. Dada la tipología de información disponible en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, se construyen hietogramas de tormentas de diseño de corta duración con base en relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia de procedencia sintética y no de registros pluviográficos, obteniendo así, mediante la transformación de lluvia en escorrentía por el modelo del Soil Conservation Service (SCS), el caudal permanente, el caudal medio y el caudal mínimo o ambiental.

Con el objeto de realizar la caracterización hidrológica de la zona de estudio, en términos de procesos lluvia-escorrentía, se hizo uso de los siguientes parámetros:

- Información de planos de uso y cobertura de suelo de la cuenca de río de Oro, de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios de Bucaramanga, Girón, Floridablanca y Piedecuesta.
- Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental Subcuenca Río de Oro, de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

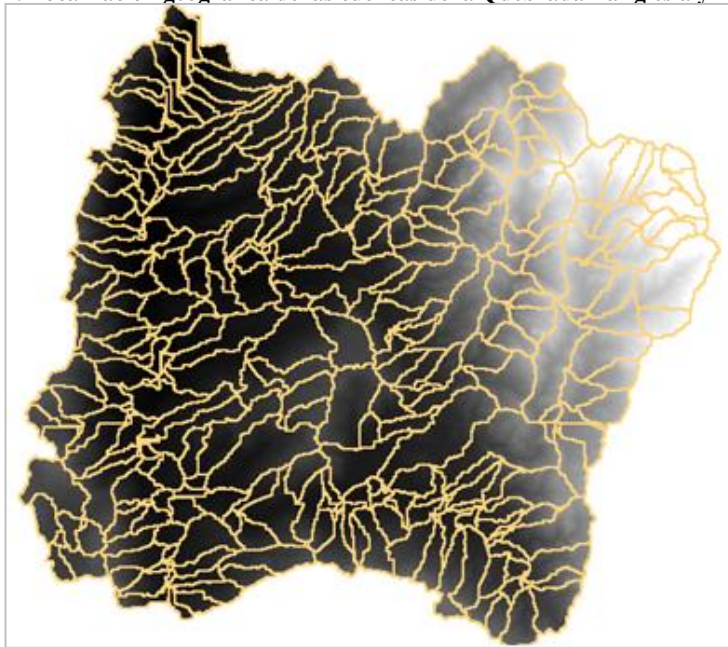
- Cartografía con base en el MED obtenido por medio del U.S. Geological Survey mediante el proyecto realizado por la NASA llamado “The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)”, el cual suministra modelos de elevación digital con una resolución de 30 metros.
- Datos de precipitación en 24 horas de las estaciones meteorológicas operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, que influyen en la cuenca del Río de Oro, y que son descritas más adelante.

La construcción del Modelo Hidrológico se realizó previendo la evaluación hidráulica de drenajes dentro del perímetro del casco urbano de los municipios.

### **3.1 Caracterización de la cuenca y zona de estudio**

La cuenca del Río de Oro posee una extensión aproximada de 578,0139 km<sup>2</sup>, mientras que la de la Quebrada La Iglesia presenta un valor de 23,747 km<sup>2</sup>. La figura 4 muestra la localización geográfica de las hoyas hidrográficas aferentes a los drenajes arriba mencionados.

**Figura 4. Localización geográfica de las cuencas de la Quebrada La Iglesia y Río de Oro**



### **3.2 Descripción geológica**

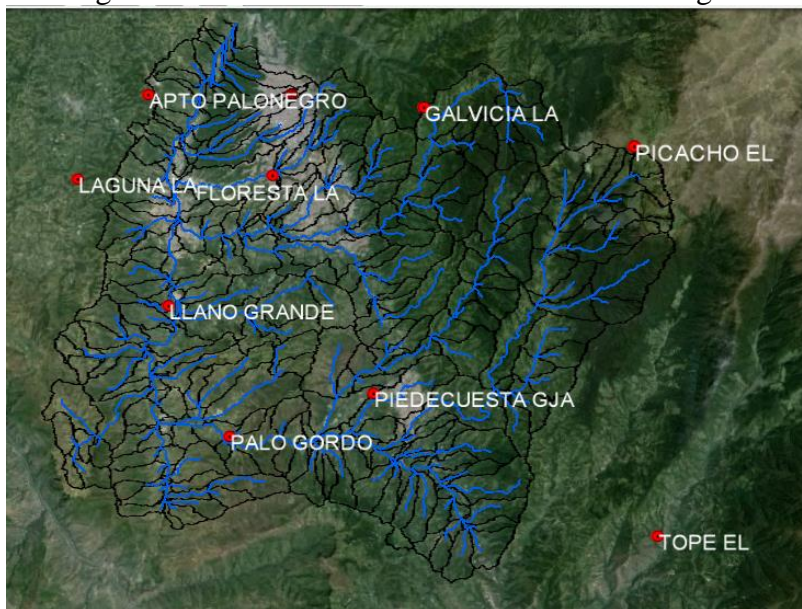
Se hace uso de la Geología, a escala 1:100.000, del Servicio Geológico Colombiano para el Departamento de Santander.

### **3.3 Estaciones en el área de estudio**

Luego de realizar una inspección de la disponibilidad de estaciones pluviométricas de la red del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM,

se identificó que para realizar un balance hidrológico a largo plazo, las estaciones con registro histórico consistente y continuo son las presentadas en la figura 5 y en el Anexo 4, presentando en la siguiente tabla la información asociada a cada una de ellas.

Figura 5. Estaciones usadas en el modelo hidrológico



Fuente: Google Inc.

La información obtenida de las estaciones pluviométricas fue solicitada al IDEAM y corresponde a los valores de precipitación máximos obtenidos durante 24 horas en un periodo mínimo de 10 años.

Tabla 4. Estaciones utilizadas en el modelo hidrológico

<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>COTA</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>LATITUD</b>
23190300	El Picacho	3310	72.96	7.11
23190400	La Galvicia	1779	73.05	7.12
23190590	La Floresta	925	73.12	7.09
23190700	Gja Piedecuesta	1000	73.06	6.99
23190830	Ideam Bucaramanga	1025	73.11	7.12
23195110	Llano Grande	777	73.16	7.02
23195130	Apto Palonegro	1189	73.18	7.12
24030330	El Tope	2050	72.93	6.93
23190260	La Laguna	1050	73.21	7.07
23190280	Palo Gordo	950	73.13	6.96

### 3.4 Curvas Intensidad – Frecuencia – Duración (IDF)

Las curvas de Intensidad – Frecuencia – Duración (IDF) permiten la estimación de volúmenes de drenaje superficial mediante modelos de lluvia-escorrentía en cuencas

pequeñas para las cuales no existen registros históricos de caudal o ausencia de una estación limnimétrica o limnigráfica.

Los métodos tradicionales de cálculo de las curvas IDF requiere el uso de información pluviográfica con un registro histórico de al menos 10 años. De acuerdo con Chow (1994), los análisis de frecuencias en hidrología relacionan la magnitud de los eventos con la frecuencia con que estos ocurren. Este tipo de análisis es uno de los más comunes al generar curvas IDF y el procedimiento de éste depende de las funciones, es decir, si las funciones con las que se pretende realizar el análisis son o no invertibles.

La función más comúnmente usada es la de valores extremos tipo I o de Gumbel. Esta función es invertible y la estimación de los cuantiles, para determinados periodos de retorno, está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 1. } X_t = \mu + \alpha Y_t$$

Donde  $X_T$  es el cuantil estimado a partir de la función,  $Y_T$  es la variable reducida de la función,  $\mu$  puede ser calculado a partir de la muestra de datos, en términos del Método de Momentos, mediante la ecuación  $\mu = \bar{x} + 0.5772\alpha$  y  $\alpha$  mediante  $\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S$ , donde  $\bar{x}$  es la media de los datos, y  $S$  la desviación de estos.

Cuando no se dispone de registros pluviográficos, como es el caso de la zona de estudio, se pueden hacer uso de ecuaciones que permitan estimar las curvas IDF a partir de información pluviométrica, la constituye una alternativa para aquellas zonas que disponen de registro de lluvias a nivel diario o totalizado de 24 horas.

Para generar las curvas IDF de la cuenca del Río de Oro, a partir del registro diario de las estaciones ubicadas en el área de estudio, se usaron tres metodologías diferentes que se describen a continuación:

### 3.4.1 Vargas – Díaz Granados

El método de Vargas – Díaz Granados (1998) es recomendado por el Manual de Drenaje de Carreteras del INVIAS. Este método se basa en la ecuación propuesta por Kothyari & Garde (1992), la cual tiene como resultado la ecuación:

$$\text{Ecuación 2. } I = \alpha \frac{T_r^b}{t^c} M^d$$

Dónde:

I = Intensidad de la lluvia para un período de retorno  $T_r$  (mm/h)

a, b, c, d, e = Parámetros de la ecuación.

$T_r$  = Período de retorno (años).

t = Tiempo (min).

M = Promedio del valor máximo anual.

Los parámetros de la ecuación son constantes que han sido regionalizadas para cada una de las zonas colombianas y que para la cuenca del Río de Oro, según el mapa desarrollado por los autores, se encuentra en la zona Andina.

### 3.4.2 Hargreaves

El método determinado por Hargreaves (1988) se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 3. } X = K \left( \frac{d}{60} \right)^{-\frac{3}{4}} T_r^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

K = Constante de Hargreaves.

d = Duración de la tormenta (h).

$T_r$  = Periodo de retorno (años).

Siendo, la constante de Hargreaves (K) definida mediante la ecuación:

$$\text{Ecuación 4. } K = \frac{X'}{24^{0.25} T_r^{\frac{1}{6}}}$$

Donde:

$X'$  = Cuantil estimado por la metodología de Gumbel para 24 horas.

$T_r$  = Periodo de retorno (años).

### 3.4.3 Bell

Bell (1969) propuso una fórmula para determinar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, a partir de las lluvias con duraciones hasta de 120 minutos, y permiten estimar la altura de lluvia para una cierta duración entre 5 y 120 minutos y un período de retorno entre 2 y 100 años. El método de Bell se encuentra definido por la ecuación:

$$\text{Ecuación 5. } P_{T_r}^t = (0.35 \ln T_r + 0.76)(0.54 t^{0.25} - 0.5) P_2^{60}$$

Donde:

$P_{T_r}$  = Lámina de lluvia para un  $T_r$  (años) dado y una duración t dada (min).

$T_r$  = Periodo de retorno (años).

t = Duración de lluvia (min).

$P_2^{60}$  = Lámina de lluvia con duración de una hora (60 min) para un tiempo de retorno en un periodo 2 años (mm).

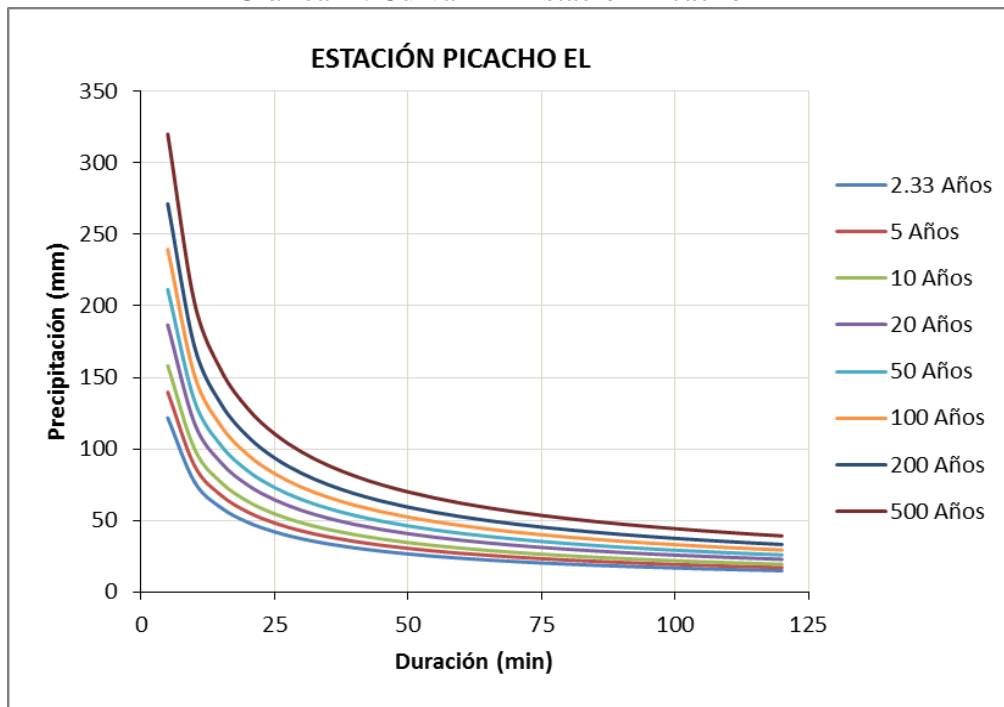
Las relaciones graficas I-D-F suelen ser demasiado susceptibles a la metodología empleada para su construcción. Con referencia a lo concluido por el Ing. Adrián Rizo en su trabajo de grado “Revisión y actualización de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para el Área

*Metropolitana de Bucaramanga a partir de las series de tiempo Máximos Anuales y Duración Parcial”, si no se tiene en cuenta el cálculo de parámetros tan fundamentales y básicos para este fin, como es el caso del Error Cuadrático Medio (RMSE por sus siglas en inglés), se pueden obtener valores que subestimen o sobrestimen el real comportamiento temporal de la serie histórica analizada.*

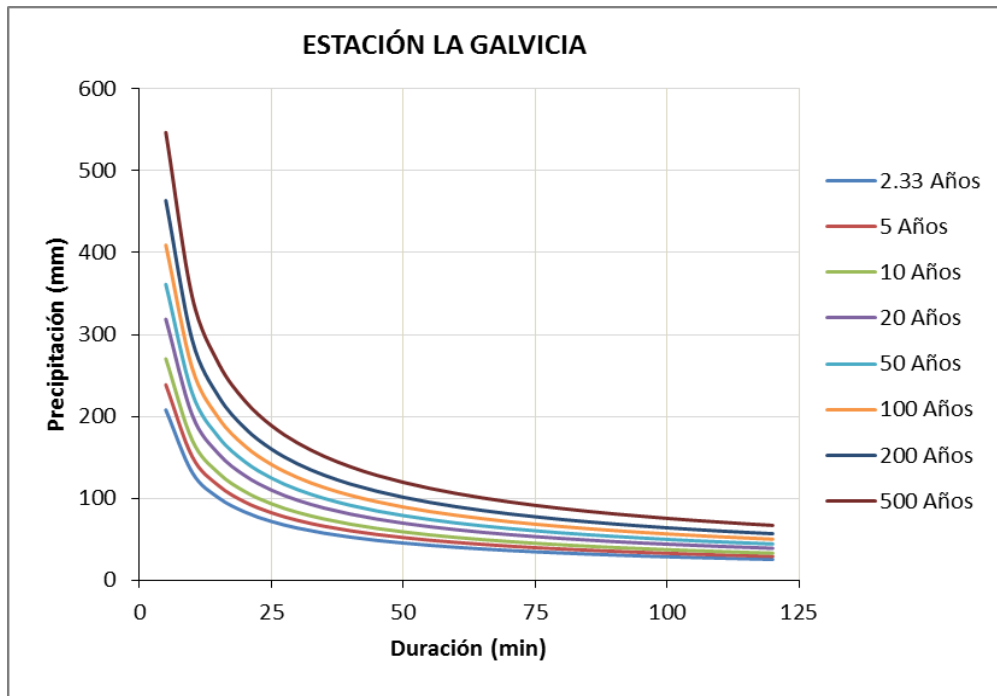
En el presente estudio se hace uso de las curvas I-D-F obtenidas por la metodología de Hargreaves, ya que aquellas generadas por la metodología de Díaz-Granados se han encontrado, para la región de Santander, llegar a ser cerca del doble de aquellas obtenidas con información pluviográfica real y se desconoce, para la metodología de Bell, la correcta distribución de los coeficientes de duración entre intensidades de corta y larga duración.

En las gráficas 1 a 10 se presentan las relaciones sintéticas gráficas de Intensidad-Duración-Frecuencia de corta duración para la evaluación de las crecientes de diseño de cada una de las diez (10) estaciones presentadas en la tabla 4.

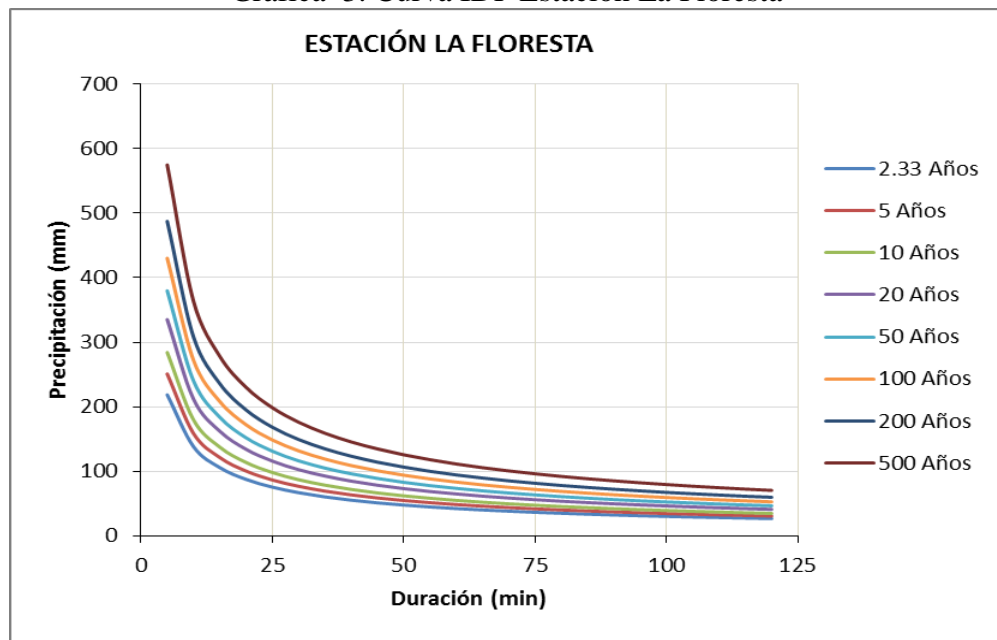
Gráfica 1. Curva IDF Estación Picacho EL



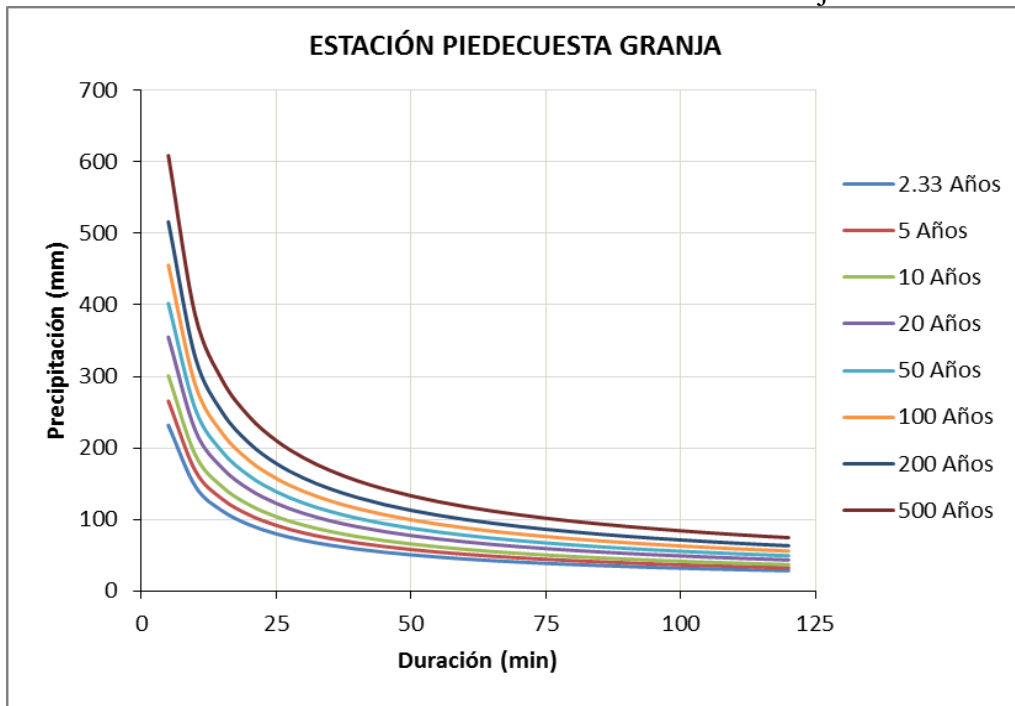
Gráfica 2. Curva IDF Estación La Galvicia



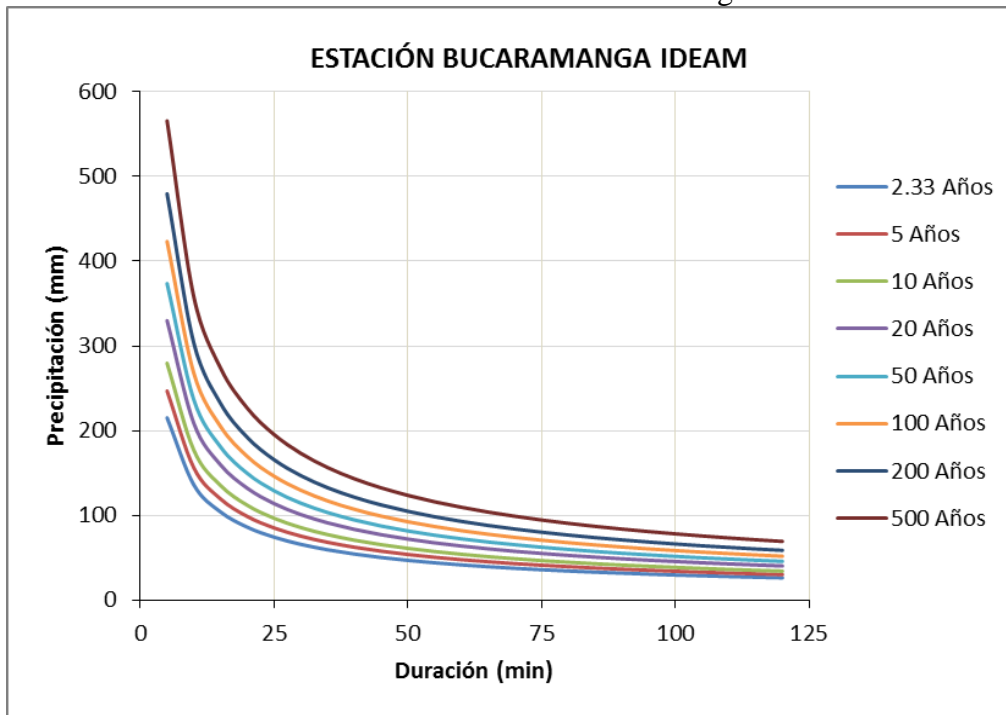
Gráfica 3. Curva IDF Estación La Floresta



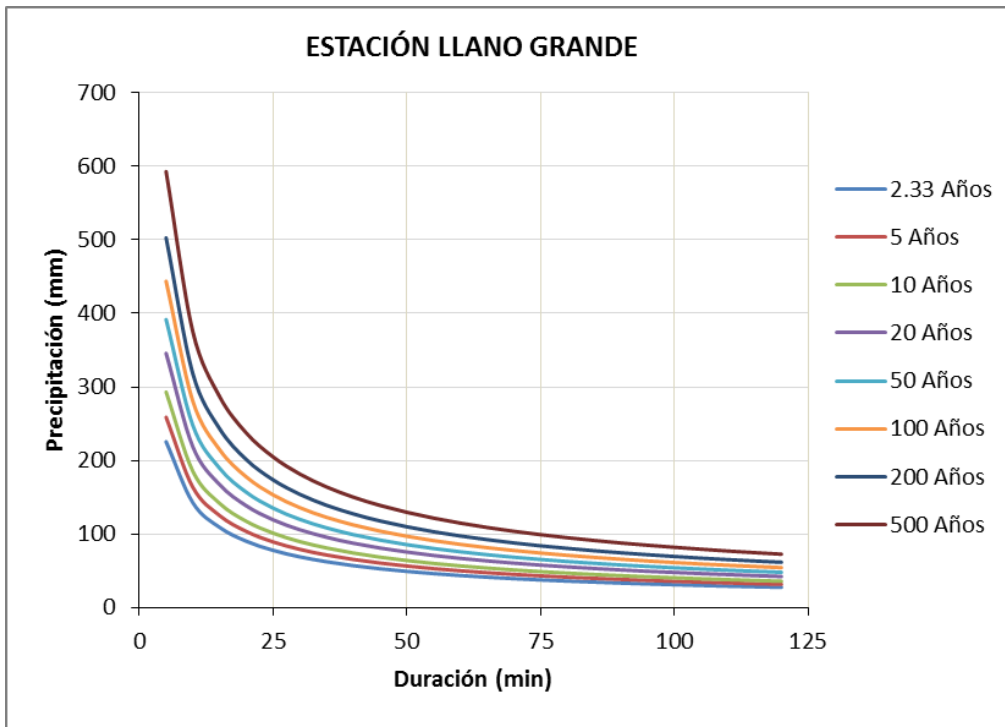
Gráfica 4. Curva IDF Estación Piedecuesta Granja



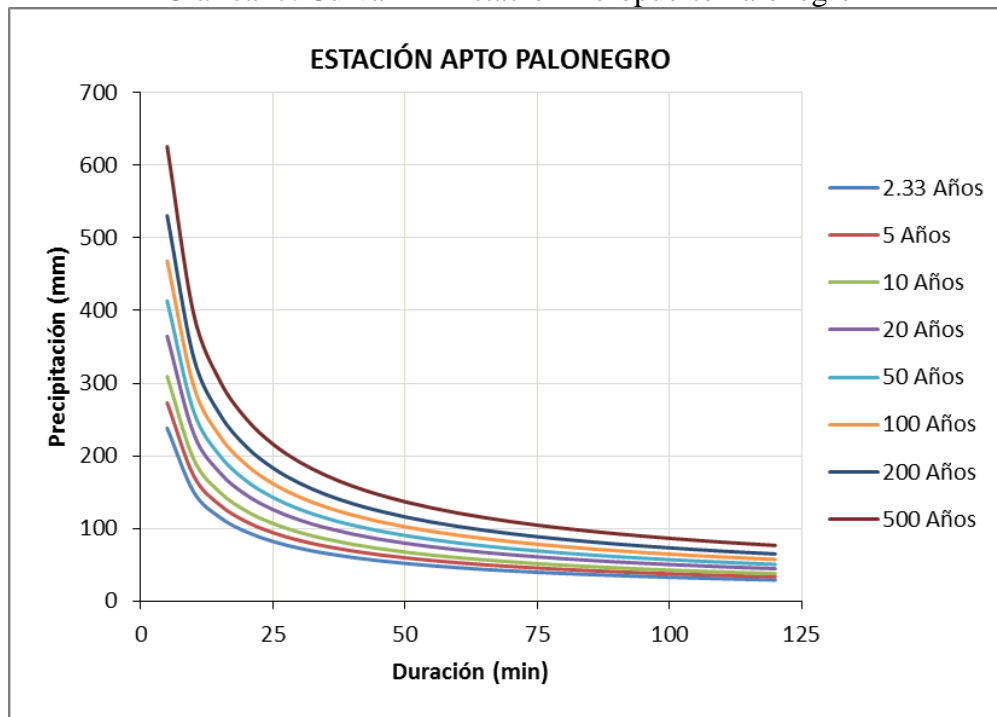
Gráfica 5. Curva IDF Estación Bucaramanga IDEAM



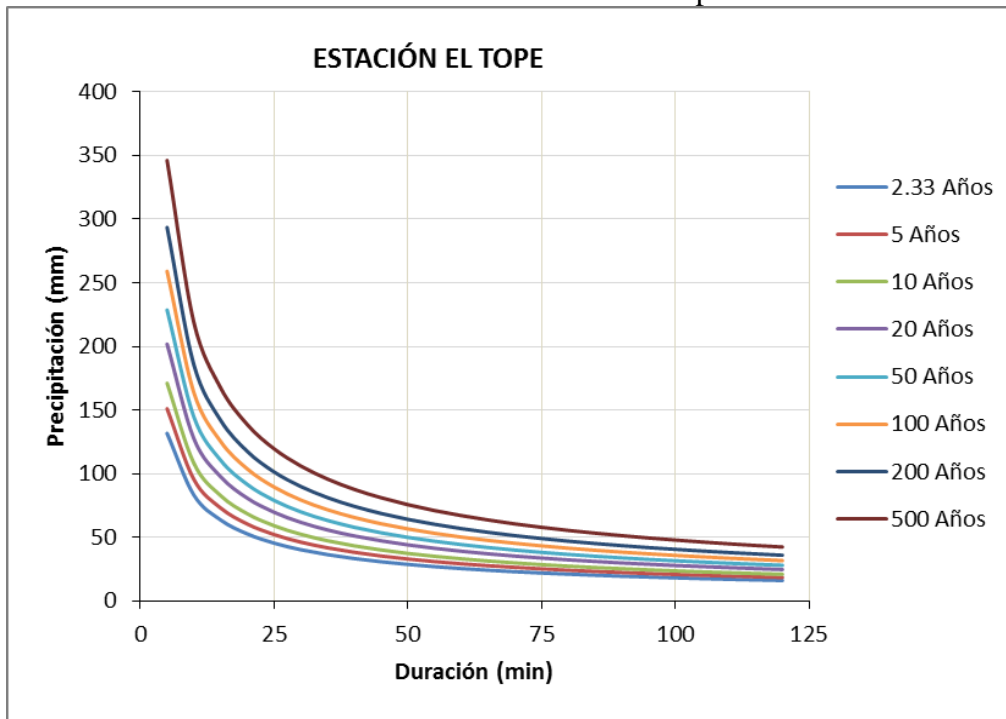
Gráfica 6. Curva IDF Estación Llano Grande



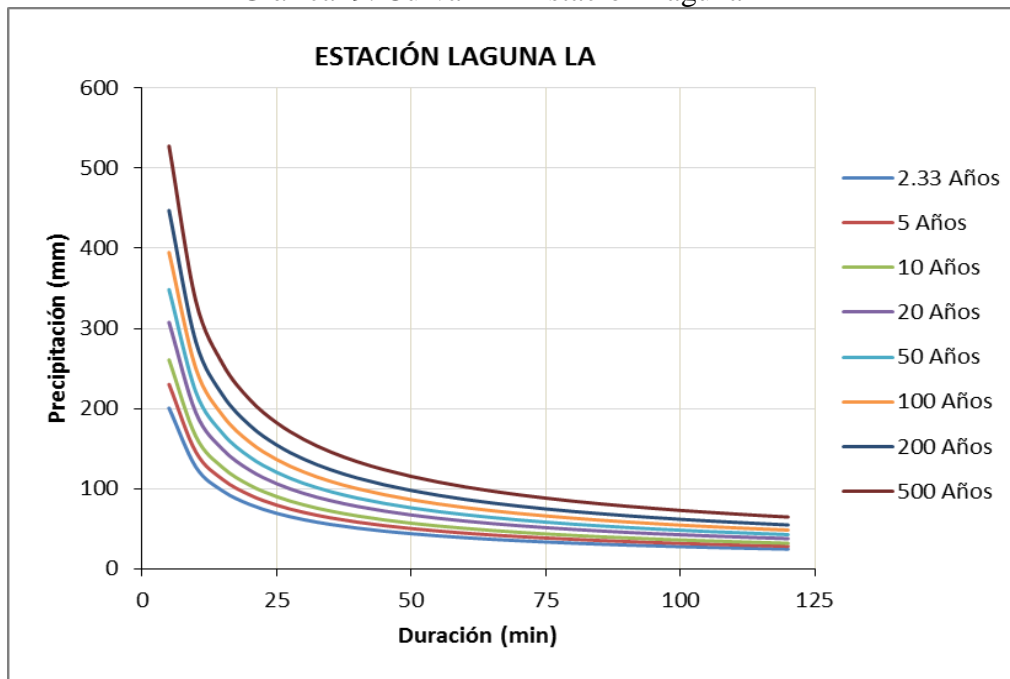
Gráfica 7. Curva IDF Estación Aeropuerto Palonegro



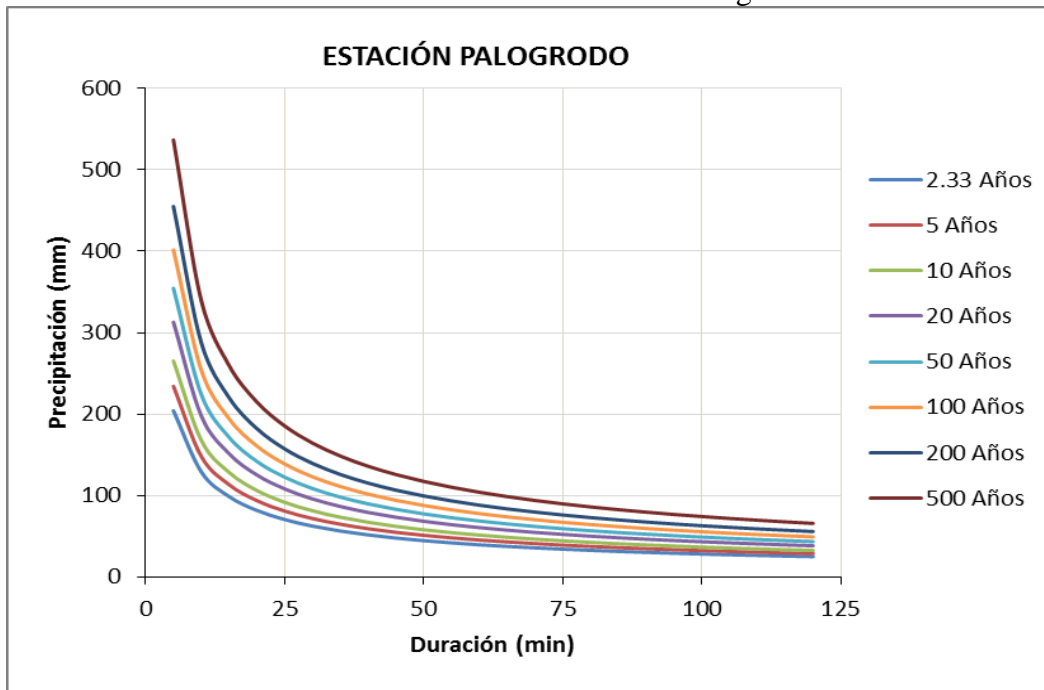
Gráfica 8. Curva IDF Estación Tope EL



Gráfica 9. Curva IDF Estación Laguna LA



Gráfica 10. Curva IDF Estación Palogordo



### 3.5 Caudal de diseño (Qdis)

Debido a la ausencia de series de tiempo de caudales para el cauce del Río de Oro, se hace necesario utilizar métodos que permitan determinar el escurrimiento de la cuenca a partir de sus características y de la precipitación. La calidad y cantidad de la información disponible difiere de manera importante de un lugar a otro, por lo que se reportan en la literatura diversidad de metodologías para el análisis de la relación precipitación-escorrentía, las cuales utilizan como parámetros principales: el área de la cuenca, datos de precipitación, características generales de la cuenca, distribución temporal y espacial de la lluvia, etc.

Para la modelación hidráulica de un área se requiere definir el caudal de diseño a partir del periodo de retorno seleccionado. En la literatura existen diversas metodologías para este procedimiento, siendo la más conocida o usada el Método Racional. De acuerdo con el Manual de drenaje para carreteras de INVIAS, el método racional puede ser empleado en cuencas con áreas inferiores a  $2.5 \text{ km}^2$ , mientras que el Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) restringe las metodologías a un área no mayor de 700 ha, es decir,  $7 \text{ km}^2$ .

Cuando las áreas de drenaje en una cuenca son mayores a estos valores, se aconseja realizar una división por subcuencas y aplicar metodologías computacionales (software HEC-HMS, por ejemplo) para tener en cuenta el hidrograma de creciente producido por cada una de las subcuencas y su tránsito a través del canal principal de la misma.

Por lo tanto, para la realización del presente estudio se utilizó la metodología desarrollada por el Soil Conservation Service (SCS), la cual consta de tres partes. En la primera parte se realiza una delimitación de las subcuencas y drenajes de la cuenca de estudio; en la segunda, se realiza la estimación del volumen de escorrentía resultante de una precipitación – escorrentía directa; y finalmente en la tercera se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta.

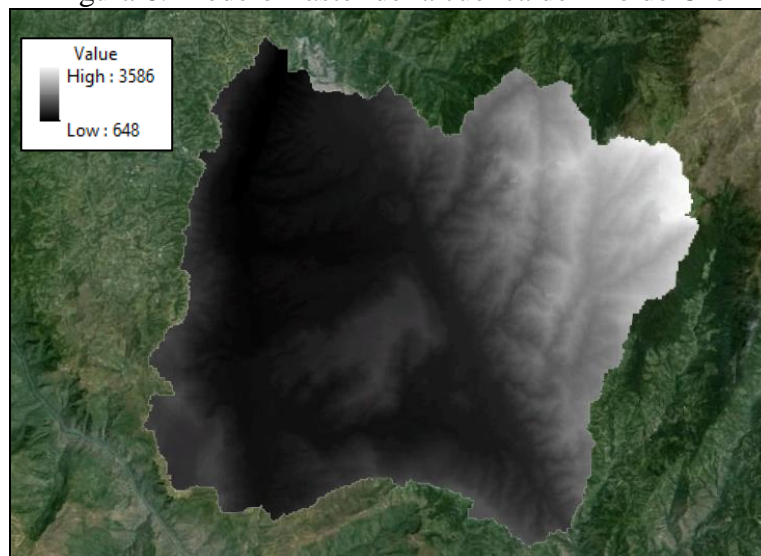
### 3.5.1 Delimitación cuenca del Río de Oro

Para la realización de la delimitación de la cuenca del Río de Oro fue necesario descargar el modelo de elevación digital (MED) del área de estudio, ver Anexo 5. El MED fue obtenido por medio del U.S. Geological Survey mediante el proyecto realizado por la NASA llamado “The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)”, el cual suministra modelos de elevación digital con una resolución de 30 metros. A partir de la información del MED, se realizó el procesamiento de la información vectorial, para la delimitación de subcuencas y drenajes mediante la utilización del software ArcGIS realizada de la siguiente manera:

- Constitución Ráster de elevaciones.
- Ráster de direcciones de flujo.
- Definición de Cauces.
- Delimitación de subcuencas

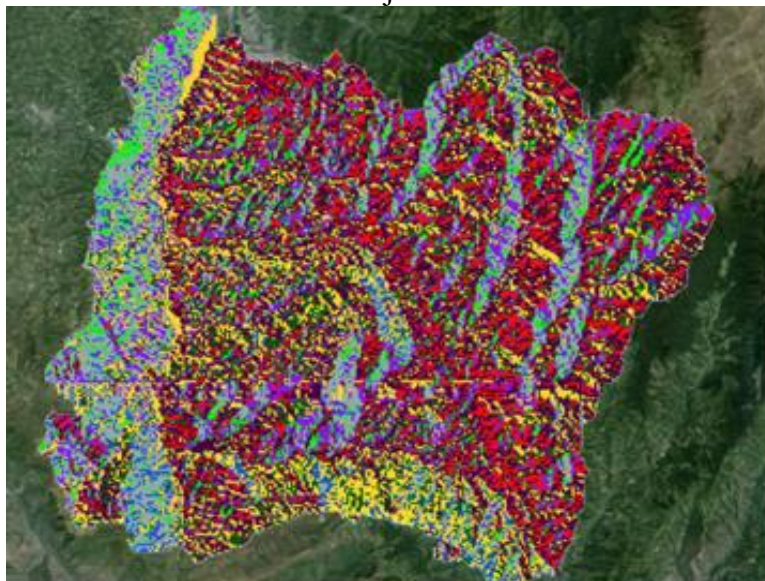
Las siguientes ilustraciones muestran los mapas obtenidos del procesamiento de la información vectorial de la cuenca del Río de Oro.

Figura 6. Modelo Ráster de la cuenca del Río de Oro



Fuente: Google Inc.

Figura 7. Modelo de direcciones de flujo de la cuenca del Río de Oro



Fuente: Google Inc

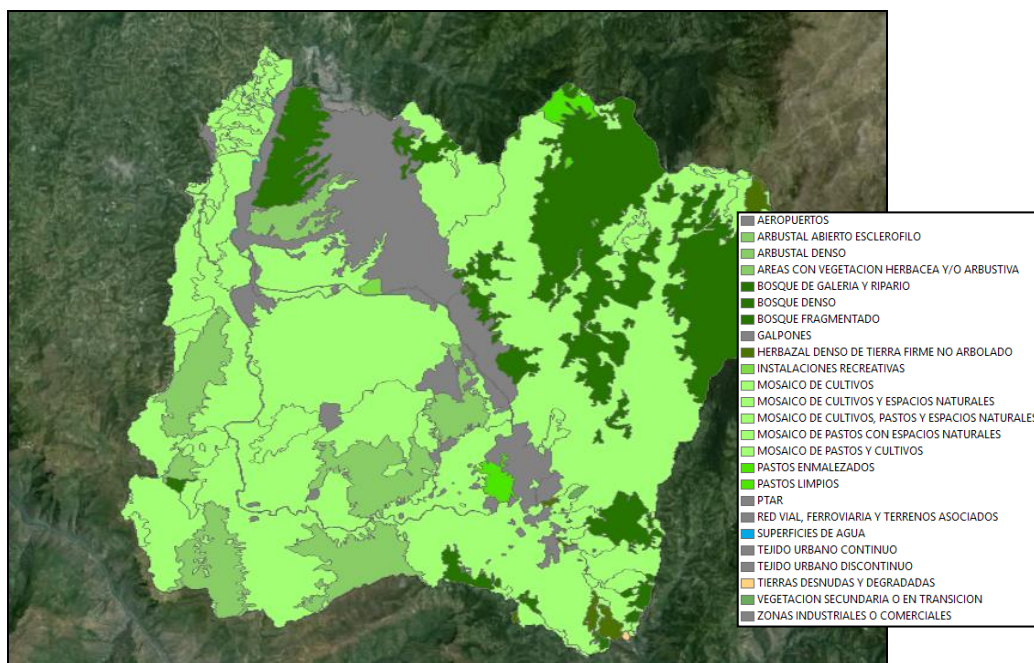
Para el cálculo de hidrogramas y estimación de crecientes máximas, es indispensable conocer la escurrentía que produce una determinada tormenta. La estimación de la escurrentía a partir de la precipitación puede realizarse de varias formas, pero básicamente todos los métodos tratan de descontar de la lluvia caída sobre una cuenca, todas aquellas pérdidas que son debidas a factores como la infiltración, la evapotranspiración, etc. Sin embargo, el método más generalizado y quizá el más flexible es el método del número de curva CN del “Soil Conservation Service”, este método es fácil de adaptar a nuestras condiciones pues toma en cuenta la cobertura del suelo, la pendiente, el porcentaje de área impermeable, el tipo de suelo, etc.

### 3.6 Curva Numero (CN)

El valor de curva número CN es un parámetro propuesto por el SCS (Soil Conservation Service) para determinar la retención potencial máxima del suelo en una cuenca, y se aplica para valores de humedad antecedentes propios de cada subcuenca de drenaje, la cual se obtiene basada en el tipo de suelo y su condición hidrológica. Todos estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de escurrentía producida por una cuenca hidrográfica.

La distribución espacial del uso de suelo para la zona objeto de estudio se obtuvo de los Planes de Ordenamiento Territorial de los cuatro municipios que conforman el área Metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Piedecuesta, Floridablanca, Girón) y del Plan de Ordenamiento y manejo Ambiental Subcuenca Río de Oro de la CDMB. El mapa de uso del suelo de la cuenca de Río de Oro obtenido mediante el procesamiento de la información en el Software de Sistemas de Información Geográfica, se puede observar en la siguiente Ilustración.

Figura 8. Mapa uso de suelo cuenca del Río de Oro



Fuente: Google Inc.

De igual manera, para la determinación del CN, se requiere conocer del grupo hidrológico, el cual se encuentra en función de las unidades geológicas superficiales con propiedades de drenaje. El SCS (Soil Conservation Service) define cuatro grupos hidrológicos **A**, **B**, **C**, y **D**, de acuerdo con el potencial de escurrimiento, descritos a continuación:

**GRUPO A:** (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

**GRUPO B:** (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

**GRUPO C:** (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100 cm).

**GRUPO D:** (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con

nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta a los flujos subterráneos.

De acuerdo a la información geológica disponible, la unidad geológica predominante en el área de estudio son suelos con moderado potencial de escorrentía. De acuerdo al tipo de cobertura, tipo de suelo y de la pendiente, existe una tabla para seleccionar el CN correspondiente a una condición de humedad antecedente y que son representativos de las condiciones promedio que se pueden presentar en la cuenca del Río de Oro. En la tabla 5 se muestran los diferentes valores de CN para esta condición.

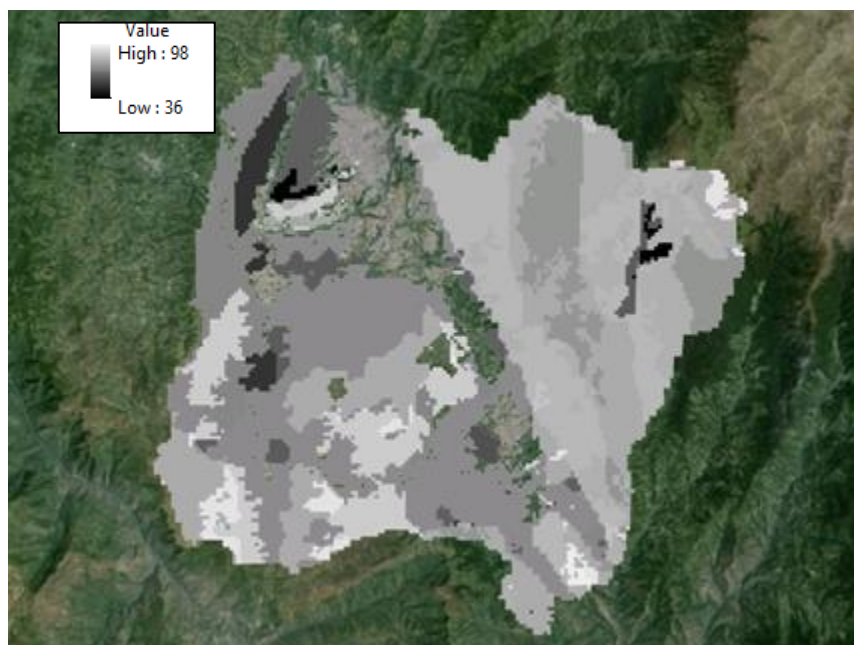
Tabla 5. Curvas de escorrentía para los complejos de suelo cobertura CN.

Cobertura			Grupo de suelos			
Uso de la tierra	Tratamiento práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
			Número de curva			
Rastrojo			77	86	91	94
Cultivos en hilera	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82	
	Buena	62	71	78	81	
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82	
	Buena	59	70	78	81	
Leguminosas en hileras estrechas o forrajes en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83	
	Buena	51	67	76	83	
Pastos de pastoreo		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Mala	47	67	81	88
Regular		25	59	75	89	
Buena	6	35	70	79		
Pastos de corte			30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Pacios			59	74	82	86
Caminos en tierra			72	82	87	89
Pavimentos			74	84	90	92

Fuente: Hidrología de tierras agrícolas CIDIAT Pág. 56

Seguidamente, se determinó la distribución espacial del valor de CN para la cuenca del Río anteriormente mencionado mediante la extensión del Hec-GeoHMS. En la figura 9 se presenta el mapa en formato *ráster* del valor de CN.

Figura 9. Distribución espacial de CN en la cuenca del Río de Oro



Fuente: Google Inc.

### 3.7 Valor de Tiempos de Desfase ( $T_l$ )

De acuerdo a la metodología del SCS se hace necesario determinar el tiempo de desfase para cada una de las subcuencas del área de estudio. El tiempo de desfase de la cuenca es el tiempo comprendido entre el centro de gravedad del pulso de lluvia y el instante del caudal máximo, el cual se expresa a través de la ecuación:

$$\text{Ecuación 6. } T_l = \frac{L^{0.8}(2540-22.86CN)^{0.7}}{14104CN^{0.7}S^{0.5}}$$

Dónde:

$T_l$  = Tiempo de desfase para la cuenca de estudio (h).

CN = Número de curva (-).

L = Longitud del cauce principal (m).

S = Pendiente del cauce principal (m/m).

Sin embargo, existen diversas metodologías aptas para el cálculo el tiempo de desfase. De acuerdo con el manual de cálculo de la extensión de HEC-GeoHMS, el tiempo de desfase se calcula mediante la ecuación:

$$\text{Ecuación 7. } T_l = \frac{L^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * Y^{0.5}}$$

Dónde,

$T_l$  = Tiempo de desfase para la cuenca de estudio (h).

L = Longitud hidráulica de la cuenca (ft).

S = Retención potencial máxima (función del CN para cada subcuenca).

Y= Pendiente media de la cuenca (m/m).

La metodología aplicada para el cálculo del tiempo de desfase de la cuenca del Río de Oro es la recomendada por la extensión de HEC-GeoHMS.

### **3.8 Modelo hidrológico HEC-HMS**

El **HEC-HMS** es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un periodo de lluvia. Para los trabajos particulares relacionados con el presente estudio, se utilizó la versión más reciente de este modelo hidrológico HEC-HMS 4.1.

Los componentes del modelo se basan en relaciones matemáticas simples que tratan de representar los procesos que intervienen en la generación y circulación de los hidrogramas de escorrentía: pérdidas, transformación del exceso de lluvia en caudal de salida de la cuenca, adición del flujo base, circulación del hidrograma por el cauce, etc. En este caso, hay una serie de condicionantes o limitaciones que por distintos motivos tiene el modelo aplicado:

- La simulación se limita a eventos de lluvia (modelo de eventos), consecuencia de la propia aplicación del modelo a la simulación de avenidas.
- En la modelación no se incluye la escorrentía subsuperficial al no disponer de valores de los parámetros que caracterizan el mismo.

#### **3.8.1 Modelo conceptual HEC-HMS cuenca del Río de Oro**

A partir de la información procesada y generada mediante el software ArcGIS, se ha utilizado la extensión HEC-GeoHMS para exportar dicha información al HEC-HMS y construir el modelo conceptual de la cuenca del Río de Oro. La figura 10 muestra el modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca.

Definido el modelo conceptual morfológico de la cuenca es preciso determinar los hietogramas de diseño de cada una de las estaciones localizadas en el área de estudio. Introducidas todas las estaciones, las áreas de influencia de cada estación se han obtenido con el método de los Polígonos de Thiessen. La figura 11 muestra las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas localizadas en el área de estudio.

El periodo de retorno evaluado corresponde al de 2.33 años, pues éste, con base en el desarrollo de eventos extremos dados por Gumbel corresponde a la media teórica de los eventos extremos y se ha de usar como la recurrencia, o como el caudal permanente de la corriente hídrica.

Figura 10. Modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del Río de Oro

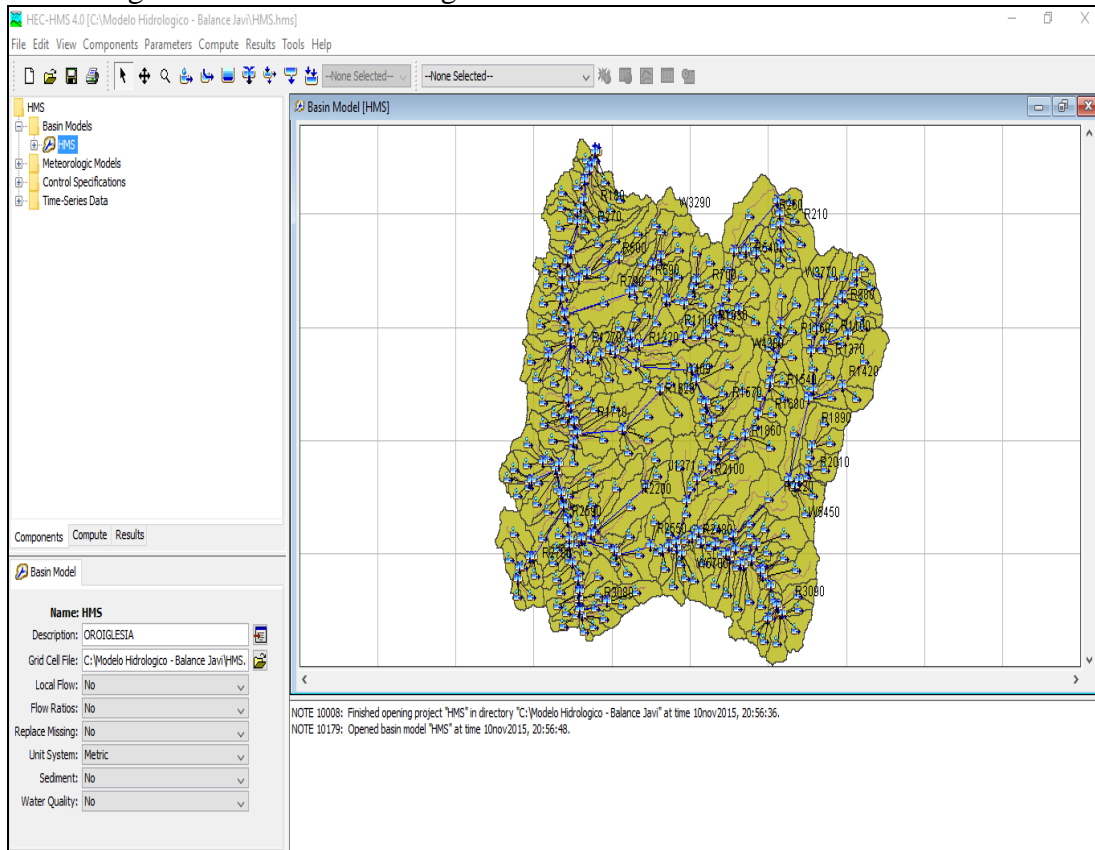
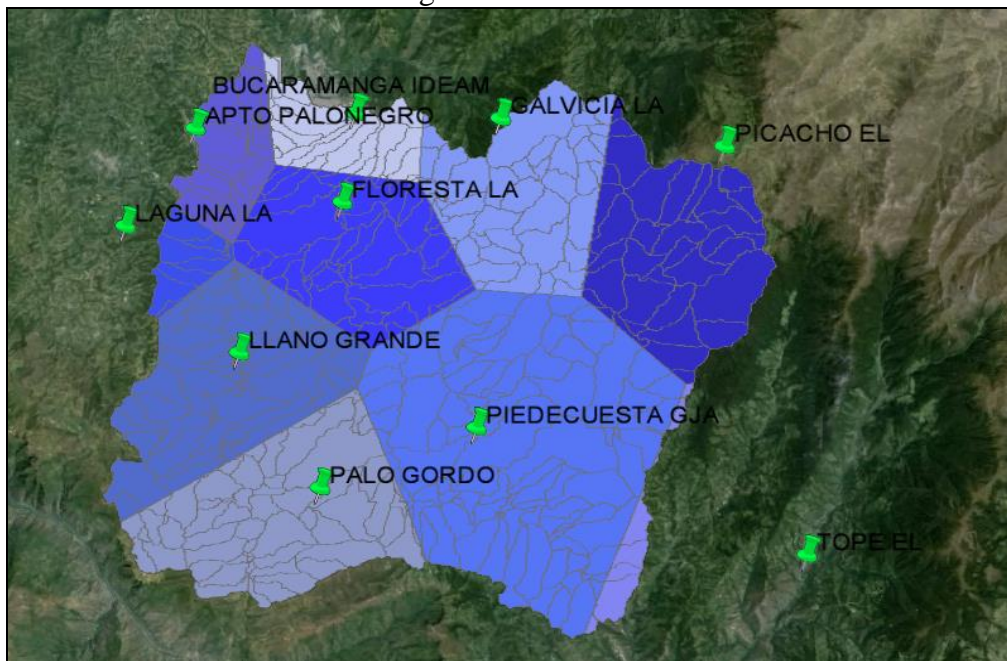


Figura 11. Áreas de influencia de las estaciones meteorológicas determinadas mediante Polígonos de Thiessen



Fuente: Google Inc.

De acuerdo a lo anterior, el cálculo del caudal permanente para el Río de Oro corresponde al estipulado en la tabla 6.

Tabla 6. Resumen de caudal (m<sup>3</sup>/s) permanente para el Río Oro

<b>Drenaje</b>	<b>Tr 2.33 Años</b>
Río de Oro	8.8

De igual manera, para el cálculo de caudal medio anual y un caudal crítico o mínimo, se hizo uso del balance hidrológico a largo plazo, el cual permite evaluar las condiciones hidrológicas de una cuenca mediante la consideración de la precipitación y evapotranspiración.

$$\text{Ecuación 8. } Q = (\bar{P} - \bar{E}) * A_i$$

Donde:

Q: Caudal medio Anual

P: Precipitación Media Anual

E: Evapotranspiración

A: Área de la Subcuenca

Dado que no existe registro de evaporación en la zona de estudio, se hace uso del método de Thornthwaite (1948) para el cálculo de la variable en mención, a partir de información de Temperatura. La precipitación media sobre las cuencas fue obtenida con base en la distribución de polígonos de Thiessen presentados anteriormente en la figura 11.

Es importante mantener presente que debido a la falta de información de caudales de las corrientes de interés, fue necesario mediante un análisis hidrológico, calcular un caudal bajo, que permitiera definir una condición crítica en los escenarios de modelamiento planteados. De igual manera se recuerda que no corresponde a los objetivos de esta tesis la elaboración de dicho análisis; sin embargo, fue necesario definir dicho caudal que permitiera evaluar el comportamiento de las variables objeto de modelamiento en condiciones críticas. Por lo tanto, el estudio no consiste en calcular el caudal ambiental de las corrientes, pues esto requiere de una profundización mayor, ya que no existe aún una única metodología para el establecimiento de los caudales ambientales generalizada a nivel de cuencas hidrográficas (Carvajal 2009).

De acuerdo a lo anterior, y debido a que la mayoría de los métodos utilizados para calcular un caudal mínimo se analizan registros históricos anuales, y ya que no se cuenta con registros de niveles y/o caudales diarios, o con periodos de registro superiores a 10 años, se tomó como criterio, un caudal mínimo o crítico del 25% del caudal medio anual. Según Castro, Lina Heredia; Carvajal, Jesid Escobar (2009) en Chile se contempla como caudal ecológico el 10% del caudal medio anual, siendo este el criterio que ha sido comúnmente en Chile por la Dirección General de Aguas (1999).

De igual manera, según las mediciones realizadas por la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del AMB durante el periodo del fenómeno del niño, año 2015, fue posible verificar el comportamiento de caudal de las corrientes en el fenómeno climático. En la tabla 7 se presentan los caudales mensuales medidos en los puntos antes de las corrientes de interés.

Tabla 7. Medición mensual de caudales red de calidad del agua del AMB

2015	Caudal Río de Oro m <sup>3</sup> /s		Caudal Quebrada la Iglesia m <sup>3</sup> /s			
	RF-G-01 Caneyes	RO-G-04 Bahondo	QLF-B-01 La Flora	QLC-B-01 La Cascada	QM-B-01 El Macho	QG-B-01 La Guacamaya
Enero	3.834	0.605	0.182	0.04	0.00108	0.001375
Febrero	0.978	5.715	0.006537	0.022	0.001413	0.007756
Marzo	1.513	0.940	0.005351	0.024	0.0121	0.017
Abril	1.474	1.595	0.209	0.02	0.000561	0.009108
Mayo	1.155	0.894	0.00589	0.018	0.00593	0.01198
Junio	1.766	2.225	0.017	0.035	0.0093	0.013
Julio	1.492	0.872	0.035	0.041	0.00154	0.012
Agosto	1.334	1.369	0.007	0.0172	0.001158	0.0099
Septiembre	1.038	1.677	0.007085	0.02	0.00293	0.011
Octubre	0.919	1.735	0.005332	0.017	0.000344	0.001935
Máximo	3.834	5.715	0.209	0.041	0.012	0.017
Mínimo	0.919	0.605	0.005	0.017	0.000	0.001
Prom. 2015	1.550	1.763	0.048	0.025	0.004	0.010
Caudal mínimo aguas arriba	1.524		0.024			

Fuente: Red de monitoreo de la calidad del agua del AMB, 2015

Según la tabla 7, el caudal mínimo en el punto sobre el Río de Oro antes de la confluencia de la Quebrada La Iglesia (frontera superior Río de Oro) es de 1.524 m<sup>3</sup>/s, generados de la sumatoria del punto RO-G-04 en Bahondo, y el punto RF-G-01 en el puente Caneyes, que corresponde al Río Frío.

Para la Quebrada La Iglesia antes del vertimiento del Carrasco el caudal mínimo fue de 0.024 m<sup>3</sup>/s, y se halló realizando la sumatoria de los caudales mínimos del punto de la Quebrada La Flora (QLF-B-01), La Cascada (QLC-B-01), el Macho (QM-B-01) y la Guacamaya (QG-B-01).

De acuerdo a lo anterior, fue posible tener una magnitud o un valor aproximado de los caudales críticos o bajos en los puntos de fronteras superior del Río de Oro y de la Quebrada la Iglesia

La razón de no contemplar el 10% del caudal medio anual para el escenario de modelamiento, se debe a que los caudales corresponderían a valores muy bajos tanto en la Quebrada La Iglesia como en el Río de Oro, y deberían preservar los ecosistemas de las fuentes, y para el presente estudio, se requiere suponer el vertimiento del lixiviado tratado.

Los resultados de los caudales son los presentados en la tabla 8. El caudal crítico o mínimo equivale al 25% del caudal medio anual, tal y como se presenta en la tabla 7.

Tabla 8. Caudal Medio y Mínimo.

<b>Drenaje</b>	<b>Caudal Medio Anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal crítico o mínimo (m<sup>3</sup>/s)</b>
Río de Oro (AAR)	4.898307	1.224577
Quebrada La Iglesia (AAR)	0.203	0.045

La sigla aguas arriba - AAR, hacen referencia a los valores de caudales en la frontera superior de cada corriente.

#### 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MONITOREO DE AGUA SUPERFICIAL Y DE VERTIMIENTOS

Como parte del desarrollo del estudio de modelamiento de la calidad del agua, se realizó una jornada de monitoreo compuesta por tres días de trabajo desarrolladas de la siguiente manera.

- **Día uno:** Consistió en mediciones hidráulicas durante un periodo de monitoreo de diez horas en las dos fronteras de la Quebrada La Iglesia (punto inicial y final del tramo), y en dos del río del Oro (punto inicial y final del tramo). En estas mediciones fue posible obtener información sobre el ancho de las secciones, las profundidades, la velocidad transversal y el caudal.
- **Día dos:** Consistió en la realización de la prueba con trazadores, para lo cual se utilizó la Rodamina WT como la sustancia química trazadora en la corriente. En la medición se utilizó para cada una de las corrientes tres puntos, que corresponden al punto de inyección de la sustancia, y dos puntos de medición de la concentración de la sustancia. La medición se realiza desde aguas abajo hasta aguas arriba con el fin de no alterar el dato de concentración de la sustancia. Por lo anterior, se realizó la medición primero en el Río del Oro y posteriormente la Quebrada La Iglesia. En la medición se utilizaron dos equipos de lectura de rodamina WT, lo que permitió conocer la velocidad longitudinal de las secciones, así como el coeficiente de dispersión.
- **Día tres:** En este día se realizó el monitoreo en la columna de agua, en el vertimiento, y en el sedimento. Las tomas de las muestras se realizaron haciendo el seguimiento de masa, por lo que inició en horas de la mañana el monitoreo y finalizado en horas de la noche. El monitoreo fue realizado por un laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, y algunas sustancias fueron subcontratadas igualmente con laboratorios acreditados, con el fin de buscar una credibilidad en los resultados.

En esta sección del presente informe, se relacionan los datos obtenidos durante el monitoreo realizado en el Área Metropolitana de Bucaramanga, departamento de Santander, por medio de un laboratorio acreditado ante el IDEAM, en el cual se hizo un análisis fisicoquímico de sedimentos y un análisis fisicoquímico y microbiológico de las aguas superficiales y residuales.

Los monitoreos descritos se llevaron a cabo los días 21 al 22 de mayo de 2015, para las matrices de sedimentos, agua superficial y agua residual, en los puntos establecidos previamente; esto con el fin de evaluar comportamiento y grado de cumplimiento respecto a los límites establecidos en los artículos 44, 72 y 74 del Decreto 1594 de 1984 del entonces Ministerio de Salud y Ministerio de Agricultura para las aguas superficiales y residuales.

La recolección de las muestras y análisis de laboratorio se realizó bajo las metodologías definidas en el “Standard Methods for Examination of Water and Wastewater”, 22<sup>a</sup> edición,

2005 y en el “U.S. EPA”. De igual manera fue utilizado un programa de aseguramiento de la calidad en el muestreo y el análisis de campo para correlacionar las condiciones del entorno con el comportamiento del vertimiento en un momento dado, curvas de calibración y certificados de calibración de equipos de laboratorio.

El monitoreo fue realizado con el laboratorio ANTEK S.A acreditado por parte del IDEAM, bajo la norma ISO 17025 mediante resolución 2636 de 2014.

Debido a la cantidad de sustancias que se requirieron analizar en laboratorio, fue necesario subcontratar con otros laboratorios, siempre asegurando que dichas variables se encuentren acreditadas por parte del IDEAM.

Debido a la extensión de los resultados de los monitoreos, se presenta en el Anexo 6 el informe técnico con los reportes por parte de ANTEK S.A., lo anterior por corresponder a la base de información para realizar la calibración de los modelos de calidad del agua.

Como el estudio busca conocer el comportamiento de las sustancias convencionales y no convencionales, se procuró tratar de analizar el mayor número de sustancias que permitieran alimentar los modelos de calidad del agua. Las sustancias analizadas en el laboratorio se presentan en la tabla 8, y en la misma se indican la cantidad de muestras y las sustancias acreditadas. Se buscó contar con el mayor número de sustancias acreditadas, pero debido a que el presente documento corresponde a un estudio de investigación, se analizaron sustancias en la cual no existían laboratorios en el país que contaran con dicha acreditación.

Tabla 9. Sustancias analizadas en laboratorio

Parámetros		Unidades	Laboratorio	Acreditación	Cantidad	Puntos					
						corrientes		vertimientos		Total	
Columna de agua	Sólidos	Totales	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
		Suspendidos	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
		Suspendidos volátiles	mg/l	Acueducto de Bogotá	Res. 1306 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Carbón	DBO5 filtrada	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
		DBO5 total no filtrada	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
		DQO filtrada	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
		DQO total no filtrada	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
		DBO 1,3,5,7,10, 15,20 (corriente)	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	7	4	28	13	91	119
		DBO 1,3,5,7,10, 15,20 (vertimiento)	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	7	0	0	13	91	91
		Nitrógenos	NTK	mg/l	Anascol S.A.S	Res. 2107 de 2014	1	8	8	13	13
	NH3 reportado como NH4		mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Nitritos		mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Nitratos		mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Fósforo	Fósforo total	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
		Fósforo reactivo soluble	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21

Parámetros		Unidades	Laboratorio	Acreditación	Cantidad	Puntos				
						corrientes		vertimientos		Total
	(SRP)									
	Demanda béntica	gO2/m2 /d	Dr. Calderón		1	8	8	0	0	8
	Clorofila Alpha	mg/m3	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8		0	8
Biológico	Coliformes totales y fecales	UFC	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
Sustancias No Convencionales	Fenoles	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014			0		0	0
	Cromo total	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Cromo trivalente +3	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Cromo Hexavalente +6	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Mercurio elemental (Hg 0)	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
	Metil Mercurio (Me-Hg)	mg/l	Petro Market		1	8	8	13	13	21
	Mercurio Divalente (Hg II)	mg/l	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8	13	13	21
Sedimento	Cromo trivalente +3	mg/Kg	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8		0	8
	Cromo Hexavalente +6	mg/Kg	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8		0	8
	Mercurio elemental (Hg 0)	mg/Kg	Lab. LMS	Res. 241 de 2015	1	8	8		0	8
	Mercurio Divalente (Hg II)	mg/Kg	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8		0	8
	Metil Mercurio (Me-Hg)	mg/Kg	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8		0	8
	Conductividad	mmho/cm	Antek S.A	Res. 3653 de 2014	1	8	8		0	8

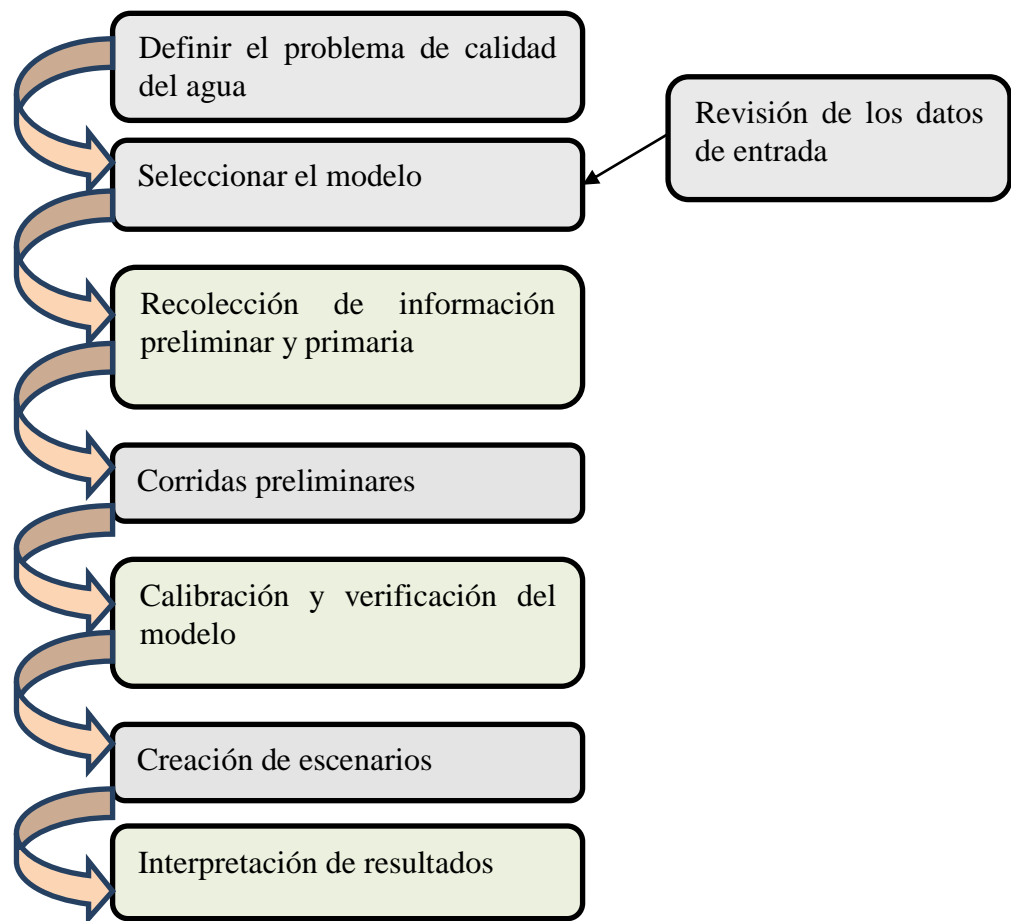
Parámetros	Unidades	Laboratorio	Acreditación	Cantidad	Puntos					
					corrientes		vertimientos		Total	
	Carbono Orgánico Disuelto	mg/Kg			1	8	8		0	8
	Nitrógeno Total	mg/Kg	Lab. LMS	Res. 241 de 2015	1	8	8		0	8
	Fósforo Total	mg/Kg	Lab. LMS	Res. 241 de 2016	1	8	8		0	8
	pH	Unidades de pH	Lab. LMS	Res. 241 de 2017	1	8	8		0	8

## 5 MODELO DE SIMULACIÓN DE LA QUEBRADA LA IGLESIA

De acuerdo con el objetivo del estudio, el alcance de la modelación es analizar el comportamiento de la calidad del agua en la Quebrada La Iglesia entre las dos (2) últimos kilómetros de la corriente, y parte del Río de Oro. Para lo anterior se plantearon diferentes escenarios, así como también se tuvo en cuenta la presencia de vertimientos de la red de alcantarillado principalmente. Es importante mencionar que el estudio se realiza bajo los lineamientos del decreto 3930 de 2010, y se recuerda que debido a que el análisis de calidad del agua se realiza utilizando condiciones de caudales bajos, en la modelación se considera que en las corrientes hídricas de interés se presentan condiciones de flujo permanente no uniforme.

El desarrollo del estudio se lleva a cabo por etapas siguiendo las actividades o pasos recomendados por la literatura de Sierra Ramírez, Carlos A. en su libro Calidad del agua: Evaluación y Diagnóstico (2011), como lo muestra la figura 12.

Figura 12. Etapas en el desarrollo de un estudio de modelación de la calidad del agua



## **5.1 GENERALIDADES DEL SISTEMA HÍDRICO A MODELAR**

El sistema objeto principal de la modelación lo comprende aproximadamente dos (2) últimos kilómetros de la Quebrada La Iglesia. Se concibe como cabecera de la corriente, un punto inmediatamente antes del vertimiento del Carrasco sobre la Quebrada La Iglesia. Y el tramo en el Río de Oro tiene como cabecera un punto antes de la confluencia de la Quebrada La Iglesia en el Río de Oro.

Los vertimientos que son tenidos en cuenta sobre la Quebrada La Iglesia corresponden al efluente de la planta de tratamiento de lixiviados del Carrasco, los vertimientos de los establecimientos definidos en la zona aferente al mismo mediante la denominada quebrada El Carrasco, que corresponden principalmente a talleres mecánicos de maquinaria pesada, y establecimientos comerciales y de servicios. Así mismo se analizó los vertimientos de la red de alcantarillado del Barrio la Esmeralda 1, del vertimiento del Barrio Esmeralda 2, el colector denominado la Iglesia, los cuales son de propiedad de la Empresa del Alcantarillado de Santander - EMPAS S.A E.S.P.

En el tramo de interés del estudio no se presentan corrientes afluentes importantes en términos de carga contaminante aportante en la Quebrada La Iglesia, sino que corresponden a vertimientos municipales principalmente, los cuales sí aportan una carga contaminante importante.

Debido a que se desea conocer el comportamiento de los contaminantes en las corrientes hídricas, se decidió modelar igualmente el Río de Oro, éste corresponde a la fuente hídrica principal, receptora de todos los vertimientos del Área Metropolitana de Bucaramanga, debido a que por topografía de la zona, tanto las corrientes como los vertimientos drenan hacia este corriente hídrica.

El estudio busca que adicionalmente al modelamiento sobre la Quebrada La Iglesia, se conozca el comportamiento de los contaminantes sobre un tramo del Río de Oro. Es por esto que fueron monitoreados los vertimientos de la margen derecha e izquierda, Carrizal, Distrito 4, Zona Chimitá de EMPAS S.A E.S.P., así como también parque Industrial primera etapa; y las quebradas Chimitá y la Cuyamita como tributarios importantes.

### **5.1.1 Características de los cuerpos de agua localizados en el área de estudio**

Para la caracterización hidráulica y de calidad de aguas del sistema hídrico, se realizó una revisión de la información histórica de calidad, la cantidad de agua y la cartografía por parte del Área Metropolitana de Bucaramanga, los resultados de monitoreos a través del laboratorio ANTEK, el cual se encuentra acreditado para toma de muestras y análisis de laboratorio según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM.

Debido a que la modelación del transporte de contaminantes en ríos requiere del conocimiento de parámetros hidrológicos (caudal, velocidad, coeficiente de dispersión) y geométricos (profundidad, anchura, sección transversal, pendiente), se realizó para fines de

precisión el cálculo de los tiempos de viaje, una campaña de aforos y de uso de trazadores sobre la corriente y medición de caudales.

Para el estudio se utilizó información secundaria, aquella que se obtiene de estudios anteriores y provenientes de diversas entidades; sin embargo, debido a la demora en la entrega de la información por parte de la CDMB, esta no fue tomada en cuenta para el mismo. La información permite al modelador y encargados del estudio conocer la importancia, grado de necesidad y complejidad del modelo requerido y estimar el error de modelación (Chapra, 1997). Esta información es utilizada para caracterizaciones generales, e iniciar el montaje y la calibración del modelo hidráulico.

Primero se configuró la red de elementos formada por cuerpos de agua y tramos. Se determinó, con base en la información revisada, la forma en la que se acoplaron cada uno de los elementos; y posteriormente, se definieron las características hidráulicas de cada tramo. Esto consiste básicamente en ubicar secciones transversales, definir el área y las relaciones hidráulicas de velocidad de flujo, forma de la sección, rugosidad del lecho y los taludes, pendiente del cauce y configuración en tramos de características homogéneas. A cada sección se le asignaron valores de nivel de banca llena, coeficientes de Manning, tiempos de viaje.

En el Anexo 6 se presentan los resultados del estudio de caracterización realizado en la campaña de mayo de 2015, que permiten conocer con profundidad los datos utilizados en el modelamiento de la calidad del agua.

### **5.1.2 Información sobre calidad del agua**

Para desarrollar la modelación, se utilizó información primaria generada por el Área Metropolitana de Bucaramanga AMB. Los siguientes corresponden a información primaria utilizada en el estudio:

- Resultados de la red de monitoreo de la calidad del agua del AMB del periodo de 2015 realizado por el laboratorio SIAMA LTDA.
- Monitoreo realizados por la Universidad Pontificia Bolivariana en el mes de mayo de 2015, por medio del laboratorio ANTEK S.A.

A partir de la información analizada se construye la base de datos de calidad de agua, de la cual se extrae la información que caracteriza en diferentes puntos la calidad del agua en las corrientes.

Para la calibración se utiliza la información del monitoreo de mayo 22 de 2015, debido a que este periodo corresponde a un fenómeno climatológico denominado el Niño, el cual permitió adelantar las mediciones en condiciones críticas de cantidad y calidad en las corrientes hídricas, pues las mismas presentaban niveles bajos de caudal, y altas concentraciones de las sustancias objeto de análisis.

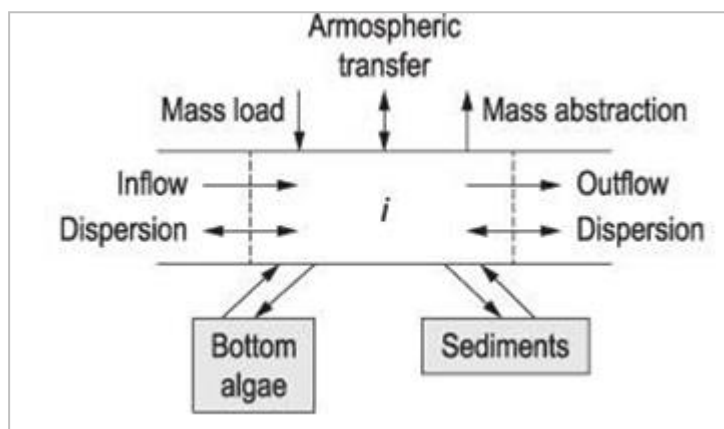
## 5.2 SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para realizar el modelamiento de la corriente hídrica, se utilizó el modelo QUAL2Kw, el cual es utilizado para la simulación de la calidad del agua en fuentes loticas como ríos y arroyos. El modelo XQUAL2KW es una versión nueva del modelo Q2K, el cual permite evaluar la capacidad de asimilación de agua residual en una corriente hídrica mediante la simulación de varios constituyentes de calidad del agua, utilizando una solución de diferencias finitas de las ecuaciones de advección-dispersión y de reacción.

El modelo QUAL2Kw es distribuido por el Departamento de Ecología del Estado de Washington y se basa en ecuaciones diferenciales ordinarias para los sistemas de una dimensión y una suposición de flujo constante. El QUAL2Kw puede simular una serie de componentes, incluyendo la temperatura, el pH, la demanda bioquímica carbonosa, la demanda de oxígeno del sedimento, el oxígeno disuelto, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrito y nitrato, fósforo orgánico, fósforo inorgánico, nitrógeno total, fósforo total, el fitoplancton y la demanda bentónica.

El modelo permite la simulación de cada parámetro de calidad del agua a lo largo de un tramo seleccionado. Sobre esta base, es posible realizar cálculos de balance de masa para cada componente del modelo, a excepción de las sustancias relacionadas con las algas. Para el tramo seleccionado se considera que es un reactor de mezcla completa, y la sucesión de los siguientes elementos permite que el modelo represente la evolución de la calidad del agua a lo largo del río (Pelletier et al., 2006). En la figura 13 se presenta el esquema de balance de masas utilizado como el elemento computacional en el modelo.

Figura 13. Esquema de balance de masa según Pelletier and Chapra (2005)



QUAL2Kw es un modelo de calidad de los ríos y el agua corriente que se pretende representar una versión modernizada del modelo QUAL2E (Brown y Barnwell, 1987). QUAL2Kw está relacionada con el modelo QUAL2K que fue desarrollado por el Dr. Steven Chapra (Chapra y Pelletier, 2003). Incluye algunos procesos y opciones que no están en QUAL2K. QUAL2Kw es similar a QUAL2E en los siguientes aspectos:

- Unidimensional. El canal está bien mezclado vertical y lateralmente.
- Hidráulica estado estacionario. No uniforme, se simula flujo constante.
- Presupuesto de calor Diel. El balance de calor y la temperatura se simulan dinámicamente como una función de la meteorología en una escala de tiempo diel.
- Diel cinética de la calidad del agua. Todas las sustancias de calidad del agua se simulan dinámicamente en una escala de tiempo diel.
- Calor y masa insumos. Cargas y abstracciones Point y no puntuales son simuladas.

El QUAL2Kw incluye los siguientes nuevos elementos:

- Entorno de software y la interfaz. Q2Kw se implementa en el entorno de Microsoft Excel / VBA. Se programa en el lenguaje de macros de Windows: Visual Basic para Aplicaciones (VBA). Excel se utiliza como la interfaz gráfica de usuario.
- Modelo de segmentación. Segmentos QUAL2E el sistema en el río compone elementos igualmente espaciados. En contraste, Q2Kw puede utilizar alcances desigualmente espaciadas. Además, múltiples cargas y abstracciones se pueden introducir a cualquier alcance.
- Carbón especiación. Q2Kw utiliza dos formas de carbono, en lugar de BOD, para representar carbono orgánico. Estas formas son una forma oxidante lentamente (carbono orgánico disuelto lenta) y una forma oxidante rápidamente (carbono orgánico disuelto rápido). Además, se simula la materia orgánica particulada no viva (detritus). Este material detrítico incluye partículas de carbono orgánico, nitrógeno, y fósforo.
- Anoxia. Q2Kw acomoda anoxia mediante la reducción de las reacciones de oxidación a cero en los niveles bajos de oxígeno. Además, la desnitrificación se modela.
- Bottom algas. Q2Kw explícitamente simula adjunta algas del fondo usando ya sea de orden cero o cinética de crecimiento de primer orden.
- Captación de lujo. Se simula estequiometría variable de nitrógeno y fósforo en algas del fondo.
- Extinción de la luz. Extinción de la luz se calcula como una función de las algas, detritus y los sólidos inorgánicos.
- pH. Tanto la alcalinidad y carbono inorgánico total son simuladas. Estos se utilizan para determinar el pH.
- Indicador de patógeno. Un indicador patógeno genérico se simula (por ejemplo, Coliformes fecales o enterococos). La eliminación de patógeno indicador se determina como una función de la temperatura, la luz, y sedimentación.
- Interacciones con el agua de sedimentos. Flujos de sedimentos de aguas de oxígeno disuelto y nutrientes son simuladas internamente en lugar de ser prescrito. El oxígeno (SOD) y los flujos de nutrientes son simuladas como una función de la solución de partículas de materia orgánica, diagénesis reacciones dentro de los sedimentos, y las concentraciones de formas solubles en las aguas suprayacentes.

- Flujo de calor en los sedimentos. Flujo de calor agua-sedimento y la temperatura de sedimentos se simula mediante la formulación de la ley de Fick para dar cuenta de la conducción entre el agua y los sedimentos y el flujo hyporheic y el intercambio de calor.
- Respiración hyporheic. El intercambio de agua entre la columna de agua de la superficie y la zona hyporheic, y la simulación de la calidad del agua de los poros de sedimentos, incluyendo la simulación opcional del crecimiento y la respiración de las bacterias heterótrofas biofilm en la zona hyporheic.
- Calibración automática. Un algoritmo genético se incluye para determinar los valores óptimos para los parámetros de velocidad cinética para optimizar la bondad de ajuste del modelo en comparación con los datos observados.
- Simulación de Monte Carlo. Listo para ejecutar simulaciones de Monte Carlo, ya sea con la YASAIw complemento, también disponible en el Departamento de Ecología.

### 5.2.1 Selección de los parámetros por simular

Dado que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible no ha expedido la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico, para la selección de los parámetros a modelar se tomó como guía los parámetros señalados en el parágrafo del Artículo 7 del Decreto 3930 del 2010, los cuales son modelados por las autoridades ambientales para efectos de realizar el Ordenamiento del Recurso Hídrico. De igual manera, para la selección de los parámetros por simular se tuvo en cuenta principalmente los objetivos de calidad fijados para la Quebrada La Iglesia y el Río de Oro en el tramo de interés, así como también las sustancias No convencionales que se ha presentado como valores superiores a los definidos en el artículo 74 del decreto 1594 de 1984. Adicionalmente para dicha selección se consideró también la información disponible en el proyecto, las caracterizaciones históricas realizadas por la red de monitoreo de la calidad del agua del AMB.

De esta manera los parámetros propuestos para simular en la evaluación ambiental de los vertimientos son:

- Oxígeno Disuelto (O.D)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Sustancias de interés sanitario (Cromo (Cr<sup>+6</sup>), Mercurio (Hg), Fenoles). A pesar de que el mercurio es una sustancia que en los diferentes monitoreos existentes no ha registrado un valor superior al definido en la norma de vertimientos actuales, sino por el contrario las concentraciones registradas son muy bajas, a las definidas por la norma, inclusive inferiores al límite de detección del método.

### 5.3 SEGMENTACIÓN (TRAMOS) DE LOS CUERPOS DE AGUA

#### ▪ Segmentación sustancias convencionales – Qual2kw

En la actualidad no existe un método científico o teórico que permita establecer el número de tramos o segmentos en los cuales se deba dividir una corriente con propósitos de aplicar un modelamiento de la calidad del agua.

De acuerdo a las características del sistema hídrico de interés del estudio, se considera que éste está formado por dos cuerpos de agua: 1) La Quebrada La Iglesia (aguas arriba de la confluencia con la quebrada El Carrasco) y 2) el Río de Oro. En Figura 14 se muestra Esquema hídrico del sistema en estudio.

Posterior a la definición esquemática del modelo, cada cuerpo de agua se divide en segmentos o tramos. Para determinar el número de tramos por dividir cada cuerpo de agua se tuvo en cuenta la siguiente información:

- Localización de las estaciones de monitoreo del estudio y de la red de monitoreo de la calidad del agua.
- La pendiente del cauce. Se trató que cada tramo tuviera una pendiente uniforme.
- El tiempo de retención en cada segmento sea aproximadamente igual.
- Identificación de los vertimientos de aguas residuales tanto domésticos como No domésticos.
- Importancia de las cargas contaminantes aportantes a las corrientes hídricas.
- Corrientes hídricas afluentes a la Quebrada La Iglesia y al Río de Oro.

En las tablas 9 y 10 se definen la cantidad y los números de vertimientos analizados y los puntos sobre las corrientes hídricas que fueron objeto de monitoreo.

Tabla 10. Nombre de los puntos de vertimientos analizados.

Número del Vertimiento	Nombre del vertimiento o corriente afluente
1	Q. El Carrasco
2	Puente Sena
3	B. La Esmeralda
4	Colector la Iglesia
5	Margen derecha Empas
6	Margen Izquierda Empas
7	Distrito 4 Empas
8	Carrizal Empas
9	Sector Chimitá Empas
10	Q. Chimitá
11	Parque Industrial I

Número del Vertimiento	Nombre del vertimiento o corriente afluyente
12	Q. Cuyamita
13	Efluente PTLX Carrasco

Tabla 11. Nombre de los puntos sobre las corrientes hídricas

Punto de Monitoreo sobre la corriente hídrica	Nombre del punto
LI-1	Antes de confluencia de Q. Carrasco (frontera superior)
LI-2	Puente Plaza de toros
LI-3	Sector Construvicol
LI-4	Abajo Barrio la Esmeralda (frontera inferior)
RO-1	Antes de vertimientos (frontera superior)
RO-2	Antes de confluencia de Q. Chimitá
RO-3	Aguas debajo de Parque Industrial I
RO-4	Puente tienda de Palo (frontera inferior)

El ingreso de las distancias entre los tramos y los puntos de monitoreo son de gran importancia al momento de alimentar el modelo de calidad del agua para sustancias convencionales, por lo que en las tablas 11 y 12 se presentan las distancias de cada uno de los tramos generados de las mediciones realizadas en las corrientes hídricas, y las distancias entre cada punto de monitoreo en la corriente y los vertimientos. Para una mejor visualización de los puntos, en la figura 14 se muestra el esquema hídrico.

Tabla 12. Distancias entre puntos de monitoreo en las corrientes hídricas

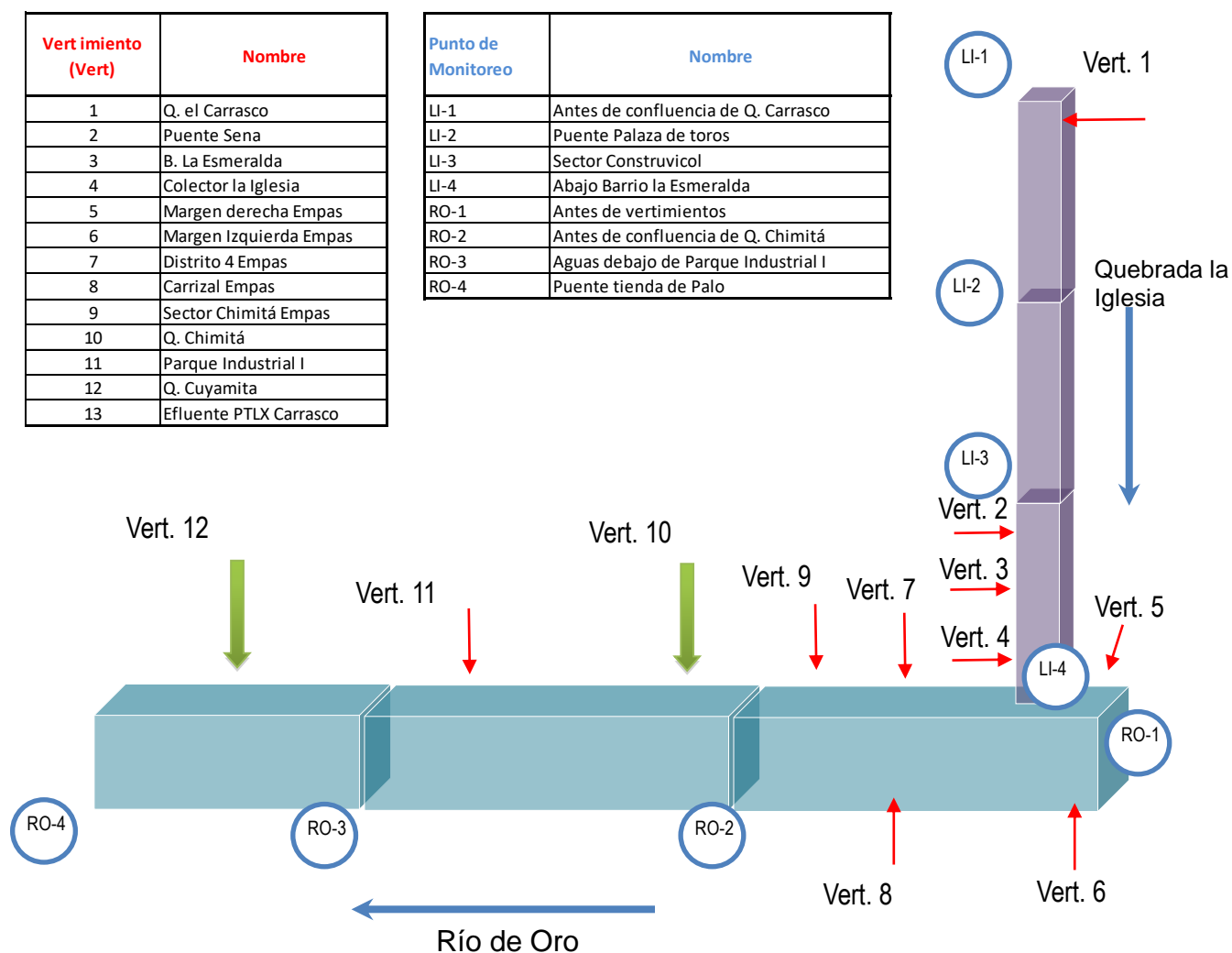
TRAMOS		Distancia (m)	Localización (m)		Elevación (m.s.n.m)	
			Upstream	Downstream	Upstream	Downstream
<b>Frontera Río de Oro</b>	P2-Ro	2394.38	6541.62	4147.24	687	676
	P2-Ro	2393.38	4147.24	1753.86	676	654
	P3-Ro	1753.86	1753.86	0	654	642
	P4-Ro PI AMB					
Total Río de Oro		6541.62				
<b>Frontera la Iglesia</b>	Plaza de toros	696.88	2286.49	1589.61	731	715
	Plaza de toros	706.05	1589.61	883.56	715	711
	Construvicol	725.75	883.56	157.81	711	687
	P4-LI	157.81	157.81	0	687	686

TRAMOS	Distancia (m)	Localización (m)		Elevación (m.s.n.m)	
		Upstream	Downstream	Upstream	Downstream
Río de Oro					
Total Quebrada La Iglesia	2286.49				
Total modelado	<b>8828.11</b>				

Tabla 13. Distancias entre puntos de monitoreo y vertimientos.

<b>RÍO DE ORO - VERTIMIENTOS O AFLUENTES</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Distancia acumulada (m)</b>
P1-RO Frontera	0	0
Vertimiento 2 RO margen izquierda	107.92	107.92
Vert. 1 RO margen derecha	23.49	131.41
Confluencia la iglesia con Río de Oro	70.69	202.1
Vertimiento 3-RO Distrito IV	618.62	820.72
Vertimiento 4-RO Carrizal	215.73	1036.45
Vertimiento 5-RO Zona industrial Chimitá	1215.89	2252.34
Vertimiento 6 Q. Chimitá	391.94	2644.28
Vertimiento 7-RO Parque Industrial	1531.01	4175.29
Vertimiento 8-Ro Q. Cuyamita	1441.35	5616.64
P4-RO PI AMB	924.98	6541.62
	<b>6541.62</b>	
<b>QUEBRADA LA IGLESIA - VERTIMIENTOS O AFLUENTES</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Distancia acumulada (m)</b>
Frontera la Iglesia	0	0
Vertimiento El Carrasco	21.5	21.5
Vertimiento 2-LI Sena	1885.27	1906.77
Vertimiento 3-La Esmeralda	137.39	2044.16
Vertimiento 4 Colector la Iglesia	186.4	2230.56
Confluencia la iglesia con Río de Oro	55.93	2286.49
	<b>2286.49</b>	

Figura 14. Esquema hídrico del sistema en estudio

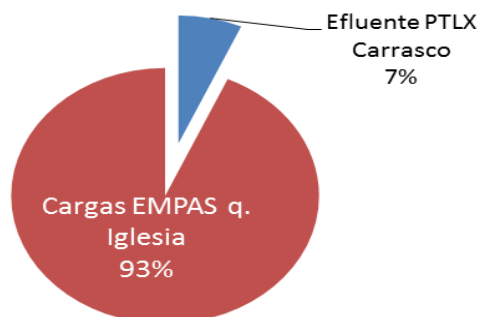


Sobre la Quebrada La Iglesia se presentan dos (2) vertimientos muy importantes que corresponde al efluente del sistema de tratamiento de lixiviados del Carrasco, y al Colector la Iglesia de la Empresa De Alcantarillado De Santander EMPAS S.A E.S.P., ubicados en el primer y último tramo de la quebrada respectivamente, tramo 1 y 3 según la figura 14.

En la gráfica 11 es posible identificar la diferencia en términos de porcentaje de carga aportada por cada una de las entidades, EMAB y EMPAS S.A E.S.P.

Gráfica 11. Porcentaje de cargas aportadas por entidades o empresas en la Quebrada La Iglesia

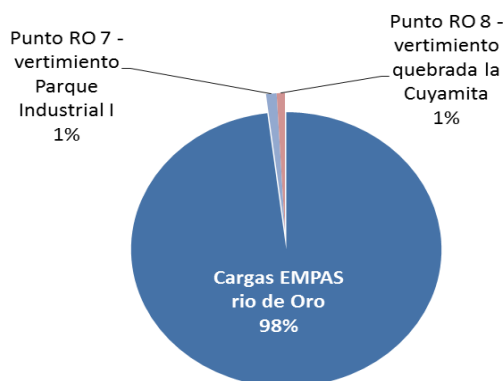
**CARGAS DBO5 EN Q. LA IGLESIA**



De igual manera, para el Río de Oro, los vertimientos importantes corresponden a lo aportado por la empresa de alcantarillado. En esta corriente se presentan mayor número de vertimientos al Río de Oro en comparación con la Quebrada La Iglesia en el tramo de interés, como se aprecia en la gráfica 12.

Gráfica 12. Porcentaje de cargas aportadas por entidades o empresas en Río de Oro.

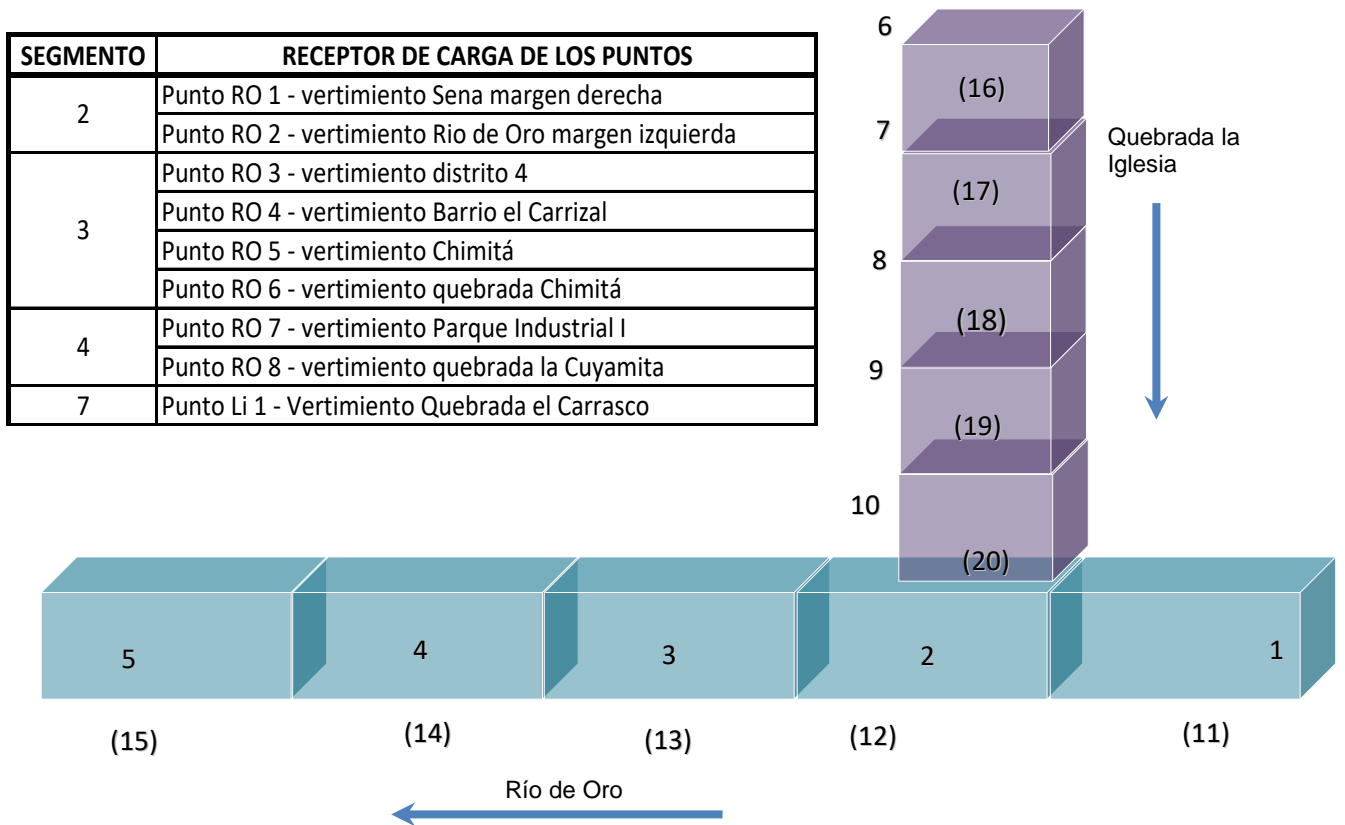
**CARGAS DBO5 EN RIO DE ORO**



▪ **Segmentación sustancias convencionales – WASP 7.52**

Adicionalmente, para efectos de la simulación de las sustancias tóxicas empleando el modelo WASP 7.52 se considera que a cada segmento superficial le corresponde un segmento de fondo. En conclusión, se cuenta diez (10) segmentos superficiales y diez (10) de fondo para un total de veinte (20) segmentos, como se observa en la figura 15.

Figura 15. Numeración de tramos del sistema hídrico Esquema isométrico modelo WASP 7.52



De acuerdo al modelo WASP 7.52, debido a que se contemplan sedimentos para el análisis de las diferentes sustancias de interés sanitario, en el modelo conceptual del programa se requiere contemplar los sedimentos, razón por la cual en el programa se generan veinte (20) segmentos, distribuidos así: los segmentos del uno (1) al diez (10) corresponden a la columna de agua del Río de Oro y de la Quebrada La Iglesia, siendo cinco segmentos para cada uno. Del once (11) al veinte (20) corresponden a la matriz de sedimento, del once (11) al quince (15) para los sedimentos del Río de Oro; y del dieciséis (16) al veinte (20) a los sedimentos de la Quebrada La Iglesia.

Así mismo, según la tabla presentada en la figura 15, se identifican los aportes de los vertimientos en cada segmento de las corrientes hídricas.

#### 5.4 Resultados de prueba de trazadores

Para el estudio se realizó la prueba de trazadores aplicando de manera instantánea la sustancia y haciendo el seguimiento de masa. Tanto para la Quebrada La Iglesia como el Río de Oro, se tomaron dos puntos de medición de la rodamina WT, ubicados abajo del punto de descarga de la sustancia, en las distancias como se indica en la tabla 13.

Tabla 14. Distancia de ubicación de los puntos de medición de la Rodamina WT en la Quebrada La Iglesia y Río de Oro

<b>Punto de medición en Q. la Iglesia</b>	<b>Distancia km</b>
Descarga rodamina WT	0
primera medición	0.6968
segunda medición	1.4029
<b>Punto de medición en el Río de Oro</b>	<b>Distancia km</b>
Descarga rodamina WT	0
primera medición	2.39438
segunda medición	4.78776

Antes de iniciar la prueba de trazadores, se realizó una medición hidráulica en las dos fronteras superiores de cada corriente, en el primer punto de la Quebrada La Iglesia y en el primer punto en el Río de Oro. De acuerdo a los datos promedio en la medición, para la Quebrada La Iglesia el ancho fue de 5.5 m, una velocidad de 0.24 m/s, profundidad de 0.38 m y un caudal de 0.251 m<sup>3</sup>/s. Para el Río de Oro se presentó un ancho de cauce de 16 m, una velocidad de 0.5 m/s, una profundidad de 0.63 m/s, y un caudal de 3.695 m<sup>3</sup>/s.

Para la Quebrada La Iglesia es posible identificar en las tablas 14 y 15 las mediciones de las concentraciones y tiempos de la sustancia para los dos puntos de control.

Tabla 15. Datos de lectura del trazador en la Quebrada La Iglesia para el primer punto de control.

<b>T (min)</b>	<b>Rodamina (ug/l)</b>	<b>Rodamina media</b>	<b>Tiempo de viaje</b>	<b>Varianza</b>
90	1.69	21.45	1995.5	185770
95	2.6	44.15	4350	428825
100	6.23	96.15	9940	1028125
105	13	188.9	20454	2215815
110	24.78	388.1	44012	4993235
115	52.84	672.5	79379	9373565
120	81.66	946.5	116271	14288895
125	107.64	1213.6	155077	19823635
130	135.08	1399.6	185569	24612805
135	144.84	1496.15	205840	28328765
140	154.39	1500.2	213669.25	30441676.25
145	145.65	1451.4	214068.75	31582331.25
150	144.63	1283.2	195280.25	29726076.25

<b>T (min)</b>	<b>Rodamina (ug/l)</b>	<b>Rodamina media</b>	<b>Tiempo de viaje</b>	<b>Varianza</b>
155	112.01	1074.35	169095.75	26621281.25
160	102.86	997.7	162049	26326645
165	96.68	885.65	148143.5	24785590
170	80.45	741.1	127681.25	22002306.25
175	67.77	620.6	110013.75	19505981.25
180	56.35	505.85	92173.5	16798522.5
185	44.82	388.3	72656.5	13597442.5
190	32.84	294.9	56684.5	10897487.5
195	26.14	237.65	46876.5	9247867.5
200	21.39	192.6	38948.25	7877441.25
205	17.13	150.35	31145.25	6452711.25
210	12.94	103.65	21961.25	4653733.75
215	7.79	41.04	8834.05	1901619.75
220	0.418			
<b>Sumatoria</b>		<b>16935.64</b>	<b>2532168.8</b>	<b>387698148.5</b>

Tabla 16. Datos de lectura del trazador en la Quebrada La Iglesia para el segundo punto de control.

<b>T (min)</b>	<b>Rodamina (ug/l)</b>	<b>Rodamina media</b>	<b>Tiempo de viaje</b>	<b>Varianza</b>
160	2.86	35.6	5802.5	945972.5
165	4.26	50	8393.5	1409322.5
170	5.74	69.2	11966.5	2069742.5
175	8.1	103	18337.5	3265312.5
180	12.5	153.5	28085	5139475
185	18.2	217.5	40870	7681125
190	25.3	292	56307.5	10859787.5
195	33.1	393	77772.5	15393137.5
200	45.5	529	107307.5	21770537.5
205	60.3	674.5	140137.5	29119837.5
210	74.6	831.5	176907.5	37643462.5
215	91.7	951	206927.5	45031162.5
220	98.5	1049.5	233675	52035125
225	111.4	1153	262405	59726525

T (min)	Rodamina (ug/l)	Rodamina media	Tiempo de viaje	Varianza
230	119.2	1219.5	283602.5	65961187.5
235	124.7	1275	302882.5	71959187.5
240	130.3	1300.5	315365	76482625
245	129.8	1253	310005	76706225
250	120.8	1167	294565	74359075
255	112.6	1097.5	282535	72741275
260	106.9	1040	272927.5	71630937.5
265	101.1	977	261262.5	69871087.5
270	94.3	862.5	234830	63941725
275	78.2	709	196565	54500575
280	63.6	556.5	157012.5	44303362.5
285	47.7	393.5	112922.5	32407662.5
290	31	225	65600	19127250
295	14	106.35	31555	9363250
300	7.27			
<b>Sumatoria</b>		<b>18684.65</b>	<b>4496525</b>	<b>1095445950</b>

De acuerdo a lo anterior, y según Chapra en el libro Surface Water Quality Modelling, se presenta a continuación los cálculos requeridos para hallar el coeficiente de dispersión de (Fischer 1968).

- |    |                           |             |                     |                        |             |                  |
|----|---------------------------|-------------|---------------------|------------------------|-------------|------------------|
| 1) | <b>Cmedia 1 km</b>        | <b>38.8</b> | ug/l                | <b>Cmedia 1 km</b>     | <b>19.5</b> | ug/l             |
| 2) | <b>Masa</b>               | 1993888889  | ug                  | <b>Masa</b>            | 2004166667  | ug               |
|    |                           | 1.99        | Kg                  |                        | 2.004166667 | Kg               |
| 3) | <b>Tiempo de viaje</b>    | 149.3298969 | min                 | <b>Tiempo de viaje</b> | 725.9615385 | min              |
|    |                           | 0.103831361 | días                |                        | 0.167120433 | días             |
| 4) | <b>Varianza</b>           | 856.2519928 | min <sup>2</sup>    | <b>Varianza</b>        | 4021.511341 | min <sup>2</sup> |
| 5) | <b>Vel media</b>          | 0.006936838 | km/min              |                        |             |                  |
|    |                           | 6.936837509 | m/min               |                        |             |                  |
| 6) | <b>Coef de dispersion</b> | 116.9293521 | m <sup>2</sup> /min |                        |             |                  |

Para el Río de Oro de igual manera se presenta en la tabla 16 las concentraciones y tiempos de la medición del trazador.

Tabla 17. Datos de lectura del trazador en el Río de Oro para el primer punto de control.

T (min)	Rodamina (ug/l)	Rodamina media	Tiempo de viaje	Varianza
110	57.9	1289.5	146845	16727950
115	200	2323.5	273820	32283400
120	264.7	2443.5	298820	36558400
125	224	1866	236980	30107400
130	149.2	1251.5	165222.5	21820137.5
135	101.1	834	114232.5	15651337.5
140	65.7	580.5	82530	11736900
145	50.4			
<b>Sumatoria</b>		<b>10588.5</b>	<b>1318450</b>	<b>164885525</b>

Tabla 18. Datos de lectura del trazador en el Río de Oro para el segundo punto de control.

T (min)	Rodamina (ug/l)	Rodamina media	Tiempo de viaje	Varianza
165	56	764.5	128565	21625050
170	96.9	1354.5	234615	40645800
175	174	1850	328650	58395750
180	196	1950	355850	64950250
185	194	1795	336200	62980750
190	165	1505	289350	55639500
195	136	1190	234600	46257000
200	102	909.5	183897.5	37188987.5
205	79.9	743	154032.5	31937337.5
210	68.7	343.5	72135	15148350
215				
<b>Sumatoria</b>		<b>12405</b>	<b>2317895</b>	<b>434768775</b>

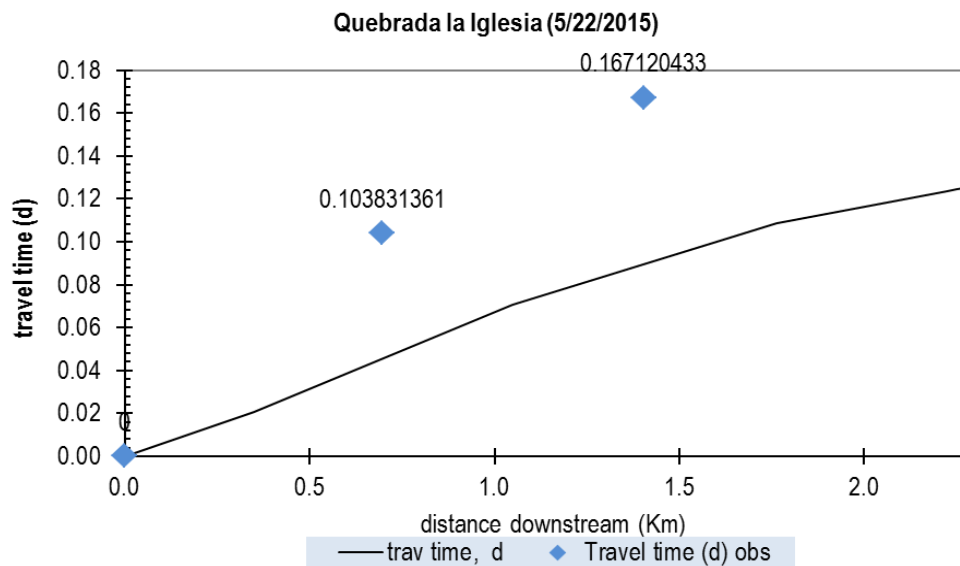
1) **Cmedia 1 km** 151.2642857 ug/l      **Cmedia 1 km** 124.05 ug/l

2) **Masa** 1173735225 ug  
1.17 Kg      **Masa** 1375094250 ug  
1.37509425 Kg

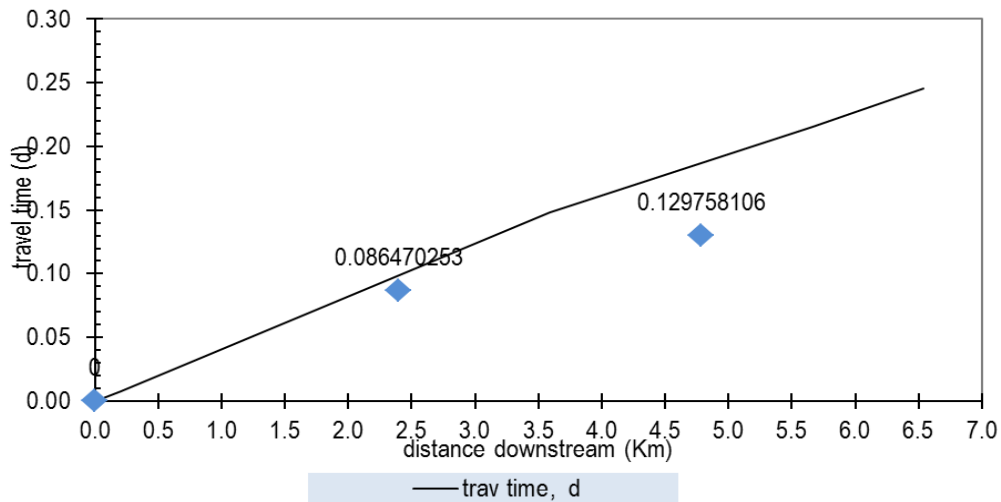
- |    |                                    |                               |                        |                              |
|----|------------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 3) | <b>Tiempo de viaje</b>             | 124.5171648 min               | <b>Tiempo de viaje</b> | 186.8516727 min              |
|    |                                    | 0.086470253 días              |                        | 0.129758106 días             |
| 4) | <b>Varianza</b>                    | 67.60816 min <sup>2</sup>     | <b>Varianza</b>        | 134.3181844 min <sup>2</sup> |
| 5) | <b>Velocidad media:</b>            | 0.038395747 m/min             |                        |                              |
|    |                                    | 38.39574711 m/min             |                        |                              |
|    |                                    | 138.2246896 km/d              |                        |                              |
| 6) | <b>Coefficiente de dispersión:</b> | 394.66934 m <sup>2</sup> /min |                        |                              |
|    |                                    | 6.577822333 m <sup>2</sup> /s |                        |                              |

De acuerdo a lo anterior, se presentan en las gráficas 13 y 14 los tiempos de viajes de la rodamina WT para los tramos en la Quebrada La Iglesia y en el Río de Oro.

Gráfica 13. Tiempo de viaje Quebrada La Iglesia



Gráfica 14. Tiempo de viaje quebrada para el Río de Oro  
Río de Oro (5/22/2015)



## 5.5 Calibración del modelo

El presente estudio ha sido elaborado dividiendo en dos fases el desarrollo de las actividades, la primera consiste en la modelación de los contaminantes convencionales utilizando el modelo QUAL2KW; y la segunda en la modelación de las sustancias tóxicas o no Convencionales empleando el modelo WASP 7.52.

Para el caso de los contaminantes convencionales se calibró el modelo QUAL2KW utilizando los datos del monitoreo realizado el 22 de mayo de 2013. Los resultados de la calibración se discuten más adelante.

Respecto al programa WASP 7.52, no fue posible realizar la calibración del modelo principalmente por las siguientes razones:

- Las concentraciones para Mercurio, Cromo, Fenoles obtenidas para el monitoreo de 22 de mayo de 2015 sobre la Quebrada La Iglesia y Río de Oro, arrojaron valores en todos los puntos monitoreados, por debajo del límite detectable del método utilizado.
- Según el artículo 43 del Decreto 3930 de 2010, mientras el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS publica la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico, el decreto no exige que la evaluación ambiental del vertimiento se haga utilizando un modelo calibrado.

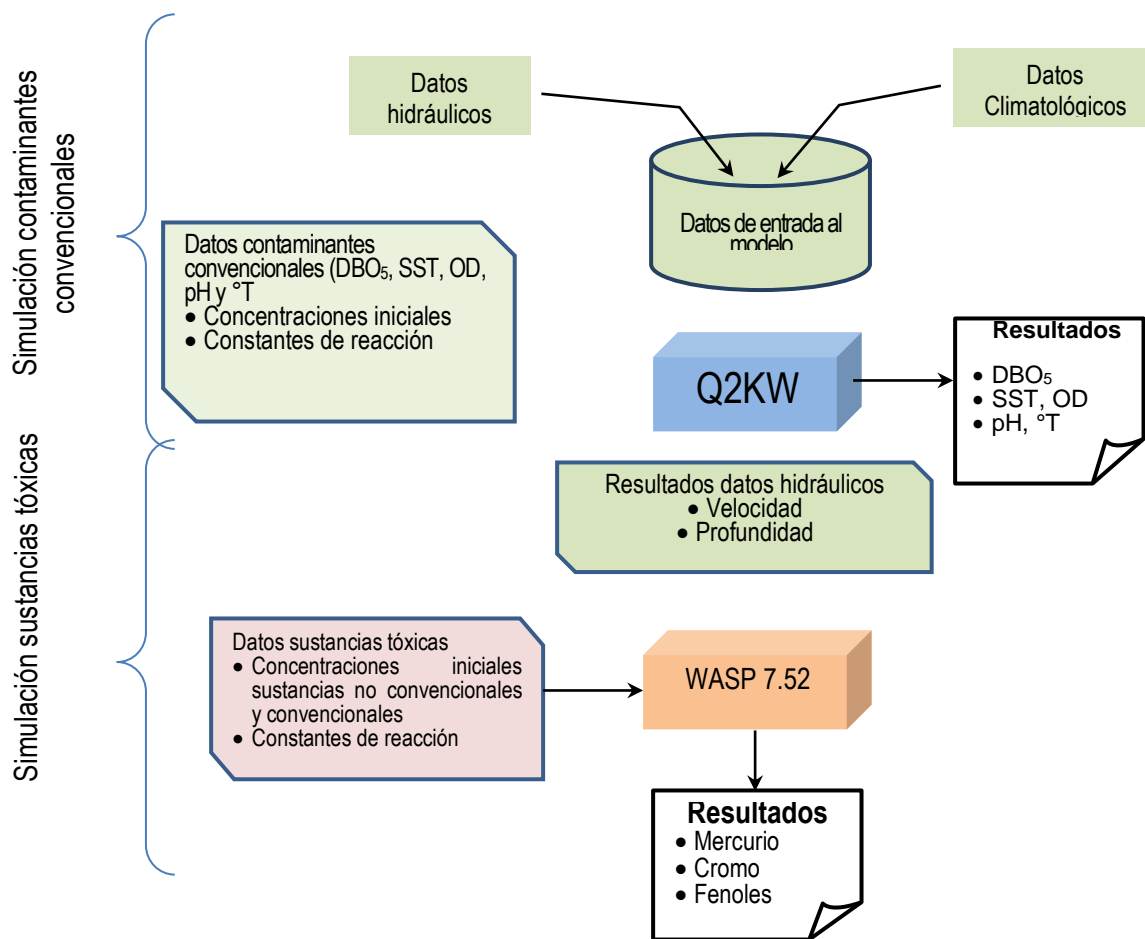
## 5.6 Estrategia de modelación

Con el propósito de simular los parámetros definidos, en el esquema de la figura 16 se muestra la estrategia de modelación a utilizar.

Se puede considerar que el estudio está dividido en dos fases simultáneas y complementarias. En una primera fase se simulan los contaminantes convencionales (DBO<sub>5</sub>, SST, OD, pH y temperatura); y en la segunda las sustancias tóxicas y metales pesados (Mercurio, Cromo y Fenoles).

Los contaminantes convencionales se generan por actividades naturales y su acción sobre el ambiente consiste básicamente en alterar el ciclo de producción/oxidación de la materia orgánica. Chapra (1997), los considera más relacionados con la calidad estética del recurso que con sus efectos sobre la salud humana.

Figura 16. Estrategia de modelación



Contrario a las sustancias convencionales, las sustancias tóxicas no se producen de forma natural, son generadas por actividades antrópicas y pueden influir en los procesos naturales. El análisis de este tipo de sustancias es complejo debido a que una sustancia puede presentar varias formas de reaccionar, se requiere de bastante información tanto de la columna de agua como en el sedimento de la corriente hídrica.

Para la simulación de los contaminantes convencionales se seleccionó el modelo Q2KW, por la facilidad de utilización, es aplicable al sistema en estudio, es un programa ampliamente utilizado en el país en estudios de modelación de la calidad del agua, y es posible encontrar información de estudios que han realizado dicho programa.

Para la modelación de las sustancias tóxicas se seleccionó el software WASP 7.52, pues contiene independientemente los módulos Mercury (mercurio) y Organic Toxicants (tóxicos orgánicos).

Para el modelamiento de las sustancias Convencionales como no Convencionales se toma información del monitoreo de mayo de 2015. Esta época climatológica es de gran importancia porque corresponde a una condición crítica, ya que pertenece a un fenómeno climatológico denominado el Niño, el cual favorece bajos niveles de caudal, y por lo tanto altas concentraciones de contaminantes en el agua. Se asume que en los cuerpos de agua por modelar se presenta flujo permanente no uniforme.

### **5.6.1 Estrategia de modelación de contaminantes convencionales**

El uso del programa Q2KW se debe al gran uso y experiencia en corrientes hídricas en Colombia, en estudios de evaluación de impacto ambiental y en la aplicación de los instrumentos económicos de gestión de calidad de agua (tasas retributivas por contaminación del agua).

De igual manera la facilidad en el uso del programa por estar desarrollado en formato Excel permite que el programa sea amigable con los usuarios y permita una mayor facilidad en la entrega de los resultados en forma gráfica y de tablas, y fácil manejo de los datos.

Para las corridas preliminares objeto de este estudio se simulan los parámetros DBO<sub>5</sub>, SST, OD, temperatura y pH. Entre las estrategias de modelación utilizadas en esta fase del estudio están:

- Ante la falta de información de campo, se realiza un monitoreo de vertimientos, columna de agua y sedimento con suficientes sustancias que permitan realizar cálculos de constantes biocinéticas.
- En la ausencia de constantes biocinéticas se utilizarán los valores por defecto que trae el software, una vez sean calibradas dichas constantes.
- De acuerdo con la profundidad y velocidad del agua, se seleccionó la opción de Owens y Gibbs para el cálculo de la constante de aireación.
- Se incluye la demanda béntica como un factor de consumo de oxígeno debido al alto contenido de materia orgánica y leve profundidad en los cuerpos de agua modelados y a la presencia de velocidades relativamente bajas que favorecen la sedimentación de los sólidos suspendidos.
- Análisis de sustancias en la matriz de sedimento por ser una información necesaria para comprender el destino de los contaminantes convencionales.

## 5.6.2 Estrategia de modelación de sustancias de interés sanitario

El programa para el análisis de la calidad del agua (Water Analysis Simulation Program) WASP, es un software de dominio público administrado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés).

Actualmente se dispone de la versión 7.52, y cada vez que se nombre WASP, se estará refiriendo a esta versión. Es importante indicar que la versión actual (7.52) no tiene un manual de usuarios actualizado, se dispone del manual de usuarios para la versión 6.0. El propósito del material presentado en esta sección es familiarizar al lector con las características básicas del programa para que comprenda la utilización. Para una completa revisión de las características y descripción del WASP, “*se recomienda al lector revisar el manual de usuarios del programa<sup>1</sup> y visitar la página web<sup>2</sup> de la EPA para bajar la información completa sobre el programa*”.

El WASP es un modelo dinámico que puede ser utilizado para analizar una gran variedad de problemas relacionados con la calidad del agua en cualquier cuerpo de agua (canales, lagos, embalses, ríos, estuarios, etc.).

Entre las características más importantes del programa se pueden nombrar las más significativas:

- El programa incluye el análisis en la columna de agua, así como en las capas que forman los sedimentos.
- El programa básico puede representar los procesos sustancias en el tiempo de advección, dispersión, cargas puntuales y difusas.
- La flexibilidad del programa permite al modelador estructurar problemas en una, dos y tres dimensiones. Además, puede especificar coeficientes biocinéticos, flujos advectivos, cargas de contaminantes y condiciones de frontera sustancias en el tiempo.

Si el usuario lo desea, puede desarrollar nuevas estructuras cinéticas o de reacciones siendo posible personalizar las características del sistema analizado.

### ▪ Generalidades

Básicamente se puede considerar al programa dividido en dos subprogramas o modelos de operación independiente: el modelo hidrodinámico y el modelo de calidad del agua. La figura 17 muestra un esquema del ensamblaje del programa.

Entre las limitaciones que presenta el WASP se pueden anotar:

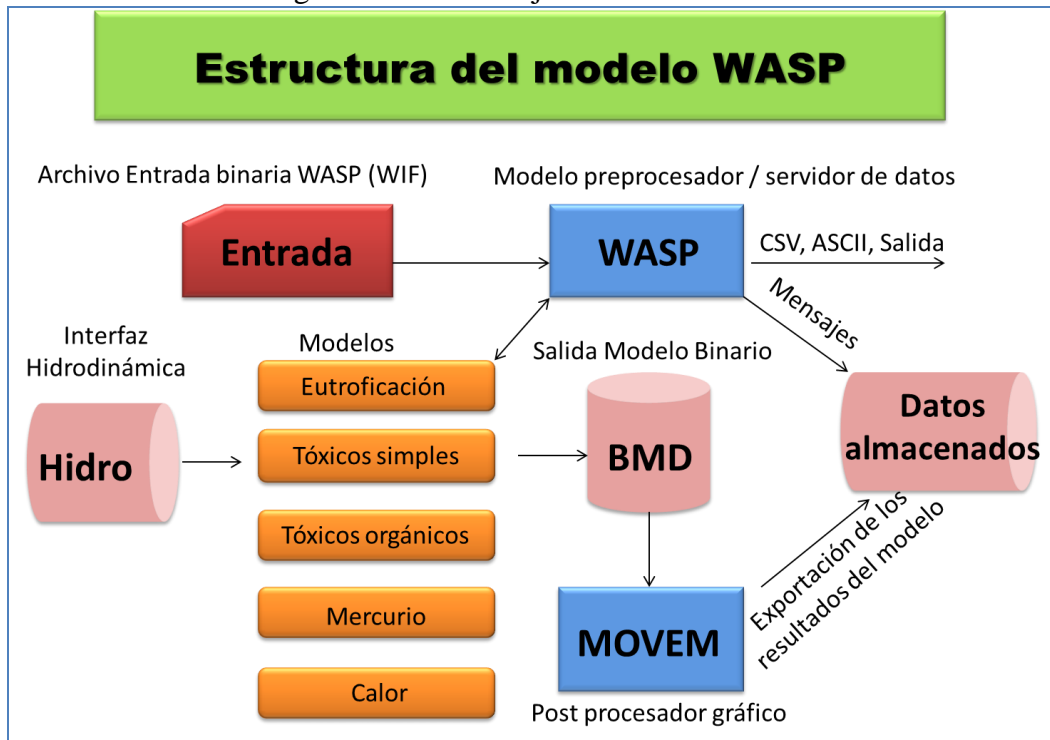
---

<sup>1</sup>Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), version 6.0, US Environmental Protection Agency – Region 4, Atlanta, USA, s.f

<sup>2</sup><http://epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html>

- No incluye el efecto de algunos parámetros o procesos tales como:
  - No aplica para derrames o vertimientos accidentales
  - El módulo de metales es limitado a determinadas especies generadas en los procesos que sufren estos compuestos en el agua.
- Potencialmente maneja archivos hidrodinámicos externos muy pesados
- Maneja módulos separados para eutroficación y sustancias tóxicas

Figura 17. Ensamblaje del modelo WASP



Fuente: <http://epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html>

#### ▪ Características básicas del modelo hidrodinámico

El programa hidrodinámico propio que trae el software es el modelo DYNHY, del cual puede ser ejecutado de manera separada o conjunta con el modelo de calidad del agua. Es importante tener en cuenta que el modelo de calidad del agua puede recibir la información hidrodinámica de modelos diferentes al DYNHYD tales los modelos hidrodinámicos que distribuye la EPA. El programa hidrodinámico (DYNHYD) simula el movimiento del agua mientras que el programa de calidad (WASP) simula el movimiento e interacciones de contaminantes en el agua.

A continuación, se enumeran las principales generalidades del análisis hidrogeométrico que realiza el programa DYNHYD:

- El método que utiliza WASP sigue los lineamientos de implementación de QUAL2K (Brown y Barnwell, 1987). En el WASP, las velocidades y profundidades se utilizan únicamente para cálculos de reaireación y tasas de volatilización.

- Los cálculos de velocidad no son usados para la estimación del tiempo de viaje.
  - El usuario puede especificar como datos de entrada series de tiempo para caudales en el cuerpo principal y tributario. La información requerida es por tanto:
    - Longitud, ancho, profundidad inicial
    - Exponentes y coeficientes hidráulicos (curvas de calibración)
    - Pendiente del fondo
    - Coeficiente de rugosidad de Manning
- **Características básicas del modelo de calidad del agua**

Para realizar la simulación de los diferentes parámetros el programa realiza un balance de masa. El usuario debe alimentar el modelo con datos de entrada que definen siete características importantes:

- i) Simulación y control de salidas
- ii) Segmentación del modelo
- iii) Transporte advectivo y dispersivo
- iv) Concentración en fronteras
- v) Fuentes puntuales y difusas de cargas contaminantes
- vi) Parámetros cinéticos, constantes y funciones de tiempo
- vii) Concentraciones iniciales

Para la solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas (opción de onda cinemática), se establece un intervalo de integración o simulación que define una malla computacional. La malla de trabajo del modelo es un grupo de volúmenes de control o segmentos, que en conjunto representan la configuración física del cuerpo de agua. La malla puede subdividir el cuerpo de agua lateralmente y verticalmente, así como longitudinalmente.

Los segmentos en WASP pueden ser de cuatro tipos, que se especifican con la variable de entrada. Segmentos tipo 1 indica el epilimnio (agua superficial), tipo 2 indica las capas del hipolimnio (subsuperficiales), tipo 3 indica una capa superior béntica y tipo 4 las capas inferiores bénticas.

▪ **Tipos de modelos o módulos**

El WASP tiene la opción de emplear cualquiera de ocho módulos disponibles de calidad del agua, los aspectos básicos de cada módulo se explican a continuación:

- i) Eutroficación.

En el módulo de eutroficación el usuario tiene la opción de simular todos o algunos de los parámetros básicos o convencionales de calidad del agua:

- Tres formas de DBO carbonácea: DBO (1), DBO (2) y DBO (3)
- Oxígeno disuelto
- Sólidos

- Nitrógeno amoniacal
- Nitratos
- Nitrógeno orgánico
- Ortofosfatos
- Fósforo orgánico
- Salinidad
- Fitoplacton (clorofila  $\alpha$ )

En este módulo, el programa no incluye todos los procesos de transformación que ocurren en el cuerpo de agua, por ejemplo, ignora el efecto de las algas perifíticas sobre la calidad del agua, así como no tiene en cuenta el flujo de nutrientes entre la capa de sedimentos y la columna de agua. Es un módulo simplificado aplicable a ríos o corrientes rápidas donde la sedimentación no sea importante y la calidad del agua no esté influenciada por la capa de sedimentos.

#### *ii) Eutroficación avanzada*

Además de incluir los parámetros de la opción anterior, en este módulo el usuario puede simular adicionalmente:

- Las formas disueltas de N y P
- Algas y su interacción con los nutrientes
- Tres formas diferentes de fitoplancton
- pH
- Alcalinidad

Esta opción considera los procesos más importantes relacionados con la calidad del agua y su interacción con las capas de sedimentos. El marco de cálculo incorporado en para la simulación del intercambio entre la zona béntica y la columna de agua, se encuentra basado principalmente en el estudio del lago Erie, el cual incorpora las interacciones sedimento – columna de agua, desarrolladas por Di Toro y Connolly (1980).

#### *iii) Tóxicos simples*

De acuerdo con las características de las sustancias tóxicas, este módulo considera que el tóxico desaparece siguiendo una reacción química de primer orden caracterizada por una tasa o constante de decaimiento. Adicionalmente, la afinidad del tóxico por los sólidos la tiene en cuenta especificando coeficientes de partición de equilibrio.

El módulo de tóxicos simples incluye la simulación de tres sustancias químicas que pueden adherirse a finos, arenas o sólidos orgánicos. Entre los compuestos químicos que se pueden simular con este módulo están: metales no reactivos como cobre, plomo, cinc y cadmio o sustancias orgánicas simples como PCB y homólogos.

Este módulo es recomendable utilizarlo cuando no se disponga de la información suficiente y se estén adelantando estudios empíricos: todas las constantes químicas, funciones de tiempo y parámetros ambientales pueden ignorarse y utilizar una tasa simple de transformación definida por el usuario.

#### *iv) Sustancias tóxicas orgánicas*

- Los modelos de campos lejanos, tal como WASP, simulan el transporte y destino último de químicos a través de un campo de agua. Estos modelos simulan la columna de agua y una capa de lecho e incluyen degradación química y adsorción / absorción de sólidos. Modelos más complejos pueden emplear mecanismos de decaimiento de segundo orden y adsorción / absorción no lineal o tasas constantes de primer orden.
- WASP puede utilizarse para simular contaminantes de primer orden incluyendo trazadores, intrusión salina y Coliformes.
- En un ambiente acuático, los químicos tóxicos pueden transferirse entre fases y pueden degradarse por varios procesos químicos y biológicos.
- Los procesos simplificados de transferencia en el modelo incluyen adsorción / absorción y volatilización.
- Los procesos de transformación incluyen biodegradación, hidrólisis, fotólisis y oxidación.
- La adsorción / absorción se maneja como una reacción de equilibrio. Los procesos de transformación simplificados se describen por tasa de primer orden.

Este módulo puede emplearse para simular las sustancias orgánicas ionizables tales como pesticidas y tóxicos orgánicos.

#### *v) Tóxicos no ionizados*

Este módulo es similar al de sustancias tóxicas orgánicas, simplemente que aplica a tóxicos no ionizados tales como:

- Metales radioactivos: arsénico, estaño, selenio, cromo:
- Sustancias orgánicas transformables: gasolina, petróleo BTEX, PAH, solventes clorados, PCB, VOC.

#### *vi) Mercurio*

El módulo para modelación de mercurio utiliza un subgrupo del módulo general para simular el ciclo del mercurio y su transporte en el cuerpo de agua. Se simula tres especies de mercurio,  $Hg^0$ ,  $Hg(II)$  y  $MeHg$ , así como de uno a tres tipos de sólidos. Las simulaciones son realizadas para las cargas de mercurio recibido de la atmósfera, tributario y fuentes puntuales.

#### *vii) Calor*

El módulo de calor está diseñado exclusivamente para simular la temperatura.

viii) Meta4

Este módulo actualmente se encuentra en construcción, no está disponible.

▪ **Esquema del modelo de transporte**

El modelo de transporte incluye los mecanismos de advección y dispersión de los constituyentes o parámetros de calidad del agua. La advección y la dispersión son subdivididas en seis tipos o campos diferentes. El primer campo de transporte involucra flujo advectivo y dispersión de mezcla en la columna de agua; el segundo campo de transporte especifica el movimiento del agua en medios porosos y en los sedimentos del fondo. El tercer, cuarto y quinto campos de transporte especifican el transporte de contaminantes particulados por sedimentación y resuspensión. El usuario puede definir los tres campos sólidos como fracciones del tamaño, tales como arenas, arcillas y limos, o como inorgánico, fitoplancton y sólidos orgánicos. Por último, el sexto campo de transporte representa evaporación y precipitación desde o hacia los segmentos de la superficie del agua.

Información adicional de transporte, como velocidades de flujo o de sedimentación, debe especificarse por el usuario en una base de datos de entrada a WASP. Para el flujo de agua, el usuario puede acoplar WASP con un modelo hidrodinámico.

Datos de entrada al modelo

A continuación, se explican sucintamente los datos de entrada requeridos por el modelo

- **Parámetros de control:** Estos parámetros definen la identidad básica del modelo, segmentación y control de la simulación. Incluye tipo de simulación, títulos de la simulación, número de segmentos, número de sistemas (sustancias de estado), intervalos de tiempo, tiempo inicial y final de simulación etc.
- **Parámetros de transporte:** Este grupo de parámetros define los transportes por advección y dispersión de las sustancias simuladas. Los parámetros de entrada incluyen flujos advectivos, velocidades de transporte de sedimentos, coeficientes de dispersión, áreas de secciones transversales y longitudes características.
- **Flujo advectivo:** Tanto flujo permanente como no permanente puede especificarse entre los nudos de los segmentos. El usuario debe ser cuidadoso con el chequeo de errores de continuidad dado que el modelo no requiere que la continuidad del flujo se mantenga. Para la simulación se recomienda utilizar los resultados de un modelo hidrodinámico para garantizar que la continuidad del flujo se mantenga automáticamente.
- **Coefficientes de dispersión:** Los coeficientes de dispersión pueden especificarse entre los nudos de los segmentos o a través de las fronteras. Estos coeficientes pueden modelar difusión en el medio poroso en segmentos béticos, difusión vertical en lagos y dispersión lateral y longitudinal en cuerpos de agua grandes. Los valores pueden variar entre  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para difusión molecular hasta  $5 \times 10^2$  para mezcla longitudinal en algunos estuarios.

- **Área de la sección transversal:** El área de la sección transversal se especifica para cada coeficiente de dispersión, reflejando el área a través de la cual ocurre la mezcla. Estas pueden ser áreas superficiales para intercambios verticales. Las áreas no se modifican durante la simulación por cambios de flujo.
- **Longitud característica de mezcla:** La longitud de mezcla se especifica para cada coeficiente de dispersión, reflejando la longitud sobre la cual ocurre la mezcla. Estas son típicamente las longitudes entre los puntos centrales de los segmentos.

- **Condiciones de frontera**

Se define como condiciones de frontera las características de calidad y cantidad de las sustancias de estado por simular en cada uno de los puntos donde se presenta un aporte externo (tributario, inicio o fin de un segmento, etc.).

Las condiciones de frontera que debe especificar el usuario son:

- Concentraciones de los parámetros por simular en los puntos de frontera
- Cargas contaminantes
- Concentraciones iniciales [mg/L]
- Fracciones disueltas
- Densidad de sólidos
- Concentraciones máximas

- **Parámetros de transformación**

Se denomina parámetros de transformación a la información general sobre los parámetros ambientales por incluir en la modelación. Este grupo de parámetros incluye sustancias espaciales, constantes y funciones de tiempo de cinética para parámetros como temperatura (cuando no se usa el módulo Heat), otras condiciones climáticas (velocidad del viento, horas de brillo solar, etc.).

- **Archivos de entrada externos**

Dos archivos de entrada externos pueden ser utilizados con WASP durante una simulación. Estos archivos pueden crearse por una simulación de un modelo, o por salida de una hoja de cálculo. Dado que son archivos con formato ASCII, deben editarse utilizando editores de texto estándar. Los archivos hidrodinámicos se denotan por \*.HYD. Las fuentes de cargas no puntuales se denotan por \*.NPS.

## Resultados

Los resultados de la modelación pueden ser organizados de tal manera que el usuario puede obtener los resultados a través diferentes medios:

- **Por pantalla.** Durante la simulación, el programa despliega en la pantalla los resultados a medida que va realizando los cálculos. Esta opción sirve simplemente para visualizar los resultados parcialmente.

- **Posprocesador.** El programa posee un procesador de resultados que le permite al usuario graficar los resultados de las sustancias que desea analizar. El manejo del posprocesador está descrito complemente en el manual de usuarios (ver referencia 13).
- **GIS.** El posprocesador también tiene la opción de plasmar los resultados en un archivo gráfico tipo shape. El manejo de esta opción está descrito complemente en el manual de usuarios (ver referencia 13).
- **Tablas formato Excel.** En la opción de control de salida (resultados) que posee el programa se puede habilitar la creación de archivos \*.csv. Los archivos \*.csv (*comma separation value*), por sus siglas en inglés, se importan a Excel, herramienta bajo la cual el usuario puede analizar la información de acuerdo a sus necesidades.

## **6 MODELACIÓN DE LOS CONTAMINANTES CONVENCIONALES Y TÓXICOS**

En las figuras 16 y 17 se presentaba el esquema base o modelo funcional del sistema en el cual se consideran los tramos, los drenajes, los tributarios y vertimientos. Con base en dicho esquema se construyeron los escenarios considerados.

En resumen, el modelo del sistema hídrico por simular presenta los siguientes componentes:

- Dos cuerpos de agua principales: Quebrada La Iglesia y Río de Oro
- Segmentos o tramos superficiales
- Dos (2) tributarios o quebradas afluentes al Río de Oro
  - Quebrada Chimitá
  - Quebrada Cuyamita
- Trece (13) vertimientos
  - Doce que corresponden a los aportes a las corrientes hídricas y un vertimiento que corresponde al efluente del sistema de tratamiento de lixiviado actual.

Existen otros vertimientos provenientes de establecimientos comerciales como Central de Abastos, y Parque Industrial I etapa; así como también quebrada Chocoita, sin embargo, corresponden a aportes de carga fisicoquímica y organoléptica tan bajas, que no amerita realizar un tratamiento a dichos drenajes.

### **6.1 Generación de escenario base para la calibración**

A continuación, se presenta en las gráficas 15 a 34 los resultados obtenidos para el escenario base o escenario de calibración para la Quebrada la Iglesia y el Río de Oro. La información utilizada para la calibración corresponde a los resultados del monitoreo del 22 de mayo de 2015, realizado por el laboratorio ANTEK S.A.S, según los tres días de monitoreo. En numerales anteriores fue explicado los puntos seleccionados sobre las corrientes hídricas.

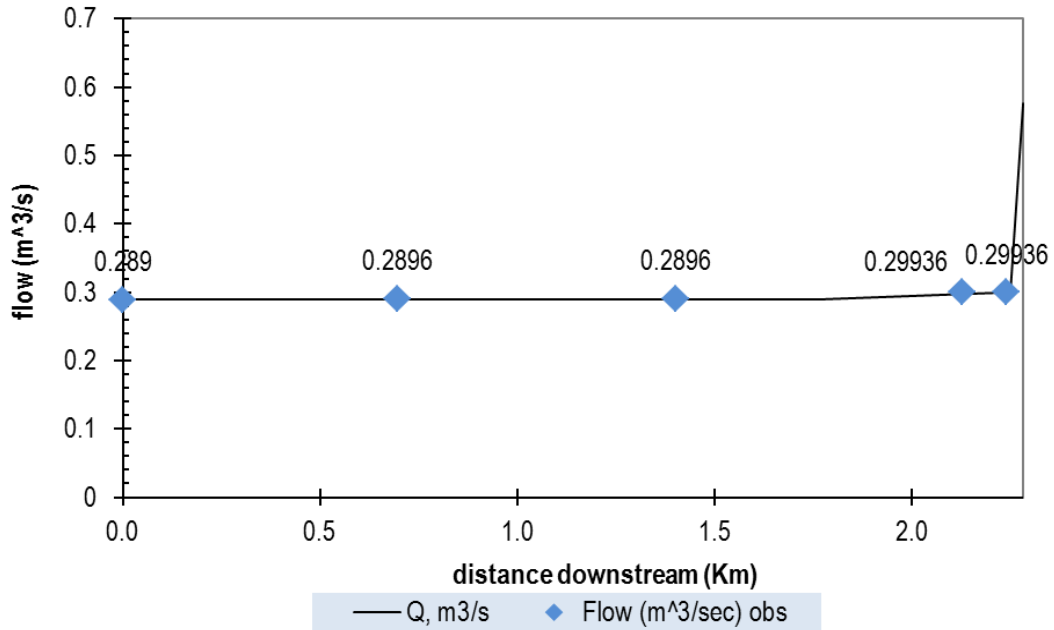
De acuerdo a la selección de las sustancias, se presentarán las gráficas de caudal, velocidad, profundidad, temperatura, pH, Oxígeno Disuelto, DBO rápida, Coliformes Fecales, Nitrógeno Total, y Sólidos Suspendidos Totales. Los resultados son presentados por corriente hídrica, que corresponden a la Quebrada La Iglesia, y Río de Oro.

Es importante mencionar que la información utilizada del monitoreo de mayo 22 de 2015, se considera ideal para la calibración del modelo por corresponder a una condición crítica climatológica y por lo tanto de condiciones críticas de cantidad y calidad del agua de las corrientes hídricas. Este fenómeno favorece un bajo caudal en las corrientes hídricas y unas concentraciones de sustancias altas en el agua.

▪ **QUEBRADA LA IGLESIA**

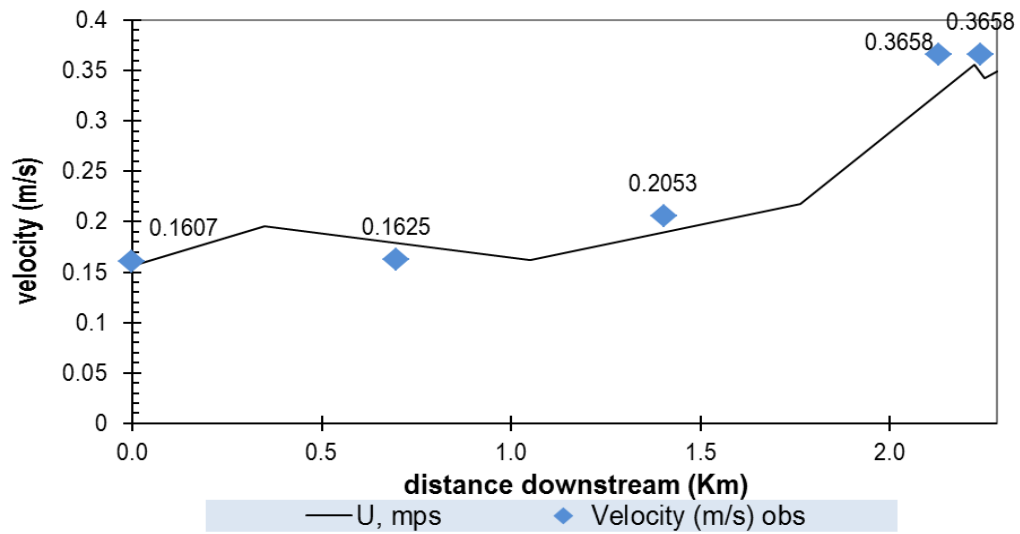
Gráfica 15. Comportamiento del flujo en la Quebrada La Iglesia

Quebrada la Iglesia (5/22/2015)

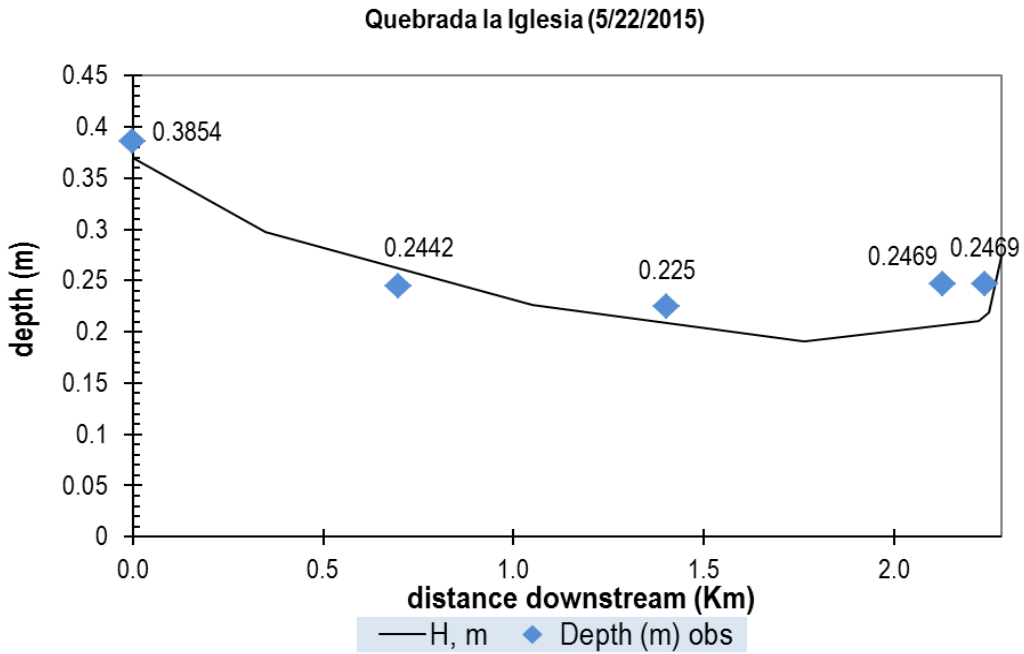


Gráfica 16. Comportamiento de la velocidad en la Quebrada La Iglesia.

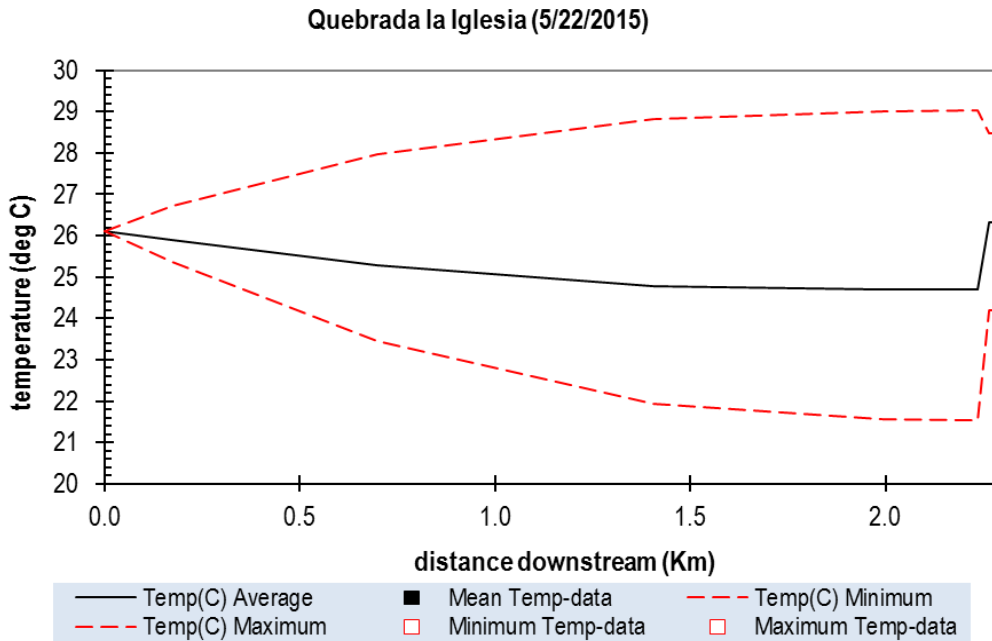
Quebrada la Iglesia (5/22/2015)



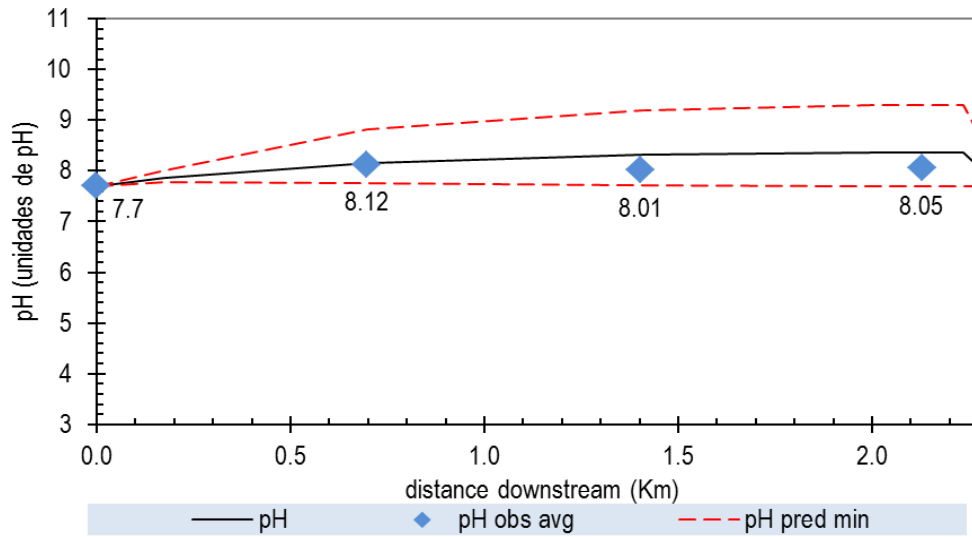
Gráfica 17. Comportamiento de la profundidad en la Quebrada La Iglesia.



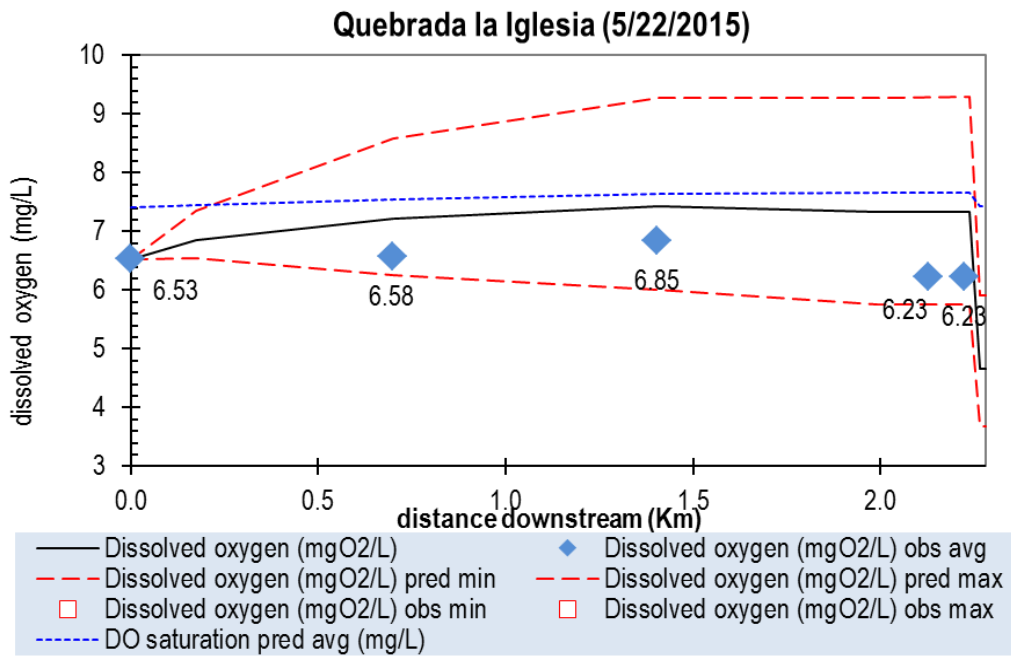
Gráfica 18. Comportamiento de la temperatura en la Quebrada La Iglesia



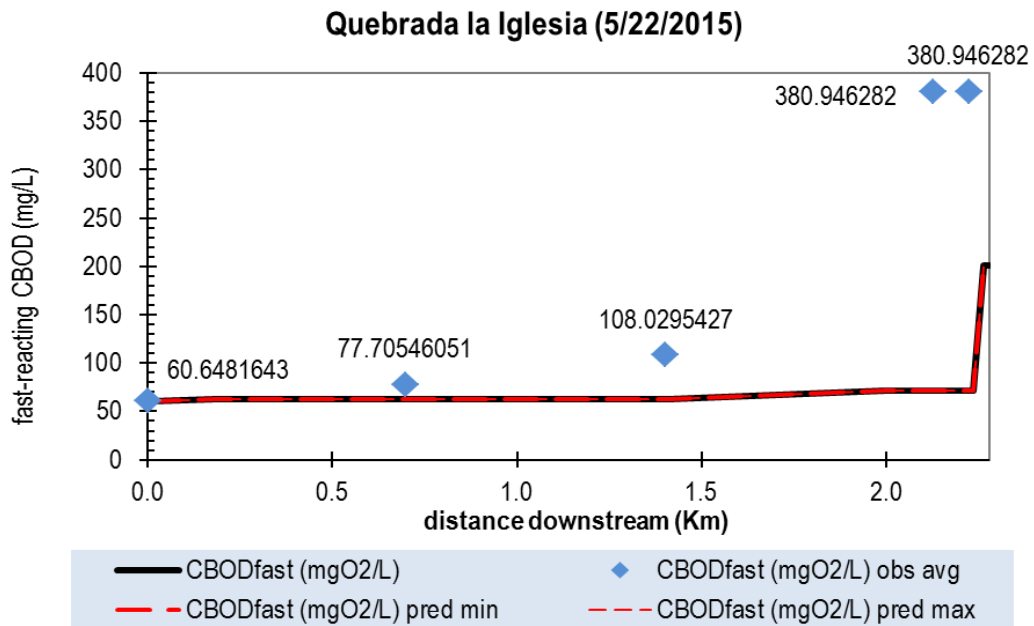
Gráfica 19. Comportamiento del pH en la Quebrada La Iglesia  
Quebrada la Iglesia (5/22/2015)



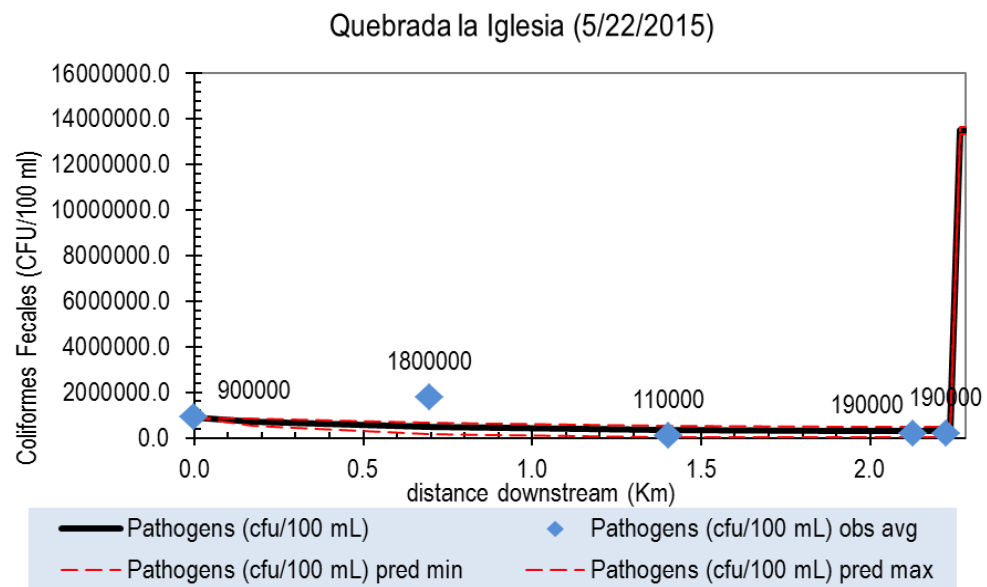
Gráfica 20. Comportamiento del oxígeno disuelto en la Quebrada La Iglesia



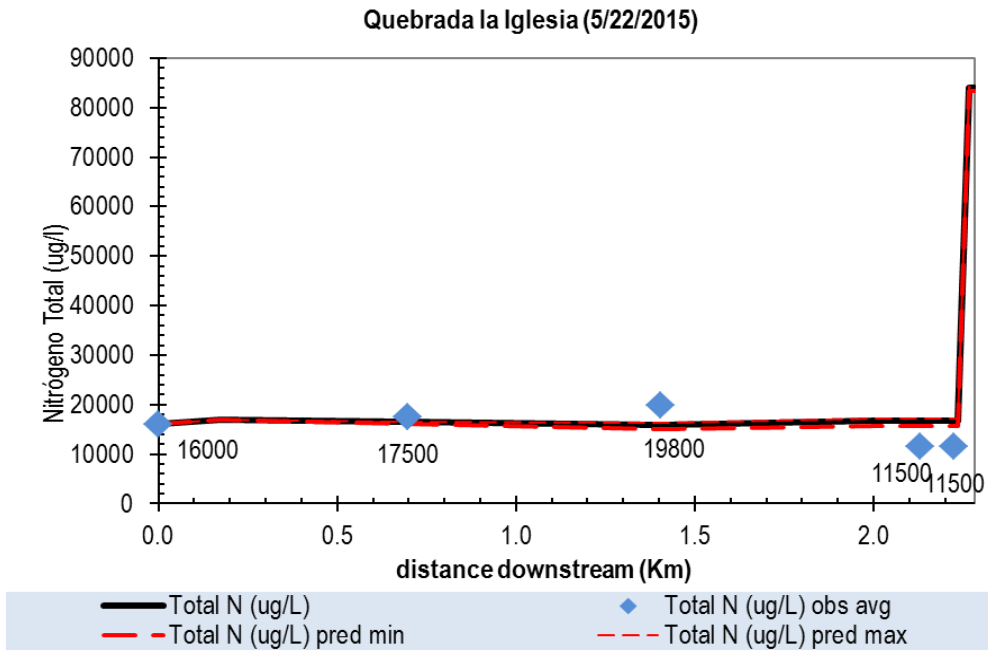
Gráfica 21. Comportamiento de la DBO rápida en la Quebrada La Iglesia



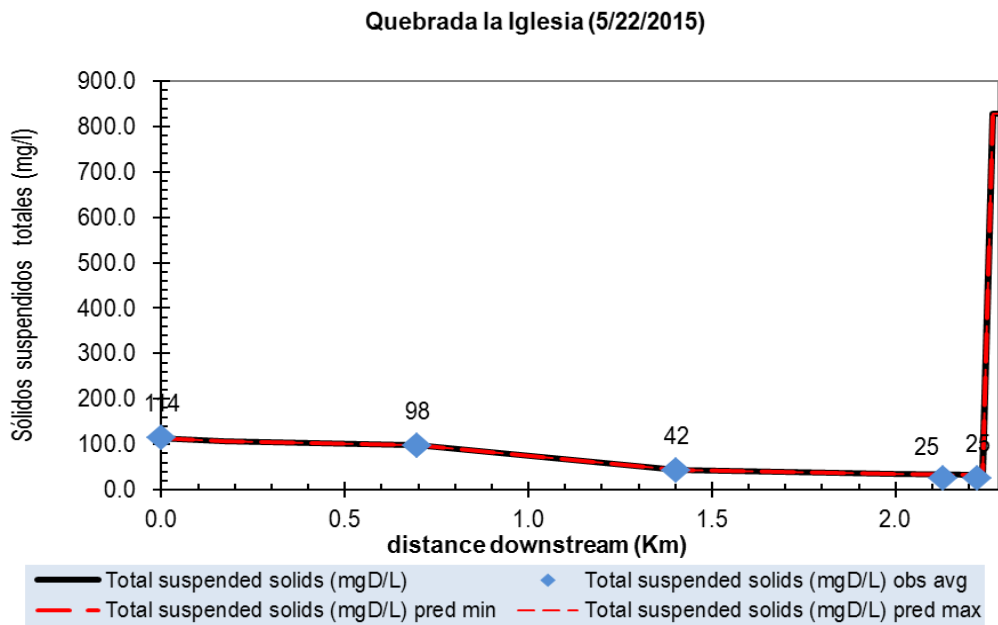
Gráfica 22. Comportamiento de los Coliformes Fecales en la Quebrada La Iglesia



Gráfica 23. Comportamiento del Nitrógeno Total en la Quebrada La Iglesia

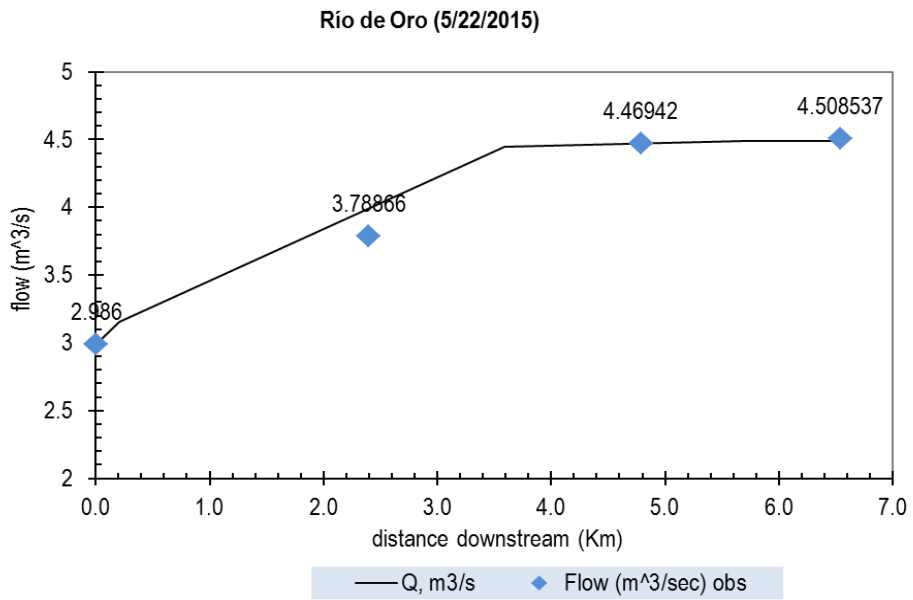


Gráfica 24. Comportamiento de los Sólidos Suspendingos en la Quebrada La Iglesia

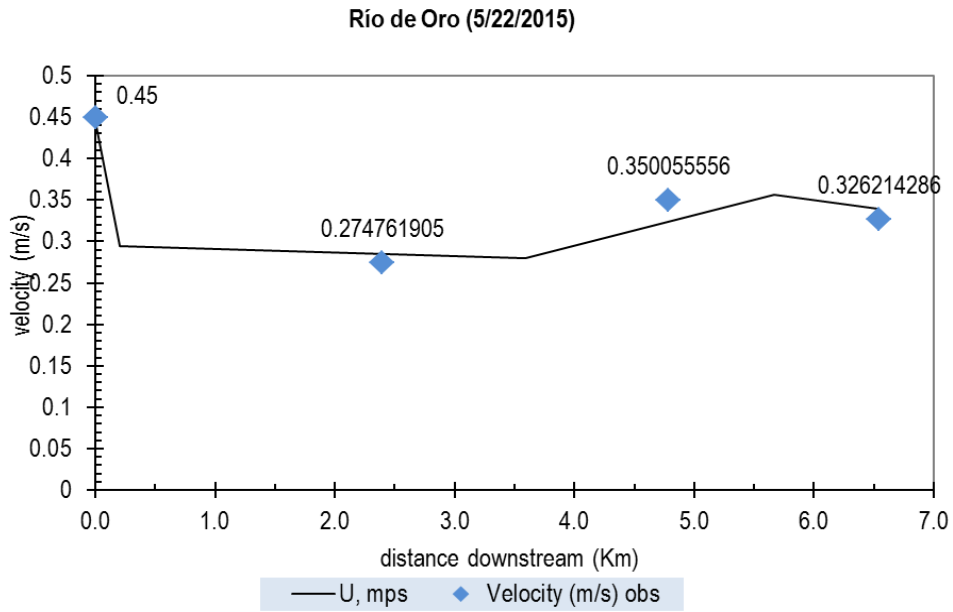


▪ **RÍO DE ORO**

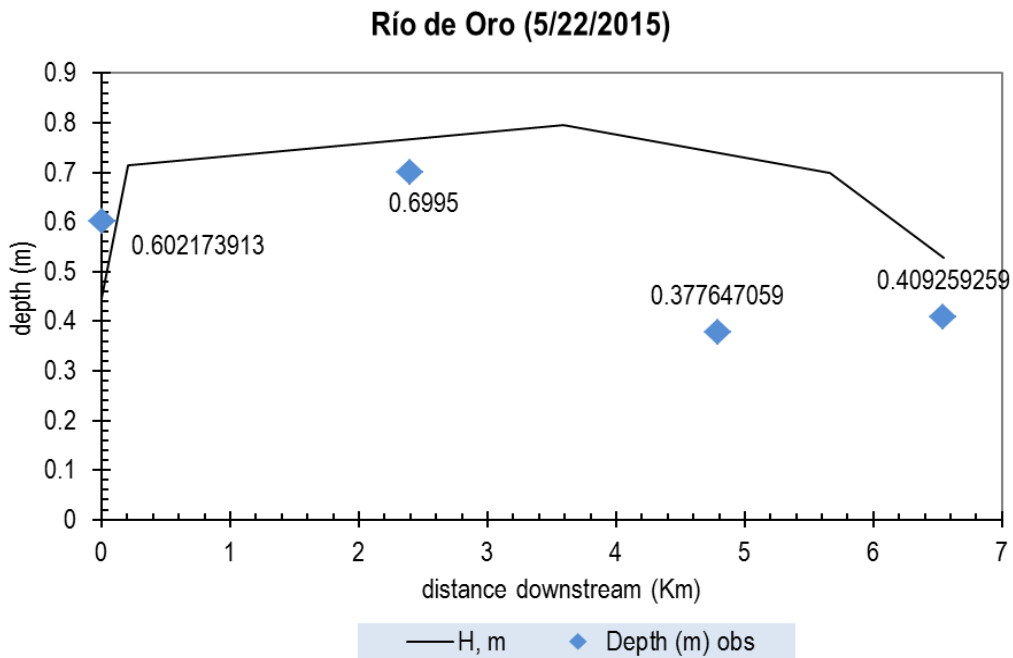
Gráfica 25. Comportamiento del flujo en el Río de Oro



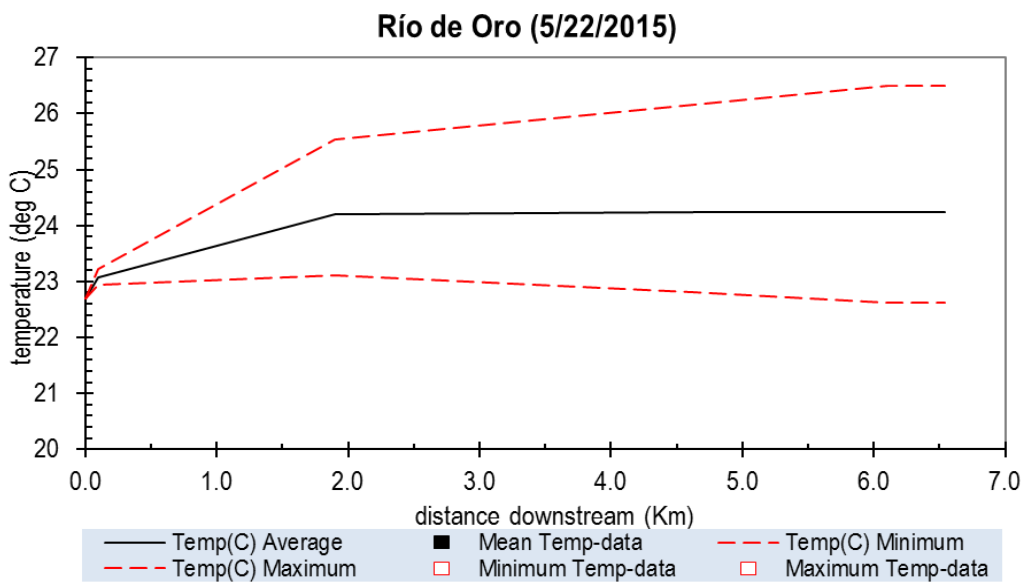
Gráfica 26. Comportamiento de la velocidad del agua en el Río de Oro



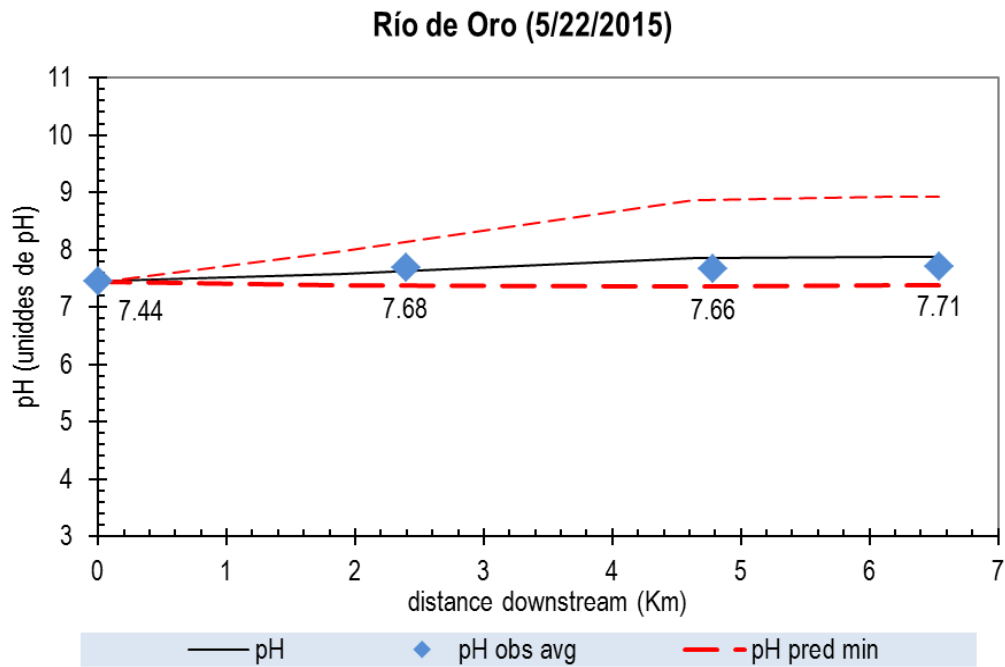
Gráfica 27. Comportamiento de la profundidad en el Río de Oro



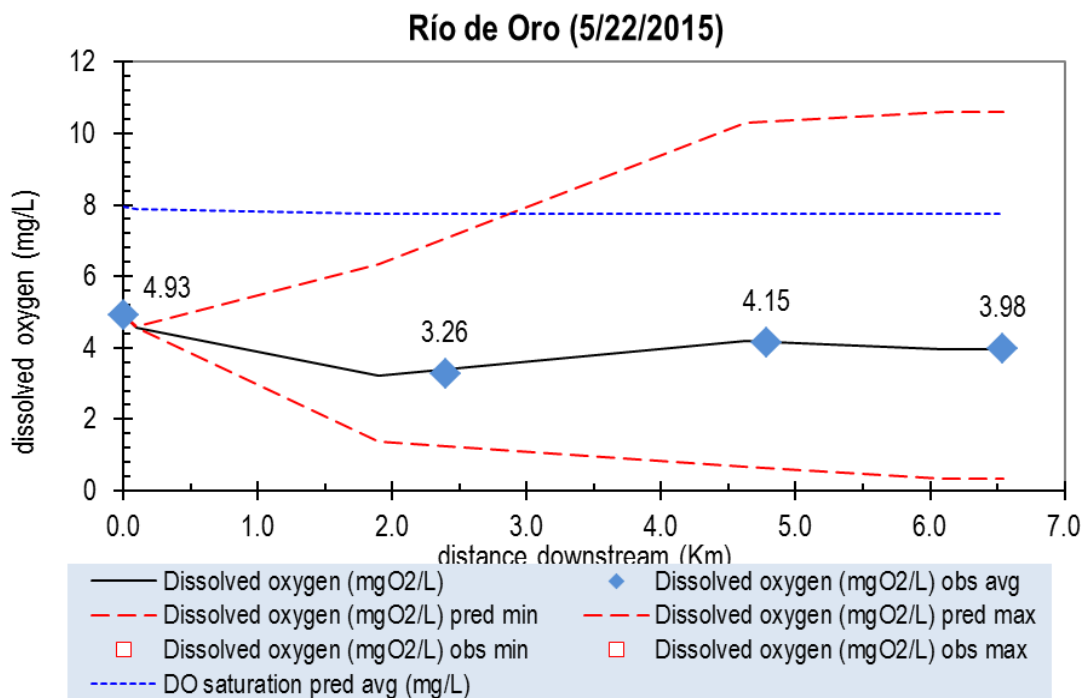
Gráfica 28. Comportamiento de la temperatura del agua en el Río de Oro



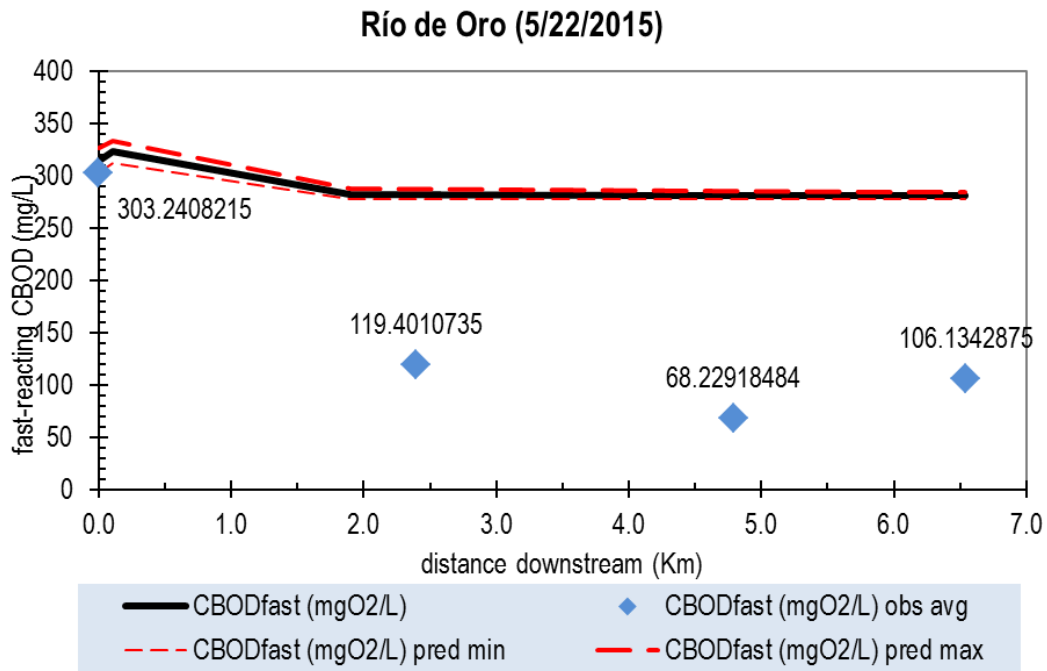
Gráfica 29. Comportamiento del pH en el Río de Oro



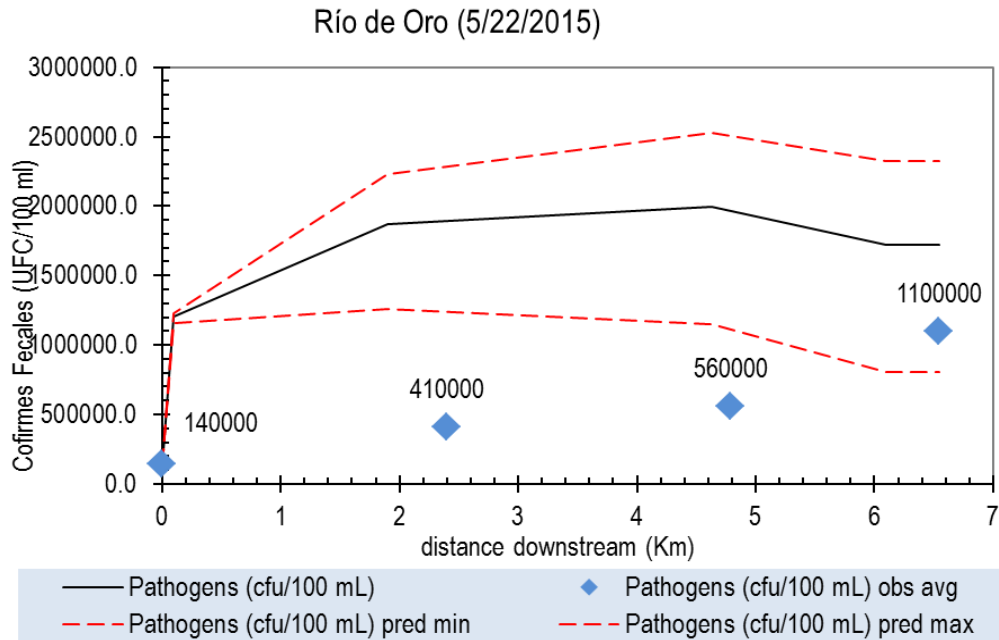
Gráfica 30. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en el Río de Oro



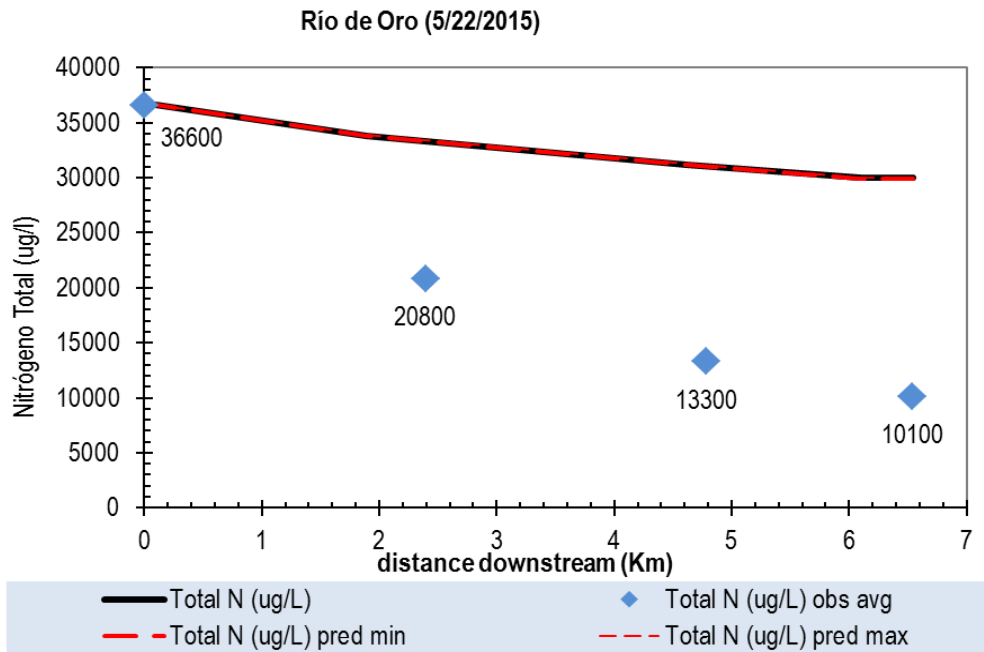
Gráfica 31. Comportamiento de la DBO5 en el Río de Oro



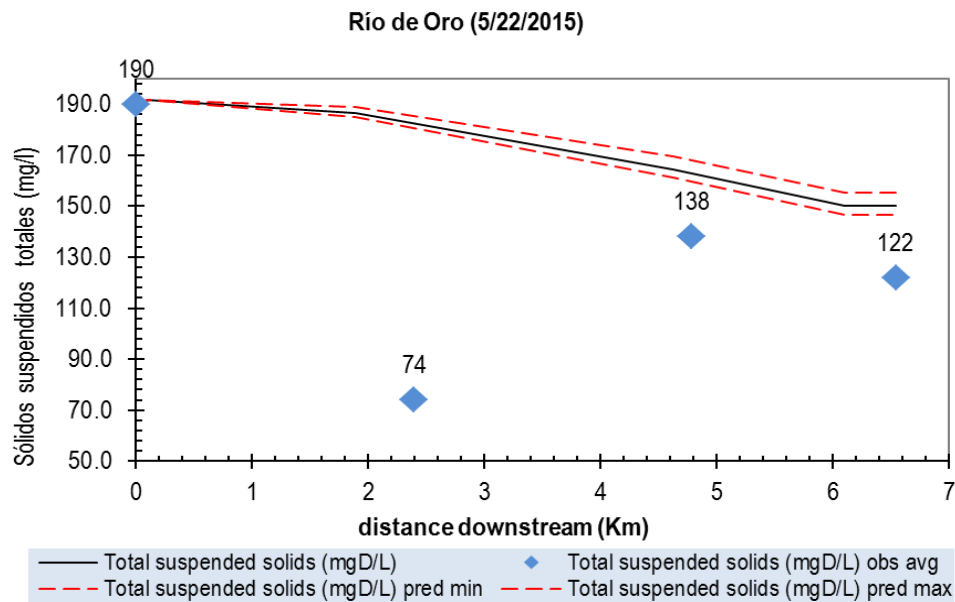
Gráfica 32. Comportamiento de los Coliformes Fecales en el Río de Oro



Gráfica 33. Comportamiento del Nitrógeno Total en el Río de Oro



Gráfica 34. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos Totales en el Río de Oro



## 6.2 Calibración del modelo y cálculo de las constantes biocinéticas

La calibración es el proceso que procura identificar los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulados o predichos se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados. En el proceso se utiliza una información en las fronteras de las

corrientes, la cual permite realizar simulaciones hasta reproducir con precisión la serie de datos observados o medidos en campo en diferentes estaciones o puntos de control.

Este proceso puede realizarse de dos formas, la de Prueba y error, y la automática. La Prueba y error es un método muy utilizado y usualmente recomendado, ya que implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. La Automática optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas. A diferencia de la “prueba y error”, este método es mucho más rápido y objetivo; sin embargo, es numéricamente complejo y presenta problemas en la compensación de errores y en la captura de valores mínimos locales.

### 6.2.1 Calibración del modelo para los parámetros convencionales

Para el caso del Q2KW, el programa utiliza el algoritmo genético PIKAIA para la calibración de las constantes. Según Ismael Leonardo Vera Puerto, y Jaime Andrés Lara Borrero en el paper “Discusión de operadores involucrados en un proceso de calibración mediante algoritmos genéticos para un modelo de calidad del agua de corrientes superficiales trabajando con la herramienta Qual2Kw”<sup>3</sup> el algoritmo genético, se enmarca como una técnica de búsqueda basada en los mecanismos de la genética natural y operaciones biológicamente inspiradas, que involucra una serie de operadores que le permiten converger para encontrar la mejor solución posible, pero encontrar el conjunto de operadores que logren que el algoritmo genético trabaje y encuentre, sin que el proceso computacional emplee demasiado tiempo, el juego de constantes que mejor represente la realidad del río, implica el primer reto al cual debe enfrentarse el modelador al inicio de la calibración de su modelo de calidad del agua cuando utiliza esta herramienta.

La eficiencia del modelo para representar la información observada puede cuantificarse utilizando métodos estadísticos como la raíz del error cuadrático promedio RMSE. La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

El RMSE, se calcula con la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}}$$

Ecuación 9.

Para el estudio se presenta en la tabla 18 los errores cuadráticos medios calculados para las sustancias de DBO rápida, Oxígeno Disuelto, Nitrógeno Total, y Sólidos Suspendidos Totales.

---

<sup>3</sup> Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 50 pp. 77-86. Diciembre, 2009

Tabla 19. Raíz del error cuadrático promedio (RMSE) para las sustancias de calidad del agua ajustadas con el modelo Qual2Kw.

Corriente Hídrica	Reach	Distance (Km)	Dissolved oxygen (mgO <sub>2</sub> /L)	CBODfast (mgO <sub>2</sub> /L)	Total N (ug/L)	Total suspended solids (mgD/L)	
Quebrada La Iglesia	Observado	0	6.53	60.6481643	16	114	
		0.69688	6.58	77.70546051	17.5	98	
		1.40293	6.85	108.0295427	19.8	42	
		2.12868	6.23	380.946282	11.5	25	
		2.224	6.23	380.946282	11.5	25	
	Predicho o simulado	0	6.53	60.65	16.0346624	114.2592	
		0.69688	7.212273529	62.89260157	16.45712884	97.22662861	
		1.40293	7.433017146	62.89074984	15.94907962	42.85985963	
		2.12868	7.327037007	71.79563096	16.69299985	34.2127497	
		2.224	4.660393582	201.2455074	84.0183231	827.9088461	
	Squared residual of diel min	0	3.99361E-26	3.36979E-06	0.001201482	0.06718464	
		0.69688	0.399769816	219.4207899	1.087580252	0.598103306	
		1.40293	0.339908992	2037.510617	14.82958779	0.739358584	
		2.12868	1.203490194	95574.12505	26.96724742	84.87475695	
		2.224	2.463664308	32292.36841	5258.907185	644662.6152	
	<b>RMSE Total</b>		<b>0.9388113</b>	<b>161.321682</b>	<b>32.5631473</b>	<b>359.0957796</b>	
	Río de Oro	Observado	0.00	4.93	303.2408215	36.6	190
			2.39	3.26	119.4010735	20.8	74
			4.79	4.15	68.22918484	13.3	138
			6.54	3.98	106.1342875	10.1	122
Predicho o simulado		0.00	4.93	314.7397559	36.6257384	190.1922	
		2.39	3.219679869	281.7708008	33.83207675	186.5325675	
		4.79	4.199394888	280.5145105	31.21891021	164.3597674	
		6.54	3.968809439	280.4827361	29.96110657	149.9741375	
Squared residual of diel min		0.00	3.81809E-28	132.2254913	0.000662465	0.03694084	
		2.39	0.001625713	26363.92837	169.8350245	12663.57875	
		4.79	0.002439855	45065.05949	321.0873431	694.837337	
		6.54	0.000125229	30397.38152	394.4635541	782.552369	

	<b>RMSE Total</b>		<b>0.03236818</b>	<b>159.65478</b>	<b>14.8777231</b>	<b>59.4579797</b>
--	-------------------	--	-------------------	------------------	-------------------	-------------------

De acuerdo a lo presentado en la tabla 18, según el error cuadrático medio de todo el análisis de las corrientes en general, es posible indicar que respecto a la Quebrada La Iglesia y el Río de Oro, podría considerarse ajustado el oxígeno disuelto solamente. Sin embargo, al realizar el cálculo del error relativo para cada punto sobre las corrientes hídricas de manera diferente, es posible evaluar que tan grande es el error en cada uno de esos puntos medidos, versus los predichos por el programa.

En la siguiente tabla se presenta el error relativo para cada punto de la Quebrada La Iglesia y del Río de Oro, con el fin de poder conocer con exactitud cuáles de estos son considerados ajustados y que puedan considerar calibrado.

Tabla 20. Error relativo de los puntos de control en Quebrada La Iglesia y Río de Oro.

Corriente Hídrica	Reach	Distance (Km)	Dissolved oxygen (mgO <sub>2</sub> /L)	Error relativo %	CBODfast (mgO <sub>2</sub> /L)	Error relativo %	Total N (ug/L)	Error relativo %	Total suspended solids (mgD/L)	Error relativo %
Quebrada La Iglesia	Observado	0.000	6.530		60.648		16.000		114.000	
		0.697	6.580		77.705		17.500		98.000	
		1.403	6.850		108.030		19.800		42.000	
		2.129	6.230		380.946		11.500		25.000	
		2.224	6.230		380.946		11.500		25.000	
	Predicho o simulado	0.000	6.530	0.000	60.650	0.003	16.035	0.216	114.259	0.227
		0.697	7.212	8.767	62.893	23.553	16.457	6.337	97.227	0.795
		1.403	7.433	7.844	62.891	71.773	15.949	24.145	42.860	2.006
		2.129	7.327	14.972	71.796	430.598	16.693	31.109	34.213	26.928
		2.224	4.660	33.680	201.246	89.294	84.018	86.313	827.909	96.980
Río de Oro	Observado	0.000	4.930		303.241		36.600		190.000	
		2.394	3.260		119.401		20.800		74.000	
		4.788	4.150		68.229		13.300		138.000	
		6.542	3.980		106.134		10.100		122.000	
	Predicho o simulado	0.000	4.930	0.000	314.740	3.653	36.626	0.070	190.192	0.101
		2.394	3.220	1.252	281.771	57.625	33.832	38.520	186.533	60.329
		4.788	4.199	1.176	280.515	75.677	31.219	57.398	164.360	16.038
		6.542	3.969	0.282	280.483	62.160	29.961	66.290	149.974	18.653

Según el error relativo, es posible precisar que para la Quebrada La Iglesia las sustancias que se consideran calibradas corresponden al oxígeno disuelto, los sólidos suspendidos totales; sin embargo, para la DBO se precisa que se encuentra calibrada para 2000 de 2200 metros de la quebrada.

Para el Río de Oro, se considera calibrada la variable de oxígeno disuelto para toda la corriente, pues presenta errores relativos muy bajos. Para los sólidos suspendidos totales, el modelo se encuentra calibrado a partir de los cuatro (4) kilómetros en adelante; sin embargo, para la DBO rápida y el nitrógeno total, no fue posible calibrar el modelo, por lo que se considera un error muy alto para ser tenido en cuenta en el análisis.

Es posible indicar según lo observado en las gráficas de calibración y de las anteriores tablas que para el Río de Oro, el aporte de la carga del colector la Iglesia genera un incremento de contaminación importante en la corriente hídrica.

#### **6.2.1.1 Constantes biocinéticas**

Para efectos del presente estudio, se implementó el primer método para conseguir una primera aproximación y luego se optimizó utilizando una calibración automática del modelo Q2KWX.

Es así que, para el método de prueba y error, fue posible calibrar las sustancias de velocidad, profundidad y oxígeno disuelto en las corrientes.

La auto calibración utilizada en el programa se realizó para las sustancias relacionadas con la materia orgánica y que podría influir en la DBO5. Por esto se corrió el algoritmo para los Sólidos Suspendidos Inorgánicos, la hidrólisis del nitrógeno, velocidad de sedimentación del nitrógeno, denitrificación, coeficiente de transferencia de denitrificación, hidrólisis del fósforo, velocidad de sedimentación del fósforo, velocidad de sedimentación del fósforo inorgánico, tasa de crecimiento de fitoplancton, tasa de respiración y de muerte del fitoplancton, preferencia del amoniaco,

En la tabla 20 se aprecia las sustancias objeto de auto calibración por parte del programa XQUAL2KW.

Tabla 21. Sustancias para autocalibrar

1 XQUAL2KW		Run Fortran		Run Auto-cal		Fitness: 1.1988		Show/hide Sheets		Sheets: 2	
2 Stream Water Quality Model											
3 Rio de Oro											
4 Global rate parameters											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
41											
42											
43											
44											
45											
46											
47											
48											
49											
50											
51											
52											
53											
54											
55											
56											
57											
58											
59											
60											
61											
62											
63											
64											
65											
66											
67											
68											
69											
70											
71											
72											
73											
74											
75											
76											
77											
78											
79											
80											
81											
82											
83											
84											
85											
86											
87											
88											
89											
90											
91											
92											
93											
94											
95											
96											
97											
98											
99											
100											

Auto-calibration genetic algorithm control:		
Random number seed	123456	seed
Model runs in a population (cc512)	100	np
Generations in the evolution	75	ngen
Digits to encode genotype (cc6)	5	nd
Crossover mode (1, 2, 3, 4, 5, 6, or 7)	3	kcross
Crossover probability (0-1):	0.85	pcross
Mutation mode (1, 2, 3, 4, 5, or 6)	2	mmut
Initial mutation rate (0-1):	0.005	pmut
Minimum mutation rate (0-1):	0.0005	pmutmn
Maximum mutation rate (0-1):	0.25	pmutmx
Relative fitness differential (0-1):	1	fdf
Reproduction plan (1, 2, or 3):	1	irep
Elitism (0 or 1):	1	elite
Shuffle probability (0-1):	0	psuffle
Restart from previous evolution (0 or 1):	0	restart
Skip high Courant conditions	Yes	icour

1	<b>XQUAL2KW</b>						
2	<b>Stream Water Quality Model</b>						
3	<b>Río de Oro</b>						
4	<b>Global rate parameters</b>						
149	<b>User-defined auto-calibration parameters (optional)</b>						
150	1. Hydrolysis - N org - Iglesia 3	0.1311675				0.05	0.3
151	1. Hydrolysis - N org - Iglesia 4	0.272915				0.05	0.3
152	1. Hydrolysis - N org - Iglesia 5	0.180745				0.05	0.3
153	1. Hydrolysis - N org - Iglesia 6	0.0943925				0.05	0.3
154	1. Hydrolysis - N org - Oro 1	0.267775				0.05	0.3
155	1. Hydrolysis - N org - Oro 2	0.0809725				0.05	0.3
156	1. Hydrolysis - N org - Oro 3	0.0502975				0.05	0.3
157	1. Hydrolysis - N org - Oro 4	0.2004975				0.05	0.3
158	2. Settling velocity - N Org - Oro 1	1.2423665				0.05	2
159	2. Settling velocity - N Org - Oro 2	1.933817				0.05	2
160	2. Settling velocity - N Org - Oro 3	1.7367695				0.05	2
161	2. Settling velocity - N Org - Oro 4	1.287743				0.05	2
162	3. Denitrification - Nitrato - Oro 1	0.36708				0	2
163	3. Denitrification - Nitrato - Oro 2	1.61516				0	2
164	3. Denitrification - Nitrato - Oro 3	0.45594				0	2
165	3. Denitrification - Nitrato - Oro 4	1.04796				0	2
166	4. Sed denitrification transfer coeff -Nitrato - Oro 1	0.31438				0	1
167	4. Sed denitrification transfer coeff -Nitrato - Oro 2	0.96032				0	1
168	4. Sed denitrification transfer coeff -Nitrato - Oro 3	0.41966				0	1
169	4. Sed denitrification transfer coeff -Nitrato - Oro 4	0.19518				0	1
170	5. Max Growth rate - fitop - Iglesia 3	2.13858				1.5	3
171	5. Max Growth rate - fitop - Iglesia 4	2.19972				1.5	3
172	5. Max Growth rate - fitop - Iglesia 5	1.609485				1.5	3
172	5. Max Growth rate - fitop - Iglesia 5	1.609485				1.5	3
173	5. Max Growth rate - fitop - Iglesia 6	1.82094				1.5	3
174	5. Max Growth rate - fitop - Oro 1	1.761015				1.5	3
175	5. Max Growth rate - fitop - Oro 2	1.95483				1.5	3
176	5. Max Growth rate - fitop - Oro 3	2.84805				1.5	3
177	5. Max Growth rate - fitop - Oro 4	1.72299				1.5	3
178	6. Respiration rate - fitop - Iglesia 3	0.0990095				0.05	0.5
179	6. Respiration rate - fitop - Iglesia 4	0.339872				0.05	0.5
180	6. Respiration rate - fitop - Iglesia 5	0.479282				0.05	0.5
181	6. Respiration rate - fitop - Iglesia 6	0.0539825				0.05	0.5
182	6. Respiration rate - fitop - Oro 1	0.3538085				0.05	0.5
183	6. Respiration rate - fitop - Oro 2	0.1801265				0.05	0.5
184	6. Respiration rate - fitop - Oro 3	0.055679				0.05	0.5
185	6. Respiration rate - fitop - Oro 4	0.356432				0.05	0.5
186	7. Death rate - fitop - Iglesia 3	0.84262				0	1
187	7. Death rate - fitop - Iglesia 4	0.13813				0	1
188	7. Death rate - fitop - Iglesia 5	0.46192				0	1
189	7. Death rate - fitop - Iglesia 6	0.78504				0	1
190	7. Death rate - fitop - Oro 1	0.26785				0	1
191	7. Death rate - fitop - Oro 2	0.72919				0	1
192	7. Death rate - fitop - Oro 3	0.33748				0	1
193	7. Death rate - fitop - Oro 4	0.76122				0	1
194	8. Ammonia preference - fitop - Iglesia 3	29.49315				15	30
195	8. Ammonia preference - fitop - Iglesia 4	15.5637				15	30
195	8. Ammonia preference - fitop - Iglesia 4	15.5637				15	30
196	8. Ammonia preference - fitop - Iglesia 5	16.60665				15	30
197	8. Ammonia preference - fitop - Iglesia 6	27.9819				15	30
198	8. Ammonia preference - fitop - Oro 1	15.07635				15	30
199	8. Ammonia preference - fitop - Oro 2	21.18675				15	30
200	8. Ammonia preference - fitop - Oro 3	20.0715				15	30
201	8. Ammonia preference - fitop - Oro 4	24.40815				15	30
202	9. Settling velocity - fitop - Iglesia 3	0.7840385				0.05	2
203	9. Settling velocity - fitop - Iglesia 4	0.266099				0.05	2
204	9. Settling velocity - fitop - Iglesia 5	0.2730995				0.05	2
205	9. Settling velocity - fitop - Iglesia 6	1.46765				0.05	2
206	9. Settling velocity - fitop - Oro 1	0.0656				0.05	2
207	9. Settling velocity - fitop - Oro 2	1.74416				0.05	2
208	9. Settling velocity - fitop - Oro 3	1.2181475				0.05	2
209	9. Settling velocity - fitop - Oro 4	1.8939395				0.05	2
210	10. Settling velocity - ssi - Oro 2	1.44628				0	2
211	10. Settling velocity - ssi - Oro 3	1.88012				0	2
212	10. Settling velocity - ssi - Oro 4	1.9222				0	2

### 6.3 Generación de escenarios de simulación sustancias convencionales

Una vez se cuente con el modelo calibrado, es posible crear escenarios que permitan conocer el comportamiento que podrían tener las sustancias de interés en diferentes situaciones que pudieran ocurrir. En la tabla 21 se establecen seis posibles escenarios, según cambios que pueden ocurrir en la planta de tratamiento de lixiviados del Carrasco, al saneamiento de la Quebrada La Iglesia y el Río de Oro, generado por la puesta en marcha del colector la Iglesia.

Tabla 22. Escenarios de modelamiento sustancias convencionales.

Descripción		Mayo 2015	ESCENARIOS - 2015				2016	6
		Base ok	1	2	3	4	5	
		Condiciones actuales	Sin Tratamiento actual PTLX	Con Tratamiento del lixiviado actual PTLX	Sin Tratamiento (Crítico)	Funcionamiento interceptor y PTLX nueva	Funcionamiento interceptor y PTLX nueva con posible incremento de caudal	
Quebrada la Iglesia	Caudal	Campaña 22/05/15	Medido en campaña	Medido en campaña	Ambiental (45 l/s)	Ambiental (45 l/s)	Ambiental (45 l/s)	Condiciones promedio red AMB
	Calidad		Medido en campaña	Medido en campaña	Base de datos actual AMB (quebrada saneada). Se obtiene información de la quebrada la Cascada, como condición de frontera	Base de datos actual AMB (quebrada saneada). Se obtiene información de la quebrada la Cascada, como condición de frontera	Base de datos actual AMB (quebrada saneada). Se obtiene información de la quebrada la Cascada, como condición de frontera	Condiciones promedio red AMB
PTLX	Caudal promedio	Campaña 22/05/15 PTLX actual (tratamiento combinado)	De bombeo continuo de 4 l/s	De bombeo continuo de 4 l/s	De bombeo continuo de 4 l/s	Caudal de diseño nueva PTLX (continuo) - 2.5 LPS	Caudal de diseño nueva PTLX (continuo) - 2.5 LPS	De bombeo continuo de 4 l/s
	Calidad		Vertimiento crudo a la quebrada la Iglesia	Efluente tratamiento de PTLX actual - Medido en campaña	Vertimiento crudo a la quebrada la Iglesia	Cumpliendo con parámetros de diseño (remoción del 95%)	Cumplimiento resolución 631 de 2015	Mediciones promedio de la red de monitoreo del AMB en punto denominado DC-01
Río de Oro	Caudal	Campaña 22/05/15	Medido en campaña	Medido en campaña	Ambiental	Ambiental	Ambiental	Condiciones promedio red AMB. Se realiza balance de masas entre RO-4A y RF-01 para hallar el punto aguas debajo de esta confluencia
	Calidad		Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Condiciones promedio red AMB. Se realiza balance de masas entre RO-4A y RF-01 para hallar el punto aguas debajo de esta confluencia
Interceptor		PSMV	Funcionamiento parcialmente por operatividad (el interceptor no está funcionando totalmente)	Funcionamiento parcialmente por operatividad (el interceptor no está funcionando totalmente)	Funcionando adecuadamente, sin vertimientos aguas arriba del Carrasco y vertimiento en la iglesia confluencia con río de oro	Funcionando adecuadamente, sin vertimientos aguas arriba del Carrasco, y vertimiento en la iglesia confluencia con río de oro	Funcionando adecuadamente, sin vertimientos aguas arriba del Carrasco, y vertimiento en la iglesia confluencia con río de Oro	Funcionamiento parcialmente por operatividad (el interceptor no está funcionando totalmente)

▪ **ESCENARIO UNO (1) – VERTIMIENTO LIXIVIADO SIN TRATAMIENTO**

En el escenario uno (1) se desea modelar el comportamiento de las sustancias de interés, asumiendo unas condiciones similares a las del monitoreo de mayo de 22 de 2015 en las corrientes hídricas, el cual es considerado una condición crítica. De igual manera se asume un vertimiento de lixiviados completamente crudos, sin tratamiento alguno. Los datos del vertimiento corresponden a las características fisicoquímicas del lixiviado medido en el afluente de los pondajes del Carrasco. De igual manera, se asume un caudal de bombeo de 4 LPS, debido a que corresponde a la capacidad del bombeo del efluente del sistema de

tratamiento actual. Respecto al colector la Iglesia, se asume que funciona correctamente, por lo que se genera vertimientos sobre la Quebrada La Iglesia, aguas arriba del vertimiento del Carrasco.

- **ESCENARIO DOS (2) – VERTIMIENTO SEGÚN EFLUENTE DE LA PLANTA DE LIXIVIADOS ACTUAL**

Este escenario consiste en el comportamiento de las sustancias de interés en el agua, con un vertimiento del Carrasco según características fisicoquímicas del efluente de la planta de lixiviados, de acuerdo a los resultados de la planta del monitoreo realizado el 22 de mayo de 2015. El caudal continúa asumiéndose de 4 LPS debido a que corresponde a la capacidad de la bomba del efluente de la planta de lixiviados. Las características fisicoquímicas de las corrientes hídricas corresponden a los resultados del monitoreo realizado el 22 de mayo de 2015. Y respecto al colector la Iglesia, se asume que funciona correctamente, por lo que se genera vertimientos sobre la Quebrada La Iglesia, aguas arriba del vertimiento del Carrasco.

- **ESCENARIO TRES (3) – CRÍTICO**

Este escenario corresponde a la situación más crítica, ya que se asume un saneamiento de la Quebrada La Iglesia, debido a que estaría funcionando correctamente el colector la Iglesia, por lo que toda el agua residual del alcantarillado público sería descargado al final del colector la Iglesia. Lo anterior indica que aguas arriba del vertimiento del Carrasco, se presenta una calidad del agua muy buena, similar a la de la quebrada la Flora.

Tanto la Quebrada La Iglesia como el Río de Oro presentan caudales muy bajos que fueron calculados según metodología explicada en anteriores numerales. Para el caso de la Quebrada La Iglesia, el caudal crítico corresponde a 45 LPS y al Río de Oro de 1225 LPS. El Río de Oro presenta las características fisicoquímicas iguales a las del monitoreo de mayo 22 de 2015. El caudal continúa asumiéndose de 4 LPS debido a que corresponde a la capacidad de la bomba del efluente de la planta de lixiviados. Los datos del vertimiento corresponden a las características fisicoquímicas del lixiviado medido en el afluente de los pondajes del Carrasco.

- **ESCENARIO CUATRO (4) – FUNCIONAMIENTO NUEVA PLANTA DE LIXIVIADOS**

Este escenario corresponde a la situación en que la Quebrada La Iglesia se encuentra saneada debido al correcto funcionamiento del colector la Iglesia, por lo que el caudal aguas arriba del vertimiento del Carrasco es de 45 LPS y las características fisicoquímicas son muy buenas. El Río de Oro presenta una caudal mínimo de 1225 LPS y unas características fisicoquímicas y bacteriológicas iguales a las medidas en mayo 22 de 2015. El efluente de la planta de lixiviados corresponde a los valores teóricos de remoción del 95% del efluente de los pondajes, por lo que presenta bajas concentraciones comparadas

con las condiciones actuales de vertimiento. El caudal en el vertimiento de la nueva planta de tratamiento de lixiviados es de 2.5 LPS por ser este valor máximo, según su capacidad.

La planta fue diseñada para dar cumplimiento a la nueva normatividad de vertimientos, resolución 631 de 2015, por lo que a continuación se presenta una breve explicación del funcionamiento del tren de tratamiento de la nueva planta de lixiviados, con el fin de ilustrar al lector sobre la capacidad de dichas unidades de tratamiento. Esta información fue suministrada por la Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga – EMAB.

La Planta de Tratamiento de Lixiviado –PTLX-, se definió teniendo en cuenta la información de línea base como caracterización de calidad de lixiviado y aforos de los pondajes entregados por la EMAB.

## **DESCRIPCION DE PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.**

### **A. Parámetros de Diseño:**

\*Caudal variable y regulable desde la laguna de: 1,5 [lps] a 2,5 [lps].

\*Parámetros de calidad de lixiviado: Ver análisis realizados por el laboratorio de aguas de la Universidad Industrial de Santander –UIS- presentados a continuación.

➤ Afluente Lagunas de Homogenización

	<b>LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	<b>Código:</b> F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	<b>Versión:</b> 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>Fecha:</b> 2012/01/16 Página 1 de 3	



\*Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1659 de 2011, en los parámetros pH, DMG<sub>2</sub>, DQO, SST, Jíndices, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y comparativas\*



\*Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 4353 de 2013, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano\*

<b>Informe de resultados No.</b>	<b>15-167-01</b>	<b>Fecha de emisión:</b>	<b>Mayo 06 de 2015</b>
<b>Cliente:</b>	<b>TEKQUIMICA S.A.S</b>		
<b>Dirección del cliente:</b>	<b>Parque Industrial San Miguel Bodega 12 B Km 1.5 Vía Siberia - Cota</b>		
<b>Solicitud de servicio No.</b>	<b>15-157</b>	<b>No. de muestras:</b>	<b>02</b>
<b>Fecha de recepción de las muestras:</b>	<b>Abril 27 de 2015</b>		
<b>Muestras recibidas por:</b>	<b>Amparo López</b>		
<b>Fecha de análisis:</b>	<b>Abril 27 de 2015 – Mayo 06 de 2015</b>		

### 1. ANALISIS FISICOQUIMICO

<b>Codificación de la Muestra:</b>	<b>15-157-01</b>	<b>Tipo de muestra:</b>	<b>Compuesta</b>
<b>Identificación de la muestra:</b>	<b>Afluente</b>		
<b>Matriz de la muestra:</b>	<b>Lixiviado</b>		
<b>Muestreo realizado por:</b>	<b>El Cliente</b>		
<b>Lugar y punto de muestreo:</b>	<b>Relleno Sanitario Carrasco – Entrada Lagunas</b>		
<b>Fecha del muestreo:</b>	<b>Abril 27 de 2015</b>		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
pH(Unidades de pH)	7,60	Potenciométrico/SM 4500-H <sup>+</sup> B
Grasas y Aceites (mg/L)	13,8	Extracción Líquido-Líquido/ SM 5520 B
Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	2541,62	Absorción Atómica/ SM 3030 E y 3111 B y D
Calcio (mg Ca/L)	507,53	Absorción Atómica/ SM 3030 E y 3111 D
Magnesio (mg Mg/L)	305,47	Absorción Atómica/ SM 3030 E y 3111 B
Alcalinidad Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	10816	Titrimétrico / SM 2320 B
Conductividad (mS/cm)	28,0	Conductivimétrico/SM 2510 B
Cloruros (mg Cl/L)	2830	Argentométrico / SM 4500-Cl <sup>-</sup> B
Sodio (mg Na/L)	2806,3	Absorción Atómica/SM 3030 E y SM 3111 B
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	20100	Gravimétrico/SM 2540 B y D
Demanda Química de Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)	37600	Respirométrico/ SM 5210 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)	21315	Titrimétrico-Reflujo Cerrado/ SM 5220 C
Oxígeno Disuelto (mg O <sub>2</sub> /L)	0,23	Sonda Luminiscente Infrarroja
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	390	Gravimétrico/SM 2540 D
Fósforo Total (mg P/L)	34,77	Espectrofotométrico/SM 4500- P C
Nitrógeno Orgánico (mg N <sub>ORG</sub> /L)	275,7	Titrimétrico/SM 4500-NH <sub>3</sub> C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH <sub>3</sub> /L)	2218,8	Titrimétrico/SM 4500-NH <sub>3</sub> C
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg N/L)	2494,4	Kjeldahl-Titrimétrico/ SM 4500 - N

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222  
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009  
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: [labquimco@gmail.com](mailto:labquimco@gmail.com); [labquimco@uis.edu.co](mailto:labquimco@uis.edu.co)  
 Bucaramanga - Colombia

➤ Efluente de las lagunas de homogenización.

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	Código: F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	Versión: 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. 15-167

Solicitud de servicio No. 15-157

## 2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	15-157-02	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	Efluente		
Matriz de la muestra:	Lixiviado		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Relleno Sanitario Carrasco – Salida Lagunas		
Fecha del muestreo:	Abril 27 de 2015		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
pH(Unidades de pH)	8,14	Potenciométrico/SM 4500-H <sup>+</sup> B
Grasas y Aceites (mg/L)	15,2	Extracción Líquido-Líquido/ SM 5520 B
Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	1096,33	Absorción Atómica/ SM 3030 E y 3111 B y D
Calcio (mg Ca/L)	85,53	Absorción Atómica/ SM 3030 E y 3111 D
Magnesio (mg Mg/L)	211,80	Absorción Atómica/ SM 3030 E y 3111 B
Alcalinidad Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	13051	Titrimétrico / SM 2320 B
Conductividad (mS/cm)	27,2	Conductivimétrico/SM 2510 B
Cloruros (mg Cl <sup>-</sup> /L)	3214	Argentométrico / SM 4500-Cl <sup>-</sup> B
Sodio (mg Na/L)	2642	Absorción Atómica/SM 3030 E y SM 3111 B
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	16730	Gravimétrico/SM 2540 B y D
Demanda Química de Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)	10904	Respirométrico/ SM 5210 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)	3480	Titrimétrico-Reflujo Cerrado/ SM 5220 C
Oxígeno Disuelto (mg O <sub>2</sub> /L)	0,30	Sonda Luminiscente Infrarroja
Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	760	Gravimétrico/SM 2540 D
Fósforo Total (mg P/L)	36,31	Espectrofotométrico/SM 4500- P C
Nitrógeno Orgánico (mg N <sub>org</sub> /L )	201,7	Titrimétrico/SM 4500-NH <sub>3</sub> C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH <sub>3</sub> /L)	2151,5	Titrimétrico/SM 4500-NH <sub>3</sub> C
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg N/L)	2353,2	Kjeldahl-Titrimétrico/ SM 4500 - N

**B. Equipos según Proceso Unitario de tratamiento:**

**\*Tamizaje:**

El tamizaje hace parte fundamental del pretratamiento del lixiviado cuyo objetivo es eliminar los sólidos gruesos flotantes o sedimentables. El tamiz rotatorio está diseñado para retener partículas y sólidos mayores a 0,75 mm.

### **\*Tratamiento Primario - Físicoquímico (Celda de Flotación)**

La celda de flotación conocida como DAF por sus siglas en inglés Dissolved air flotation se utiliza para el tratamiento físicoquímico del lixiviado a tratar, previa adición de sustancias químicas neutralizantes (ácidas o alcalinas) dependiendo del rango de pH. También se considera la aplicación de agentes coagulantes y/o floculantes para la remoción de sólidos en suspensión y materia orgánicas presentes en el lixiviado.

El objetivo de la celda de flotación o DAF es remover partículas por flotación. Puede remover sólidos en suspensión y/o sólidos sedimentables y sustancias flotantes como la grasa y los aceites. Las partículas que pueden sedimentar por acción de la gravedad al adicionar un floculante de modo que las microburbujas que se aplican sobre el floc tengan una acción resultante de flotación llevando las partículas hacia arriba, de la misma forma actúa sobre las grasas y aceites que por obvia razón flotan con mayor facilidad.

Este equipo desestabiliza partículas coloidales de manera que coadyuva a la clarificación del lixiviado logrando remociones alrededor del 30-40%.

En términos generales, el tamizado y la celda de flotación y todo lo que estos procesos involucran nos garantizan la remoción de partículas suspendidas de gran y pequeño tamaño que se traducen en una disminución de los parámetros de DQO, DBO y sólidos suspendidos presentes en el agua a tratar.

### **\*Tratamiento Secundario DTRO (UF / OR –Disc)**

En este sistema, el lixiviado ácido de 6,5 valores de pH se bombea a través de un filtro de arena y un filtro de seguridad 10  $\mu\text{m}$  antes de ir a la bomba de alta presión. El filtro de arena diseñado con el proceso de lavado automático para mantener el sistema estable. El cartucho de filtro de seguridad necesita ser reemplazados cuando se presenta caída de presión. Esto también se indica en la pantalla táctil como un mensaje de alarma.

La bomba de alta presión impulsa el lixiviado a 50-60 bar y luego regula el flujo y la presión para que ingrese a las membranas. El equipo realiza una recirculación donde la bomba en línea lleva la mayor parte del concentrado de nuevo y se mezcla con el lixiviado fresco. El flujo es 1m<sup>3</sup> / h para cada módulo para mantener la velocidad de flujo alta en la superficie de la membrana, a fin de reducir la tendencia a obstruirse por ensuciamiento.

En los módulos de membrana, el lixiviado se separa en agua clara permeado y concentrado. El agua clara va al proceso de ajuste de desgasificación y pH antes de ir al tanque de agua clara. El concentrado va hacia el tanque de concentrado para reinyección. La reinyección se realiza con una bomba de reinyección por sistema de tuberías.

### **\*Tratamiento Terciario OSMOSIS INVERSA (OR)**

La ósmosis inversa es una tecnología de purificación de agua mediante la cual se logra un elevado porcentaje de retención de contaminantes, disueltos y no disueltos (hasta un 95%

de retención de sales disueltas). Es el mejor método que permite obtener una calidad de agua excepcional que puede luego verterse sin contaminar otras fuentes de agua o el suelo, cumpliendo y excediendo las exigencias de la norma de vertimientos.

#### **\*Tratamiento de lodos**

Los lodos y grasas generados de cada una de las etapas de tratamientos deben ser tratados para garantizar que el contenido de humedad para hacer la disposición final, cumpla con las normas vigentes.

El sistema tiene su tablero eléctrico de control y de comando de todos los accesorios, equipos y elementos necesarios para garantizar su funcionamiento. Se compone de un tanque acondicionador de lodos y de un Filtro Prensa.

#### **\*Filtro Prensa**

Los lodos que se remueven tanto en el tamizado como en la celda de flotación van al tanque de homogenización de lodos para su tratamiento en el proceso de deshidratación a través del equipo denominado filtro prensa. La filtración se realiza por presión de 5 a 15 bares o más.

El filtro prensa a instalar, consta de una serie de chapas verticales, yuxtapuestas y acopladas. Estas chapas prensadas entre ellas cuentan con un sistema hidráulico-neumático semiautomático. La presión aplicada a las zonas unidad de cada filtro debe de soportar la presión interna de la cámara que se forma debido a la inyección mediante bomba del lodo al sistema.

Esta disposición de placas verticales que permiten la fácil descarga de las tortas de lodo.

### **C. Resultados Estimados del Tratamiento**

De acuerdo a las tecnologías de tratamiento seleccionadas y descritas anteriormente, en la tabla 22 se estimaron los porcentajes de remoción en cada proceso unitario, partiendo de los parámetros de diseño.

Tabla 23. Porcentajes de remoción presuntiva de la nueva PTLX.

<b>Remoción estimada en Tratamiento Primario</b>	<b>Remoción estimada en Tratamiento Secundario</b>	<b>Remoción estimada en Tratamiento Terciario</b>
30-40 %	90 %	95 %

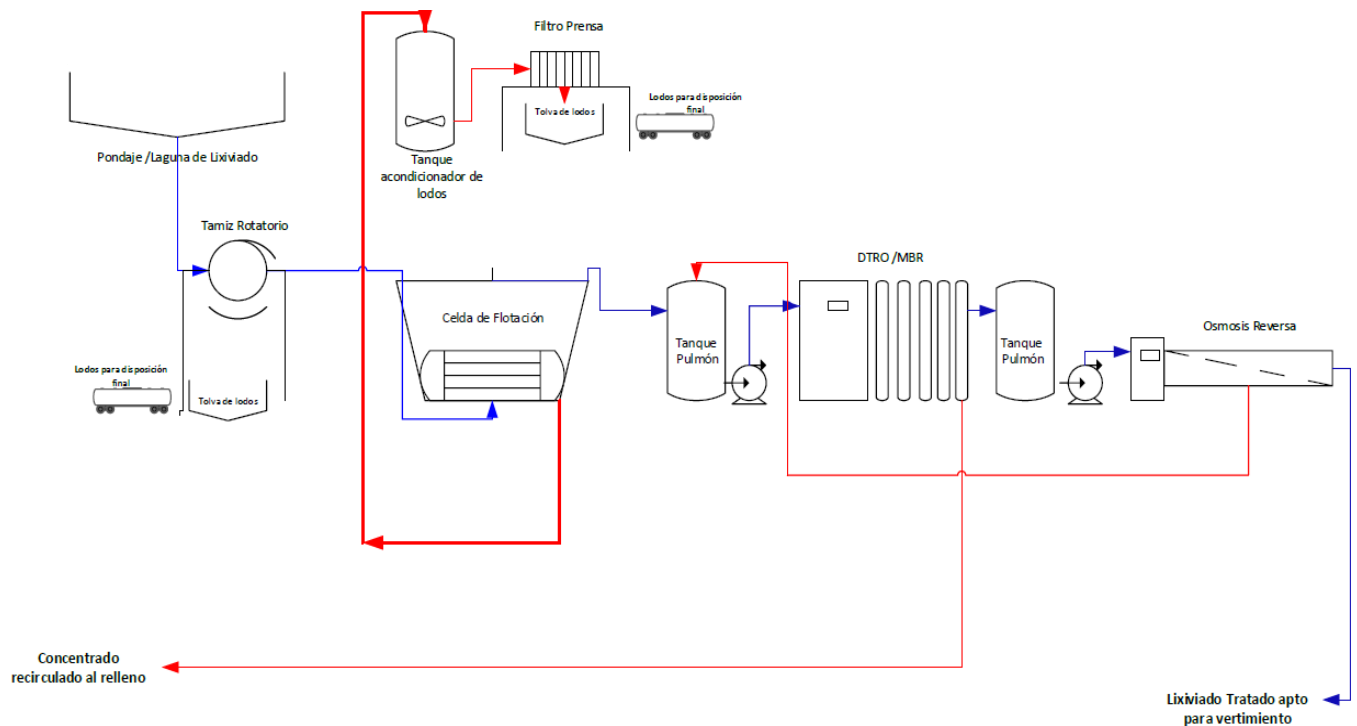
En la tabla 23 se presentan las concentraciones esperadas después de cada unidad que conforma el tren de tratamiento de la planta de lixiviados. De acuerdo a estos valores, se espera que todos sean inferiores a los definidos en la Resolución 631 de 2015.

Tabla 24. Concentraciones de algunas sustancias de interés en el tren de tratamiento de la nueva PTLX.

PARAMETROS	Lixiviado	DAF	First Stage DTRO	O. R
DQO (mg/L)	20000	14000	1400	70
BOD5(mg/L)	12000	8400	840	42
NH4-N (mg/L)	2000	1400	140	7
Heavy Metal (mg/L)	1000	700	70	<2.5

En la figura 18 se presenta el tren de tratamiento de la nueva planta de tratamiento de lixiviados, la cual permite identificar el recorrido del lixiviado desde el ingreso hasta el vertimiento.

Figura 18. Tren de tratamiento de la planta de lixiviado



▪ **ESCENARIO QUINTO (5) – FUNCIONAMIENTO NUEVA PLANTA DE LIXIVIADOS CUMPLIMIENTO DE NUEVA NORMA DE VERTIMIENTOS**

Este escenario corresponde a la situación en que la planta de tratamiento de lixiviados da cumplimiento a la nueva norma de vertimientos que corresponden a la resolución 631 de 2015. La Quebrada La Iglesia se encuentra saneada debido al correcto funcionamiento del colector la Iglesia y presenta un caudal mínimo de 45 LPS, por lo que se asegura una

condición crítica en la fuente receptora del vertimiento. El caudal en el vertimiento de la nueva planta de tratamiento de lixiviados es de 2.5 LPS por ser este valor máximo, según su capacidad. El Río de Oro presenta una caudal mínimo de 1225 LPS y unas características fisicoquímicas y bacteriológicas iguales a las medidas en mayo 22 de 2015.

▪ **ESCENARIO SEXTO (6) – CONDICIONES PROMEDIO RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA**

Con este escenario que mide el comportamiento de las sustancias de interés en las corrientes hídricas, bajo condiciones promedio de medición. La información para alimentar el modelo corresponde a los valores medidos en la red de monitoreo de la calidad del agua del Área Metropolitana de Bucaramanga.

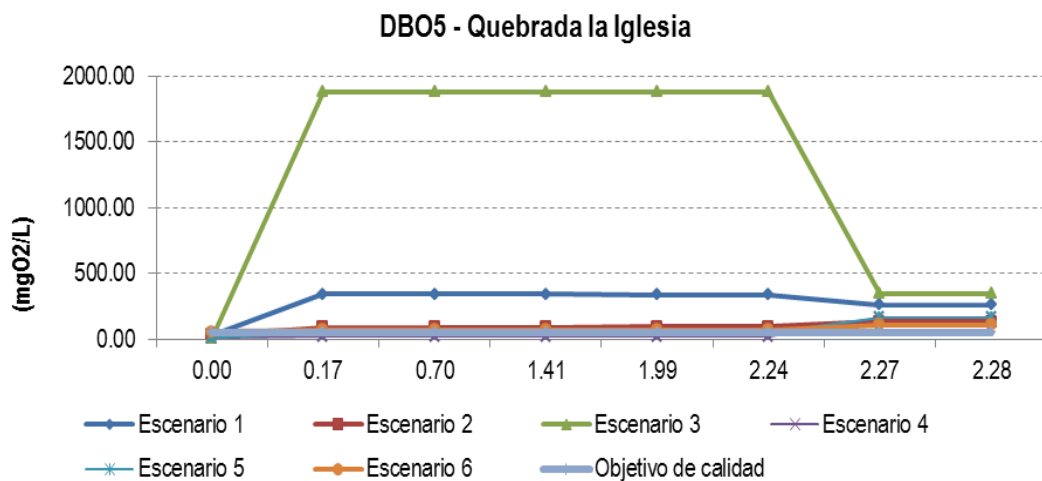
De acuerdo a lo anterior, la Quebrada La Iglesia presenta un caudal mayor, así como el Río de Oro, en comparación a la condición crítica de caudal mínimo. Se asume un aporte de carga según el punto de medición del AMB en la quebrada El Carrasco; sin embargo, se asume un vertimiento de 4 LPS debido a que corresponde a la capacidad de la bomba del efluente de la planta de lixiviados.

De acuerdo a lo anterior, a continuación, se presentan los resultados de las corridas de los seis escenarios definidos, para la Quebrada La Iglesia y para el Río de Oro.

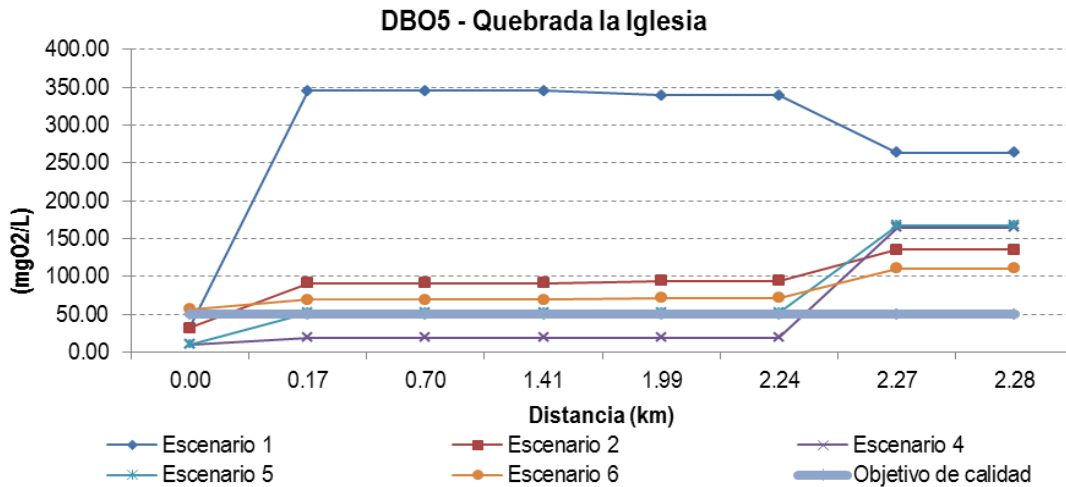
**6.3.1 Escenario DBO5**

▪ **Quebrada La Iglesia**

Gráfica 35. Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> en la Quebrada La Iglesia para todos los escenarios



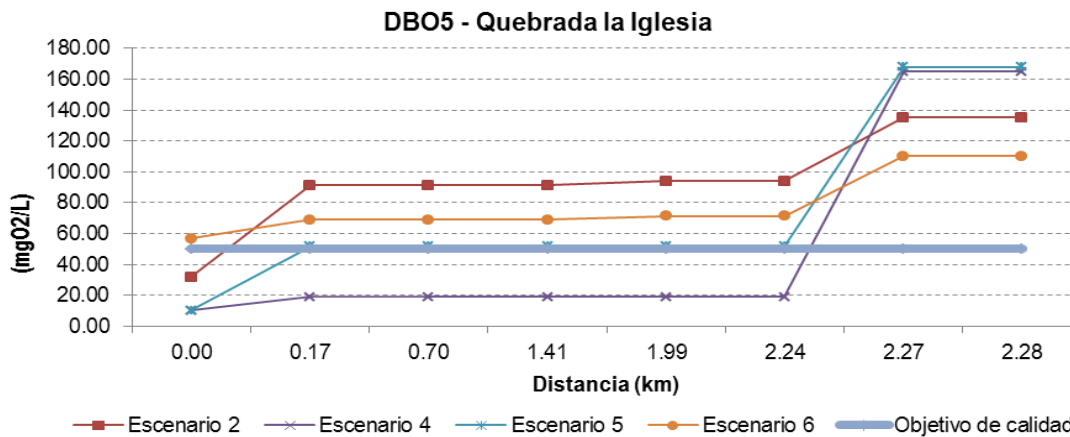
Gráfica 36. Comportamiento de la DBO5 en la Quebrada La Iglesia para los escenarios 1, 2, 4, 5, 6.



De acuerdo a las gráficas 35 y 36, se evidencia que para el escenario más crítico que corresponde al tres (3), la concentración de la DBO5 se incrementaría a un valor muy alto, llegando casi a los 2000 mg/l, por lo que esa condición podría suceder si se presenta un vertimiento sin tratamiento previo, y con una quebrada saneada y con buenas características fisicoquímicas.

Para poder observar los demás escenarios, en la gráfica de la DBO5 para escenarios 1,2,4,5,6, es posible evidenciar que otra condición crítica es el escenario uno (1), pues bajo las condiciones de la Quebrada La Iglesia medida en la campaña de monitoreo de mayo de 2015, la concentración de la DBO5 se incrementaría hasta aproximadamente 350 mg/l al presentarse el vertimiento del Carrasco sin ningún tratamiento del lixiviado; y al ser vertido el colector la Iglesia se presenta una dilución de la sustancia en la corriente, por lo que el valor de la concentración disminuye a casi 250 mg/l.

Gráfica 37. Comportamiento de la DBO5 en la Quebrada La Iglesia para los escenarios 2, 4, 5, 6.



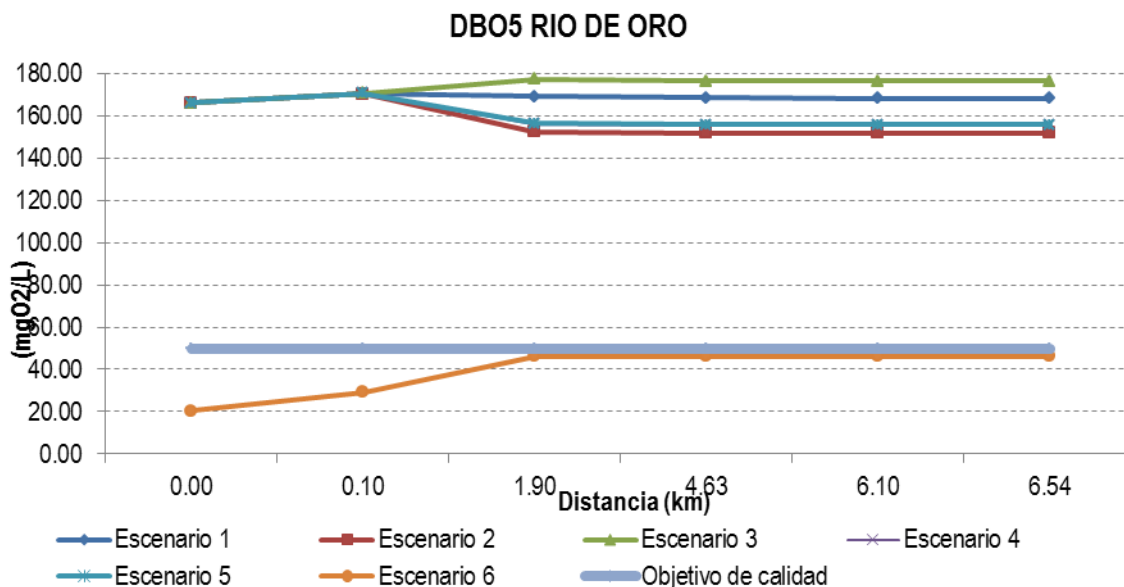
En la gráfica 37, al eliminar el escenario uno (1) y tres (3), es posible observar de una mejor manera el comportamiento de los escenarios 2, 4, 5 y 6, de tal manera que para los escenarios (4 y 6) en donde se implementaría un nuevo sistema de tratamiento de lixiviados, se daría cumplimiento de los objetivos de calidad de la fuente hídrica, la cual es de 50 mg/l. EL cumplimiento de la resolución 631 de 2015 permite dar cumplimiento al objetivo de calidad actual de la corriente; sin embargo en el escenario cuatro (4), en el cual se espera una remoción muy alta de la carga en el nuevo sistema de tratamiento, y cuya concentración es inferior al definido en la resolución 631 de 2015, la mayor concentración de la DBO5 sería de 20 mg/l aproximadamente, y al momento de la descarga del colector la Iglesia se incrementaría de manera importante hasta 160 mg/l aproximadamente.

Respecto al escenario seis (6) que corresponden a valores promedio se observa un leve incremento de la concentración de la DBO5 después del vertimiento, pasando de 60 mg/l a aproximadamente 70 mg/l; sin embargo, según las mediciones promedio medidos en la red de monitoreo de la calidad del agua del AMB, la concentración después del vertimiento de la Quebrada La Iglesia disminuye de manera significativa.

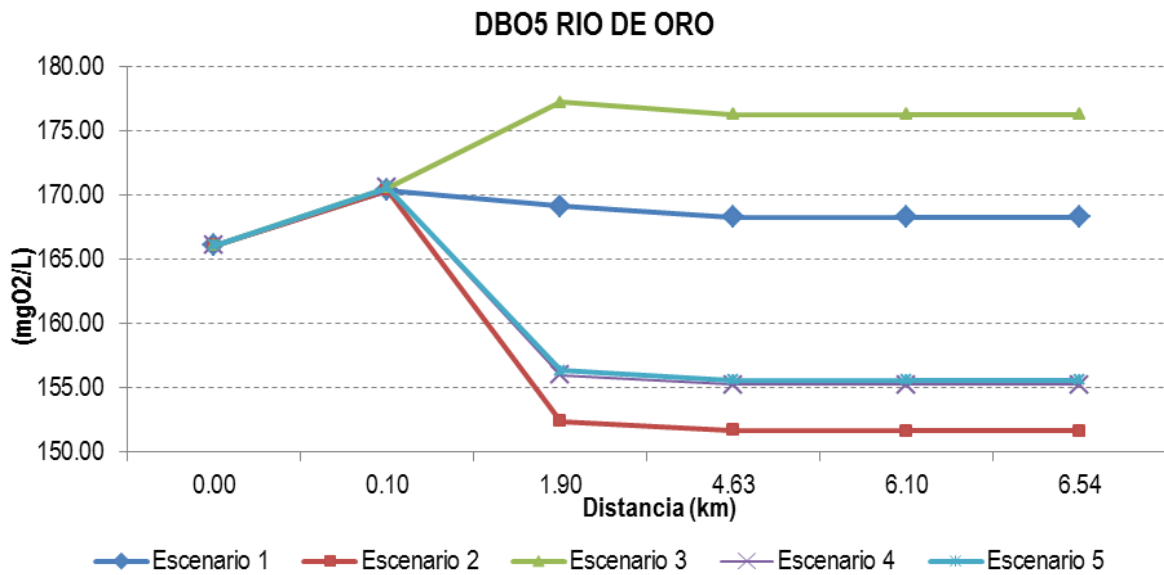
▪ **Río de Oro**

En cuanto al comportamiento de la DBO5 en el Río de Oro, es preciso indicar que según el análisis del error relativo para cada punto medido y modelado, no fue posible lograr un ajuste o calibración de esta variable para la corriente, en ninguno de los puntos de medición. Sin embargo, en las gráficas 38 y 39 se presenta el modelamiento de esta sustancia.

Gráfica 38. Comportamiento de la DBO5 en el Río de Oro para todos los escenarios.



Gráfica 39. Comportamiento de la DBO5 en Río de Oro para los escenarios del 1 al 5.



De acuerdo a lo anterior, es posible precisar que según el escenario seis (6) que corresponde a las condiciones promedio de medición de la red de monitoreo del AMB, se da cumplimiento; sin embargo, debido a la ausencia de un punto de control o medición en el Río de Oro antes de la confluencia de la Quebrada La Iglesia, se asumió o se tomó información de calidad del agua del Río de Oro en el barrio de Vahondo como fuente de información.

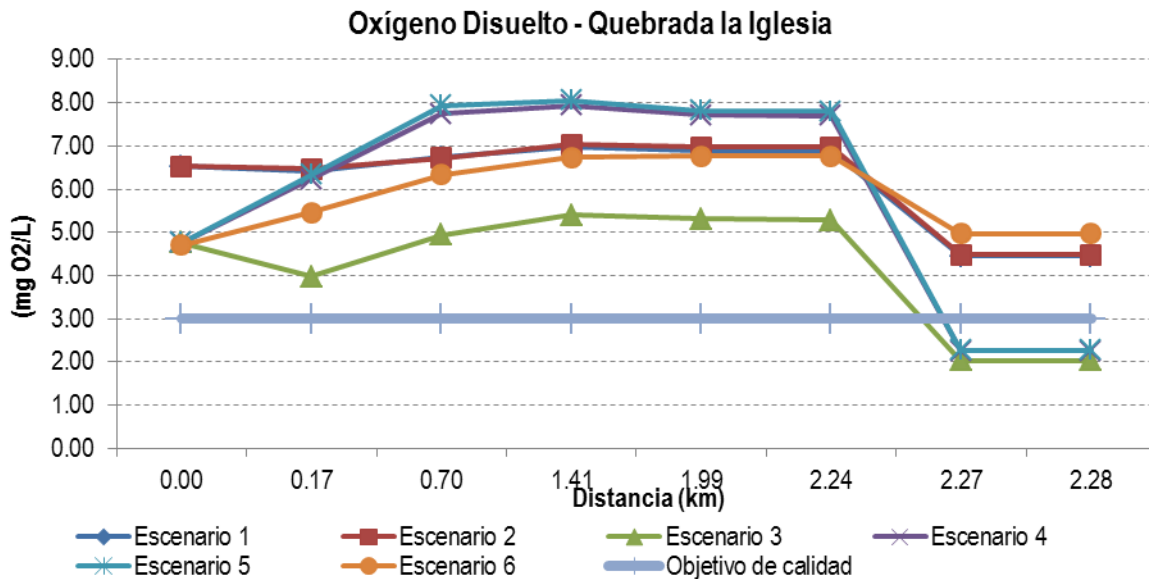
Es importante mencionar que debido a que en el monitoreo de mayo de 2015 se encontró una concentración muy alta de la DBO5, el modelo reporta altas concentraciones en la distancia analizada o de interés. Este valor encontrado en el monitoreo, puede haberse presentado por la confluencia o aporte de carga del río Frío, ya que la planta de tratamiento de aguas residuales río Frío no tiene actualmente la capacidad de tratar la totalidad del agua residual afluente, y se realizan vertimientos crudo del agua por largos periodos de tiempo durante el día, lo que podría favorecer el incremento de la concentración de la DBO5 en ciertas horas del día sobre el río Frío y por lo tanto del Río de Oro.

### 6.3.2 Escenario Oxígeno Disuelto

- **Quebrada La Iglesia**

Después de la temperatura, el oxígeno es uno de los factores más importantes que debe ser medido en el agua. La solubilidad del oxígeno en el agua depende principalmente de la temperatura, la presión atmosférica, la salinidad, la contaminación, la altitud, las condiciones meteorológicas y la presión hidrostática. En la gráfica 40 se evidencia el comportamiento del oxígeno disuelto en la longitud de interés sobre la Quebrada La Iglesia.

Gráfica 40. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la Quebrada La Iglesia para todos los escenarios.



En general, el consumo de oxígeno ocurre por respiración de plantas y animales, las demandas bioquímicas (soluble y fina/particulada y suspendida), química, bentónica de oxígeno, entre otros, es por esto que el monitoreo de mayo de 2015 comprende sustancias que permiten tener en cuenta todos estos procesos.

Para el oxígeno disuelto en la Quebrada La Iglesia, es posible indicar que esta variable se encuentra calibrada, por lo que la predicción del modelo es ajustada.

La Quebrada La Iglesia tiene una característica favorable que le permite contar con una constante de reaireación muy alto, y es debido a que esta corriente se encuentra canalizada, y cuenta con estructuras de caída durante el recorrido de la misma. Lo anterior le permite lograr altas concentraciones de oxígeno disuelto, aun cuando se presenta alta contaminación del agua generada por los vertimientos de la red de alcantarillado y de industrias o establecimientos comerciales o de servicios.

Para el escenario más crítico (3) se observa que el vertimiento del Carrasco sin tratamiento previo sobre la Quebrada La Iglesia, estando ésta saneada, generará una disminución del oxígeno de 5 mg/l a casi 4 mg/l; sin embargo de acuerdo a lo mencionado en el anterior párrafo, la concentración se incrementará posteriormente a un valor superior a 5 mg/, y nuevamente disminuirá a una concentración inferior al objetivo de calidad actual de la corriente (3 mg/l) en el último tramo, debido al vertimiento del colector la Iglesia de EMPAS S.A E.S.P.

Los escenarios uno (1) y dos (2) presentan exactamente el mismo comportamiento, en donde es posible observar que el vertimiento del Carrasco no genera una disminución en la concentración, pero que debido al vertimiento del colector la Iglesia más adelante,

disminuirá a casi 4.5 mg/l; sin embargo, en todo momento estaría cumpliendo con el objetivo de calidad.

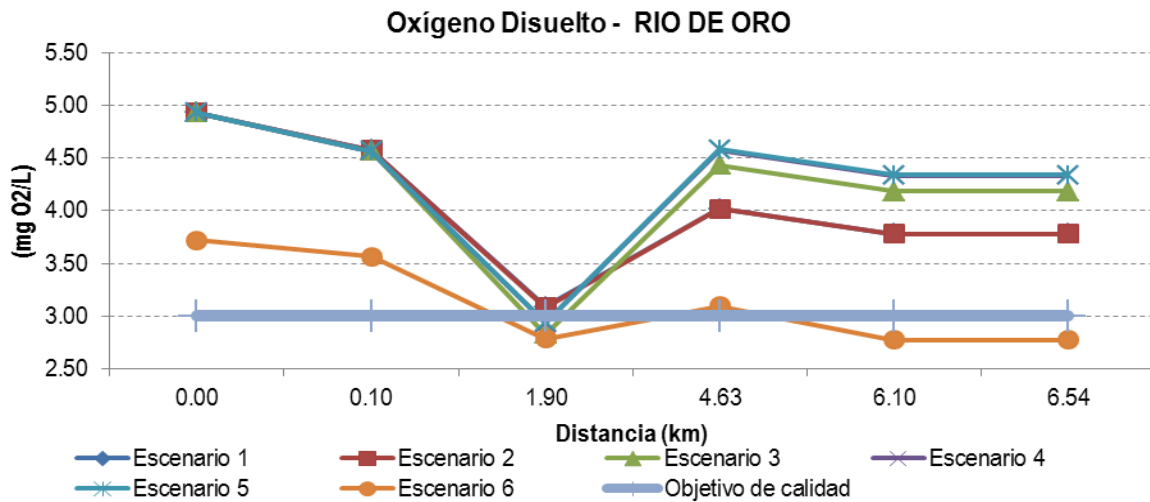
De acuerdo al escenario cuatro (4) y cinco (5), relacionados con el funcionamiento de la nueva planta de tratamiento de lixiviados, se observa que el vertimiento del lixiviado no generará disminución en la concentración del oxígeno, y por el contrario se favorecerá el incremento de este a casi 8 mg/l; pero por el vertimiento del colector la Iglesia la concentración disminuirá a casi 2 mg/l, valor inferior al objetivo de calidad actual.

▪ **Río de Oro**

De igual manera en el Río de Oro es posible mencionar que el oxígeno disuelto es considerado calibrado para la toda la corriente hídrica, y el objetivo de calidad actual de la corriente es de 3 mg/l para todo el tramo de interés del presente estudio.

De acuerdo a la gráfica 41, los escenarios uno (1) y dos (2) presentan un comportamiento similar, iniciando con una concentración aproximada de 5 mg/l, y después de la confluencia con la Quebrada La Iglesia disminuye a 3 mg/l aproximadamente. Por condiciones propias de reaeración del río, éste se recupera y la concentración se incrementa a 4 mg/l. La confluencia de la quebrada Chimitá favorece la recuperación de la corriente en términos de oxígeno disuelto.

Gráfica 41. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en el Río de Oro para todos los escenarios.



En el escenario más crítico (3), se observa un comportamiento muy similar al de los escenarios cuatro (4) y cinco (5), en donde se disminuye el oxígeno a 3 mg/l por la confluencia de la Quebrada La Iglesia, sin embargo, la corriente se recupera casi hasta los 4.5 mg/l.

En condiciones promedio, es posible evidenciar que después de la confluencia de la Quebrada La Iglesia la concentración disminuye a menos de 3 mg/l y a lo largo del tramo en estudio, ésta no se recupera y por el contrario tiende a disminuir la concentración, por lo que se considera un tramo crítico por el incumplimiento del objetivo de calidad actual de la corriente.

Como conclusión es posible indicar que en el escenario más crítico, el aporte del vertimiento del Carrasco no genera una disminución de la concentración del oxígeno, inferior al objetivo de calidad existente actualmente para el tramo de estudio en el Río de Oro.

### 6.3.3 Escenario Sólidos Suspendidos Totales

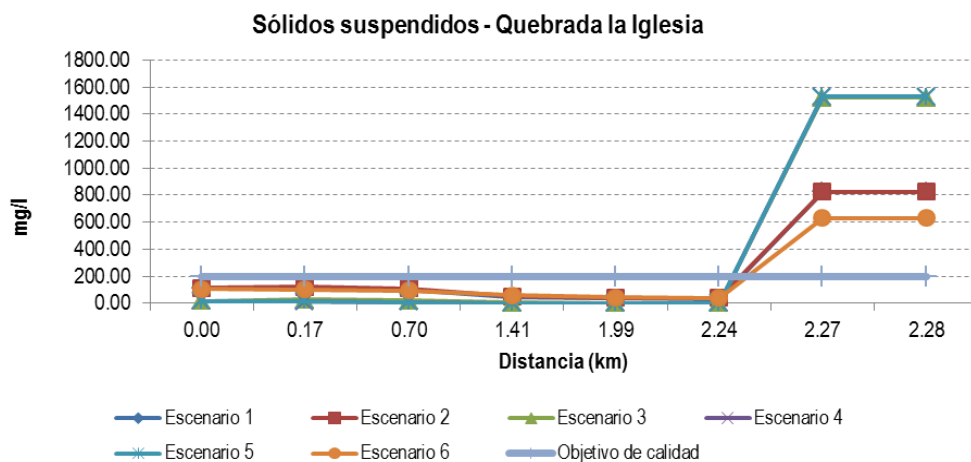
Los sólidos son una variable muy importante en la calidad del agua debido a que pueden ocasionar problemas estéticos por el depósito de lodos y favorecer condiciones anaerobias, adsorción de contaminantes y protección de patógenos.

Para la Quebrada La Iglesia, los sólidos suspendidos se encuentran calibrados por lo que los resultados del modelamiento cuentan con bajo porcentaje de error.

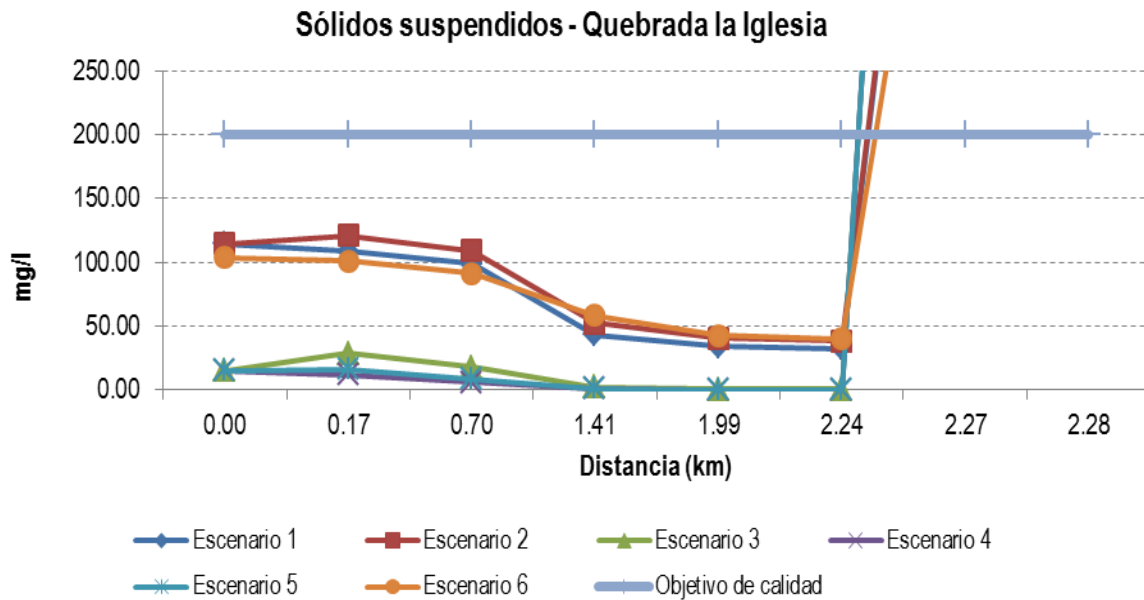
Debido a que el objetivo de calidad actual de la Quebrada La Iglesia es de 200 mg/l, es posible evidenciar que el aporte o vertimiento en condiciones más críticas (escenario 3) no genera alteración alguna o modificación en la concentración de los sólidos suspendidos.

#### ▪ Quebrada La Iglesia

Gráfica 42. Comportamiento de los Sólidos Suspendidos en la Quebrada La Iglesia para todos los escenarios



Gráfica 43. Comportamiento de los Sólidos Suspendedos en la Quebrada La Iglesia para los escenarios para una concentración inferior a 200 mg/l.



Al hacer un acercamiento de los resultados sobre lo sucedido en una concentración inferior a 200 mg/l, de acuerdo a la gráfica 43, se observa que los escenarios uno (1), dos (2) y seis (6) tienen un comportamiento similar, lo cual indica que en caso de vertimiento de lixiviado sin tratamiento previo en condiciones actuales de calidad de la Quebrada La Iglesia, no se afectaría dicha concentración después del vertimiento, y por el contrario se presentaría una disminución de los sólidos, probablemente por sedimentación de los mismos.

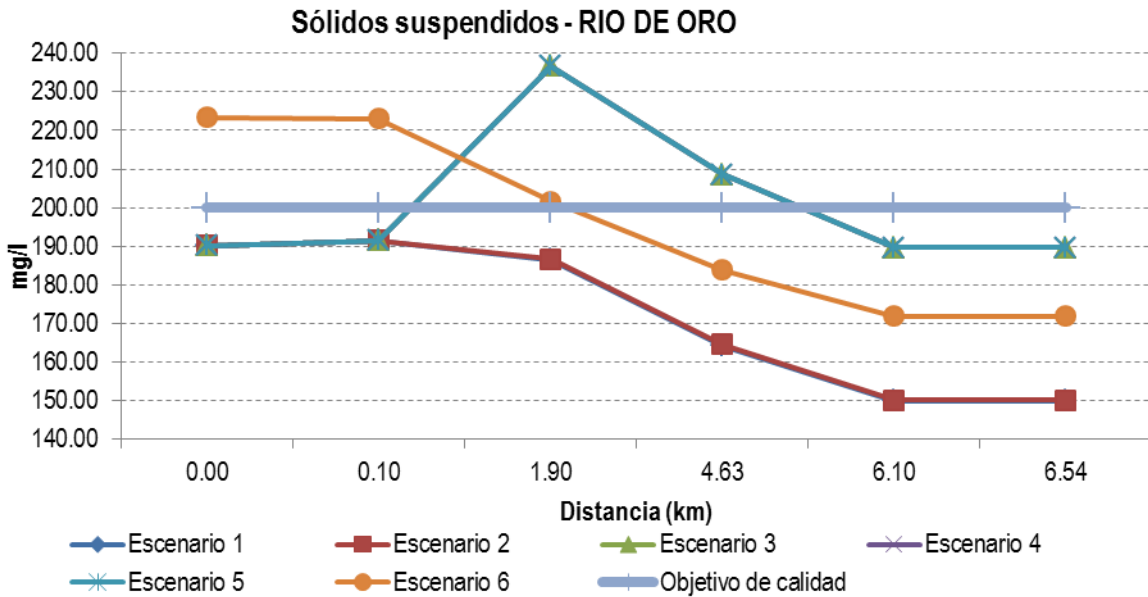
En cuanto al escenario más crítico (3), en el vertimiento del lixiviado sin tratamiento y en condiciones muy buenas de calidad de la corriente, ésta pasaría de 15 mg/l a 30 mg/l aproximadamente; sin embargo, esta concentración estaría muy por debajo del objetivo de calidad actual.

Respecto a los escenarios de modelamiento en donde se relaciona la nueva planta de tratamiento de lixiviados, se observa que el vertimiento del Carrasco no generará incremento en los sólidos suspendidos, y la concentración será inferior al objetivo de calidad actual para la corriente.

En todos los escenarios se presenta un incremento muy importante de los sólidos en los últimos 200 metros aproximadamente de corriente, debido al vertimiento del colector la Iglesia de la empresa EMPAS S. A E.S.P.

▪ **Río de Oro**

Gráfica 44. Comportamiento de los Sólidos Suspendedos en el Río de Oro para todos los escenarios.



Los sólidos suspendidos totales en el Río de Oro, presentaría en condiciones promedio incumplimiento del objetivo de calidad (200 mg/l); sin embargo, en el transcurso del recorrido del tramo, se presenta una sedimentación importante que permite la disminución de dicha concentración a valores inferiores al objetivo de calidad actual.

En el escenario crítico (3) se incrementarían los sólidos a concentraciones superiores al objetivo de calidad por una longitud aproximada de 4 kilómetros aproximadamente; sin embargo posteriormente se generaría una sedimentación que permitiría disminuir la concentración a un valor menor al objetivo de calidad. Ese incremento en la concentración se debe al caudal mínimo en el Río de Oro utilizado en el modelamiento, y al aporte de carga por parte de la red de alcantarillado.

En las condiciones actuales de vertimiento y asumiendo un vertimiento del Carrasco sin tratamiento previo, se daría cumplimiento al objetivo de calidad actual para la corriente.

**6.4 Generación de escenarios de simulación sustancias no convencionales**

Para el modelamiento de las sustancias no convencionales es importante indicar que según los resultados del monitoreo del 22 de mayo de 2015, las concentraciones para el Mercurio elemental, Fenoles y Cromo (+6) fueron inferiores al límite de detección del método utilizado en la técnica analítica. Debido a esta situación se solicitó al laboratorio reportar la

concentración de las sustancias, aún sin estar estos valores acreditados, debido a que son menores al límite de detección. De acuerdo a esta falta de información, se crearon dos escenarios que corresponden a una condición crítica y a una condición evaluando el comportamiento de las sustancias de interés con el funcionamiento de la nueva planta de lixiviados.

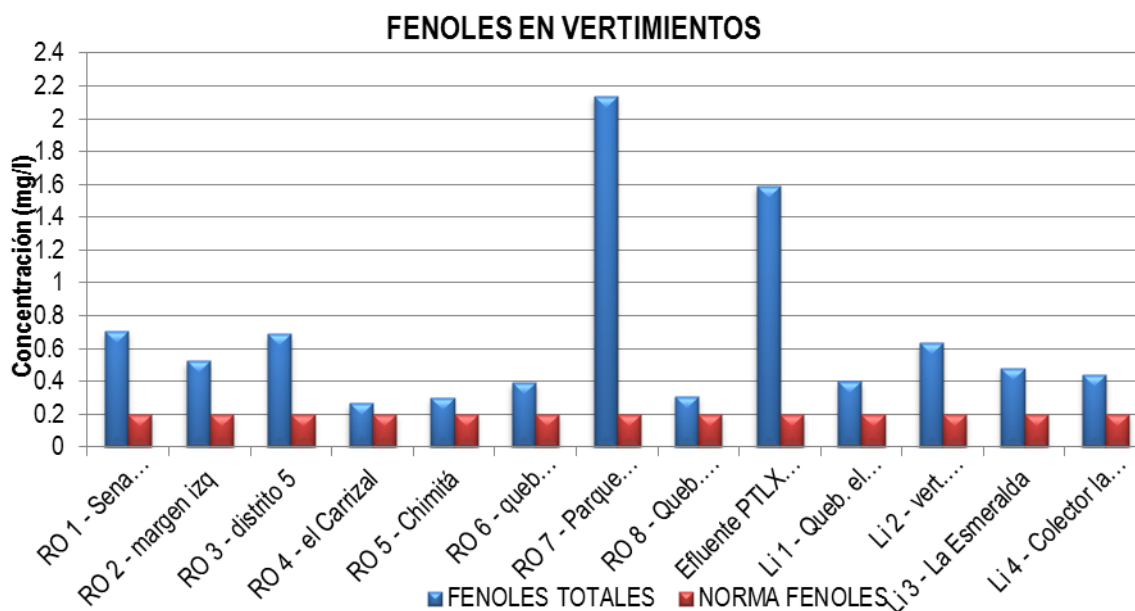
En la tabla 25 se presentan los escenarios planteados de modelamiento.

Tabla 25. Escenarios de modelamiento sustancias no convencionales.

		Mayo 2015	ESCENARIOS Mercurio Elemental		ESCENARIOS Cromo Hexavalente	
		Base ok	1 ok	2 ok	1 ok	2 ok
Descripción		Condiciones actuales	Sin Tratamiento	Con Tratamiento del lixiviado actual PTLX	Sin Tratamiento	Con Tratamiento del lixiviado actual PTLX
Quebrada la Iglesia	Caudal	Campaña 20/05/15	Medido en campaña	Ambiental (45 l/s)	Medido en campaña	Ambiental (45 l/s)
	Calidad		Medido en campaña	Medido en campaña	Medido en campaña	Medido en campaña
PTLX	Caudal promedio	En construcción	De bombeo continuo de 4 l/s	Caudal de diseño nueva PTLX (continuo) - 2.5 LPS	De bombeo continuo de 4 l/s	Caudal de diseño nueva PTLX (continuo) - 2.5 LPS
	Calidad		Vertimiento crudo a la quebrada la Iglesia (De monitoreo UIS AMB 2013, concentración cárcava nueva, de 0.00372 m/l)	Efluente tratamiento de PTLX actual - Cumplimiento artículo 14 resolución 631 de 2015 (0.01 mg Hg/l)	Vertimiento crudo a la quebrada la Iglesia (De monitoreo UIS AMB 2013, concentración cárcava 1 vieja, de 1.12 mg/l)	Efluente tratamiento de PTLX actual - Cumplimiento artículo 14 resolución 631 de 2015, de 0.5 mg/l.
Río de Oro	Caudal	Campaña 20/05/15	Medido en campaña	Ambiental (1225 l/s)	Medido en campaña	Ambiental (1225 l/s)
	Calidad		Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.	Medido en campaña para el dato de CABECERA, debido a ausencia de información en el punto.
Interceptor la Iglesia			Funcionamiento parcialmente por operabilidad (el interceptor no está funcionando totalmente, por lo que la quebrada presenta alto caudal por los vertimientos de la red de alcantarillado)	Funcionamiento completamente (el interceptor descarga casi la totalidad de las aguas residuales en la confluencia con el río de Oro. Continúa vertimiento de Sena y barrio la Esmeralda)	Funcionamiento parcialmente por operabilidad (el interceptor no está funcionando totalmente, por lo que la quebrada presenta alto caudal por los vertimientos de la red de alcantarillado)	Funcionamiento completamente (el interceptor descarga casi la totalidad de las aguas residuales en la confluencia con el río de Oro. Continúa vertimiento de Sena y barrio la Esmeralda)

En la tabla es posible observar que no se presenta información sobre el Fenol, esto se debe a que no fue posible correr el modelo, pues una vez alimentado, éste no generó gráficas del comportamiento de la sustancia. Se presume que la razón de esta situación puede ser ocasionada porque en ningún punto de la Quebrada La Iglesia y del Río de Oro se registraron fenoles, aunque en todos los vertimientos sí se reportaron concentraciones que son superiores a la norma de vertimientos, según artículo 74 del decreto 1594 de 1984. Ver gráfica 45.

Gráfica 45. Concentración de fenoles en todos los vertimientos monitoreados.



▪ **ESCENARIO UNO (1) – CRÍTICO**

Este escenario contempla que las corrientes hídricas tienen condiciones medidas en el monitoreo de mayo de 2015. Para las concentraciones de las sustancias de Mercurio y Cromo, se realizó una revisión histórica de los monitoreos existentes a la planta de lixiviados del Carrasco. Para lo anterior se solicitó información a la Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga – EMAB, a la Procuraduría para Asuntos Agrarios y Ambientales, y a la Defensoría del Pueblo. En la información encontrada fue posible verificar que las mayores concentraciones de Mercurio y de Cromo fueron medidas en el monitoreo realizado por el laboratorio CEIAM, y solicitado por el AMB, y fueron registrados en los afluentes del sistema de tratamiento de lixiviados que comienza en los pondajes. La mayor concentración de Mercurio se registró en la cárcava nueva y correspondió a un valor de 0.00372 mg/l; y el Cromo se registró en la cárcava antigua con una concentración máxima de 1.12 mg/l.

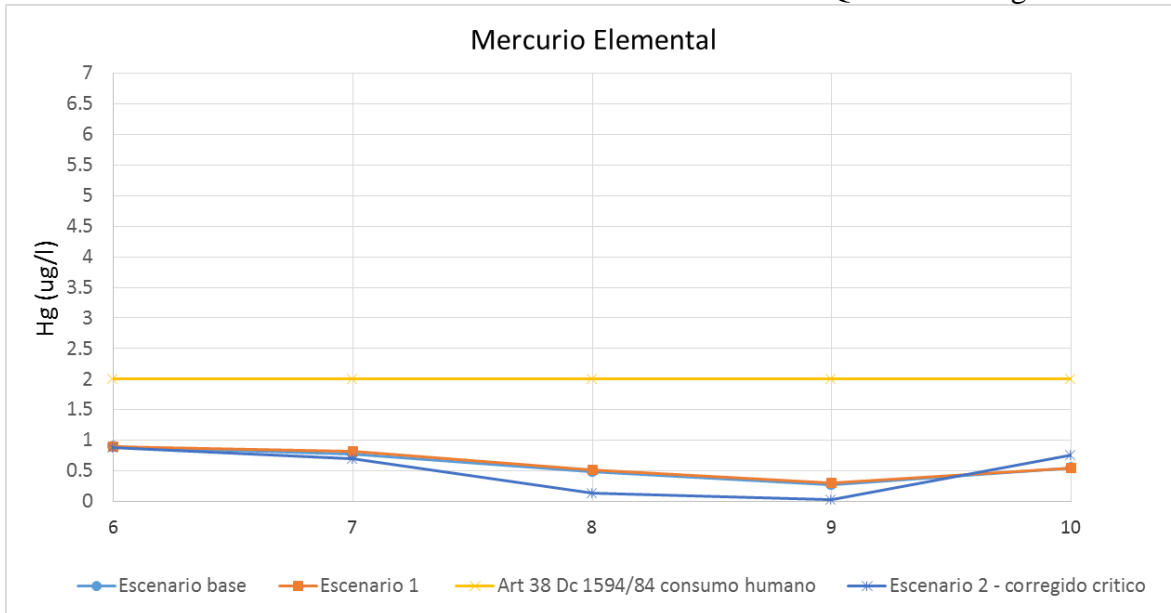
▪ **ESCENARIO DOS (2) – CON TRATAMIENTO DE NUEVA PLANTA DE LIXIVIADOS**

En este escenario fueron asumidas condiciones de saneamiento de la Quebrada La Iglesia y por lo tanto con un caudal mínimo de 45 LPS, con unas condiciones de calidad buenas, debido a que no existirían vertimientos en dicha corriente. Para el Río de Oro se utilizó un caudal de 1225 LPS, con las condiciones fisicoquímicas reportadas en el monitoreo de mayo de 2015. Respecto a las condiciones del vertimiento de la planta de lixiviados se tomó como concentración máxima el valor aceptado en la resolución 631 de 2015, norma de vertimientos que entró a regir a partir de enero 1 de 2016.

### 6.4.1 Escenario Mercurio

#### ▪ Quebrada La Iglesia

Gráfica 46. Modelamiento del Mercurio elemental en la Quebrada La Iglesia.



Para esta sustancia, es posible indicar que las concentraciones reportadas hasta el momento en los monitoreos realizados por la Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga – EMAB y por parte de las Autoridades Ambientales, corresponden a valores muy bajos, que se encuentra inclusive inferior a lo establecido en el artículo 74 del decreto 1594 de 1984 que corresponden a 0.02 mg/l.

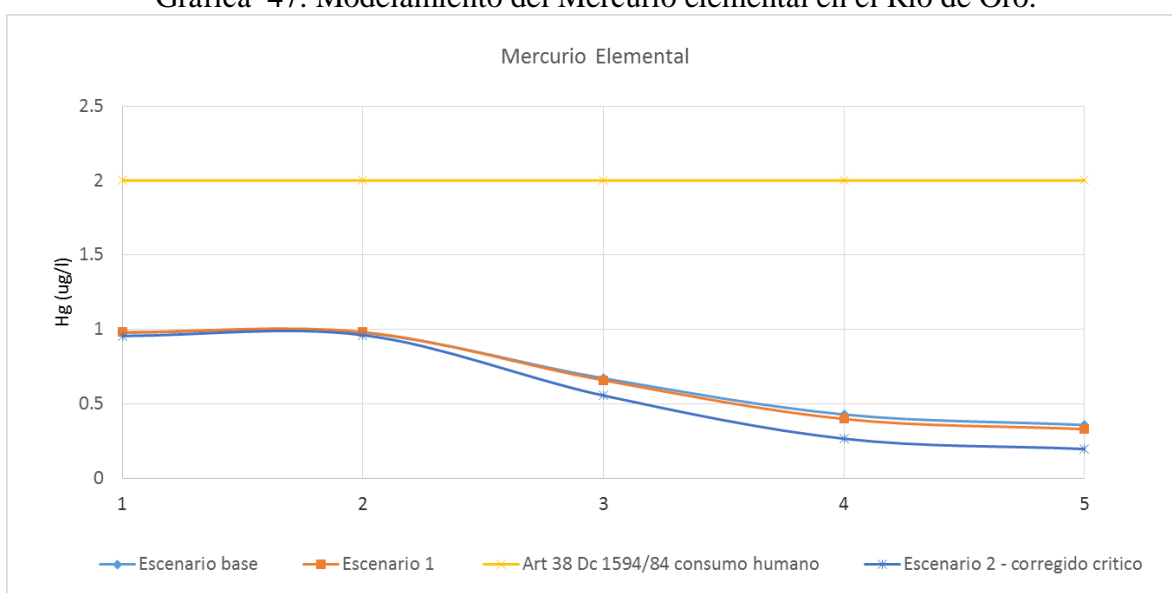
Como se mencionó en la tabla 25, al asumir un vertimiento de lixiviado a la Quebrada La Iglesia sin tratamiento previo con una concentración de 0.00372 mg/l de Hg, no generará ninguna afectación a la corriente de interés, pues según el modelo, en la Quebrada La Iglesia la mayor concentración será de casi 1 ug/l (0.001 mg/l), y al tomar como concentración máxima en la corriente un uso del recurso para consumo humano y doméstico (artículo 38 del decreto 1594 de 1984), el mercurio debe ser inferior a 2 ug/l (0.002 mg/l). Por lo tanto, no se generará contaminación a la Quebrada La Iglesia por Mercurio elemental aportado por El Carrasco.

En la gráfica 46 es posible observar una disminución en el segmento 8 y 9, generado posiblemente por efectos de sedimentación. Y al final, en el segmento diez (10) se presenta un incremento de la concentración debido al vertimiento del colector la Iglesia a la quebrada, aunque este vertimiento que en términos de caudal es muy grande, tampoco genera un incremento en la concentración del mercurio elemental, de tal forma que supere la concentración para una corriente con uso del recurso para consumo humano y doméstico.

Respecto al segundo escenario, en el cual se plantea una disminución en el caudal de la Quebrada La Iglesia debido a que entraría en funcionamiento el colector la iglesia de EMPAS S.A E.S.P, es posible observar en la gráfica la disminución de la concentración, lo cual puede ser debido a que al disminuir el caudal en la quebrada, disminuye la velocidad del agua, y se favorece la sedimentación de la sustancia, pues el mercurio presenta una facilidad para unirse con los sólidos del agua. De igual manera se favorece la volatilización del mismo, sobre todo por la alta reaireación existente en la Quebrada La Iglesia por ser una estructura canalizada, con pendiente cero, pero con caídas en el recorrido que favorece el incremento de esta tasa.

- **Río de Oro**

Gráfica 47. Modelamiento del Mercurio elemental en el Río de Oro.



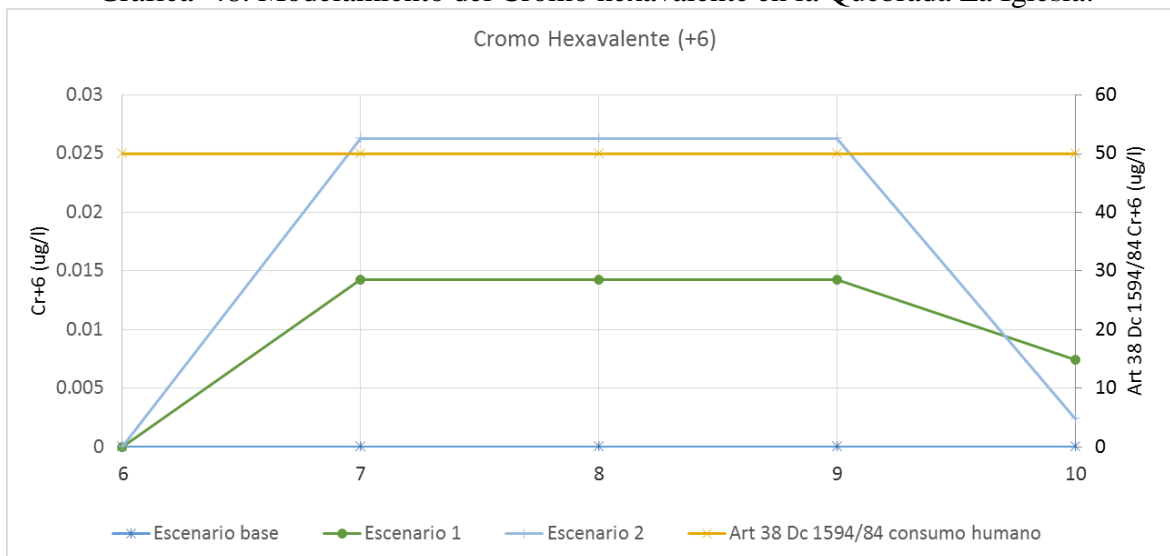
Para el caso del Río de Oro, la confluencia de la Quebrada La Iglesia sobre el río se presenta en el segmento dos (2), y dicho aporte favorece una dilución del mercurio elemental en la corriente. En los demás segmentos no se presentan cargas afluentes importantes, y por lo tanto se genera una disminución en la concentración, inclusive inferior a la concentración para una corriente con uso del recurso para consumo humano y doméstico.

En el segundo escenario, al plantear una disminución en el caudal el en Río de Oro debido al caudal mínimo calculado, es posible observar en la gráfica 47 la disminución de la concentración, posiblemente debido a que existe un bajo caudal en el río, disminuye la velocidad del agua, y se favorece la sedimentación de la sustancia, pues el mercurio presenta una facilidad para unirse con los sólidos del agua. De igual manera se favorece la volatilización del mismo, sobre todo por la alta reaireación existente en la Quebrada La Iglesia por ser una estructura canalizada, con pendiente cero, pero con caídas en el recorrido que favorece el incremento de esta tasa.

## 6.4.2 Escenario modelamiento Cromo

### ▪ Quebrada La Iglesia

Gráfica 48. Modelamiento del Cromo hexavalente en la Quebrada La Iglesia.



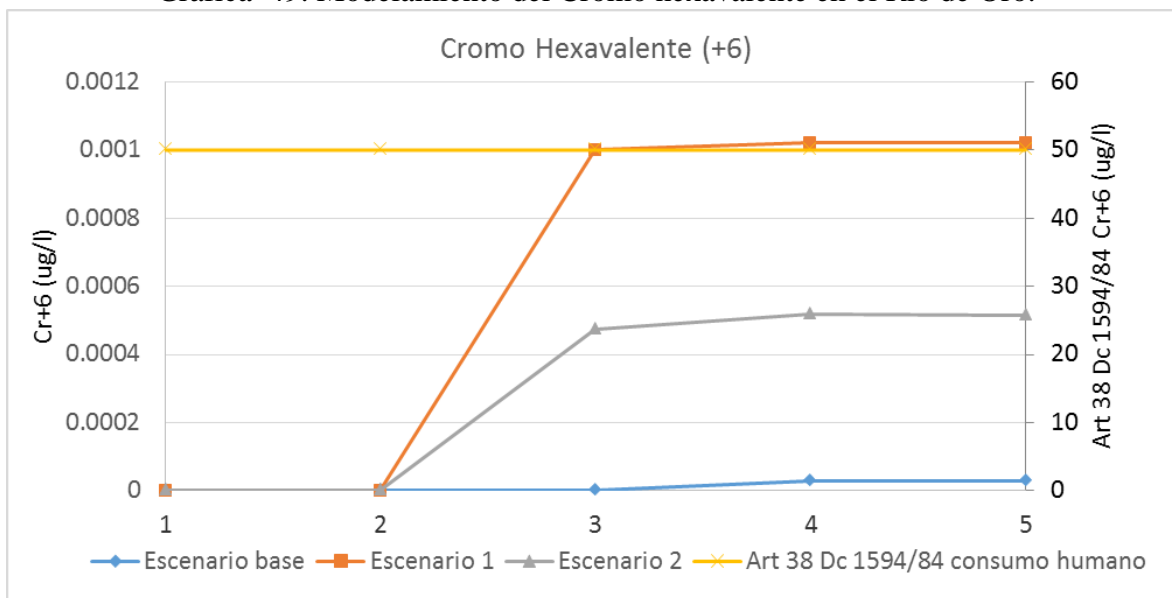
Al observar la gráfica 48 generada del modelamiento del Cromo hexavalente (Cr+6), es posible indicar que las concentraciones que se generarán en la Quebrada La Iglesia son muy bajas, pues la máxima concentración generada se generaría en el escenario dos (2), y se presentaría en el segmento siete (7) al nueve (9), debido al incremento de carga del lixiviado del Carrasco, sin tratamiento previo, siendo ésta de aproximadamente 0.025 ug/l. Posteriormente se presenta una disminución de la concentración, debido probablemente a la dilución del vertimiento del colector la iglesia de la empresa EMPAS S.A E.S.P en el segmento diez (10). Es importante mencionar que según la información histórica del Cromo (+6) en los monitoreos realizados por las Autoridades Ambientales, el mayor valor fue de 1.12 mg/l y fue medido por el laboratorio CEIAM de la UIS, según solicitud del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Esta concentración corresponde a un valor en el afluente de los pondajes, por lo que asume dicha concentración como el valor máximo vertido sin tratamiento previo. Bajo estas condiciones, y al tomar como concentración máxima en la corriente un uso del recurso para consumo humano y doméstico (artículo 38 del decreto 1594 de 1984), el Cromo+6 debe ser inferior a 50 ug/l (0.05 mg/l), se observa en la gráfica 48 que el vertimiento del lixiviado no generaría ninguna afectación sobre el recurso hídrico.

Para el escenario uno (1) las concentraciones serían más bajas que el segundo escenario.

- **Río de Oro**

Gráfica 49. Modelamiento del Cromo hexavalente en el Río de Oro.



Según la gráfica 49, en el Río de Oro las concentraciones mayores se presentan en el escenario uno (1), con un valor de 0.001 µg/l, en los segmentos tres (3), cuatro (4) y cinco (5). En el escenario dos (2) disminuye debido posiblemente a la baja del caudal y velocidad del agua, favoreciendo la sedimentación. De igual manera, las concentraciones más altas para el escenario dos (2), son muy bajas en comparación con la norma al tomar como concentración máxima en la corriente un uso del recurso para consumo humano y doméstico (artículo 38 del decreto 1594 de 1984), el Cromo+6 debe ser inferior a 50 µg/l (0.05 mg/l). Por lo anterior se asume que el vertimiento del Carrasco en ninguna de las dos condiciones generaría una afectación al agua del Río de Oro.

## 7 APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS

Durante la ejecución del convenio en el cual se desarrolló el estudio, fue posible contar con una actividad adicional a las contempladas y definidas en los objetivos específicos, que permitiera conocer si parte del lixiviado generado en la descomposición de la materia orgánica llega a los flujos subterráneos en la zona de disposición de residuos sólidos en El Carrasco. Es importante indicar que la finalidad del documento no corresponde a evaluar el comportamiento de los lixiviados en los flujos subterráneos, ni tampoco conocer la magnitud o la concentración de los mismos, corresponde solamente a la posibilidad de adelantar en un futuro, un estudio con mayor profundidad, de acuerdo a los resultados hallados.

De acuerdo a lo anterior, se realizó un diagnóstico ambiental de la situación actual, mediante la caracterización en El Carrasco, por medio de la adquisición de tres (3) tomografías de resistividad eléctrica y cuatro (4) sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo, con el objetivo de Caracterizar geofísicamente los sitios donde se realiza la disposición de residuos sólidos, y en un sitio clausurado mediante los métodos geofísicos mencionados, buscando poder identificar las zonas de acumulación de los lixiviados y gases dentro del relleno.

En todo momento deberá tenerse en cuenta que los resultados obtenidos y la interpretación de los datos adquiridos en campo por medio de métodos de investigación geofísica fueron realizados por la empresa HYDROINGENIERÍA. Debe tenerse en cuenta que por su naturaleza interpretativa, los resultados mostrados son susceptibles de revisión y modificación a la luz de nuevos datos obtenidos por métodos directos y/o indirectos de investigación.

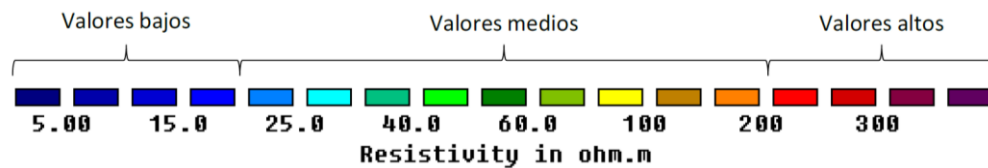
HYDROINGENIERÍA S.A.S, es una empresa que provee servicios de ingeniería, enfocados principalmente en las áreas de hidrología, hidrogeología y geofísica. El informe de los resultados, se encuentra anexo al presente estudio. Para una mayor profundidad de la información, el lector deberá remitirse al anexo.

**La Tomografía de Resistividad Eléctrica - TRE** es una técnica de prospección geoelectrica que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, es decir, es un diferenciador de los mismos en función de su valor de resistividad, y tiene por objeto específico determinar la distribución de la resistividad real en el subsuelo a partir de los valores de resistividad aparente medidos en campo mediante los métodos convencionales de corriente continua.

Los perfiles geoelectricos fueron generados a partir del procesamiento de los datos adquiridos en campo. El proceso de inversión genera, a partir de la pseudosección de resistividad aparente (datos de campo), un modelo de la distribución de la resistividad real del subsuelo que pueda ser considerada como una solución válida de los datos experimentales, de forma que el modelo teórico de esta sea similar a las observaciones de campo. El criterio de convergencia del proceso está relacionado con el cálculo del error

cuadrático medio (RMS), determinado entre los datos experimentales (datos de campo) y la respuesta del modelo deducido. Cuando se fije en un valor menor al 15% se considera que el ajuste entre los datos y los resultados es adecuado (GEOTOMO SOFTWARE, 2013).

Los valores de resistividad obtenidos del procesamiento de los datos de TRE adquiridos en campo se ubican en una escala entre  $\sim 2$  y  $>350$  Ohm.m, pudiendo ser divididos en tres rangos: valores bajos ( $\sim 2 - 20$  Ohm.m), medios ( $20 - 200$  Ohm.m) y altos ( $>200$  Ohm.m).



**Los sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo (SEDT)** es una técnica geofísica basada en la inducción y decaimiento de un campo eléctrico secundario en el subsuelo, creado a partir de un campo magnético y eléctrico primario. Dependiendo de la respuesta del subsuelo se generan contrastes en la conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y la intensidad de la señal que se transmite, propiedades que permiten caracterizar y definir los diferentes materiales y estratos geológicos en profundidad.

Los datos adquiridos en campo por medio de los SEDT, los cuales corresponden a los datos de la respuesta del impulso electromagnético (dB/dt) en función del tiempo (t), son ajustados automáticamente mediante la técnica de inversión suavizada (Constable et al., 1987), para estimar la distribución de la resistividad del subsuelo a lo largo de un sondeo 1D. Mediante un proceso iterativo, el modelo de inversión suavizada es calculado hasta que el data residual se ubique por debajo del límite aceptable 2.0.

## 7.1 METODOLOGÍA ESTUDIO GEOFÍSICO

La metodología utilizada para realizar las mediciones correspondió a las siguientes actividades principales:

### 7.1.1 VISITAS DE CAMPO

En el mes de octubre del año 2015 se realizaron las visitas de reconocimiento en El Carrasco, con el fin de identificar el alinderamiento del predio, el dimensionamiento de la celda de sitio de disposición de residuos sólidos, las condiciones topográficas y ambientales del lugar, para de esta manera localizar las Tomografías de Resistividad Eléctrica – TRE, y los Sondeos Electromagnéticos En Dominio Del Tiempo – SEDT. En el mes de enero de 2016, mediante información realizada por el Área Metropolitana de Bucaramanga – AMB, para lo cual la información fue tenida en cuenta en el presente estudio.

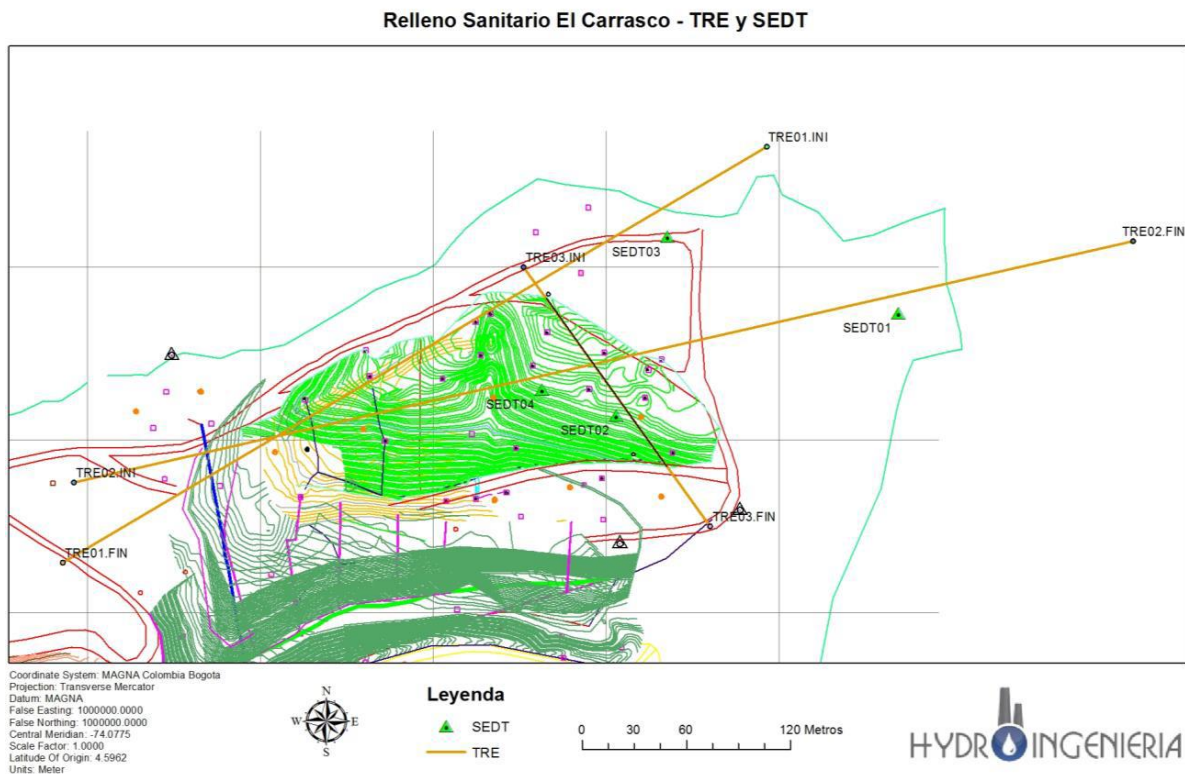
### 7.1.2 TRABAJO DE CAMPO

La campaña de adquisición de datos entre los días 20, 21 y 25 de octubre de 2015, y 30 de enero de 2016, llevando a cabo la medición de tres (3) TRE y cuatro (4) SEDT.

El equipo utilizado para la adquisición de datos geoelectricos fue un TERRAMETER ABEM LS, que consta de 81 electrodos, un set de cables LUND (4 cables, con 21 salidas a un intervalo de 10 metros), conector de cables (2) y 75 jumper cable-electrodo. Para la adquisición de los datos SEDT fue utilizado un ABEM WalkTEM, el cual consta de una antena transmisora de 40x40 m y dos antenas receptoras de 10x10 m y 0.5x0.5 m. El diseño de las TRE y SEDT (ubicación y extensión) se realizó tomando en cuenta el objetivo del estudio y las limitaciones y distribución del terreno.

En la Figura 19 muestra la distribución de los puntos y perfiles de trabajo realizados en campo. Los triángulos representan los SEDT y las líneas en amarillo representan las TRE.

Figura 19. Distribución de los SEDT y TRE realizados en la zona de estudio



### 7.1.3 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Debido a los dos tipos de mediciones analizadas, se realizó la inversión de datos de TRE utilizando el programa para posprocesamiento de datos el software **RES2DINVx64**; y para el procesamiento de la información SEDT, el software utilizado es el **ViewTEM**.

### 7.1.4 VALORACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Dentro de la bibliografía disponible con información relevante para el análisis de los datos del estudio se encuentra:

- INGEOMINAS (2001). Zonificación Sismogeotécnica indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga: Mapa geológico (escala 1:25.000) y memoria explicativa.
- INGEOEXPLORACIONES S.A.S (2015). Estudio geofísico mediante dos tomografías eléctrica 2D TE-1 en la nueva celda contigua del relleno sanitario El Carrasco, municipio de Bucaramanga, departamento de Santander.

## 7.2 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Como fue mencionado, en el siguiente numeral se presentan los resultados de las tres (3) Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE), y de los cuatro (4) Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo (SDET).

### 7.2.1 Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE)

En la tabla 26 se pueden observar las características de cada una de las TRE realizadas en el relleno sanitario El Carrasco.

Tabla 26. Características de las TRE realizadas en el relleno sanitario El Carrasco

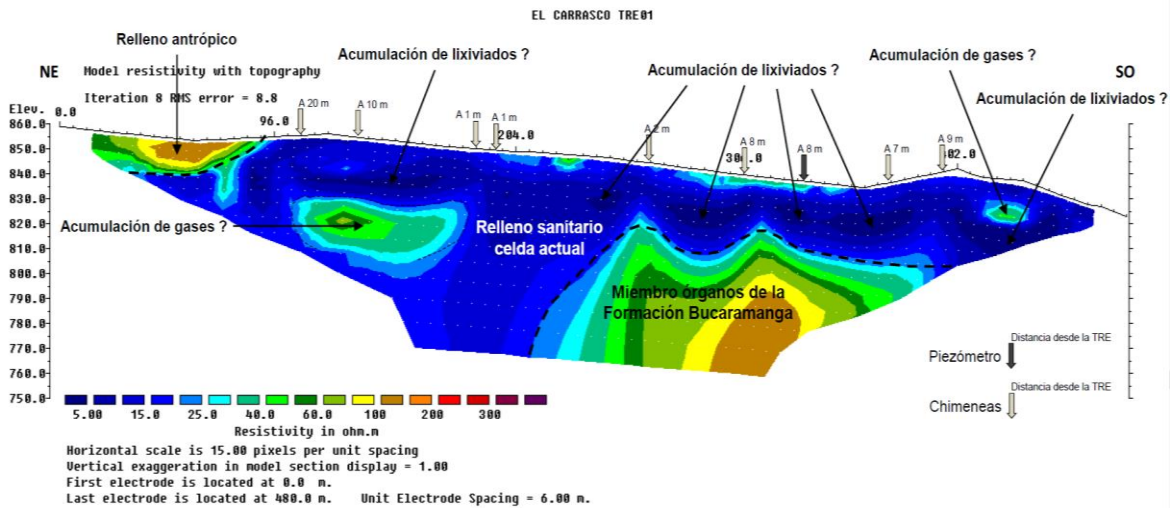
TRE	Punto Inicial	Punto Final	Long (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Profundidad máxima (m)	RMS-error (%)
TRE01	1.274.769 N	1.274.529 N	480	6	80	8.8
	1.103.292 E	1.102.885 E				
TRE02	1.274.575 N	1.274.715 N	640	8	110	13.9
	1.102.892 E	1.103.504 E				
TRE03	1.274.700 N	1.274.550 N	200	2.5	37	13.6
	1.103.152 E	1.103.260 E				

- **TRE 1:** La Figura 20 muestra la interpretación de los resultados de la TRE01. Los valores de resistividad medios se encuentran a lo largo de la TRE; en la superficie se observan como una capa que se extiende entre el inicio de la imagen hasta los 90 metros de distancia y posee un espesor de 13 metros. Se observa una anomalía de valores de resistividad medios en forma de un lente, ubicado entre los 108 y 180 metros de distancia, con un espesor de 20 metros; y por último, la anomalía de mayor notabilidad es la que se observa entre los 234 y 390 metros de distancia, que se dispone desde una profundidad promedio de 30 metros hasta la máxima profundidad de investigación, exhibiendo su continuidad en profundidad.

La imagen exhibe la base de la celda de disposición actual del relleno sanitario, esta posee valores de resistividad entre ~2 y 20 Ohm.m y un espesor desde 50 metros hasta la profundidad máxima de investigación. Dentro del relleno se logran identificar las zonas donde posiblemente se acumulan los lixiviados, donde los valores de resistividad descienden por debajo de los 5 Ohm.m, y los gases, donde los valores de resistividad ascienden hasta los 50 Ohm.m. Al costado nororiental se observa un relleno antrópico compuesto por una mezcla heterogénea de sedimentos de distintos tamaños, con un espesor máximo de 15 metros. Por debajo del límite del relleno sanitario se puede identificar una

zona donde se observan valores de resistividad entre 20 y 200 Ohm.m, los cuales caracterizan los sedimentos del miembro Órganos de la Formación Bucaramanga.

Figura 20. Interpretación de resultados de la TRE01



Fuente: Hydroingeniería (2015)

- **TRE 2:** La Figura 21 muestra la interpretación de los resultados de la TRE02, exhibiendo una capa con valores de resistividad bajos que se extienden a lo largo de la TRE, y posee un espesor variable entre 20 y 75 metros.

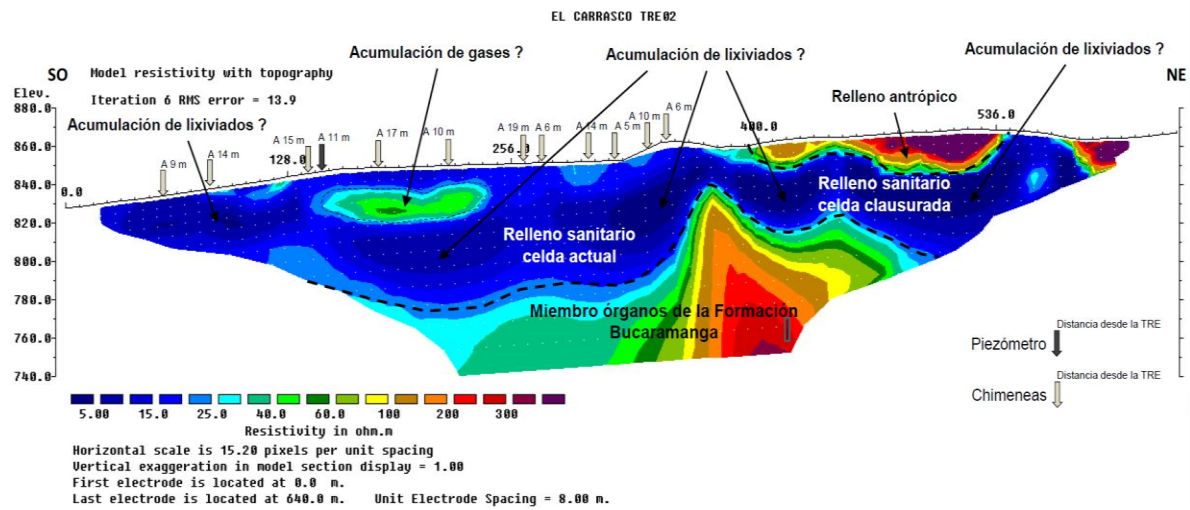
Se observa además una anomalía con valores de resistividad medios en forma de un lente, ubicado entre los 144 y 244 metros de distancia, con un espesor de 18 metros. En el costado nororiental de la TRE, se puede observar una capa en superficie con valores de resistividad altos, que posee un espesor máximo de 20 metros y se ubica entre 400 y 536 metros de distancia. Por último, se aprecia una capa con valores de resistividad medios, que se extiende desde profundidades de 75 y 20 metros hasta la máxima profundidad de investigación, exhibiendo su continuidad en profundidad.

La imagen exhibe completamente la celda de disposición actual del relleno sanitario, caracterizada por los valores de resistividad entre ~2 y 20 Ohm.m, dentro de la cual se logran identificar las zonas donde posiblemente se acumulan los lixiviados, donde los valores de resistividad descienden por debajo de los 5 Ohm.m, y los gases, donde los valores de resistividad ascienden hasta los 40 y 80 Ohm.m.

- **TRE 3:** La Figura 22 muestra la interpretación de los resultados de la TRE03, en donde se exhibe el predominio de los valores de resistividad bajos, desde la superficie hasta la máxima profundidad de investigación. Los valores de resistividad medios se encuentran en dos zonas de la TRE; en la zona central se observan como una anomalía vertical entre los 85 y 105 metros de distancia, y los 7 y 32 metros de profundidad, con valores de resistividad entre 25 y 40 Ohm.m; y hacia el costado suroriental se observan como una anomalía en forma de un lente que se extiende entre los 120 y 165 metros de distancia, y profundidades entre 10 y 20 metros, con valores de resistividad entre 25 y 80 Ohm.m.

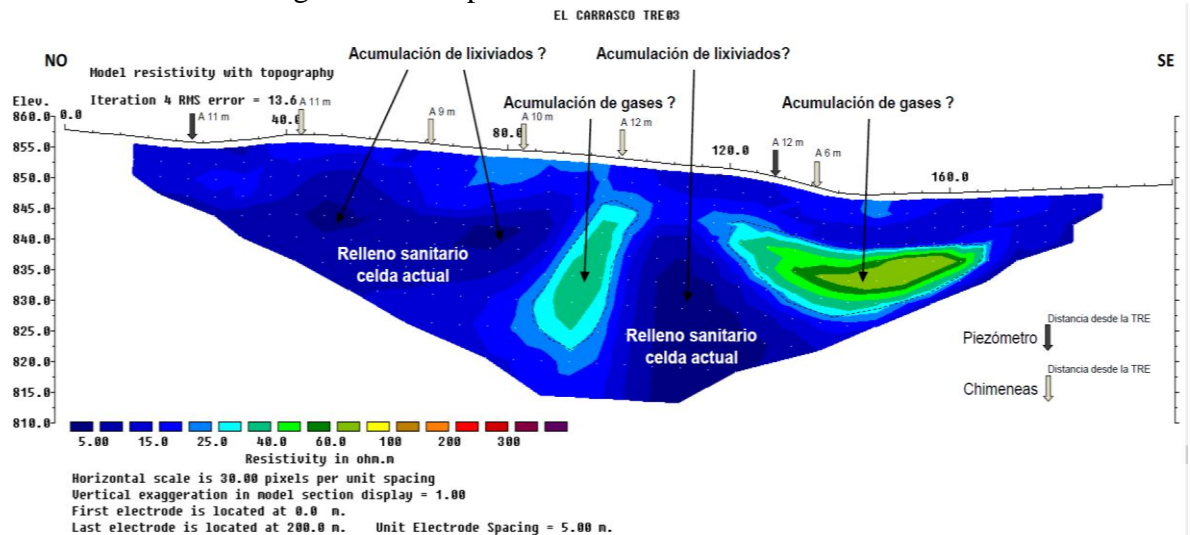
La imagen exhibe completamente la celda de disposición actual del relleno sanitario, caracterizada por los valores de resistividad entre ~2 y 20 Ohm.m, dentro de la cual se logran identificar las zonas donde posiblemente se acumulan los lixiviados, donde los valores de resistividad descienden por debajo de los 5 Ohm.m, y los gases, donde los valores de resistividad ascienden hasta los 40 y 80 Ohm.m.

Figura 21. Interpretación de resultados de la TRE02



Fuente: Hydroingeniería (2015)

Figura 22. Interpretación de resultados de la TRE03



Fuente: Hydroingeniería (2015)

## 7.2.2 Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo (SDET)

La Tabla 27 exhibe las características de cada uno de los SEDT realizados en campo.

Tabla 27. Características de los SEDT realizados en el relleno sanitario El Carrasco

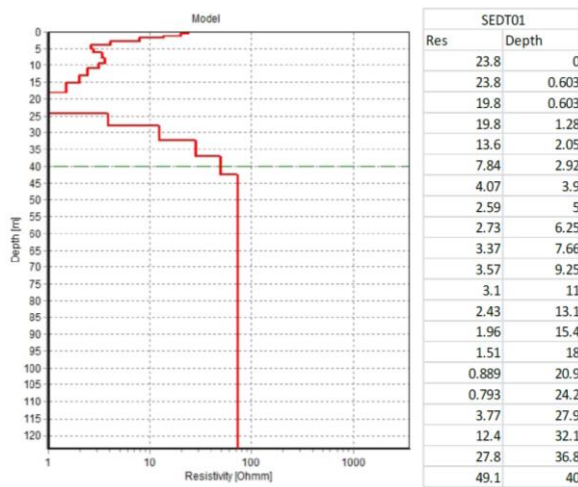
SEDT	Localización		Altura GPS	Profundidad de investigación (m)	Data residual
	N	E			
<b>SEDT01</b>	1.274.673	1.103.368	863	40	1.9
<b>SEDT02</b>	1.274.614	1.103.205	854	41	1.7
<b>SEDT03</b>	1.274.717	1.103.234	856	85	0.8
<b>SEDT04</b>	1.274.628	1.103.162	856	41	1.3

Los resultados de los SEDT son presentados en las Gráficas 50 a 53. En los resultados se observa una línea punteada, la cual indica la profundidad de investigación, ya que por debajo de esta los datos están influenciados por el error electromagnético natural de fondo medido en campo.

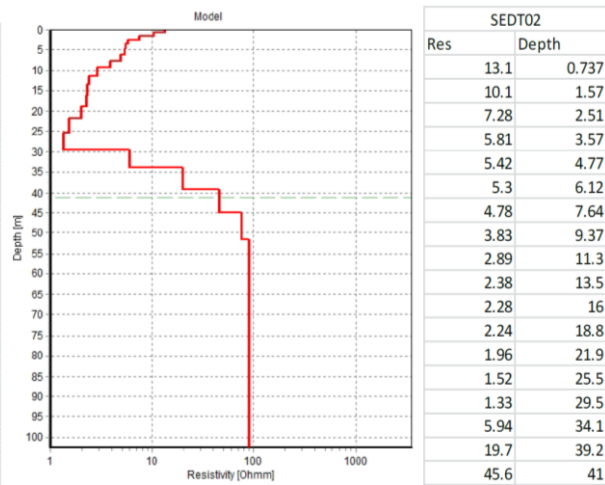
Los resultados de los SEDT exhiben una primera capa con valores de resistividad medios, entre 10 y 35 Ohm.m, y un espesor entre 3 y 5 metros. Por debajo de esta se identifica una capa que posee espesores entre 20 y 30 metros aproximadamente, con valores de resistividad bajos, los cuales alcanzan valores mínimos de ~1 Ohm.m. Por último, se observa una capa con valores de resistividad medios que se extiende desde profundidades de 25 y 30 metros.

Las profundidades alcanzadas con el método SEDT fueron bastante limitadas, esto es explicado por la existencia de la capa de valores de resistividad tan bajos como de 1 Ohm.m, es decir es una capa de muy alta conductividad, causando un efecto electromagnético que hace que la corriente permanezca en la capa de alta conductividad y realmente no pueda fluir por la capa resistiva.

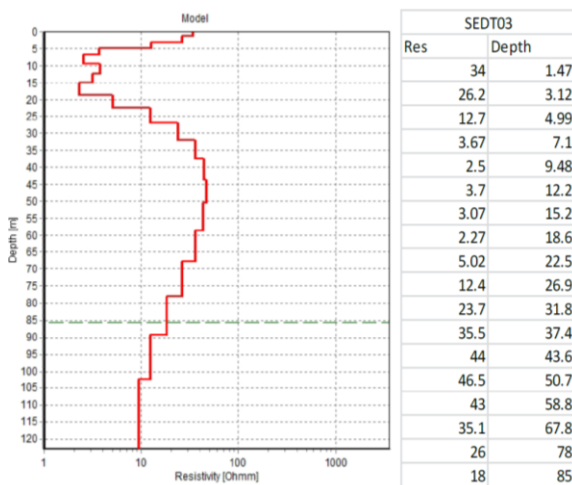
Gráfica 50. Resultados del SEDT01



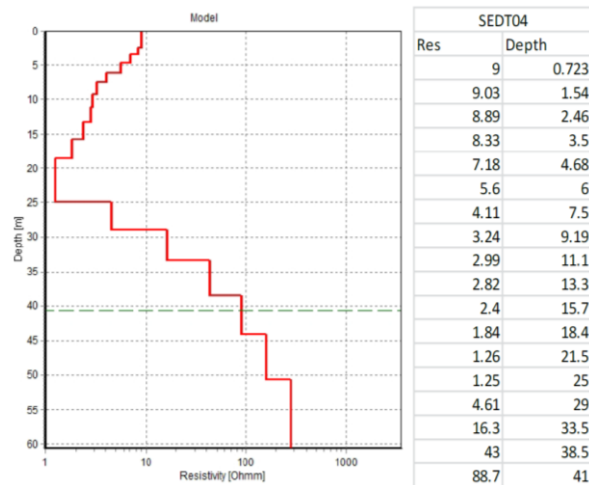
Gráfica 51. Resultados del SEDT02



Gráfica 52. Resultados del SEDT03

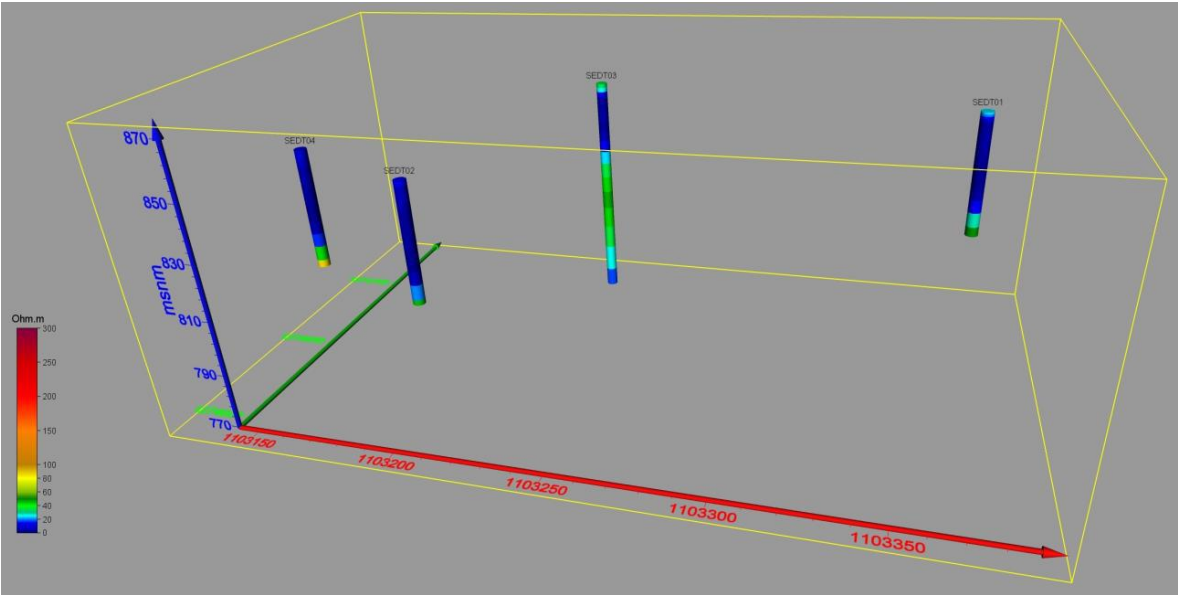


Gráfica 53. Resultados del SEDT04



La gráfica 54 muestra los resultados de los SEDT. En ella se pueden identificar los valores de resistividad característicos del relleno sanitario (valores entre ~1 y 10 Ohm.m), los cuales se reconocen en todos los SEDT de la gráfica. En el SEDT01 estos valores se ubican desde los 4 y 30 metros de profundidad; en el SEDT02 los encontramos entre 2 y 30 metros de profundidad; en el SEDT03 entre 5 y 23 metros de profundidad; y en el SEDT04 entre 2 y 29 metros de profundidad. Por debajo de este intervalo, en cada uno de los SEDT se identifica un incremento en los valores de resistividad hasta valores de resistividad medios, los cuales podrían estar representando los sedimentos del miembro Órganos de la Formación Bucaramanga.

Gráfica 54. Resultados de los SEDT



## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- No fue posible utilizar información solicitada a la CDMB debido a que dicha información fue entregada en tiempos donde ya se había realizado la alimentación del modelo hidrológico, y de calidad del agua. Por lo anterior se recomienda realizar en una segunda fase del estudio el uso de esta información.
- Debido a la ausencia de series de tiempo de caudales para el cauce del Río de Oro, se recomienda instalar equipos automáticos para medición de lluvia y niveles en línea, que permitan determinar el escurrimiento real de la cuenca. Dicha información facilitará la calibración de un modelo hidrológico ajustado de la cuenca hídrica.
- Debido a que el interés del presente documento no era realizar un estudio hidrológico, el caudal para los escenarios críticos fue calculado como un caudal mínimo que puede presentarse en la Quebrada La Iglesia y en el Río de Oro. Si se desea verificar dicha condición se recomienda para un futuro plantear un estudio que permita estimar el caudal ambiental en las principales corrientes hídricas de la jurisdicción del Área Metropolitana de Bucaramanga. Este estudio deberá realizarse una vez exista información suficiente y de calidad, y que sea generado por equipos de medición de niveles y caudales en línea.
- El monitoreo de aguas residuales, de sedimento y de vertimientos permitió conocer que la calidad del agua de la Quebrada La Iglesia y del Río de Oro están fuertemente influenciados por los vertimientos provenientes de la red de alcantarillado público, pues en la Quebrada La Iglesia el aporte de carga de la DBO<sub>5</sub> por parte del alcantarillado fue de 93% y 7% por parte de la empresa de Aseo; y en el Río de Oro fue de 98% por parte del alcantarillado y de 1% para el parque industrial y de 1% para la quebrada Cuyamita.
- Las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, DQO y carbono orgánico disuelto, indicaron un contenido significativo de materia orgánica en descomposición en los puntos objeto de estudio, lo que indica que la concentración de oxígeno usada por los microorganismos para degradar y estabilizar la materia orgánica biodegradable o materia orgánica es alta.
- Los fenoles totales en la columna de agua en todos los puntos de monitoreo reportaron el correspondiente límite de la técnica analítica empleada por el laboratorio, demostrando la no afectación por parte de este parámetro; sin embargo, de acuerdo a las concentraciones inferiores al límite de detección del método, la concentración del fenol en todos los puntos fue de cero (0).
- Parámetros como el fósforo soluble reactivo, el fósforo total, y los nitrógenos reportaron concentraciones altas en las aguas monitoreadas, indicando condiciones de Hipereutrofia, debido posiblemente a procesos de degradación incompleta de materia orgánica biodegradable.

- Metales analizados como el cromo hexavalente, mercurio, mercurio divalente y metilmercurio, reportaron el correspondiente límite de la técnica analítica empleada por el laboratorio, el día y la hora en que se efectuó el monitoreo, indicando una mínima presencia y/o ausencia por parte de estos. De acuerdo a las concentraciones inferiores al límite de detección del método, solamente se encontró cromo trivalente en el punto sobre la quebrada Iglesia denominado P-3 Puente Construvicol, siendo este valor de 0.003 mg/l. Y respecto al mercurio se encontró en todos los puntos de las corrientes, pero en concentraciones muy bajas.
- Las poblaciones de Coliformes totales y fecales en las aguas monitoreadas son un indicador de contaminación proveniente de vertimientos de aguas residuales domésticas y no domésticas.
- Los fenoles totales en todos los vertimientos analizados presentaron valores superiores al límite máximo establecido en el artículo 74 del Decreto 1594 de 1984, indicando un alto contenido de aguas residuales no domésticas.
- Con respecto a los nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno total en los vertimientos, éstos se encontraron en altas concentraciones, indicando una afectación en el recurso hídrico asociado con estos parámetros.
- Los Metales analizados como el cromo hexavalente se presentó solamente en la quebrada Cuyamita, siendo ésta de 0.004 mg/l, concentración inferior a la norma de vertimientos (0.5 mg/l). Respecto al mercurio, en todos los puntos se encontró esta sustancia, pero en concentraciones inferiores a la norma de vertimientos (0.02 mg/l).

## **SUSTANCIAS CONVENCIONALES**

- El modelo para sustancias convencionales se encuentra calibrado para el oxígeno disuelto para la Quebrada La Iglesia y el Río de Oro. Y para los sólidos suspendidos totales se considera calibrado para las dos corrientes hídricas igualmente.
- Respecto a la DBO<sub>5</sub>, es posible indicar que en caso ser saneada la Quebrada La Iglesia con la PTLX actual, el vertimiento del Carrasco afectaría fuertemente la calidad del agua de la corriente tanto para el caso de vertimientos sin tratamiento como con tratamiento, aunque las dos concentraciones sean muy diferentes, estarían superando el valor según el objetivo de calidad actual. Sin embargo, para el escenario con tratamiento mediante la nueva planta de lixiviados, las concentraciones en los dos escenarios generarían una concentración de la DBO<sub>5</sub> inferior al establecido en el objetivo de calidad de la corriente.
- Debido a la alta concentración de la DBO<sub>5</sub> en la Quebrada La Iglesia antes del vertimiento de la quebrada El Carrasco, es posible que se esté generando una dilución de los contaminantes aportados por el lixiviado del Carrasco en la Quebrada La Iglesia.

- Una vez sea saneada la quebrada El Carrasco, y según las características fisicoquímicas del vertimiento de la nueva planta de lixiviados iguales a la requerida por la norma de vertimiento, según artículo 14 de la resolución 631 de 2015, es posible dar cumplimiento a los objetivos de calidad existente para la corriente hídrica.
- Según la concentración esperada de la DBO<sub>5</sub> del efluente proyectado de la nueva planta de lixiviados, la cual es muy inferior a la definida por la norma de vertimiento según artículo 14 de la resolución 631 de 2015, se presentará una concentración en la Quebrada La Iglesia más baja que la definida en los objetivos de calidad existente para la corriente hídrica.
- La concentración de la DBO<sub>5</sub> del efluente de la planta de lixiviados actual es muy superior a la descargada o vertida por la quebrada El Carrasco, por lo que se presume que exista una dilución, generado por el aporte de los diferentes establecimientos comerciales e industriales que vierten sobre la misma tubería, y que están ubicados en la vía de acceso al sitio de disposición final de residuos sólidos, pues estos no cuentan con la prestación del servicio de alcantarillado.
- Respecto al oxígeno disuelto en la Quebrada La Iglesia, la canalización de la misma favorece una constante de reaireación muy alta, razón por la cual la corriente presenta altas concentraciones de oxígeno, los cuales están por encima del objetivo de calidad actual (3 mg/l), aun cuando se presenta alta contaminación del agua generada por los vertimientos de la red de alcantarillado y de industrias o establecimientos comerciales o de servicios.
- Para el escenario más crítico (3), el vertimiento del Carrasco sin tratamiento previo sobre la Quebrada La Iglesia, generará una disminución del oxígeno de 5 mg/l a casi 4 mg/l; sin embargo, la concentración se incrementará posteriormente a un valor superior a 5 mg/l, y nuevamente disminuirá a una concentración inferior al objetivo de calidad actual de la corriente (3 mg/l) en el último tramo, debido al vertimiento del colector la Iglesia de EMPAS S.A E.S.P.
- Según las características fisicoquímicas del lixiviado de la nueva planta de tratamiento y según la norma nueva de vertimientos (Resolución 631 de 2015), el vertimiento no generará disminución en la concentración del oxígeno, y por el contrario se favorecerá el incremento a casi 8 mg/l.
- En el Río de Oro, el comportamiento del oxígeno disuelto en todos los escenarios se presenta una concentración igual al objetivo de calidad actual en el kilómetro 1.9, debido a que en dicho punto debe corresponder a una zona de mezcla e la Quebrada La Iglesia; en conclusión es posible indicar que en el escenario más crítico, el aporte del vertimiento del Carrasco no genera una disminución de la concentración del oxígeno, inferior al objetivo de calidad existente actualmente para el tramo de estudio en el Río de Oro.
- En cuanto a los sólidos suspendidos totales, se presenta cumplimiento del objetivo de calidad actual para la corriente en todos los escenarios; sin embargo, de igual manera en

todos los escenarios se presenta un incremento muy importante en los últimos 200 metros aproximadamente de corriente, debido al vertimiento del colector la Iglesia de la empresa EMPAS S. A E.S.P., el cual genera incumplimiento del objetivo de calidad actual.

- Respecto a los escenarios de modelamiento de los sólidos suspendidos en la Quebrada La Iglesia, en donde se relaciona la nueva planta de tratamiento de lixiviados, se observa que el vertimiento del Carrasco no generará incremento en los sólidos suspendidos de la corriente, y la concentración será inferior al objetivo de calidad actual.
- Los sólidos suspendidos totales en el Río de Oro, presentaría en condiciones promedio incumplimiento del objetivo de calidad (200 mg/l); sin embargo, en el transcurso del recorrido del tramo, se presenta una sedimentación importante que permite la disminución de la concentración a concentraciones inferiores al objetivo de calidad actual.
- En el escenario crítico (3) se incrementarían los sólidos a concentraciones superiores al objetivo de calidad por una longitud aproximada de 4 kilómetros aproximadamente; sin embargo, posteriormente se generaría una sedimentación que permitiría disminuir la concentración a un valor menor al objetivo de calidad. Ese incremento en la concentración se debe al caudal mínimo en el Río de Oro utilizado en el modelamiento, y al aporte de carga por parte de la red de alcantarillado.
- En las condiciones actuales de vertimiento y asumiendo un vertimiento del Carrasco sin tratamiento previo, se daría cumplimiento al objetivo de calidad actual para la corriente.

## **SUSTANCIAS NO CONVENCIONALES**

- Para el mercurio, es posible indicar que las concentraciones reportadas hasta el momento en los monitoreos realizados por la Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga – EMAB y por parte de las Autoridades Ambientales, corresponden a valores muy bajos, que se encuentra inclusive por debajo de lo establecido en el artículo 74 del decreto 1594 de 1984 que corresponden a 0.02 mg/l. Al asumir un vertimiento de lixiviado a la Quebrada La Iglesia sin tratamiento previo, no generará ninguna afectación a la corriente de interés, pues según el modelo, en la Quebrada La Iglesia la mayor concentración será de casi 1 ug/l (0.001 mg/l), y al tomar como concentración máxima en la corriente un uso del recurso para consumo humano y doméstico (artículo 38 del decreto 1594 de 1984), el mercurio debe ser inferior a 2 ug/l (0.002 mg/l). Por lo tanto, no se generará contaminación a la Quebrada La Iglesia por Mercurio elemental aportado por El Carrasco.
- Para el caso del Río de Oro, la confluencia de la Quebrada La Iglesia sobre el río se presenta en el segmento dos (2), y dicho aporte favorece una dilución del mercurio elemental en la corriente. En los demás segmentos no se presentan cargas afluentes importantes, y por lo tanto se genera una disminución en la concentración, inclusive

inferior a la concentración para una corriente con uso del recurso para consumo humano y doméstico.

- Respecto al Cromo hexavalente (Cr+6), es posible indicar que las concentraciones que se generarán en la Quebrada La Iglesia son muy bajas, pues la máxima concentración se generaría en el escenario dos (2), y se presentaría en el segmento siete (7) al nueve (9), debido al incremento de carga del lixiviado del Carrasco, sin tratamiento previo, siendo ésta de aproximadamente 0.025 ug/l. Al tomar como concentración máxima en la corriente un uso del recurso para consumo humano y doméstico (artículo 38 del decreto 1594 de 1984), el Cromo+6 debe ser inferior a 50 ug/l (0.05 mg/l), es posible indicar que el vertimiento del lixiviado no generaría ninguna afectación sobre el recurso hídrico.
- Para el Cromo hexavalente (Cr+6) en el Río de Oro, las concentraciones mayores se presentan en el escenario uno (1), con un valor de 0.001 ug/l, en los segmentos tres (3), cuatro (4) y cinco (5). Las concentraciones más altas para el escenario dos (2), son muy bajas en comparación con la norma al tomar como concentración máxima en la corriente un uso del recurso para consumo humano y doméstico (artículo 38 del decreto 1594 de 1984), el Cromo+6 debe ser inferior a 50 ug/l (0.05 mg/l). Por lo anterior se asume que el vertimiento del Carrasco en ninguna condición de los escenarios planteados generaría una afectación al agua del Río de Oro.
- Probablemente no se estén generando concentraciones altas de metales en sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco, debido a que una parte del sitio se encuentra en la etapa de generación del metano (Metanogénesis), lo que genera menos ácido y generalmente se retienen dichos metales.
- Se recomienda contemplar dos (2) puntos adicionales en la red de monitoreo del AMB sobre el Río de Oro. Un punto antes de río Frío y otro antes de la confluencia de la Quebrada La Iglesia. Lo anterior permitirá evaluar el impacto que genere el río Frío sobre el Río de Oro, ya que el río Frío es receptor de la totalidad de los vertimientos del municipio de Floridablanca.
- Se recomienda en próximos monitoreos, considerar el análisis del óxido de manganeso en el sedimento y agua, con el fin de poder evaluar el potencial de transformación del Cromo trivalente al Cromo hexavalente, pues no es suficiente conocer el potencial de óxido de reducción-redox.
- Es importante mencionar que en las corrientes hídricas analizadas existe un ambiente oxidante que podría favorecer la oxidación del Cromo trivalente al Cromo Hexavalente.
- Las constantes cinéticas de los tóxicos han sido asumidas debido a la falta de estudios sobre estos contaminantes.
- Se recomienda en un próximo estudio realizar un análisis más profundo en los sólidos que componen los sedimentos, con el fin de evaluar su composición de tal manera que permita la interacción sedimento columna de agua. Así como también estudios

enfocados a las constantes de sedimentación de sólidos y resuspensión de sólidos en la corriente hídrica.

- Posiblemente la baja concentración del Cromo trivalente se deba a que a pH superiores a 5, el Cromo trivalente favorece las reacciones de hidrólisis y precipitación.
- El Cromo hexavalente se encuentra en el sedimento porque tiene poca afinidad por adsorción a los sólidos y en la columna de agua se presenta en forma soluble.
- Si bien es cierto que el Cromo trivalente puede oxidarse por estar en condiciones de potencial de óxido de reducción favorable, en la campaña de monitoreo de mayo de 2015 no se encontró cromo hexavalente, lo que podría indicar para esta situación que no se tienen los agentes oxidantes tales como los óxidos de manganeso que propicien dicha oxidación. En este sentido la constante de oxidación no tendría una importancia en el modelo.
- No se encontraron aporte de cromo hexavalente, por lo que en este caso en particular tampoco sería relevante modelar la reducción del cromo trivalente a cromo hexavalente.

## **ESTUDIO GEOLÉCTRICO**

- Mediante la implementación de métodos geofísicos de tomografías de resistividad eléctrica y sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo se caracterizaron los sitios de disposición de desechos actual y clausurado, en el relleno sanitario El Carrasco.
- Según el mapa geológico del AMB elaborado por INGEOMINAS (2001), el relleno sanitario El Carrasco se localiza sobre los depósitos Cuaternarios del miembro Órganos de la Formación Bucaramanga, el cual está conformado por intercalaciones de niveles gravosos y arena arcillosos. Los niveles gravosos son depósitos de gravas y bloques, débilmente consolidados, clasto soportados (60%) y grano soportados (40%), dispuestos en forma de capas gruesas a muy gruesas, con espesores hasta de 15 m; los niveles finos corresponden a arcillas arenosas y arenas arcillosas compactas. Estos depósitos están caracterizados por valores de resistividad ubicados entre 20 y 250 Ohm.m.
- Los sitios de disposición de desechos, tanto en la celda actual como en la celda clausurada, están representados por valores de resistividad entre ~2 y 20 Ohm.m en las TRE, y ~1 y 10 Ohm.m en los SEDT. El espesor del relleno sanitario El Carrasco se definió entre valores desde 30 hasta 80 metros. El espesor máximo calculado para la celda de disposición clausurada fue de 65 metros aproximadamente, incluyendo los 20 metros de espesor del relleno antrópico que cubre parte del área de dicha celda; mientras que para la celda de disposición actual se calculó un espesor máximo de 80 metros aproximadamente. Sin embargo, la TRE01 muestra que el espesor calculado para la celda de disposición actual puede ser superior, ya que los valores de resistividad característicos del relleno posiblemente se extienden a profundidades mayores que las alcanzadas en la TRE.

- Dentro de las TRE realizadas en la zona de estudio pudieron identificarse algunas zonas con valores de resistividad por debajo de 5 Ohm.m, las cuales posiblemente están relacionadas a los sectores donde se acumulan los lixiviados dentro del relleno; también se identificaron otras zonas con valores de resistividad entre 40 y 80 Ohm.m que podrían estar relacionadas a zonas con acumulación de gases.
- Los valores de resistividad cercanos a los 20 Ohm.m identificados dentro de los sedimentos del miembro Órganos de la Formación Bucaramanga podrían, de alguna manera, estar relacionados con contaminación del suelo por lixiviados provenientes del relleno sanitario; sin embargo, esta hipótesis debe ser corroborada por medio de métodos directos de investigación.

## 9 DOCUMENTOS DE CONSULTA

- [1] Ministerio del Medio Ambiente. Guía ambiental para rellenos sanitarios. Bogotá, 2002
- [2] Albert, Lilia, A. Capítulo 14. El Cromo. Página 230. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-03a14.pdf>
- [3] Importancia del análisis de los metales pesados. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6978/02INTRODUCCION.pdf?sequence=2>
- [4] Ahumada Arias, Melba; Gómez Ibarra, Rayza Karla. Evaluación y selección de bacterias degradadoras de fenol por respirometría. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ciencias, Bogotá, 2009.
- [5] El Fenol. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia14.pdf>.
- [6] Ferreira, LilianTI; Durán, Rafael; Pallares, Miguel. EL MERCURIO COMO CONTAMINANTE AMBIENTAL Y AGENTE NEUROTÓXICO. Disponible en <http://webs.uvigo.es/pallares/articulos/libro%20para%20web%20web.pdf>.
- [7] Moneris, Miguel; Doménech, Paula. Modelación de la calidad del agua. Universidad Politécnica de valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, p. 127-128.
- [8] Molina, Carlos; Gibon, Francois; Sánchez, Yuba; Achá, Dario; Benefice, Eric; Guimaraes, Jean-Remy. Implicancia ambiental del mercurio en ecosistemas acuáticos de la Amazonía: Situación en Bolivia. Reista virtual REDESMA, 2010, Volumen 4 (2).
- [9] Jiménez, Angélica. Interacción del mercurio con los componentes del agua residual. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería y arquitectura. Departamento de ingeniería Química, 2005, p. 11.
- [10] A. Guitelman, S. Pérez; Cátedra de Construcciones Hidráulicas – Erosión y Socavación; Universidad de Buenos Aires; Primera Edición (español); Buenos Aires – Argentina 1999.
- [11] Departamento de Antioquia – Secretaria de Obras Públicas; Obras de Drenaje y Protección para Carreteras; Quinta Edición.
- [12] E. Martinez; Hidráulica Fluvial Principios y Práctica; Primera Edición; MBH; Madrid 2001.
- [13] G. Gavilán; Manual de Diseño de Drenajes Superficiales Y Sub-superficiales en Vías; Primera Edición; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga 2001.
- [14] HEASTED METHODS; Floodplain Modeling Using HEC-RAS; Bentley Institute Press. 2005
- [15] H. Breusers; A. Raudikivi; Hydraulic Structures Design Manual; Tome 2, Scouring, IAHR – AIRH, 1991.
- [16] INVIAS; Manual de Drenaje de Carreteras, Instituto Nacional de Vías; 2009. República de Colombia.
- [17] J. Martín; Ingeniería de Ríos; Alfa Omega; Primera Edición; México 2003.
- [18] J. Carciente, G. García, Z. Serrano; Drenaje de Carreteras Manual de Estructuras Típicas; Ediciones Vega s.r.l; Primera Edición; Madrid 1981.
- [19] M. Díaz-Granados, R. Vargas; Curvas Sintéticas Regionalizadas Intensidad Duración Frecuencia para Colombia; Universidad de los Andes; Bogotá.
- [20] R. Lemos; Drenaje Vial Superficial y Subterráneo; Primera Edición; Departamento de Hidráulica Facultad de Ingeniería Civil Universidad del Cauca; Popayán 1999.

- [21] V. Chow; Hidráulica de Canales Abiertos; Mc Graw Hill; Primera Edición (español); Bogotá 1994.
- [22] V. Chow; Hidrología Aplicada; Mc Graw Hill; Primera Edición (español), Bogotá 1994

## 10 ANEXOS

## **ANEXO 1. PLANO DE ÁREA DE CUENCAS**

**ANEXO 2. PUNTOS DE MONITOREO EN LA QUEBRADA LA IGLESIA Y EL  
RÍO DE ORO**

### **ANEXO 3. PUNTOS DE MONITOREO DE VERTIMIENTOS LÍQUIDOS**

**ANEXO 4. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS Y POLÍGONO DE  
THIESEN**

## **ANEXO 5. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN**

**ANEXO 6. INFORME DE RESULTADOS DEL ESTUDIO DE  
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SEDIMENTOS Y  
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL  
AGUA SUPERFICIAL Y RESIDUAL EN EL ÁREA METROPOLITANA DE  
BUCARAMANGA**

**ANEXO 7. INFORME DE APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD  
ELÉCTRICA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN DOMINIO DEL  
TIEMPO EN EL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO**