

ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL CROMO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ  
MEDIANTE LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA  
PARA LA REPRESENTACIÓN DE CONTAMINANTES CONSERVATIVOS EN CUERPOS  
DE AGUA LÓTICOS

LUIS ANGEL RAMOS RAMIREZ

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE

INGENIERIA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C. 2018

ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL CROMO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ  
MEDIANTE LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA  
PARA LA REPRESENTACIÓN DE CONTAMINANTES CONSERVATIVOS EN CUERPOS  
DE AGUA LÓTICOS

LUIS ANGEL RAMOS RAMIREZ

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Director:

DIANA MARCELA MUÑOZ NIETO

Ingeniera Química

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE

INGENIERIA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C. 2018

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los que han creído en mí, en mis capacidades, a los que alguna vez me lo han manifestado y a los que lo han hecho en silencio, agradezco a todos esos que con sus actos me han animado y aún no lo saben.

Mi agradecimiento sería pequeño si solo lo manifiesto a los sujetos, tengo el deber de agradecer a los hechos y a las circunstancias que me han llenado de fuerza para soñar y creer en lo que puedo cambiar.

## RESUMEN

La predicción de la calidad de agua de un sistema hídrico, se logra mediante la modelación del cuerpo, que será objeto de estudio, en el presente proyecto se aplicará un modelo de calidad de agua previamente desarrollado, buscando que este se ajuste a los requerimientos hídricos, físicos y de calidad, que presente la cuenca alta del río Bogotá a la altura del municipio de Villapinzón. Dicho trabajo tendrá como parámetro de modelación principal el cromo, siendo este uno de los principales contaminantes del lugar, procedente de las actividades de curtido de cuero que se desarrollan en el municipio desde el año 1820 (Tobón, 2013), además de predecir los valores más cercanos a las concentraciones reales que puede presentar el elemento, se pretende establecer las relaciones que este tiene con factores como el pH, la temperatura y el oxígeno.

Un enfoque preponderante durante la modelación del cuerpo de agua, es buscar reducir el porcentaje de incertidumbre que se pueda presentar durante la simulación o predicción de la calidad hídrica del sistema, la reducción de dicho porcentaje aumenta el grado de confianza sobre la modelación realizada, ayudando a que este se pueda emplear como herramienta de mitigación de impacto ambiental y saneamiento.

## ABSTRACT

In the present project, a previously developed water quality model will be applied, seeking to adapt it to the hydric, physical and quality water requirements, that present the upper basin of the Bogotá River at the height of the municipality of Villapinzón. This work will have chromium as its main modeling parameter, being one of the main pollutants of the place, coming from leather tanning activities that take place in the municipality since 1820 (Tobón, 2013), besides predicting the values closer to the actual concentrations that the element can present, it is intended to establish the relationships it has with factors such as pH, temperature and oxygen.

A preponderant approach during water body modeling is to reduce the percentage of uncertainty that may occur during the simulation or prediction of the water quality of the system, reducing that percentage increases the degree of confidence in the modeling performed, helping that it can be used as a tool to mitigate environmental impact and sanitation.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	IV
<b>ABSTRACT</b> .....	V
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	11
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3.1. Objetivo general</b> .....	15
<b>3.2. Objetivos específicos</b> .....	15
<b>4. MARCO TEÓRICO</b> .....	15
<b>4.1. Química del cromo y su toxicidad</b> .....	15
<b>4.2. Toxicología del cromo</b> .....	17
<b>4.3. Proceso de curtido del cuero y efectos sobre el medio ambiente</b> .....	18
<b>4.5. Marco legal</b> .....	31
<b>4.6.1. Antecedentes de la modelación en el mundo</b> .....	34
<b>4.6.2. Modelación en Colombia</b> .....	37
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	39
<b>5.1. Caracterización de la zona de estudio</b> .....	39
<b>5.1.1. Clima de la cuenca</b> .....	40
<b>5.1.2. Hidrografía de la cuenca</b> .....	43
<b>5.1.3. Vegetación de la cuenca</b> .....	46
<b>5.2. Calidad de Agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá</b> .....	48
<b>5.3. Técnicas para la recolección de información</b> .....	49
<b>5.4. Elección del tramo de modelación y segmentación del cuerpo de agua</b> .....	50
<b>5.5. Elección del modelo para representación del cromo en la Cuenca Alta del Río Bogotá</b> .....	53
<b>5.5.1 Información disponible del modelo</b> .....	60
<b>5.5.2 Permanencia en el tiempo</b> .....	61
<b>5.6. Datos de entrada en la interfaz del modelo</b> .....	62
<b>5.7. Descripción matemática de la representación fenomenológica del modelo</b> .....	63
<b>5.8. Entrada manual de los datos al modelo WASP</b> .....	68
<b>5.8.1. Datos de segmentación del río en el modelo</b> .....	69
<b>5.8.2. Información sobre el transporte del parámetro dominante en el agua</b> .....	69
<b>5.8.3. Condiciones de borde (concentraciones del toxico a trabajar)</b> .....	71

5.9.	Ejecución del modelo, post proceso y gráficos .....	71
5.10.	Datos para la modelación en el software WASP.....	72
5.10.1.	Segmentos en el tramo de modelación .....	72
5.10.2.	Puntos de vertimiento .....	73
5.10.3.	Parámetros hidráulicos .....	74
5.11.	Balance de materia para el cálculo de las concentraciones de cromo en los vertimientos 86	
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
6.1.	Resultados de la modelación en los segmentos T-2, T-3, T-4 y T-5.....	93
6.2.	Resultados de la modelación en los segmentos T-6, T-7 y T-8.....	97
6.3.	Resultados de la modelación en los segmentos T-9 y T-10.....	100
6.4.	Resultados de la modelación en los segmentos T-11, T-12 y T-13.....	103
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	107
7.2.	Recomendaciones.....	109
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	111
	ANEXOS .....	116

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Disminución de la carga contaminante. ....	29
Tabla 2.	Disminución en el consumo de agua .....	29
Tabla 3.	Usos del agua.....	44
Tabla 4.	Balance hídrico .....	44
Tabla 5.	ICA en cuatro puntos de seguimiento .....	49
Tabla 6.	Inventario de vertimientos.....	51
Tabla 7.	Cuadro comparativo de modelos .....	56
Tabla 8	Valoración numérica de los modelos .....	60
Tabla 9.	Segmentos del tramo principal.....	72
Tabla 10.	Coordenadas de los vertimientos .....	73
Tabla 11.	Niveles medios estación Villapinzón .....	78
Tabla 12.	Tabla de Schumm.....	79
Tabla 13.	Caudales a partir de la ecuación de Manning .....	81
Tabla 14.	Resultado velocidad de corte.....	83
Tabla 15.	Valores del coeficiente de dispersión .....	83
Tabla 16.	Valores de Peclet y Courant. ....	85

Tabla 17. Balance de especies químicas en ambos lados de la ecuación. ....	87
Tabla 18. Concentraciones y caudales de los puntos de vertimiento.....	91
Tabla 19. Graficas de los segmentos T-2, T-3, T-4 y T-5.....	93
Tabla 20. Graficas de los segmentos T-6, T-7 y T-8.....	97
Tabla 21. Graficas de los segmentos T-9 y T-10.....	100
Tabla 22. Graficas de los segmentos T-11, T-12 y T-13.....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de curtido.....	18
Figura 2. Aditivos y concentraciones de descargas en el proceso de curtido convencional. .	25
Figura 3. Número de días de lluvia mensual en los últimos siete años .....	41
Figura 4. Régimen de lluvias mensual en la cuenca .....	42
Figura 5. Caudales mensuales en los últimos siete años .....	45
Figura 6. Niveles mensuales en los últimos siete años.....	46
Figura 7. Segmento a Modelar .....	53
Figura 8. Red nodal WASP .....	65
Figura 9. Rutas de los segmentos a modelar .....	74
Figura 10. Estaciones limnimétricas de la cuenca alta .....	78
Figura 11. Geometría de la sección.....	81
Figura 12. Balance del consumo de agua en el proceso de curtido .....	89

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Balance de materia de las etapas de curtido. ....	117
Anexo B. Segmento a modelar. ....	119
Anexo C. Tipos de interpolación del modelo WASP.....	120
Anexo D. Datos de los vertimientos para la modelación.....	121
Anexo E. Relación de los segmentos contiguos .....	122
Anexo F. Dilución del tributario T-16 .....	124
Anexo G. Relación de la zona de mezcla con el volumen del segmento T-6 .....	126
Anexo H. Cambios en el volumen del segmento T-6 .....	128
Anexo I. Dilución del tributario T-20 .....	130



## 1. INTRODUCCIÓN

La cuenca alta del río Bogotá se ha visto afectada por las descargas provenientes de las curtiembres que se ubican en la ribera del cuerpo de agua, estos vertimientos poseen elevadas concentraciones de sólidos suspendidos, materia orgánica, sulfuros y cromo. Algunos autores mencionan que la curtición del cuero llegó al municipio en 1820 dicha práctica inició con sustancias curtidoras elaboradas a partir de extractos vegetales, posteriormente se implementaron las sales de cromo para lograr mayor efectividad y volumen de producción, desde su implementación hasta la actualidad este metal ha sido pieza fundamental en el proceso de curtición.

La investigación permite conocer cuáles son los factores hídricos que mayor influencia tienen sobre el cromo, y establecer el comportamiento de dicha sustancia en el cuerpo de agua y su relación con el tiempo, para posteriormente poder desarrollar medidas que permitan la mitigación del impacto ambiental que generan las curtiembres sobre el cuerpo de agua.

El proyecto partió de una revisión bibliográfica con el fin de establecer las características predominantes del cuerpo de agua y de la sustancia contaminante objeto de nuestro estudio, una vez definidas estas características se procedió a realizar una selección del software de modelación que se emplearía, después de establecer el modelo a usar se procedió a determinar las variables que este requería, cabe aclarar que la presente investigación no contó con una fase de campo, por lo tanto muchas de las variables hidráulicas y de calidad de agua se establecieron a partir de ecuaciones empíricas, luego de ingresar al software todas las variables necesarias, se realizó la modelación y el análisis de resultados.

El siguiente proyecto de grado se enfocó en el estudio del comportamiento del cromo sobre la cuenca alta del río Bogotá empleando el software de modelación WASP (Water Quality Analysis Simulation) desarrollado por la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El sector de la marroquinería en Colombia tiene una tasa de producción con alto potencial para la comercialización de sus productos a nivel nacional e internacional, por su gran calidad. Se considera que los productos generados por esta industria son competitivos a nivel mundial con un aporte a la economía del país cercano al 0.26 %, teniendo su mayor concentración de manufactura en la ciudad de Bogotá y en el departamento de Cundinamarca, con un número de 350 curtimbres y elaboración de 103.000 cueros que equivalen al 38% del total nacional (Martínez Buitrago & Romero Coca, 2016).

La industria con inicios en los tiempos precolombinos, es una de las actividades más antiguas, teniendo las primeras empresas en los años veinte ubicadas en el departamento de Antioquia, seguido de las curtiembres que se localizaron para los años cincuenta en los municipios de Villapinzón y Chocontá, al norte del departamento de Cundinamarca, región donde en la actualidad se encuentra la mayor producción y número de industrias, con un equivalente al 52.71 % de la totalidad del territorio (Martínez Buitrago & Romero Coca, 2016). La historia refleja una transición en la comercialización de estos productos, con una demanda superior en el exterior y una oferta promedio de ganado vacuno de 3.6 % (aktiva Servicios Financieros, 2013). Aunque se evidencia un periodo con reducción de ingresos para el sector, consecuencia de la importación de productos chinos.

Si bien las curtiembres, son negocios que generan una fuente de ingresos para varias familias y con prestigio para nuestro país, por el sello de calidad “hecho en Colombia”, son muchos los impactos que se evidencian en materia ambiental en el tratamiento y procesamiento del cuero. Las principales problemáticas son: el uso de productos químicos contaminantes,

generación de residuos sólidos tóxicos, emisiones atmosféricas, vertimientos con altas cargas de materia orgánica, excesivo consumo de agua, afluentes con cromo, entre otros.

De acuerdo a diferentes estudios, se estima que, para el procesamiento de una tonelada de piel, se emplean 442 kg de productos químicos, siendo la etapa de mayor consumo la de curtido (42 % del proceso). Seguido por la etapa de ribera. Una generación aproximada de 696 kg de residuos por cada tonelada de piel, tienen una composición química que puede ser variable, aunque con contenidos significativos de cromo, materia orgánica, sulfuros, sólidos suspendidos, grasas y aceites (Mendez Pampin, 2007). Adicional a ello, es un porcentaje mínimo en este sector, las empresas que se encuentran categorizadas como grandes industrias, siendo en su mayoría asociaciones de pequeños fabricantes, quienes no cuentan con los suficientes medios económicos o de asistencia técnica para la implementación de tecnologías limpias.

El panorama anterior, refleja la situación actual del Río Bogotá en su Cuenca Alta, donde existe una alteración en la calidad del recurso hídrico, por la fuerte presión antrópica de la zona, con la suma de las descargas de aguas residuales de los municipios y los vertimientos del mayor número de empresas de curtiembres del país. Es claro que en el recorrido desde el municipio de Villapinzón, hasta el norte de la ciudad de Bogotá, se evidencia un deterioro en la calidad de este importante cuerpo de agua. Iniciando con la reducción del oxígeno disuelto que antes del municipio de Villapinzón debe tener un porcentaje de saturación a temperatura promedio de 57.4 %, con evidente reducción en campaña de monitoreo del año 2014 a 37.9 % en el municipio de Chocontá.

Durante los últimos años, diferentes instituciones desarrollaron estudios sobre la calidad del agua en el Río Bogotá, donde se confirmó el deterioro del recurso a su paso por las curtiembres en la Cuenca Alta. Todos los métodos aplicados para la evaluación y monitoreo de la

contaminación de este cuerpo de agua, se realizaron mediante la cuantificación de sustancias de interés sanitario y cálculo de índices de calidad como el ICACOSU e ICATCA, con las correspondientes mediciones *in situ* y con el uso de técnicas analíticas previamente estandarizadas para el procesamiento de las muestras en el laboratorio. El monitoreo muestra claramente para el seguimiento de parámetros convencionales en el ICATCA 2017, un índice bueno de 0.90, aguas arriba del municipio de Villapinzón y muy regular con valor de 0.37, aguas abajo del municipio de Chocontá (Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá, 2017).

Un complemento al seguimiento del índice de calidad del agua en la Cuenca Alta, comprende algunos estudios de modelación matemática para contaminantes no conservativos, siendo esta una buena herramienta para la comprensión de la dinámica y movilidad de algunas sustancias en el cuerpo de agua. Así como su relación con parámetros hidráulicos característicos, eventos climáticos y capacidad de recuperación.

Muchos de los metales son conservativos, estos no logran descomponerse en su totalidad y los fenómenos naturales como la biodegradación o la fotólisis no son de gran incidencia en este proceso, la ausencia de mecanismos para la degradación de este tipo de contaminantes facilita la modelación de dichas sustancias, características como la absorción con materia orgánica y la adsorción a superficies bien sea por medios químicos o físicos hacen que a los contaminantes conservativos se puedan aplicar los mismos modelos y lineamientos de los contaminantes orgánicos.

La dinámica que manejan estos modelos, parten de que el comportamiento de los metales en el agua se divide en una fracción disuelta y una particulada. Para que las predicciones logren ser más acertadas se debe entender la química de este tipo de sustancias, ya que muchas de ellas

poseen diferentes formas químicas que se comportan de manera diferente en el medio donde se encuentren, para facilitar la comprensión de estos fenómenos se han integrado códigos de diversos modelos que logran un complemento que facilita al modelador entender los cambios tanto de la corriente de agua como del contaminante.

En el caso particular, el interés se dirige a la modelación de la dinámica del cromo en el Río Bogotá. Existen pocos estudios de modelación matemática sobre contaminantes conservativos en Colombia, siendo una de las razones principales para realizar este primer ejercicio. Además de estar en la búsqueda de herramientas que faciliten el conocimiento de la movilidad de estas sustancias en el ambiente y su variación ante los cambios característicos del cuerpo de agua. La idea con ello es el fortalecimiento de las estrategias que se utilizan en la formulación de políticas públicas para el monitoreo, ordenamiento, uso y destinación del recurso. Al igual que la evaluación de diversas alternativas de tratamiento.

Para la problemática de metales pesados en agua, es muy importante estimar las cargas remanentes; ya que estos elementos no se eliminan fácilmente, tienen gran afinidad por el material sólido que se transporta con el agua, son acumulativos, causan efectos adversos a los ecosistemas aledaños y pueden llegar a las plantas de tratamiento de agua potable, como lo es la PTAP Tibitoc, que abastece un porcentaje importante de la población en Bogotá.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo general

Realizar la modelación de cromo en la Cuenca Alta del Río Bogotá, aplicando un modelo preestablecido que describa de manera eficiente las condiciones hídricas y de parámetros de calidad del cuerpo de agua.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Establecer las variables y parámetros de mayor influencia sobre la movilidad del cromo en cuerpos de agua lóticos.
- Elegir un modelo de calidad del agua mediante una revisión bibliográfica teniendo en cuenta antecedentes y características técnicas, para posteriormente conocer la dinámica del cromo en la Cuenca Alta del Río Bogotá.
- Generar algunas propuestas para mejorar la metodología de modelación de contaminantes conservativos en la Cuenca Alta del Río Bogotá.

### 4. MARCO TEÓRICO

#### 4.1. Química del cromo y su toxicidad

El cromo es un elemento natural con número atómico 24 y símbolo “Cr” pertenece al grupo de los metales de transición, ocupa el puesto 17 en la lista de elementos de mayor abundancia en la corteza terrestre se encuentra en rocas, plantas, suelos, animales y en los humos y gases volcánicos. Una de sus propiedades más relevantes son sus diversos estados de oxidación, como son: -2, 0, 2, 3, y 6, los derivados de las valencias -2 y 2 no son de gran importancia, el

estado 0 pertenece al cromo metálico, en cuanto a los estados trivalente y hexavalente, se tienen diferencias en lo que refiere a sus propiedades químicas, tenemos que los derivados del cromo III son más estables dentro de estos podemos encontrar el óxido crómico, siendo uno de los compuestos más estables de este elemento. Por otro lado, tenemos que los derivados del cromo IV son fundamentalmente cromatos y dicromatos altamente reactivos en medios ácidos.

La solubilidad del Cr (III) está sujeta al pH del cuerpo de agua, bajo pH neutro y básico el cromo trivalente se precipitará, y se solubilizará cuando se encuentre bajo condiciones de pH ácidos. Por otro lado, tenemos que las formas de cromo hexavalente como el cromato y el dicromato son altamente solubles bajo cualquier tipo de pH, pero se puede precipitar con cationes divalente (+2). Teniendo en cuenta lo anterior se puede inferir que el cromo bajo estado de oxidación +3 posee menos movilidad debido a su baja solubilidad, en este estado de oxidación el metal forma complejos estables con especies orgánicas e inorgánicas, esta es la razón por la que el Cr +3 no cambia de manera significativa de rango de pH, bajo estas circunstancias el cromo se precipita con facilidad y es adsorbido por partículas en suspensión y sedimentos.

El pH es quizás uno de los factores más relevantes en el comportamiento del cromo en las aguas y posee gran influencia en el estado de oxidación en que se pueda encontrar el metal. El cromo hexavalente cuando este se encuentra en presencia de agentes reductores naturales como el hierro (III), azufre (II), materia orgánica y un medio ácido, se reduce a cromo trivalente, esta reacción tiene lugar de manera inversa cuando el metal se encuentra en aguas con pH elevado; el cromo trivalente se oxida a cromo hexavalente.

El comportamiento del analito que se quiera estudiar es dependiente de los demás componentes del cuerpo de agua, las concentraciones de cromo no serán las mismas a lo largo de un segmento en un cuerpo de agua superficial si este presenta fluctuaciones en su pH, las



concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  o  $\text{Cr}^{+3}$  cambian en medios ácidos, neutros o alcalinos debido a las relaciones expuestas anteriormente del metal con este factor, siendo este un parámetro influyente en la disponibilidad de dicho contaminante en el agua.

## 4.2. Toxicología del cromo

Como ya se ha mencionado, el cromo se encuentra principalmente en dos estados de oxidación, trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) y hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ), los dos pueden llegar a ser tóxicos, a diferencia del  $\text{Cr}^{6+}$ , el cromo en su estado trivalente requiere de altas concentraciones para presentar alteraciones en la salud de la población expuesta, este generalmente está presente en el ser humano como oligoelemento y cumple diversas funciones biológicas asimismo participa en reacciones enzimáticas, tromboplásticas y betagluconidasa, por otro lado en su estado hexavalente es considerado como altamente toxico llegando a producir efectos crónicos irreversibles en la salud, diversas instituciones lo han clasificado como un elemento cancerígeno.

Las principales vías de acceso del cromo a nuestro cuerpo son por ingestión, contacto e inhalación, una vez llega al interior de nuestro cuerpo por medio de la hemoglobina se fija en el hígado, el bazo, el riñón, tejidos blandos y los huesos. Al contacto con la piel el cromo puede llegar a generar úlceras que pueden penetrar en tejidos subcutáneos, los principales problemas de salud por acción del cromo son de origen ocupacional, uno de los casos que se detecto fue la irritación del tracto respiratorio, la aparición de rinitis, bronquitis y asma en los trabajadores que participan en la fabricación de dicromato, ya que estos se encuentran constantemente expuestos a vapores e inhalación del polvo. “No existe un nivel de exposición “seguro” claramente establecido. Sin embargo, la mayoría de los informes ponen de manifiesto una asociación entre la exposición al  $\text{Cr}^{\text{VI}}$  y el cáncer de los órganos respiratorios en exposiciones a niveles en el aire superiores a  $50 \text{ mg Cr}^{\text{VI}}/\text{m}^3 \text{ aire}$ ” (Nordberg, 1998).

### 4.3. Proceso de curtido del cuero y efectos sobre el medio ambiente

El proceso para la producción del cuero está conformado por cinco etapas principales: acopio de piel cruda, fase de limpieza, proceso de curtido y finalmente la etapa de terminado para posteriormente entregar la piel curtida (figura 1). Durante estas etapas de producción se requiere elevado volumen de agua, convirtiéndose en la principal causa de la ubicación selectiva de este tipo de industrias sobre la ribera de la cuenca alta del río Bogotá, dado que convergen diversos factores que facilitan el proceso, como la fácil disponibilidad y acceso al agua, siendo este recurso un pilar fundamental para el desarrollo del proceso de curtición. La clasificación de las curtiembres se realiza teniendo como criterio el número de pieles procesadas por mes; se denomina industria pequeña aquella que procesa hasta 100 pieles/mes, mediana hasta 1500 pieles/mes y grande entre 1500 y 10000 pieles por mes (Corredor, 2006).

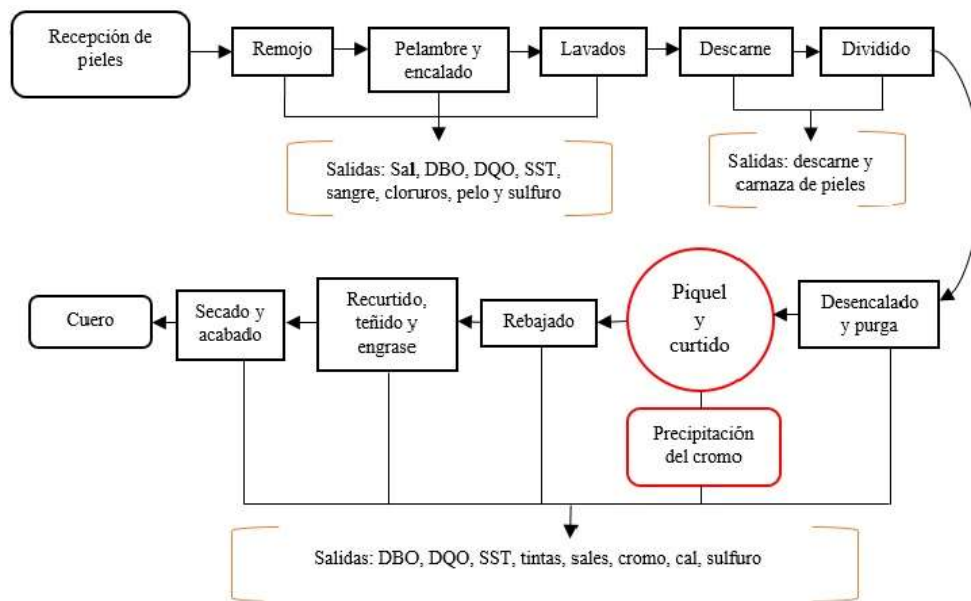


Figura 1. Proceso de curtido.

Elaboración propia a partir de Tobón, C. Metabolismo social para el manejo sostenible de los recursos naturales. El agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2013.

El proceso de producción que se desarrolla dentro de las curtiembres, está conformado por tres fases principales denominadas etapa de ribera, curtido y el ciclo de acabado o terminado, estas etapas a su vez están integradas por procesos unitarios que contribuyen a la carga contaminante de los efluentes procedentes de este tipo de industrias.

#### *a. Fase de ribera*

También conocida como etapa de limpieza, allí se acondicionan las pieles eliminando carne, grasa y pelo, además de esto se garantiza la humedad requerida para el desarrollo de las demás fases de producción, en esta etapa tiene lugar la mayor generación de residuos sólidos, algunos como el pelo y la grasa se pueden someter a procesos de recuperación para obtener nuevos productos. La fase de ribera la conforman las siguientes operaciones:

- *Recepción:*

Durante este procedimiento se descargan y almacenan las pieles tanto frescas como saladas suministradas por los proveedores, estas suelen venir acompañadas de sangre y excesos de sal, además de tratar de retirar la sal sacudiendo el material, en algunas ocasiones se deben retirar las extremidades de los animales. En esta operación se obtienen algunas sales y sólidos como residuos de piel, carne y hueso, generalmente considerados de riesgo biológico ya que se encuentran impregnados de sangre y pueden ser un importante vector para la transmisión de patógenos.

- *Remojo:*

Con esta operación se busca recuperar la humedad que la piel perdió una vez fue retirada del animal con el fin de regresarle su flexibilidad y textura, además de esto se eliminan de manera definitiva partículas que puedan alterar las fases siguientes como la sal, sangre, estiércol y otras

impurezas, para esta etapa generalmente se emplea agua acompañada de tensoactivos y bactericidas que facilitan la penetración y acción de las moléculas de agua, este proceso tarda entre 6 y 12 horas y se desarrolla dentro de un fulón o bombo. En esta fase se inicia el aporte de cargas contaminantes al efluente de la industria con sales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos, alterando parámetros como la  $DBO_5$  y DQO.

○ *Pelambre:*

Esta etapa consiste en retirar en su totalidad los restos de pelo que se encuentren en el material, destruyendo todos los componentes que contengan queratina, además de esto se debe encalar la piel con el fin de prepararla para la fase del curtido, la tecnología con la que se realiza este proceso depende del grado de tecnificación que posea la curtiembre, en algunas se lleva a cabo empleando fulones que usan hidróxido de calcio y sulfuro de sodio en un periodo de 16 a 20 horas después de aplicados y una rotación intermitente del bombo, por otro lado tenemos que en tenerías donde los procesos se desarrollan de manera más rústica las fases de encalado y el pelambre se hacen de forma separada, para el primero se emplean tinajas con cal y en ocasiones con sulfuro de sodio, para el segundo se emplean herramientas manuales como cuchillos durante espacios de 6 a 8 minutos.

Esta es una de las operaciones que más volumen de agua demanda, los efluentes poseen elevadas concentraciones de  $DBO_5$  y DQO, sólidos, grasas, materia orgánica, sulfuros, nitrógeno amoniacal y un pH básico, las cargas contaminantes dependen del proceso de pelambre utilizado bien sea el enzimático, el químico y el mixto, puesto que, cada uno emplea diferentes agentes depilatorios.

○ *Descarnado:*

En esta operación se retiran los restos de musculo, tejido subcutáneo y grasas con el fin de evitar el desarrollo de bacterias, este procedimiento se puede realizar de forma manual o con una maquina llamada descarnador, al finalizar el proceso se obtiene un residuo conocido como el Unche.

- *Dividido:*

Durante esta fase se procede a separar la dermis de la epidermis dejando divididas la capa papilar y reticular para controlar el calibre del cuero de acuerdo a las especificaciones técnicas del producto a obtener (UNAL-CAR, 2009).

- b. Fase de curtido***

Consiste en la transformación de piel en cuero estabilizando las capas de colágeno que lo conforman, haciéndolo resistente a la descomposición física y biológica, las operaciones que integran esta fase son el desencalado, piquelado, escurrido y rebajado.

- *Desencalado:*

Con este proceso se pretende remover la cal y otros productos que puedan ser alcalinos, para ello se emplean ácidos orgánicos e inorgánicos como sales de amonio, dióxido de carbono y bisulfato de sodio, además de neutralizar el pH del material, detiene su hinchamiento y remueve los remanentes de sulfuro, los efluentes líquidos resultantes de esta operación contienen elevadas cargas de DBO, amonio, sulfuros y sodio.

- *Piquelado:*

El objetivo de esta operación es detener cualquier reacción enzimática (hinchamiento) y llevar las pieles a un pH entre un rango de 2.8 y 3.5, generando un medio óptimo para la

curtición, para este proceso se emplean ácidos como el sulfúrico, fórmico o clorhídrico, este procedimiento tarda entre 2 y 4 horas dependiendo del espesor de la piel que se esté tratando, cuando se realiza curtición con tanino esta fase se omite, disminuyendo la concentración de sal que pueda llevar el efluente. Después del remojo esta es la operación que más sales aporta al vertimiento.

### *c. Curtido:*

En esta fase la piel se transforma en cuero. El colágeno, componente principal de la piel cruda reacciona con el agente curtiente generando una estructura estable resistente a la putrefacción y degradación, para este proceso se pueden emplear agentes de tres tipos:

- Sales metálicas (de cromo, aluminio, titanio y zirconio).
- Compuestos polifenólicos (taninos vegetales y sintanos).
- Compuestos orgánicos sintéticos (como compuestos de aldehídos o derivados y polímeros).

En los procesos de curtición que se desarrollan en la zona de estudio, se emplea un agente vegetal como el tanino o uno mineral como el cromo.

#### *o Curtido con tanino*

Este tipo de curtido tiene como resultado un cuero grueso y poco flexible, para la obtención de este se debe agregar agua, bisulfato de sodio, sulfato de amonio y enzimas, algunos vegetales como el castaño, el quebracho y la mimosa poseen elevadas propiedades curtientes, estos se obtienen de cortezas de árboles como el mangle rojo, este proceso tiene una duración entre 23 y 30 días, durante este periodo las pieles se dejan sumergidas en la solución, se debe hacer un volteo diario para lograr que el agente curtiente penetre la piel, durante este lapso de

tiempo se cambian las soluciones de remojo por lo menos tres veces. El efluente líquido de este proceso está compuesto por amoníaco, residuos alcalinos y sustancias que alteran el color del agua.

- *Curtido con cromo*

Cuando se emplea este mineral, el piquelado juega un papel importante ya que se requiere un pH bajo, una vez se tiene la acidez requerida, se procede a agregar sales de cromo hexavalente (Cr VI) con una proporción de 6 % a 8 % en relación al peso de las pieles a curtir, este proceso tarda alrededor de 12 horas, se basa en el intercambio de iones del cromo con grupos libres de carboxilo que se encuentran en el colágeno, al final del proceso el pH ha incrementado en promedio 1.5 unidades pasando de 2.8 a 4.2 aproximadamente, para que esto ocurra es necesario agregar un agente alcalino que neutralice los ácidos empleados en la fase de piquelado. Con este tipo de curtido se tiene como resultado un cuero delgado y flexible, el efluente resultante es ácido y cuenta con una elevada carga de sales de cromo.

- *Ecurrido y rebajado*

En este proceso lo que se pretende es darle el grado óptimo de humedad al cuero y mantener un espesor uniforme según las necesidades del cliente, para esto se emplea una máquina escurridora, cuyas descargas llevan remanentes de las sales de cromo empleadas durante el curtido, el escurrido lo acompaña la fase de rebajado, donde se emplean cuchillas para lograr el calibre que requiere el cuero generando un residuo sólido llamado viruta.

***d. Fase de terminado***

Durante esta etapa se mejora la apariencia física y las características del producto a entregar, las operaciones que se manejan son las siguientes:

- *Recurtido*

En esta fase se vuelven agregar sales de cromo hexavalente (Cr VI), lo que se pretende es mejorar la estructura del producto y hacerlo más resistente al deterioro, este proceso contribuye al incremento de la concentración del cromo en los efluentes procedentes de las tenerías.

- *Teñido y engrase*

Se da el color al cuero mediante la adición de colorantes de diferentes tipos como los hidrosolubles, naturales o sintéticos, con la etapa de engrase el producto adopta una textura suave y se aumenta la resistencia del mismo.

- *Secado*

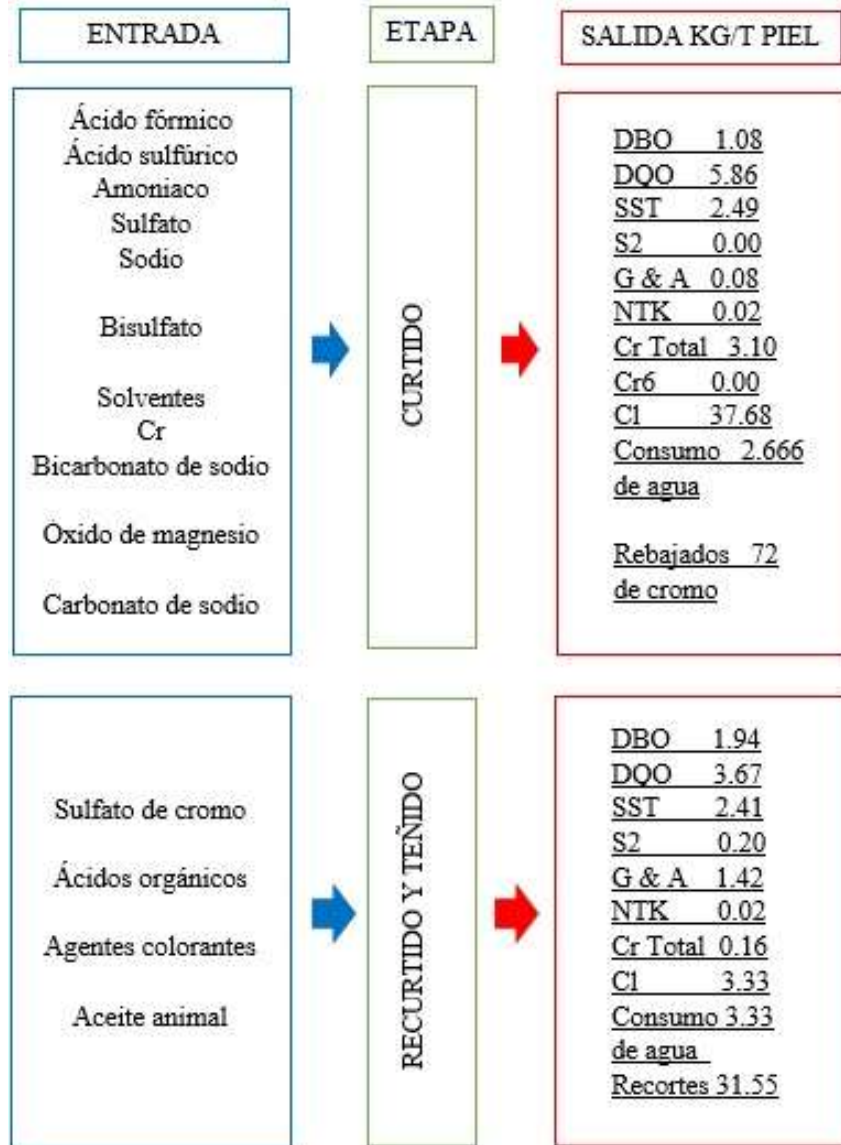
Con esta operación se extrae la humedad del cuero, se puede hacer por medio de ventilación natural, con aire caliente o secado al vacío, una vez culmina esta fase el cuero tendrá una humedad del 16 al 22 % (Rojas, 2010).

- *Acabado*

En este proceso se eliminan los defectos del cuero y se cumplen con especificaciones del cliente, finalmente se determina el área del cuero producido y se comercializa.

En el Anexo 1 se muestra un balance de materia de cada uno de los procesos de curtido y se da una idea clara de la generación de residuos sólidos y líquidos mencionados en la descripción de las etapas.





*Figura 2.* Aditivos y concentraciones de descargas en el proceso de curtido convencional. Elaboración propia a partir de Osorio, L. (2011). Iniciativas Ambientales en la Cuenca Alta del Río Bogotá: Curtiembres de Villapinzón y Chocontá y manejo integral del agua en Tominé. Bogotá: Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia.

#### 4.3.1. Efectos sobre el medio ambiente

Las industrias de las curtiembres demandan un elevado consumo de agua, por consiguiente generan una gran cantidad de efluentes, con elevados contenidos de materia orgánica, sólidos, salinidad, grasas y otros contaminantes específicos como el cromo, sulfuros y

amoníaco, el consumo y descarga del recurso hídrico, depende a su vez de la magnitud de la curtiembre y del volumen de producción. Según el índice de descarga reportado por la U.S. EPA (1980) varía desde 14 hasta 116 L de aguas residuales por kg de materia prima. El cromo posee diversos estados de oxidación siendo los más comunes el cromo trivalente (III) y el cromo hexavalente (VI), estos difieren en el comportamiento que tienen al ponerse en contacto con el ser humano, el cromo trivalente es un oligoelemento necesario para cumplir funciones biológicas, tiene acciones en el metabolismo de la glucosa, el colesterol y los ácidos grasos, por otro lado el cromo hexavalente es tóxico en cualquiera de sus concentraciones y es considerado un elemento cancerígeno. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en el año de 1980 establece que la toxicidad crónica del cromo (III) en aguas naturales con dureza de 100 mg/L es de 0.21 mg/L.

Los residuos procedentes de las curtiembres alteran las características naturales de las aguas, ocasionando efectos adversos a las mismas como la disminución del oxígeno disuelto y el incremento de la salinidad, estos efectos se tornan más riesgosos cuando los efluentes alcanzan aguas subterráneas, la probabilidad que tienen estas para estar en contacto con el cromo son reducidas, debido a la baja movilidad que este posee, el contaminante puede llegar a los mantos acuíferos bajo determinadas condiciones que aumentan su movilidad, los bajos valores de pH contribuyen a este factor, incluso en suelos donde hay presencia de óxido de manganeso ( $MnO_2$ ), este cataliza la oxidación del cromo trivalente a cromo hexavalente siendo este más tóxico y con mayor movilidad en la corteza terrestre. Las concentraciones de cromo en cuerpos de agua superficial pueden aumentar y variar en su comportamiento según las características físicas del sistema hídrico, en cuerpos que reciben descargas de cromo y poseen baja capacidad de dilución este se puede tornar tóxico, lo mismo sucede cuando los vertimientos terminan en ríos grandes,

ya que estos absorben y acumulan el contaminante en sus sedimentos. Las concentraciones también pueden ser alteradas por otros agentes presentes en el agua, en el caso del amonio, la concentración de cromo puede incrementar hasta tres veces en relación con su valor inicial.

Debido a la baja solubilidad el  $\text{Cr}^{+3}$  este no afecta bacterias, algas o peces, solo el género *Daphnia* muestra una marcada sensibilidad a las concentraciones de 6 a 9 mg/L. La toxicidad de este elemento depende de la valencia del mismo, la dosis letal medía para compuestos trivalentes se ha reportado entre rangos de 140-522 mg/Kg y para compuestos hexavalentes entre 13-795 mg de  $\text{Cr}^{+6}$ /Kg (Osorio, 2011).

#### **4.4. Producción más limpia en la industria del curtido de cuero en Colombia**

Según Tobón (2013) la primera curtiembre que se estableció en el municipio de Villapinzón data del año 1820, este sector productivo presentó un crecimiento continuo registrando un incremento en el número de establecimientos hasta el 2001, a partir de este año se mostró un decrecimiento constante en el número de curtiembres, dicha disminución se debe a los cierres que realizó la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca con el fin de ejercer un control sobre los efluentes que se vertían al Río Bogotá. Desde sus inicios las curtiembres se ubicaron en la ribera del río, ya que estar cerca de un cuerpo de agua les facilita la captación del recurso hídrico necesario para desarrollar los procesos de producción del cuero y permite la descarga directa de los efluentes procedentes de dicho proceso.

En sus inicios, los efluentes provenientes de las curtiembres no poseían cargas contaminantes tan elevadas, esto se debe a que en sus comienzos las tenerías empleaban agentes curtiembres vegetales, el más común se extraía del árbol de encenillo, este extracto predominó en

la industria hasta las décadas del 60 y 70, a partir de los años 80 la industria implemento la curtición con sulfatos de cromo (Tobón, 2013).

En el año 2006 el sector de curtiembres de Villapinzón junto con la Universidad Nacional de Colombia iniciaron la implementación de procesos de producción más limpia con el fin de optimizar dicho procedimiento y poder mejorar la calidad de los efluentes y lograr estar dentro de los límites máximos permitidos en la normatividad nacional, la eficiencia de estas prácticas se evaluó según criterios como el consumo de agua, insumos químicos y numero de pieles procesadas.

Las prácticas de producción más limpia se centraron en la optimización de los procesos de precurtido, teñido, engrase, piquelado y curtido. Debido a la carga contaminante que aportan al efluente compuesto principalmente por sales, solidos, materia orgánica, sulfuros de cromo y cal, las medidas implementadas consistieron en el tratamiento de estos efluentes para posteriormente implementar un sistema de recirculación que minimizara el consumo de agua, en cuanto al cromo, este se pretendió remover sometiendo el efluente a un proceso de precipitación con el fin de retirar del fluido un gran porcentaje del mineral en forma sólida e integrarlo nuevamente al proceso de producción.

Las alternativas para lograr una producción más limpia propuestas por la UNAL tuvieron en cuenta factores como el económico, social, técnico y tecnológico, los criterios que sirvieron como filtro de selección para elegir las alternativas se basaron en el compromiso del empresario, el costo de la implementación y el acceso a la tecnología, las técnicas con mayor viabilidad obtenidas a partir del proceso mencionado anteriormente son: remojo con productos biodegradables, pelambre ecológico con inmunización de pelo, recirculación de baños de pelambre, desencalado con productos exentos de nitrógeno y alto agotamiento de cromo (Osorio,

2011). Después de la implementación de estas alternativas se realizó un análisis fisicoquímico a 3 curtiembres y se encontraron los siguientes porcentajes de remoción:

Tabla 1.  
*Disminución de la carga contaminante.*

<b>Fase</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Reducción (%)</b>
Remojo	DBO <sub>5</sub>	8-84
	DBO <sub>5</sub>	33-77
	SST	79-98
Pelambre	Sulfuros	72-87
	Consumo de sulfuro de sodio	10-57
	Consumo de cal	11-53
Desencalado	NKT	27-99
	Sulfato de amonio	11
	Cromo	52-94
Curtido	Consumo de sulfato de cromo.	1-32

Nota de tabla. Elaboración propia

En los establecimientos donde se realiza recirculación de las aguas se presenta una disminución en el consumo del recurso:

Tabla 2.  
*Disminución en el consumo de agua*

<b>Operación</b>	<b>Reducción (%)</b>
Remojo	19
Pelambre	42
Desencalado	17
Curtido	68

Nota de tabla. Recuperado de Osorio, L. (2011). *Iniciativas Ambientales en la Cuenca Alta del Río Bogotá: Curtiembres de Villapinzón y Chocontá y manejo integral del agua en Tominé*. Bogotá: Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia.

#### **4.4.1. Alto agotamiento de cromo**

El objetivo de esta práctica es incrementar el porcentaje de cromo fijado en el cuero a procesar, disminuyendo el metal residual en el efluente de la curtiembre. El procedimiento consiste en someter la piel a un baño con baja concentración de sulfato de cromo, un 40% en relación al peso total de la piel, posteriormente se debe incrementar la temperatura a unos 40°C, durante el proceso se deben agregar elementos que incrementen la reactividad del colágeno, esta operación se puede complementar con la recirculación de baños de cromo.

Durante todo el proceso de agotamiento de cromo se debe mantener un pH básico entre 3.8 y 4.2, esta operación se debe desarrollar en un periodo de tiempo de 8 a 12 horas, este periodo de tiempo es óptimo para lograr una mayor fijación del cromo, en los casos donde se realice recirculación del efluente se debe hacer un estudio específico que determine el número de ciclos que se pueden realizar.

#### **4.4.2. Tratamiento del efluente**

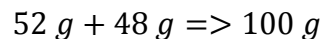
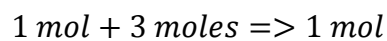
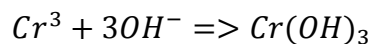
Para mitigar los impactos ambientales generados por las curtiembres se debe implementar junto con las prácticas de producción más limpia un sistema de tratamiento de los efluentes al final del proceso, ya que las PML no reducen el 100% del impacto ambiental generado (Osorio, 2011).

El tratamiento de las aguas provenientes de curtiembres inicia con una segregación de los efluentes, separando los vertimientos ácidos resultado de procesos como el piquelado, curtido, recurtido y teñido, de los vertimientos básicos provenientes de los procesos de remojo, pelambre, encalado y desencalado. Con la separación de efluentes se evita la formación del ácido sulfúrico

por disminución del pH, y se facilita la remoción de residuos sólidos aprovechables que tengan mayor pureza (Osorio, 2011).

Las aguas básicas se tratan adicionando Sulfato de Aluminio o Hidroxicloruro de Aluminio, posterior a esto se debe someter el efluente a un proceso de aireación para oxidar el sulfuro presente en el fluido la relación de estos dos factores es de 2 gramos de O<sub>2</sub> por cada gramo de sulfuro presente en el vertimiento.

Para precipitar el cromo disuelto en las aguas acidas se emplea hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) y óxido de magnesio (MgO), la adición de estos reactivos se realiza haciendo una dilución de los mismo en agua y agregándolos de forma lenta al fluido a tratar, verificando que el pH alcance un rango entre 8.4 y 9.0. Cuando se emplea MgO se debe acompañar con un polímero para finalmente someterlo a una fase de agitación y reposo. El hidroxilo presente en los precipitantes reacciona de la siguiente manera con el cloro presente en las aguas acidas.



#### **4.5. Marco legal**

La legislación colombiana desde el año de 1974 inicio la gestión para la conservación de recursos naturales con el Decreto 2811, posteriormente se fue implementando normatividad relacionada con la caracterización de los cuerpos de agua para finalmente establecer lineamientos en cuanto al uso del recurso hídrico y la disposición de vertimientos. En el año 2010 se crea el Decreto 3930, con este se busca determinar el uso de agua a partir de estudios que cuenten con el

suficiente rigor técnico, en el Capítulo 3 de dicho decreto, se hace mención de los factores a tener en cuenta para lograr generar un plan de ordenamiento del recurso hídrico, dentro de estos lineamientos se habla de la modelación de los cuerpos de agua como herramienta primordial para conocer la capacidad de asimilación y de dilución de dichos cuerpos receptores, para posteriormente identificar los usos potenciales que se le puedan dar al recurso. Los parámetros mínimos a modelar según la normatividad colombiana son: DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos suspendidos, pH, temperatura, oxígeno disuelto, caudal, datos hidrobiológicos y coliformes.

Los usos del recurso hídrico comprenden las descargas bien sea de aguas residuales domésticas (ARD) o aguas residuales no domésticas o industrias (ARnD), la Resolución 0631 expedida el 17 de marzo de 2015 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y valores máximos permisibles que deben tener los vertimientos puntuales que se realicen a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Durante la estructuración de dicha norma se enfocaron principalmente en las concentraciones que presentan los vertimientos, sin necesidad de ligar estos valores a la producción del sector que se esté caracterizando, para esto se procedió a fijar los límites máximos en mg/L y no como se venía haciendo en Kg/día, esto logro hacer más eficiente la normatividad en cuanto al aseguramiento de la calidad del agua, otra medida que garantiza una mayor eficiencia de la resolución expedida en relación con la normatividad anterior, es que para el cumplimiento de la misma, no se evaluara el porcentaje de remoción en los efluentes, para esto se tendrán en cuenta las concentraciones finales del vertimiento, de esta forma se realizara un control más riguroso a los efluentes y no a los sistemas de tratamiento previos.

Para las curtiembres que realicen captación y vertimiento en el mismo cuerpo de agua se procederá hacer balances de materia o de masa y la caracterización del agua de la captación y la



del vertimiento correspondiente, esto con el fin de hacer una sustracción del valor de las cargas aportadas durante el uso del agua captada, con el cálculo del valor de la concentración obtenido se evaluará el cumplimiento de la norma. La Resolución 0631 de 2015 especifica en el Artículo 13 los límites máximos permisibles en los efluentes procedentes de las curtiembres, se tiene que para el cromo la norma establece una concentración máxima de 1.50 mg/L, este metal además de presentar una de las sustancias más nocivas empleadas durante el proceso de curtición, en el Artículo 20 del Decreto 1594 de 1984 es considerado una sustancia de interés sanitario, también se menciona que el pH del vertimiento debe estar en un rango de 6.00 a 9.00 unidades, en cuanto a otros parámetros descargados durante el proceso de producción como los sulfuros, DBO y DQO los límites máximos permisibles son 3.00 mg/L, 1200.00 mg/L y 600.00 mg/L respectivamente.

Las curtiembres ubicadas en el municipio de Villapinzón vierten sus aguas de manera fluctuante debido a que el proceso productivo no es continuo, las descargas se realizan una vez se culmina una fase dentro del proceso, cada una de estas etapas aportan diferentes elementos que determinan la calidad de agua del efluente. Las concentraciones de cromo en el agua provienen de las etapas de curtido y recurtido.

#### **4.6. Modelación de contaminantes conservativos en cuerpos de agua loticos**

El agua es un recurso vital para el desarrollo de la vida, es por eso que en la actualidad el hombre se ha encargado de estudiar de manera específica los comportamientos que esta tiene, además de esto se han implementado diversas normas para la regulación de la calidad de la misma, en respuesta a ello se plantean diferentes prácticas como las campañas de muestreo, que permiten conocer la concentración de los diferentes componentes del recurso, debido a que las condiciones del agua fluctúan de manera permanente se ha concluido que en muchos casos dichas

campañas no son suficientes para conocer la dinámica de este recurso, como solución a esto se recurre a la aplicación de modelos matemáticos siendo estas herramientas útiles que permiten conocer el comportamiento de un cuerpo de agua de manera adecuada, además de esto permiten realizar predicciones y plantear escenarios futuros ideales para la gestión del recurso.

Las ecuaciones empleadas en los modelos matemáticos comúnmente son de tipo no lineal, las expresiones matemáticas que se emplean con mayor frecuencia son las ecuaciones de diferencias parciales basadas en el principio de conservación de masa, las condiciones heterogéneas que componen los sistemas hídricos son la principal razón para emplear métodos numéricos en lugar de soluciones analíticas, habitualmente se emplea el método de solución de diferencias parciales para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan los modelos.

#### **4.6.1. Antecedentes de la modelación en el mundo**

El inicio de los modelos matemáticos a nivel internacional tiene su origen con Streeter y Phelps en 1925 con “El estudio de la polución y purificación natural del río Ohio”, por primera vez se estudiaban las concentraciones de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua empleando modelos matemáticos, este aporte se considera de gran relevancia debido a la inferencia del oxígeno sobre la calidad del agua. Las ecuaciones de gobierno propuestas por Streeter y Phelps suponen un estado estacionario del modelo (Rodríguez, 1983), en 1964 Dobbins planteó una representación más realista del modelo empleando ecuaciones diferenciales de segundo orden, permitiendo integrar nuevos parámetros al modelo incluyendo los efectos de dispersión longitudinal que se daban en los cuerpos de agua, esta modificación permitió la aplicación del modelo en ríos de gran tamaño con diversos tramos (Rodríguez, 1983).

Rodríguez, M. menciona que en 1968 nuevamente fue Dobbins el encargado de modificar los modelos que hasta el momento se encontraban, en esta ocasión planteo una solución numérica a las ecuaciones de gobierno del modelo con el fin de abordar las condiciones dinámicas del río dejando a un lado las soluciones analíticas que, aunque más precisas, requieren condiciones constantes y formulaciones ideales para su correcto desarrollo, esta nueva invención fueron las bases fundamentales para la creación de los modelos actuales.

Los modelos numéricos de simulación de calidad del agua también se han empleado para proponer sistemas de redes de monitoreo en 1997 Danniso y Larsen emplearon el modelo MIKE 11 en un tramo del río Mollea en Dinamarca (Carvajal, Moreno, & Toro, 2008), durante el desarrollo del trabajo se incluyeron diferentes condiciones hidrológicas y de descargas con el fin de analizar las condiciones actuales y futuras del cuerpo de agua.

En la actualidad se cuenta con modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales, algunos requieren licencias comerciales en Europa y Norte América estos modelos tienen una mayor acogida debido a que cuentan con cierto grado de respaldo por el fabricante además poseen verificaciones y constantes actualizaciones que les permite corregir los errores del software, otro aspecto importante son las capacitaciones que brindan los desarrolladores de los software al personal que adquiere los modelos dotándolos de información detallada y parametros técnicos muy completos. A continuación, se enuncian algunos de los modelos con licencia comercial de mayor demanda.

- MIKE del instituto Hidráulico Danés.
- EFDC EXPLORER del Virginia Institute of Marine Science y Environmental Protection Agency de los Estados Unidos.

- DELFT 3D del Instituto Independiente DELTARES de Holanda.
- RMA-4 desarrollado por el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, King, Water Resources Engineers, Corps of Engineers en 1973.
- GEMMS (Generalized Environmental Modelling System for Surface waters) perteneciente a The Surface water Modeling Group or ERM Inc.
- CWR –ELCOM desarrollado por la Universidad de Wester, Australia.
- UNTRIM desarrollado por la Universidad de Trento, Italia.

Por otro lado, tenemos los modelos de dominio público, a diferencia de los software que requieren licencia, las ayudas que se tienen son muy limitadas, muchas de las modificaciones que tienen lugar en las actualizaciones de estos modelos son producto de la aplicación de los mismos en proyectos de investigación, algunos de estos software son:

- FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) del laboratorio Marine Ecosystem Dynamics Modeling.
- EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) de Ecosystems Research de Atenas.
- ROMS (Regional Ocean Model System) desarrollado por Ocean Modeling Group.
- MOHID (Modelo Hidrodinámico) desarrollado por MARETEC

#### 4.6.2. Modelación en Colombia

La modelación en nuestro territorio en especial la relacionada con el río Bogotá, nace con la creación de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y su interés por monitorear a calidad de agua de los recursos hídricos que se encuentran en su jurisdicción, los modelos matemáticos se convirtieron en una herramienta ideal para simular y predecir las condiciones de los cuerpos de agua.

En 1985 se estableció un contrato entre la corporación y la empresa Ingeseries Ltda, para desarrollar estudios en los ríos Bogotá, Suarez y Ubaté el objetivo de este contrato era contar con una base confiable de datos de caudal y calidad de agua para correr el modelo CODOS (*Convective and dispersive Oxygen Transport Simulation*) con el fin de simular concentraciones de oxígeno disuelto y DBO. Posterior a esto entre los años 1995 y 1996 la firma Cuervo Muriel Ingenieros Ltda adelanto programas de aforo y muestreo sobre el río Bogotá con el fin de contribuir a la base de datos del modelo CODOS, los parámetros muestreados fueron establecidos a partir de la influencia que estos tenían sobre la descomposición de la materia orgánica en el cuerpo de agua y el nivel de oxígeno disuelto, a partir de esto se presentaron las bases para emplear el modelo QUAL2E, adicional a esto se evaluaron otros modelos como el SIMOX, DOSAG, WASP-4 y CODOS-3. Finalmente se optó por el modelo QUAL2E siendo este el más apropiado para estudiar las variables relacionadas con oxígeno.

En 1999 la Universidad de Los Andes en conjunto con el DAMA realizaron una modelación de las cuencas media y baja del Río Bogotá empleando el software QUAL2E, los aspectos que se tuvieron en cuenta en las dos cuencas fueron las descargas al río, procesos que tienen origen dentro de este, condiciones hidrológicas y cargas orgánicas, finalmente se obtuvo

un diagnóstico de las medidas de saneamiento que se debían implementar para lograr la recuperación del cuerpo de agua en la sabana de Bogotá.

Uno de los modelos más usados en la actualidad es el QUAL2K, en el año 2001 la Universidad de Los Andes desarrollo junto con la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) empleo este modelo para ejecutar el proyecto denominado Modelación de Calidad del Río Bogotá, durante este proyecto se pretendía realizar mediciones en campo con el fin de lograr calibrar y verificar un modelo de calidad de agua, en la actualidad es este modelo el más empleado por las instituciones ambientales del país aunque se debe aclarar que el tema de la modelación hídrica no ha tomado la relevancia necesaria en la normatividad ambiental colombiana.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Caracterización de la zona de estudio

La Cuenca alta del Río Bogotá, se ubica en el sector nororiental del departamento de Cundinamarca, la conforman los municipios de Suesca, Lenguaque, Machetá, Villapinzón y el Chocontá. Los municipios que mayor área territorial ocupan dentro de la cuenca son Villapinzón y Chocontá con un 46,3 % y 49,9 % respectivamente siendo estos los dos centros urbanos más importantes con una carga poblacional de 35000 habitantes de los cuales 7500 se asientan en sectores urbanos y 27500 en zonas rurales. Por medio de estudios realizados durante la Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca río Alto Bogotá – 2120-19 se declaró el nacimiento del Río Bogotá como zona de reserva forestal, con una extensión de 1128 ha, la cabecera se encuentra sobre los 3450 msnm en el páramo de Guacheneque en el municipio de Villapinzón y su desembocadura sobre los 2600 msnm en el río Sisga, es de tipo alargado presenta un drenaje superficial rápido de tipo sinuoso, tiene como tributarios importantes, a lo largo de su cauce de 39,9 Km de longitud, el río Tejar las quebradas Piedra Gorda, Guanguito, Hato Frío y El Ratón (Consortio Ecoforest Ltda.- Planeación Ecológica Ltda., 2006).

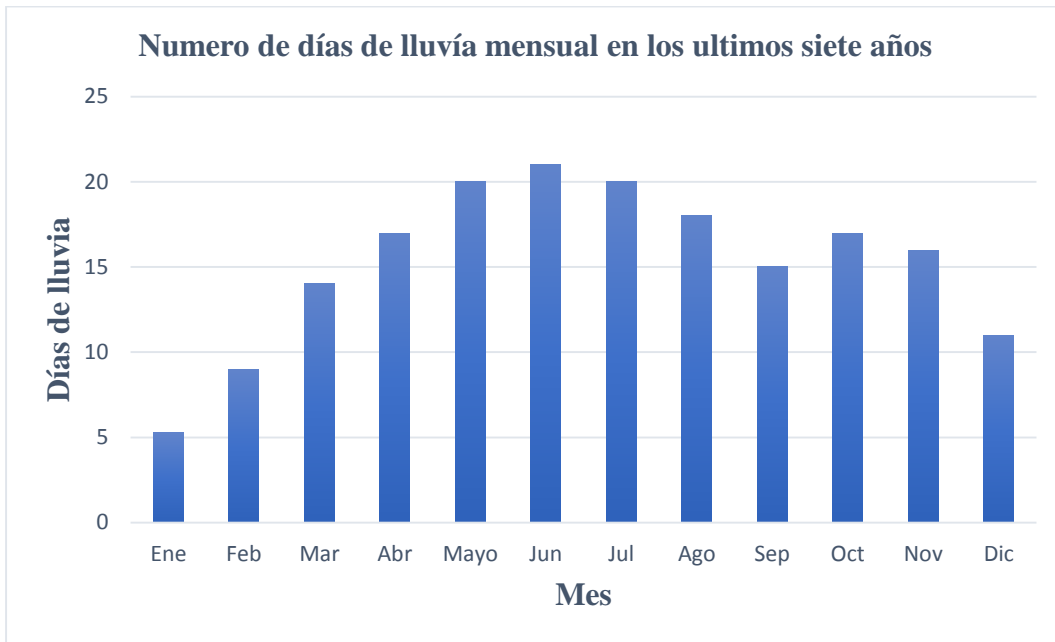
El 67 % del área total de la zona se caracteriza por presentar relieve fuertemente ondulado y quebrado, 14 % de la cuenca cuenta con formaciones suaves con pendiente menor al 7 %, que se extienden principalmente en el municipio de Chocontá, paralelo a la dirección de drenaje del río se puede encontrar relieve inclinado ocupando el 17,3 % del área, el restante se clasifica como plano, plano cóncavo y ligeramente plano.

### 5.1.1. Clima de la cuenca

Según el Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá, Subcuenca río Bogotá – 2120-19, realizado por el Consorcio Ecoforest Ltda - Ecológica Ltda, la cuenca alta del río Bogotá se ubica en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), los sectores que se encuentran en esta zona comúnmente presentan un régimen de lluvias bimodal, para el caso de la cuenca alta del Río Bogotá su margen izquierdo se ha visto alterado por los vientos húmedos provenientes de los Llanos y la Amazonia que llegan al núcleo montañoso que constituye gran parte de la cuenca, haciendo que se presente un régimen pluviométrico monomodal, registrando un periodo húmedo entre abril y octubre.

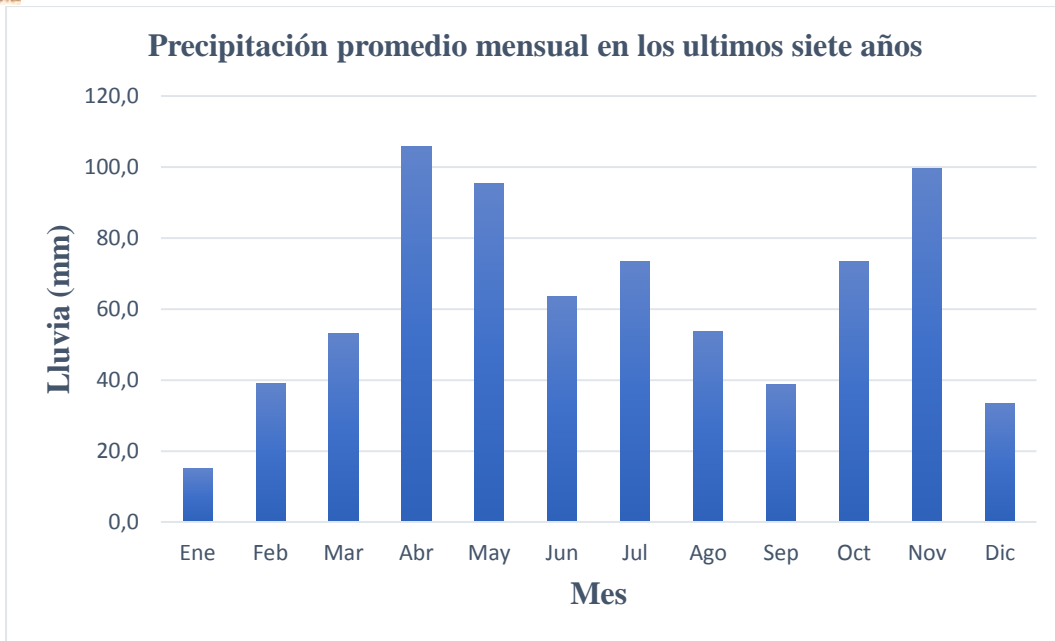
La precipitación promedio de la zona es de 850 mm por año, se identifica el mes de julio como el de mayor lluvia presentando 160 mm y enero como el más seco con una precipitación de 18 mm. La humedad relativa mensual presenta un comportamiento similar al de la precipitación siguiendo un régimen monomodal, los valores más altos se encuentran entre abril y septiembre, siendo julio el mes más húmedo con un registro de 91%, enero, febrero y marzo son los meses con menor humedad relativa, el valor promedio es de 86,6 %, el máximo de 90,6 % y el mínimo de 80,8% (Consorcio Ecoforest Ltda.- Planeación Ecológica Ltda., 2006). El régimen de lluvias de la cuenca según los datos registrados en la estación Villapinzón (COD: 2120043) suministrados por la CAR son los siguientes:





*Figura 3.* Número de días de lluvia mensual en los últimos siete años  
Elaboración propia a partir de los registros de la estación 2120043 de la CAR

En la gráfica anterior se puede observar el promedio del número de días de lluvia mensuales durante los últimos siete años teniendo como fecha corte el año 2016, podemos ver que se presenta un incremento a partir del mes de abril alcanzando su pico más alto en junio y presenta un decrecimiento en el mes de agosto, partiendo de esto se puede inferir que durante este periodo es más acentuado el invierno, en los datos registrados por la estación se observa el régimen monomodal que se ha venido estableciendo en la zona.



*Figura 4.* Régimen de lluvias mensual en la cuenca  
 Elaboración propia a partir de los registros de la estación 2120043 de la CAR

A pesar de que las lluvias en la cuenca alta del río Bogotá son constantes, las precipitaciones más elevadas tienen lugar en los meses de abril, mayo y junio siendo estos periodos los de mayor recarga para los acuíferos y posteriormente para la cuenca, ya que el relieve de la zona permite el afloramiento de manantiales a los cuerpos de agua superficiales especialmente los que se encuentran en las zonas de mayor altura, en el sistema hidrogeológico de la sabana de Bogotá se pueden encontrar tres grupos: a. Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular, b. Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas, c. Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea, la conductividad hidráulica de estos acuíferos está sujeta a la composición de los mismos, la recarga es dependiente principalmente de las lluvias y en menor grado a cuerpos de agua superficial y otros acuíferos ubicados en zonas más altas.

En cuanto a la temperatura se registra un valor promedio anual de 12,2 °C, la variación a lo largo del año no supera los 3 °C, los meses con menor registro son julio y agosto con una temperatura de 11,3 °C, por otra parte, encontramos que los meses con mayor temperatura son abril y noviembre con una temperatura de 12,38 y 12,6 grados centígrados respectivamente, para el gradiente de temperatura se estableció que esta varía 0,6°C por cada 100 metros de altura.

### **5.1.2. Hidrografía de la cuenca**

La cuenca alta comprende desde el nacimiento del río Bogotá en el páramo de Guacheneque (Alto de la calavera) hasta la zona norte de la ciudad de Bogotá, el sistema hídrico está compuesto por diferentes cuerpos de agua naturales como ríos, lagunas, quebradas, humedales y algunas modificaciones encargadas de regular el cuerpo de agua con el fin de cumplir con el abastecimiento de la población, la prevención de desastres y la generación de energía, el sistema de regulación está compuesto por nueve embalses, tiene una capacidad de almacenamiento de 1200 millones de m<sup>3</sup> de agua aprovechable y un distrito de riego. El área total de la cuenca es de 276.2 Km<sup>2</sup>, sus principales tributarios son el río Tejar, las quebradas Piedra Gorda, Guanguito, Hato Frío, La Zorrera, Sonsa, Las Arenas, San Pedro, Casablanca, Saucito, Quinchía y El Ratón, los cuerpos lénticos de la zona son los humedales pertenecientes a la laguna del Valle, El Pozo de La Nutria, el Pozo del Oso y los nacederos aledaños a la laguna El Valle (Consorcio Ecoforest Ltda.- Planeación Ecológica Ltda., 2006).

La oferta hídrica de la cuenca se determinó tomando como periodo seco, el promedio de caudales que se encuentran por debajo de la media anual y como periodo húmedo el promedio que se encuentra por encima de la media anual, en el Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá Subcuenca Río Alto Bogotá realizado por el Consorcio Ecoforest Ltda - Ecológica Ltda se tomó la estación Saucio- Pte. Baraya, se encontró que para el

periodo seco existe una oferta de 0,94 m<sup>3</sup>/s y para el húmedo de 3,74 m<sup>3</sup>/s. Para el año 2006 se tiene que la demanda hídrica parte de cuatro usos principales que son el doméstico, agropecuario, industrial y ecológico.

Tabla 3.  
*Usos del agua.*

Uso	Demanda m <sup>3</sup>
Domestico	0,045
Agrícola (agua de riego)	1,66
Industrial	0,002
Caudal ecológico	0,04

Nota de tabla. Elaboración propia a partir de Consorcio Ecoforest Ltda.- Planeación Ecológica Ltda. (2006). Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca río Alto Bogotá - 2120-19. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

En cuanto al balance oferta y demanda de la cuenca se encontró un déficit en los meses secos.

Tabla 4.  
*Balance hídrico*

Cuenca	Agropecuario	Uso [m <sup>3</sup> /s]			Oferta [m <sup>3</sup> /s]		Balance [m <sup>3</sup> /s]	
		Industrial	Doméstica	Q. Ecológico	Periodo seco	Periodo húmedo	Periodo seco	Periodo húmedo
Río Alto Bogotá	1,662	0,002	0,045	1,75	0,94	3,74	-0,81	1,99

Nota de tabla. Elaboración propia a partir de Consorcio Ecoforest Ltda.- Planeación Ecológica Ltda. (2006). Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca río Alto Bogotá - 2120-19. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

En la cuenca alta del río Bogotá, se realiza captación tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas, a pesar de que el sector doméstico no es el que mayor demanda tiene, las

concesiones empleadas para acueductos veredales y municipales predominan en los registros de la CAR hasta el año 2006, estas demandan un volumen de 48,32 l/s, el segundo lugar tenemos las concesiones para uso agropecuario con un valor de 17,59 l/s, seguidas por las de uso industrial con un volumen de 1,79 l/s.

Los caudales que se presenten en la cuenca alta están ligados a las condiciones climáticas del lugar especialmente al régimen de precipitaciones que se presente, las lluvias que se generen dependen del relieve del lugar, las montañas forman barreras que obstaculizan las masas de aire cargadas de humedad lo que obliga al aire subir por las laderas mientras este se enfría, la disminución de la temperatura durante este ascenso junto con el aumento de la humedad de estas masas de aire genera las precipitaciones en estas áreas montañosas, recargando ríos y acuíferos, según los datos registrados en la estación Villapinzón perteneciente a la CAR en los últimos siete años los caudales más altos se han registrado entre los meses de abril y noviembre.

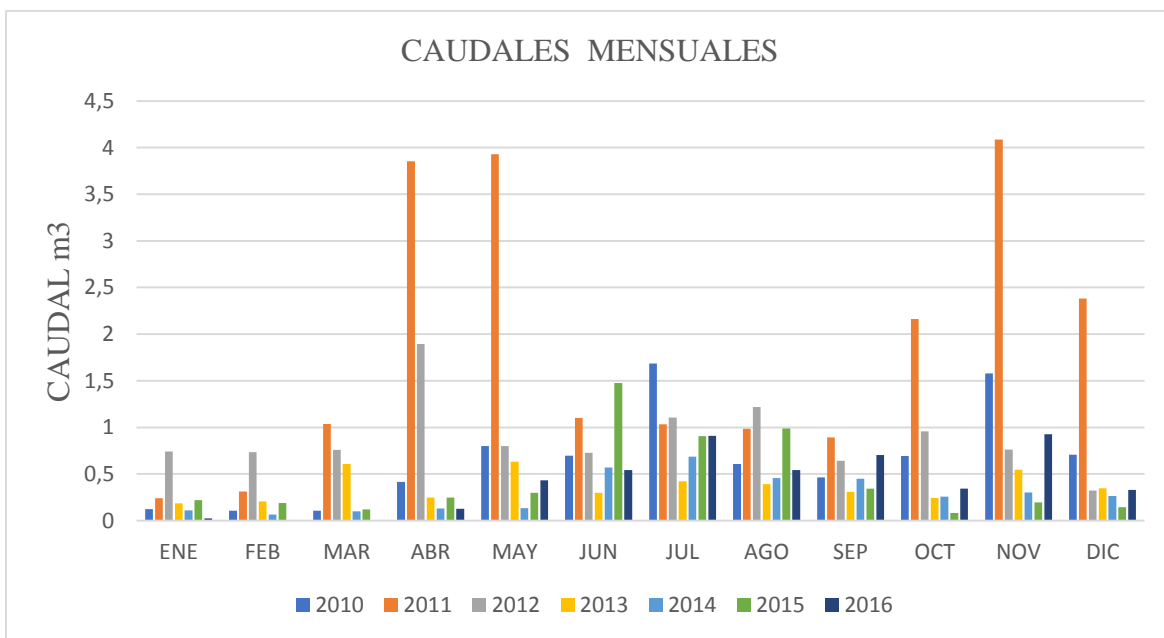


Figura 5. Caudales mensuales en los últimos siete años  
 Elaboración propia a partir de los registros de la estación 2120815 de la CAR.

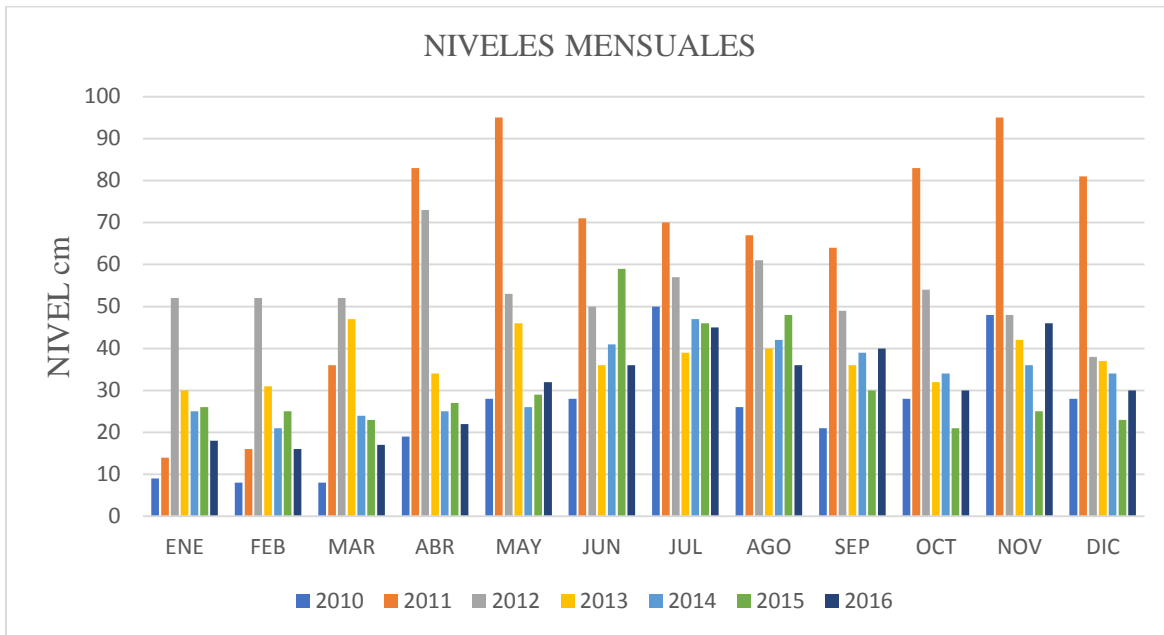


Figura 6. Niveles mensuales en los últimos siete años  
 Elaboración propia a partir de los registros de la estación 2120815 de la CAR.

En las gráficas anteriores podemos observar que en el 2011 y 2012 el río presentó las aguas más altas y con mayor caudal de los últimos siete años además de esto podemos ver cómo enero y febrero son las temporadas más secas teniendo en cuenta los datos históricos del régimen de lluvias y niveles del cuerpo de agua. En los periodos de estiaje de los ríos sucede el mayor impacto ambiental de los vertimientos realizados, el coeficiente de dispersión disminuye al igual que lo hace la capacidad de asimilación de contaminantes del sistema hídrico ayudando a disminuir la calidad del agua ocasionando daños ecosistémicos y problemas de salud pública.

### 5.1.3. Vegetación de la cuenca

Como producto de las variaciones de altura surgen espacios con diferentes condiciones climáticas que presentan condiciones óptimas para el crecimiento de distintas especies vegetales, en la cuenca alta del río Bogotá podemos encontrar dos pisos climáticos: Paramuno y Andino, el

primero se encuentra entre 3.200 y 3.600 msnm se caracteriza por presentar abundante vegetación de poca altura y de diámetro irregular, el piso Andino se ubica entre los 2.200 y los 3.200 msnm, dentro de este podemos encontrar biomas como el bosque alto andino y el bosque andino.

- Bosque alto andino: Se encuentra entre los 2.800 y 3.200 msnm, presenta arboles de altura entre los 3 y 10 metros, se pueden encontrar especies robledales, arbustos, bromelias, orquídeas y helechos.
- Bosque andino: Se ubican por encima de los 2.200 msnm hasta máximo 2.800 msnm dentro de este bioma se pueden encontrar arboles de 20 a 30 metros de altura, también se puede encontrar una gran abundancia de epifitas (plantas que viven sobre otras plantas).

La cuenca alta está cubierta en gran porcentaje por bosques andinos, este ecosistema ha sido intervenido por la población para dar paso a sabanas de pastos y cultivos, esta cobertura se localiza en la Reserva Forestal nacimiento río Tejar a 3000 msnm en las márgenes de drenajes con elevadas pendientes, la abundancia relativa indica que las especies que sobresalen son *Ocotea calophylla* con el 26.6% y *Viburnum tryphyllum* con el 20%, seguidas por *Ocotea sericea* con el 16.67% (Consorcio Ecoforest Ltda.- Planeación Ecológica Ltda., 2006). Los ecosistemas juegan un papel importante en la conservación del recurso hídrico y de la calidad de vida de la población, en ellos nacen cuerpos de agua como ríos y quebradas que suministran el recurso a las comunidades aledañas de la zona. La cobertura boscosa en la cuenca alta ocupa alrededor del 6% del área.

La vegetación juega un papel determinante en la regulación de escorrentía, protege el suelo y retiene la humedad, cuando la vegetación circundante de la cuenca ha sido removida o alterada se produce el fenómeno de escorrentía superficial con más facilidad, ya que no necesita

que el suelo este saturado de agua para que el fluido escurra por la superficie y llegue a quebradas y arroyos.

## **5.2. Calidad de Agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá**

Partiendo de un análisis ligero de los indicadores de calidad del agua del río se puede inferir que el agua en su nacimiento presenta un buen estado, este va disminuyendo a medida que aparecen asentamientos humanos y actividades productivas. En la Estrategia para el Manejo Ambiental del Río Bogotá elaborada por el Consejo Nacional de Política Económica y Social se afirma que la degradación de la calidad del agua en la cuenca alta se debe principalmente a contaminación orgánica y bacteriológica procedente de vertimientos de aguas residuales domésticas y de las curtiembres.

24 de los 27 municipios pertenecientes a la cuenca alta y media occidental cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), estas permiten remover alrededor del 40% de la carga orgánica generada, según sus condiciones de diseño estos sistemas están contruidos para remover cerca del 80% de DBO y solidos suspendidos, su efectividad se ve reducida por diversos factores entre ellos encontramos que las plantas de sacrificio animal, las curtiembres y otras industrias vierten sus aguas al alcantarillado sin ningún tipo de tratamiento previo sobrecargando la capacidad de las PTAR.

Aunque los cuatro índices expuestos solo corresponden al municipio de Villapinzón, la cuenca alta también recibe descargas de los municipios Chocontá, Suesca, Sesquilé, Guatavita, Gachancipa, Tocancipá, Cogua, Nemocón, Zipaquirá, Sopo y algunas descargas de los municipios La Calera y Cajicá. Los principales afluentes del río en este tramo son las descargas de los embalses de Tominé y Sisga, Río Negro, Neusa y Teusacá (Corporación Autònoma



Regional de Cundinamarca, 2016). El total de puntos monitoreados por la Corporación en la cuenca alta fue de 30 obteniendo los siguientes resultados: 4 se encuentran en un rango de calidad malo, 11 en regular, 12 son aceptables, 1 bueno y 2 no poseen resultado por falta de información.

Tabla 5.  
*ICA en cuatro puntos de seguimiento*

<b>Tipo</b>	<b>Nombre del punto</b>	<b>ICA</b>	<b>Calificación de la calidad del agua</b>
Corriente principal	Aguas arriba Villapinzón 1	0.8380	Aceptable
Corriente principal	Puente Villapinzón 2	0.7747	Aceptable
Corriente principal	Aguas arriba Q. Quincha 3	0.7795	Aceptable
Afluente	Q. Quincha 4	0.7389	Aceptable

Nota de tabla. Recuperado de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Boletín del Índice de calidad del agua en corrientes superficiales "ICA" 2016 - II. Bogotá : Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

### **5.3. Técnicas para la recolección de información**

Este proyecto inició con la recopilación de datos que posteriormente conformaron la información necesaria para la construcción de este proyecto de investigación, la información se consolidó a partir de datos secundarios obtenidos durante la revisión de otros proyectos relacionados con modelación hídrica con mayor presupuesto y recurso humano, ya que para el levantamiento experimental de algunos datos se requieren profesionales en distintas áreas como topografía y química. La información está conformada por datos cuantitativos muchos de estos, aunque no se obtuvieron de manera experimental si son el resultado de procesos matemáticos como ecuaciones empíricas, fórmulas hidráulicas y procesos estadísticos, algunas de las variables que integraron estos procesos requerían visitas de campo, para suplir esta información se optó por la revisión de bibliografía relacionada con este tipo de cuerpos de agua, posteriormente se

inferieron estas variables teniendo en cuenta factores comunes que se encontraron en la zona de estudio y la bibliografía revisada.

La recopilación se inició con la búsqueda y consulta de antecedentes de proyectos con un alcance similar al que se plantean en nuestros objetivos, la finalidad de esto era obtener una guía con lineamientos como los tipos de modelo a usar y las variables que son relevantes al momento de la modelación, los documentos seleccionados durante la revisión bibliográfica fueron tesis de grado e informes oficiales desarrollados por instituciones educativas y entidades gubernamentales. Como fuentes de información para la consulta de documentos se recurrió a repositorios institucionales, páginas web y bases de datos en el internet, además de los documentos digitales, se revisaron archivos físicos publicados por el Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional (IDEA), los datos obtenidos durante la revisión bibliográfica fueron complementados con consultas realizadas a las curtiembres vía telefónica.

#### **5.4. Elección del tramo de modelación y segmentación del cuerpo de agua**

La calidad de agua en la cuenca alta del río Bogotá ha sido alterada presentando problemas ambientales y de abastecimiento para la población del lugar, en algunos sectores se ha concluido que esta solo sirve para la producción de energía. Las curtiembres son uno de los sectores productivos más tradicionales del lugar, los procesos de producción que se desarrollan dentro de estos establecimientos demandan un elevado volumen de agua, gran parte de estas industrias se sitúan en jurisdicción del municipio de Villapinzón. Algunos de los curtidores iniciaron un proceso de reconversión industrial hacia la producción limpia desde el año 2004 y la construcción de sistemas de tratamiento físico-químico individual para mejorar la calidad del agua de sus efluentes (Santos, 2015). Para obtener un permiso de vertimientos por parte de la CAR las curtiembres deben acogerse a la normatividad vigente; en los numerales 4 y 5 del

Artículo 43 del Decreto 3930 de 2010 se estipula que la evaluación ambiental de los vertimientos debe tener como mínimo una predicción y valoración de los impactos que puedan generar al agua y los suelos, dichas predicciones se deben realizar en función de la capacidad del cuerpo de agua receptor para asimilar y diluir los contaminantes.

Por medio del convenio 051 de la Gobernación de Cundinamarca y la Universidad Nacional Sede Bogotá decidieron realizar la modelación de los cuerpos de agua receptores de los vertimientos y posteriormente determinar el impacto ambiental de estos, durante el desarrollo de este proyecto se establecieron 21 vertimientos provenientes de curtiembres, estos se clasificaron como individuales cuando provienen de un solo establecimiento y colectivos cuando convergen efluentes de dos o más curtiembres, se decidió tomar estos puntos ya que pertenecen a los sitios de descarga de los establecimientos que mostraron interés en acogerse al proyecto, además de esto trazan de manera clara el segmento de la cuenca en donde se inicia la reducción en el valor del índice de calidad. A continuación, en la tabla 6 se presentan las industrias y los vertimientos elegidos.

Tabla 6.  
*Inventario de vertimientos*

Número de vertimiento	Código de la curtiembre	Tipo de vertimiento	Coordenadas	
			Norte	Este
1	CUR-1	Colectivo	5.18250	-73.62777
2	CUR-2	Colectivo		
3	CUR-3	Colectivo	5.18780	-73.62716
4	CUR-4	Colectivo		
5	CUR-5	Colectivo	5.19574	-73.61177
6	CUR-6	Colectivo		
7	CUR-7	Colectivo	5.19986	-73.61072
8	CUR-8	Colectivo		
9	CUR-9	Colectivo	5.19833	-73.61072
10	CUR-10	Colectivo		
11	CUR-11	Individual	5.19275	-73.61761
12	CUR-12	Individual		
13	CUR-13	Individual	5.18288	-73.62897

Número de vertimiento	Código de la curtiembre	Tipo de vertimiento	Coordenadas	
			Norte	Este
14	CUR-14	Individual	5.19310	-73.61446
15	CUR-15	Colectivo	5.19261	-73.61650
16	CUR-16	Colectivo		
17	CUR-17	Individual	5.20814	-73.60338
18	CUR-18	Individual	5.17761	-73.63812
19	CUR-19	Individual	5.19944	-73.60696
20	CUR-20	Individual	5.19283	-73.61769

Nota de tabla. Recuperado de Santos, T. (2015). Resumen ejecutivo modelación de calidad de agua del río Bogotá y quebradas Chingacio y San Pedro con efluentes de curtiembre. Bogotá: Convenio 051. Gobernación de Cundinamarca - Universidad Nacional de Colombia.

Como se puede observar algunos vertimientos se hacen de manera colectiva, esto se debe a la cercanía entre algunas de las industrias y la relación familiar entre sus representantes, por otro lado, se tiene que gran parte de las curtiembres se ubican al costado izquierdo de la vía que conduce de Bogotá a Tunja y el cuerpo de agua se encuentra al costado opuesto de dicha vía, por esta razón los usuarios se han visto obligados a realizar obras que conduzcan sus vertimientos al río, los costos que estas obras demandan han sido otro motivo para asociarse al momento de verter sus efluentes al río.

Los segmentos del tramo se definieron de acuerdo al documento “Resumen Ejecutivo Modelación de Calidad de Agua del Río Bogotá y Quebradas Chingacio y San Pedro con Efluentes de Curtiembre” desarrollado por Santos T en 2015. Las secciones que se establecieron en el documento fueron el resultado de un levantamiento topográfico y una inspección de campo, se decidió tomar los mismos segmentos ya que se consideró que la metodología empleada por los autores integra todos los factores que influyen de manera relevante en el sistema hídrico, dentro de la modelación se incluyeron las quebradas Chingacio y San Pedro, siendo estas los principales tributarios de la cuenca alta del Río Bogotá, estos dos cuerpos de agua transportan cargas de como provenientes de curtiembres ubicadas en las riberas de las quebradas, dentro de la

configuración del modelo tanto la quebrada Chingacio como la quebrada San Pedro se tomaron como un punto de descarga y se ingresaron las concentraciones y variables hidráulicas del sitio de muestreo más próximo al Río Bogotá.

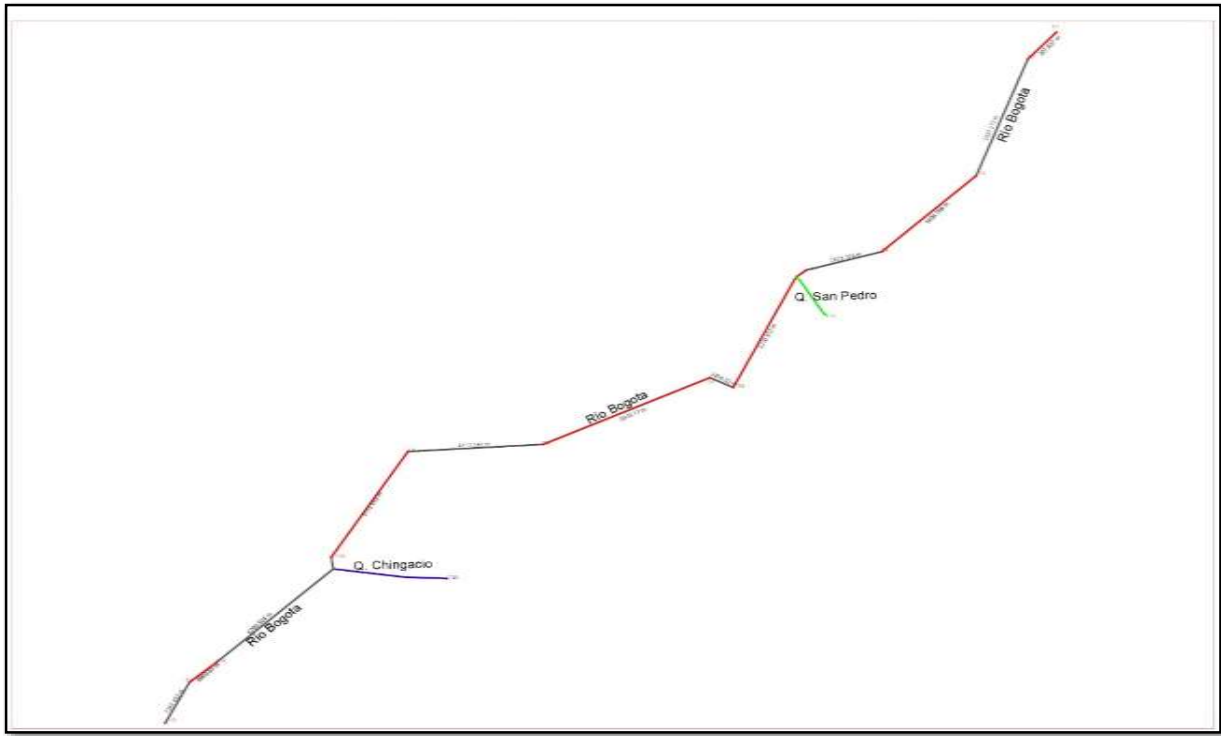


Figura 7. Segmento a Modelar

El tramo más largo corresponde al Río Bogotá, siendo esta la corriente principal, los segmentos en los que se dividió el cuerpo de agua tienen una longitud de 7.244 km. En color verde y azul son los tributarios Quebrada San Pedro y Quebrada Chingacio con una longitud de 0.310 km y 0.641 km respectivamente.

### **5.5. Elección del modelo para representación del cromo en la Cuenca Alta del Río Bogotá**

Al momento de modelar un cuerpo de agua se tienen dos opciones, la primera consiste en crear un modelo con una serie de algoritmos que se adapten a las condiciones físico-químicas e hidráulicas que posee el sistema a estudiar, la segunda emplea un modelo cuyas características de

diseño deben ser las adecuadas para alcanzar los objetivos propuestos en la investigación y se deben adaptar de la mejor manera a las condiciones del cuerpo de agua. Diseñar un modelo proporciona mayor exactitud a la simulación que se pretenda hacer ya que el modelador da las instrucciones matemáticas que debe seguir el modelo desde la observación directa de los diferentes componentes y características del cuerpo de agua, este proceso demanda recursos elevados, tanto humanos como económicos.

Por otro lado, emplear un modelo ya creado le resta exactitud a la simulación y a la vez reduce la demanda de recursos al momento de la modelación, algunos softwares permiten modificaciones, pero es la etapa de selección la que juega un papel fundamental en el resultado de la simulación. Para elegir el modelo correcto se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Tipo de corriente: es esencial encontrar un modelo que trabaje con el tipo de corriente que va a ser objeto de estudio, ya que no se puede emplear un modelo para cuerpos lénticos o subterráneos si se pretende modelar una quebrada o río.
- Alcances: se deben tener en cuenta tanto los del modelo como los del proyecto; en esta fase se revisan los componentes del modelo, los tipos de simulación y los parámetros con los que este trabaja, estos elementos que constituyen el programa deben estar acorde con los objetivos del proyecto, para esto se debe tener en cuenta el parámetro dominante, el tipo de modelación y la disponibilidad de información.
- Tipo de software: de forma general los softwares de modelación se pueden clasificar en dos categorías: licenciado y libre, para acceder al primero se debe contar con una serie de permisos que se obtienen pagando ciertos costos a las empresas que lo crearon, el

software libre por el contrario permite la descarga y ejecución completamente gratis siendo ideal para proyectos de modelación en donde no se cuenta con mucho presupuesto.

- Antecedentes: es recomendable revisar si el modelo que pretendemos utilizar se ha empleado en proyectos similares en cuanto al tipo de corriente y de parámetro dominante, esto suele ser una herramienta útil al momento de realizar la modelación.

La búsqueda del modelo se realizó por internet empleando como principal fuente las bases de datos de instituciones educativas que pudieran brindar trabajos de carácter académico cuyo contenido tuviera antecedentes sobre modelación hídrica, esta revisión bibliográfica permitió identificar los diferentes modelos que existen y las características que estos presentan, a partir de esta información se construyó un filtro flexible, teniendo como criterios los objetivos del proyecto y la zona de estudio, se descartaron modelos cuya simulación está enfocada en cuerpos de agua lénticos, aguas costeras o acuíferos, un factor esencial en esta primera selección fue el cromo siendo este elemento el parámetro dominante de la modelación, debido a que se encontraron diversos software aptos para la modelación de cromo, se decidió implementar como segundo filtro de selección los antecedentes en cuanto a la aplicación de estos modelos bajo condiciones hidrogeográficas similares a las de nuestro proyecto de investigación, como complemento a los antecedentes específicos se tuvo en cuenta el presupuesto para la ejecución del proyecto siendo este un factor que influye de manera directa con la selección del modelo por lo que se concluyó que el programa a elegir debía ser un software libre. A continuación, se presenta un cuadro comparativo de los modelos más relevantes encontrados durante la búsqueda.

Tabla 7.

*Cuadro comparativo de modelos*

<b>Modelo</b>	<b>Características</b>
<b>QUAL 2K</b>	<p>Es un modelo aplicable a ríos y corrientes de agua, es una versión moderna del modelo QUAL2E, poseen similitudes en los siguientes aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Son unidimensionales, por lo que se infiere que los canales de modelación poseen una mezcla total tanto lateral como verticalmente.</li> <li>- Derivaciones, el modelo se puede aplicar sobre un sistema conformado por un río principal con diferentes tributarios o afluentes.</li> <li>- Es estacionario, realiza simulaciones de flujo no uniforme y constante.</li> <li>- Simula entradas y salidas de calor y masa tanto puntuales como no puntuales</li> </ul> <p>QUAL2K posee las siguientes novedades:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los segmentos en que se divide el sistema a modelar pueden ser irregulares, no es necesario que todos conserven la misma longitud, además de estos las cargas y entradas se pueden incluir en cualquier elemento.</li> <li>- Posee funciones específicas para la modelación de DBO y algas.</li> </ul> <p>El manejo del modelo requiere de conocimientos sobre sistemas, por otro lado, los cálculos numéricos se programan en un lenguaje llamado Fortran 90, las gráficas son producidas por Excel y las operaciones de interfaz son programadas en Visual Basic, por lo anterior se puede considerar un modelo con un grado elevado de dificultad en cuanto a su operación y datos de entrada.</p> <p>El modelo posee ventajas para modelar factores relacionados con oxígeno como la DBO, el crecimiento de algas y la eutrofización, durante la búsqueda no se encontraron aplicaciones del programa en condiciones similares a las de este proyecto, el software no requiere licencia y su descarga se puede realizar de manera gratuita.</p>
<b>CALA</b>	<p>Este modelo fue desarrollado en el año 1985 por el Departamento Nacional de Planeación, evalúa la calidad de agua de una corriente teniendo en cuenta 49 parámetros físicos, químicos y bacteriológicos como el color, turbiedad, hierro soluble, cloruros, cobre, sulfatos, fluoruros y fenoles entre otros.</p> <p>El programa emplea análisis estadísticos y calcula tres niveles de contaminación (bajo, medio y alto), cuando se trata de una modelación</p>



---

<b>Modelo</b>	<b>Características</b>
	<p>para determinar si el fluido es apto para el consumo humano, maneja los siguientes tres criterios:</p> <p>CLASE 1: Fuente excelente; requiere por lo menos desinfección CLASE 2: Fuente buena; requiere un tratamiento convencional como coagulación, sedimentación, filtración y desinfección CLASE 3: Fuente pobre, requiere tratamiento especial</p> <p>Entre las desventajas que posee el modelo encontramos que no hace graficas de las concentraciones de los parámetros analizados, no simula la remoción de coliformes y no simula la remoción de NTK.</p> <p>A pesar de que el modelo fue creado en 1985, es pertinente citarlo en este trabajo ya que fue aplicado en el año de 1990 por la Universidad Nacional de Colombia, para evaluar la calidad de agua del Río Bogotá; se establecieron 20 estaciones donde se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: caudal, pH, temperatura, cloruros, cromo total, COT, DBO, detergentes, boro, mercurio, grasas, nitrógeno amoniacal y nitrato.</p> <p>La modelación de cromo total en el río Bogotá citada por Casas, W &amp; Vargas, C se puede considerar como un antecedente valido para esta investigación, pero la mayor limitante de este modelo es que por ser creado hace 32 años no se encuentra información disponible sobre el mismo.</p>
<b>QUASAR</b>	<p>Es un modelo empleado en cuerpos de agua y flujo en redes fluviales, describe los cambios de calidad de agua a lo largo del tiempo, brinda al modelador un método que permite realizar una comparación del estado actual del río y el que tendrá después de que se presenten cambios en la red fluvial. QUASAR al igual que la mayoría de modelos empleados en aguas superficiales emplea para su simulación una serie de segmentos definidos a partir de la confluencia de los mismos con sus tributarios, vertimientos o captaciones.</p> <p>La modelación con este software se puede realizar de dos formas distintas:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Modo planificación: el modelo puede proporcionar distribuciones y calidad en puntos clave, permitiendo así fijar niveles máximos de efluentes para mantener la calidad del río.</li><li>- Modo dinámico: el modelo proporciona estimaciones de flujo y de calidad en los extremos de cada tramo en un periodo de tiempo, permitiendo evaluar cambios propuestos en el uso, caudal y calidad de agua en el río (<a href="http://www.wmo.int">www.wmo.int</a>).</li></ul>

---

<b>Modelo</b>	<b>Características</b>
	<p>Los parámetros que modela el software son: amoníaco, pH, nitratos, temperatura, <i>E. coli</i>, DBO, oxígeno disuelto y contaminantes conservativos o trazador, en esta última categoría se podrían posicionar lo minerales conservativos como el cromo, pero no se encontraron aplicaciones del modelo usando este elemento como parámetro dominante por lo que se concluye que no es viable su uso en metales.</p> <p>La información disponible sobre el modelo es muy limitada además de esto es un software que se debe adquirir con licencia por lo que se debe contar con un determinado presupuesto económico para usarlo.</p>
<b>MIKE 11</b>	<p>Desarrollado por el Instituto Hidráulico Danés, es un modelo unidimensional, su modelo numérico está basado en las ecuaciones de Saint Venant y lo resuelve por medio de diferencias finitas y el esquema implícito. Ha sido empleado para el diseño, gestión y funcionamiento de ríos y canales, aunque se ha extendido su funcionamiento para los siguientes cálculos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aportes de en ríos</li> <li>- Destino y transporte de contaminantes en sistemas de una o dos capas</li> <li>- Filtración salina en ríos y estuarios</li> <li>- Impacto en la calidad de agua como consecuencia de los vertimientos y efluentes</li> <li>- Eutrofización y disminución de oxígeno</li> </ul> <p>El modelo puede ser utilizado usando una amplia gama de datos, requiere un conocimiento detallado del río por lo que se deben establecer un buen número de cortes transversales, los datos de calidad de agua son relevantes para la simulación, también se pueden introducir otros focos de contaminación difusa o puntual, los datos de entrada empleados por el modelo suelen ser costosos debido al detalle que demandan y que muchos de estos se deben obtener por medio de técnicas <i>in situ</i>.</p> <p>MIKE 11 posee una interfaz sencilla facilitando al modelador su uso y el proceso de entrada de datos, el fabricante proporciona manuales detallados además de brindar el soporte que el usuario crea necesario. El costo de la licencia del software es elevado y a pesar de la simplicidad en su interfaz, requiere de experiencia para que su uso sea efectivo.</p> <p>Durante la revisión de las referencias bibliográficas relacionadas con el modelo no se encontraron antecedentes de modelación similares a los de este proyecto.</p>
<b>EFDC</b>	<p>El Código de Dinámica de Fluidos Ambientales (EFDC) es un sistema de modelado de agua superficial, se puede emplear para hacer simulaciones en una, dos o tres dimensiones, es compatible con otros</p>

<b>Modelo</b>	<b>Características</b>
	<p>softwares, se ha empleado para generar datos hidrodinámicos de entrada otros programas como el WASP. El modelo requiere información como datos de batimetría, flujos del sistema, velocidad y nivel de la corriente de agua y fuentes de contaminación puntual y difusa.</p> <p>Se ha empleado para estudios de dilución de carga, intrusión de salinidad, transportes de sedimentos y contaminantes, análisis de enfriamiento de plantas de energía y estudios de eutrofización. Entre sus principales limitantes tenemos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sólo simula el transporte hidrodinámico de los contaminantes.</li> <li>- Requiere de conocimientos básicos de dinámica, para poder hacer un uso efectivo del modelo.</li> <li>- No cuenta con una interfaz gráfica, los datos de entrada deben introducirse en ficheros de texto independientes antes de ejecutar el programa.</li> </ul> <p>EFDC es un software gratuito creado por la USEPA, a pesar de las diversas aplicaciones que ha tenido el modelo no se registran antecedentes donde se use el cromo como parámetro dominante.</p>
<b>WASP</b>	<p>Este modelo permite la simulación en una, dos y tres dimensiones de vertidos en sistemas acuáticos y la predicción de las afecciones a la calidad de las aguas en río, cabe aclarar que el programa no modela procesos hidrodinámicos.</p> <p>Utilidad del modelo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- El modelo ofrece concentraciones tabuladas de los procesos simulados en los que se incluyen volúmenes de las cajas o celdas en las que se divide el sistema objeto de simulación, por lo que la comparación con concentraciones de referencia y el cálculo posterior (fuera del modelo) de volumen de agua superficial afectado es relativamente sencillo.</li> <li>- WASP incluye un amplio rango de contaminantes y procesos asociados, incluyendo contaminantes orgánicos.</li> <li>- Ofrece salidas gráficas en 2D, gráficos XY de concentración vs tiempo y mallados donde se representa con escalas de colores las concentraciones alcanzadas (Gobierno de España, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino).</li> </ul> <p>Entre los datos de entrada que requiere el software se deben ingresar las concentraciones iniciales y tasas de descarga de contaminantes, el modelo puede realizar simulaciones de contaminantes como metales, disolventes clorados, compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos y pesticidas.</p>

Modelo	Características
	<p>Limitantes del software:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si se requieren cálculos hidrodinámicos se deben tomar de fuentes externas como información previa o resultados de otros modelos de simulación.</li> <li>- No realiza predicciones de vertidos de hidrocarburos</li> <li>- No modela la zona de mezcla alrededor de vertidos o descargas</li> </ul> <p>WASP es un modelo gratuito opera sin licencia, se encontraron antecedentes de la aplicación de este tomando como parámetro dominante el cromo, en la modelación de la parte alta del río Suquiapa en el municipio de Santa Ana en El Salvador.</p>

Nota de tabla. Elaboración propia búsqueda de información en fuentes bibliográficas.

A continuación se presenta la valoración numérica de cada uno de los modelos.

Tabla 8  
Valoración numérica de los modelos

Modelo	Tipo de corriente	Alcances	Tipo de software	Antecedentes	Valoración final
QUAL 2K	1	0	1	0	2
CALA	1	1	0	1	3
QUASAR	1	1	0	0	2
MIKE 11	1	0	0	0	1
EFDC	1	0	1	0	2
WASP	1	1	1	1	4

Nota de tabla. Elaboración propia

La ponderación empleada en la tabla 8, se basó en un rango de cero (0) a uno (1), asignando el mínimo valor a los modelos que no cumplían las condiciones expuestas durante los criterios de selección y dando el valor más alto a los modelos que satisfacían las condiciones requeridas.

### 5.5.1 Información disponible del modelo

Este factor influyó de gran forma en la elección del modelo, la bibliografía disponible para cada uno de los programas se empleó como criterio de selección del software a utilizar, WASP posee antecedentes de modelación sobre cuerpos de agua superficiales y empleando metales

como parámetro dominante, además de esto se cuenta con manuales para su uso y modelación.

En la búsqueda realizada no se encontraron modelaciones en Colombia donde se empleará el modelo seleccionado, los antecedentes encontrados tuvieron como objeto de estudio la parte alta del río Suquiapa en San Salvador, estos trabajos de grado fueron de gran ayuda al momento de realizar la configuración del modelo, pero finalmente fueron los manuales de usuario los argumentos de cada selección realizada.

- **Costos**

WASP es un software libre desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos se puede descargar en la en la web sin ningún costo, por lo que no es necesario poseer un elevado recurso económico a la hora de modelar con dichos software.

### **5.5.2 Permanencia en el tiempo**

Esta propiedad hace referencia al comportamiento que tienen los procesos simulados en relación al tiempo, en este sentido, los modelos se pueden clasificar en dinámicos o estacionarios, se denominan dinámicos a los software que logran hacer simulaciones teniendo en cuenta tanto las variables espaciales como temporales, por otro lado, tenemos que los modelos estacionarios son aquellos que realizan las simulaciones siguiendo los cambios en los componentes del fluido en relación solo con los factores espaciales del cuerpo de agua.

Según Hernández et al. 2016, el software WASP se puede clasificar como un modelo dinámico, los datos de entrada que se deben suministrar son dependientes a los factores temporales, el software hace un seguimiento de la sustancia a modelar desde su entrada hasta su punto final de salida, conservando la masa en el espacio y tiempo.

Las simulaciones en este modelo se pueden hacer tanto en estado estacionario como dinámico, esto depende de la opción de flujo que elija el modelador, esta característica, sumada a las herramientas matemáticas que emplea el software para realizar representaciones de fenómenos físicos y químicos que puedan ocurrir en un cuerpo de agua, hacen que este modelo posea un elevado grado de precisión, disminuyendo el nivel de incertidumbre que los resultados puedan llegar a tener.

### **5.6. Datos de entrada en la interfaz del modelo**

En el Programa de Simulación y Análisis de la Calidad de Agua WASP la masa de agua se representa por medio de segmentos discretos con límites conocidos en cuanto a la información que se suministra, los datos de entrada para cada segmento están sujetos a la opción de flujo con la que se trabaje, para este proyecto la modelación se realizó bajo la opción *Net Flows* que requiere de información como: profundidad, tipo de segmento (superficial o subterráneo), segmento inferior (en caso de que se piense trabajar con superficies bentónicas), volumen, ancho y largo, los segmentos cuentan con un inicio y un final, a esto le denomina condiciones de borde y es en estas donde se debe fijar los valores de concentración del parámetro dominante para su posterior interpolación, cuando la modelación se realiza bajo la opción de flujo neto (*Net Flows*) las velocidades y profundidades de los segmentos no influyen en el esquema de transporte, ya que solo se utilizan en los cálculos de reaireación y las tasas de volatilización (Amaya, Arriola, & Cerna, 2015).

Obtener los valores de estas variables está dentro de los alcances del proyecto, por otro lado, emplear un modelo que demande una elevada cantidad de parámetro y variables no es viable para la investigación debido a las limitantes que se tienen para la ejecución de la misma, esto nos llevaría asignar una gran cantidad de valores arbitrarios o por defecto procedentes del

mismo software, aumentando el nivel de incertidumbre de la modelación, la precisión del modelo se evaluó a partir de la complejidad de los datos de entrada del software ya que durante la investigación no se realizó una calibración del modelo.

### 5.7. Descripción matemática de la representación fenomenológica del modelo

El sistema a modelar debe satisfacer una serie de leyes matemáticas denominadas también ecuaciones de gobierno, para WASP dichas leyes se basan en la conservación de masa, según Cuello Juan et al. 2006 esta es la razón por la que el modelo presenta una ecuación de balance para cada constituyente con la siguiente ecuación de derivadas parciales.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(uc) - \frac{\partial}{\partial y}(vc) - \frac{\partial}{\partial z}(wd) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) + S_L + S_B + S_K$$

Este tipo de ecuación se emplea cuando la función está definida por diferentes variables como:

$c =$  concentración puntual del constituyente  $\left(\frac{mg}{L}\right)$

$t =$  tiempo (días)

$u =$  velocidad longitudinal  $\left(\frac{m}{s}\right)$ ;  $v =$  velocidad lateral  $\left(\frac{m}{s}\right)$ ;  $w$

$=$  velocidad vertical  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$E_x =$  coeficiente de difusión longitudinal  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$E_y =$  coeficiente de difusión lateral  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$E_z =$  coeficiente de difusión vertical  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$$S_L = \text{tasa de carga directa y difusa} \left( \frac{g}{m^3 \text{ día}} \right)$$

$$S_B = \text{tasa de carga de contorno} \left( \frac{g}{m^3 \text{ día}} \right)$$

$$S_k = \text{tasa de transformaciones cinéticas totales} \left( \frac{g}{m^3 \text{ día}} \right)$$

Cardona, A. et al. 2006 menciona que en ríos de aguas bajas y medias se supone la homogeneidad vertical y lateral de las concentraciones del constituyente estudiado, el transporte de las magnitudes se deduce es unidireccional, se integran las coordenadas (z) y (y) del planteamiento anterior obteniendo la siguiente ecuación, donde se observa que variables como  $v$ ,  $w$ ,  $E_y$  y  $E_z$  no se encuentran dentro de la derivada planteada ya que se consideran despreciables los cambios del constituyente en estas direcciones.

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x} \left( -U_x AC + E_L A \frac{\partial c}{\partial x} \right) + A(S_L + S_B) + A(S_k)$$

$$C = \text{concentración del constituyente} \left( \frac{mg}{L} \right)$$

$$U_x = \text{velocidad media longitudinal sustituye la (u) de la ecuación anterior} \left( \frac{m}{s} \right)$$

$$A = \text{área de la sección transversal al flujo} (m^2)$$

$$E_L = \text{coeficiente de dispersión longitudinal} \left( \frac{m^2}{s} \right)$$

El término inicial del primer paréntesis representa el campo advectivo y el segundo el campo dispersivo, Cuello Juan et al. 2006 afirma que la información hidrodinámica para el cálculo del proceso de advección puede ser proporcionada de manera externa como ya se ha mencionado, o alternativamente WASP recalcula internamente volúmenes y velocidades con ecuaciones basadas en la geometría hidráulica, es decir en función del caudal.



Debido a las condiciones hidráulicas del río se trabajará con la ecuación de gobierno empleada para el transporte de escalares unidireccionales, esta se soluciona con el uso de métodos numéricos, para encontrar soluciones a valores concretos de las variables de interés. Para este caso el modelo aplica una aproximación de diferencias finitas centrada, empleando derivadas con el uso de puntos antes y después del punto de interés, WASP resuelve la anterior aproximación usando la siguiente red nodal

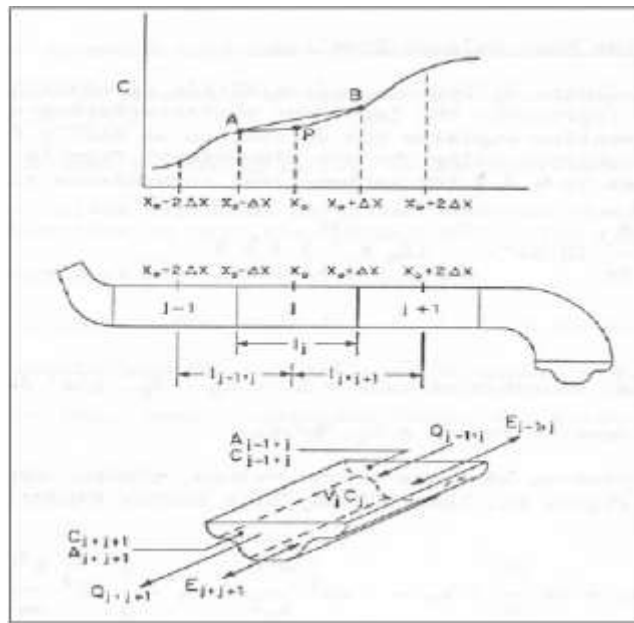


Figura 8. Red nodal WASP
   
 Alvarez, A., Cuello, J., & Trento, A. (2006). Transporte de sedimentos y metales pesados con WASP 7.0. *Mecánica computacional*, 1425-1440.

Se procede hacer una sustitución en los términos de la ecuación inicial, posteriormente se hace una aproximación de diferencias finitas del segmento, los términos obtenidos del paso anterior se multiplican por la longitud del segmento y se obtiene el balance de masa representado en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} (V_j C_j) = -Q_{j,j+1} C_{j,j+1} + Q_{j-1,j} C_{j-1,j} + R_{j,j+1} (C_{j+1} - C_j) - R_{j-1,j} (C_j - C_{j-1}) + V_j S_j^T$$

$V_j = \text{volumen del segmento } j = A_j \lambda_j$ . Expresado ( $m^3$ );  $\lambda_j = \text{longitud del segmento}$

$R = \text{flujo dispersivo} \left( E \frac{A}{L_c} \right)$  expresado en  $\left( \frac{m^3}{\text{día}} \right)$ ;  $L_c$  es la longitud característica (m)

$S_j^T = \text{es la sumatoria de las tasas del segmento } (S_L S_B S_K)$  se expresa en  $\left( \frac{g}{m^3 \text{ día}} \right)$

Cuello Juan et al. (2006) mencionan que las que las concentraciones  $C_{j,j+1}$  y  $C_{j-1,j}$  deben ser expresadas de la siguiente manera

$$C_{j,j+1} = vC_{j+1} + (1 - v)C_j \quad ; \quad C_{j-1,j} = vC_j + (1 - v)C_{j-1}$$

$v$  Se toma como el factor advectivo en un rango de 0 a 1, cuando esta toma un valor de 0 la aproximación finita será regresiva, si el factor vale 0.5 van a ser diferencias centradas.

La ecuación empleada para el balance de masa se puede plantear de forma multidimensional de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (V_j C_j) = - \sum_i Q_{ij} C_{ij} + \sum_i R_{ij} (C_i - C_j) + \sum_L V_j S_{Lj} + \sum_B V_j S_{Bj} + \sum_K V_j S_{Kj}$$

Donde  $j$  es el tramo inicial y la letra  $i$  representa los segmentos contiguos a ella;  $ij$  corresponde a interfaces como las  $j, j + 1$  aplicadas en primera ecuación de balance planteada. El caudal está representado por  $Q_{ij}$  este será positivo cuando sale de los segmentos y negativo cuando entra a estos su unidad de medida es  $\left( \frac{m^3}{\text{día}} \right)$ . La ecuación anterior es empleada por el modelo para evaluar la derivada de la masa para cada segmento  $j$  durante cada paso de tiempo  $t$  entre el tiempo inicial  $t_0$  y el tiempo final  $t_f$  (Alvarez, Cuello, & Trento, 2006).

Una vez se encuentran las nuevas concentraciones en cada tamaño de paso WASP calcula la nueva masa en el tiempo  $t + \Delta t$  planteando una red nodal y se obtiene.

$$(V_j C_j)_{t+\Delta t} = (V_j C_j)_t + \frac{\partial}{\partial t} (V_j C_j)_t \Delta t$$

$\Delta t$  se toma como el paso del tiempo en días

El software calcula las nuevas concentraciones dividiendo los volúmenes actuales

$$C_{j,t+\Delta t} = \frac{(V_j C_j)_{t+\Delta t}}{V_{j,t+\Delta t}}$$

Los nuevos volúmenes son calculados internamente desde los campos de caudales especificados, usando el principio de continuidad (Alvarez, Cuello, & Trento, 2006). Este principio establece que el caudal debe mantenerse constante a lo largo del recorrido teniendo en cuenta de que  $Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \rightarrow \text{volumen} = Q * \text{tiempo}$  la relación de estos será directamente proporcional; a mayor caudal mayor volumen se tendrá.

### **Métodos de interpolación**

La interfaz de WASP posee dos tipos de interpolación lineal y a trozos o *step*, durante la modelación que se realiza en el proyecto se debe definir en la pantalla de intercambios y de flujos cuál de estas se empleara, a continuación, realizara una explicación general de estos dos tipos de interpolación.

- **Interpolación lineal**

Se emplea para encontrar los valores que toma una función en un intervalo definido por dos valores conocidos en cada uno de sus extremos (condiciones de borde), toma el nombre de lineal debido a que para realizar este cálculo se hace una aproximación por medio de una recta,

este método emplea polinomios interpoladores, estos son los encargados de pasar por varios de los puntos de los intervalos. Este tipo de interpolación resulta útil cuando los valores se relacionan linealmente.

- **Interpolación a trozos o step**

Este método es empleado cuando los valores presentan discontinuidad, pueden presentar relación en cuanto a su dominio, pero su rango no presenta ningún tipo de continuidad.

### **5.8. Entrada manual de los datos al modelo WASP**

En la pestaña datos de entradas se configura seleccionando las siguientes opciones: tipo de modelo (*Model type*) para este proyecto se eligió el modelo Toxico Simple (*Simple Toxicant*) esta subrutina es empleada para metales no reactivos, haciéndola ideal para el objetivo de la investigación teniendo en cuenta que en los efluentes provenientes de las curtiembres se encuentra el cromo en estado trivalente siendo esta la forma más estable, ya que requiere de una energía considerable para convertirlo en estados de oxidación más bajos o más altos (Carvajal , Gaitán, & Téllez, 2004), por otro lado tenemos que los manuales suministrados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos establecen que en caso de que no se cuente con los estados cinéticos de óxido-reducción se debe realizar la modelación bajo la selección de tóxico simple. Además del tipo de modelo, se debe hacer una selección de la opción de flujo, para ello se cuenta con cuatro opciones: Net Flows, Gross Flows, Hidrodinamic Linkage y Kinematica Wave.

Finalmente se define el intervalo de tiempo (*time step*), esta información es empleada por el modelo al momento de la integración de las concentraciones del contaminante sobre los

cambios de tiempo con el fin de predecir cuanto varia la concentración en un determinado segmento, para esta opción es viable emplear la configuración predeterminada del modelo.

### **5.8.1. Datos de segmentación del río en el modelo**

En esta fase se debe suministrar toda la información mínima que requiere el software sobre los tramos en los que se dividió la zona a modelar cumpliendo condiciones de homogeneidad en cuanto a los parámetros hidráulicos y de calidad del agua, la pantalla de segmentación la integran tanto los tramos de los vertimientos y tributarios como los del recorrido principal del cuerpo de agua.

La modelación se trabajará bajo la opción de flujo *Net Flows* siendo esta la que más se ajusta a las condiciones del cuerpo de agua que es objeto de estudio del proyecto cuando se emplea esta elección el modelo suma todos los flujos para determinar la dirección del flujo neto, cuando se hace esta selección se debe suministrar información como la profundidad en metros, tipo de segmento o tipo de corriente de agua bien sea superficial o subterránea, segmento inmediatamente inferior al segmento seleccionado (en caso de que no se tengan tramos inferiores se debe colocar la opción ninguno), ancho, largo y volumen en metros cúbicos, cuando no se tiene este último valor el software lo calculara a partir del ancho y largo del tramo o segmento estos dos últimos WASP los manejo empleando el metro como unidad de medida.

### **5.8.2. Información sobre el transporte del parámetro dominante en el agua**

Esta etapa se emplea para definir el transporte advectivo de la sustancia a modelar, la primera etapa consiste en seleccionar el tipo de transporte, para esto se tienen seis opciones: agua superficial, agua de poro, sólidos 1,2 y 3, evaporación y precipitación. En este caso se empleó la

opción de agua superficial, este tipo de flujo puede transportar tanto fracciones disueltas como partículas de un constituyente (Amaya, Arriola, & Cerna, 2015).

Los valores que se emplean en esta fase se basan en el recorrido del cuerpo de agua principal y los tributarios que a este llegan, la calidad y veracidad de esta información permite una mejor ejecución del modelo. Las opciones que brinda WASP permiten al modelador establecer el nombre de la función y la opción de interpolación de esta posteriormente se puede definir las funciones de flujo bien sea río arriba o río abajo incluyendo los tributarios, el software nos permite trazar el recorrido de los flujos que intervienen en la modelación desde la entrada al cuerpo de agua hasta la salida del mismo permitiéndonos construir con los segmentos o tramos tomados la ruta que corresponde a cada función de flujo, dentro de esta fase también se debe incluir los caudales del inicio de cabecera de cada segmento.

Una vez definidos en el software los factores externos que interfieren en el transporte advectivo del contaminante, se procede a establecer los elementos que tienen influencia sobre el desplazamiento dispersivo de la sustancia a modelar. Para esto se emplea un menú llamado pantalla de intercambios, en primer lugar se debe indicar el tipo de agua a trabajar, posterior a esto se debe indicar la función y la opción de interpolación (lineal o por pasos) que se va aplicar, una vez se ha definido la función se encuentran dos submenús que permiten definir el recorrido y la función del tiempo de intercambio, el recorrido que se establece es el principal, el que realiza el cuerpo de agua objeto de estudio a través de la segmentación, solo se toma este trazado debido a que es sobre este sistema que se quiere saber el comportamiento del contaminante, para establecer el recorrido se deben ingresar los puntos que definen los segmentos, seguido del área transversal en metros cuadrado ( $m^2$ ) y finalmente la longitud donde tiene lugar la mezcla, generalmente este valor lo establece la distancia entre los puntos centrales de cada segmento. La

función del tiempo de intercambio está conformada por fechas, tiempos y valores de coeficientes de dispersión o flujos, se deben ingresar al menos dos filas con los datos mencionados, para que se aplique el tipo de interpolación asignada.

### **5.8.3. Condiciones de borde (concentraciones del toxico a trabajar)**

En esta fase se deben asignar las fechas, tiempos y valores de concentración a cada punto tomado como inicio de un segmento o función de flujo estos se establecieron durante la etapa anterior, el conjunto de estos tres factores representa un momento en el tiempo y se observan como una fila en la interfaz del software, finalmente se debe elegir un tipo de interpolación, para que se aplique a las concentraciones durante la simulación, cabe aclarar que se deben ingresar al menos dos filas para que el modelo pueda realizar dicha tarea, en el caso de que se presenten las mismas concentraciones en el tiempo de partida y en el término de la simulación, la concentración se mantendrá constante en el tiempo.

### **5.9. Ejecución del modelo, post proceso y gráficos**

La interfaz del software cuenta con un icono que una vez seleccionado da inicio a la modelación, cuando finaliza la simulación, WASP proporciona al usuario un informe de las novedades encontradas durante la modelación, finalmente se emplea el post procesador para que el modelo tome los datos obtenidos y los exponga en una gráfica o plano cartesiano con ejes (y) y (x), al igual que para la simulación el software también cuenta con icono designado para este proceso, de la fase de post proceso se obtiene un archivo de salida tipo \*.BDM para visualizar este se debe oprimir el icono de creación del gráfico que nos permitirá configurar la apariencia de la gráfica y magnitudes de los ejes, finalmente se seleccionan los parámetros y segmentos que se quieren visualiza.

## 5.10. Datos para la modelación en el software WASP

Los datos a emplear son el resultado de la revisión bibliográfica realizada durante la recopilación de información con la que se inició la investigación y la consulta a entidades oficiales, durante la revisión se tuvieron en cuenta factores como la similitud en los cuerpos de agua estudiados, sustancia a modelar y puntos de monitoreo y registro de donde surgieron los datos solicitados.

### 5.10.1. Segmentos en el tramo de modelación

A continuación, se presentan los segmentos que conforman la corriente principal y sus principales tributarios, un total de 15 secciones hicieron parte de la modelación de este tramo, estas fueron tomadas a partir del estudio batimétrico realizado sobre la cuenca alta del Río Bogotá desarrollado durante la ejecución del convenio 051 entre la Gobernación de Cundinamarca y la Universidad Nacional de Colombia, las cláusulas de confidencialidad establecidos entre los propietarios de las curtiembres y los gestores del convenio no permitieron el acceso al documento completo por lo cual se debió tomar la información aquí presentada en el Resumen Ejecutivo presentado por (Santos, 2015).

Tabla 9.  
*Segmentos del tramo principal*

I.D	Secciones Batimétricas						Nivel (m)
	Coordenadas MAGNA		Cauce	Distancia (m)	Distancia acumulada (m)	Ancho (m)	
	Norte	Este					
T-1	1067847	1052708	R. Bogotá	0	0	6,73	0,30
T-2	1067701	1052576	R. Bogotá	207,637	207,637	6,73	0,30
T-3	1067065	1052336	R. Bogotá	799,635	1007,272	6,73	0,30
T-4	1066651	1051899	R. Bogotá	801,514	1808,786	6,56	0,30
T-5	1066551	1051550	R. Bogotá	614,523	2423,309	6,56	0,30
T-6	1065911	1051212	R. Bogotá	847,603	3270,912	6,26	0,30



### Secciones Batimétricas

I.D	Coordenadas MAGNA		Cauce	Distancia (m)	Distancia acumulada (m)	Ancho (m)	Nivel (m)
	Norte	Este					
T-7	1065965	1051104	R. Bogotá	165,111	3436,023	6,49	0,30
T-8	1065602	1050333	R. Bogotá	538,147	3974,17	6,49	0,30
T-9	1065564	1049708	R. Bogotá	837,994	4812,164	6,88	0,30
T-10	1064988	1049353	R. Bogotá	903,505	5715,669	8,35	0,30
T-11	1064415	1048822	R. Bogotá	1083,835	6799,504	6,29	0,30
T-12	1064307	1048697	R. Bogotá	170,389	6969,893	7,47	0,30
T-13	1064084	1048584	R. Bogotá	273,76	7243,653	7,47	0,30
T-16	1066512	1051502	Q. San Pedro	300,625	309,91	4,35	0,30
T-20	1064924	1049362	Q. Chingacio	444,768	640,992	1,01	0,30

Nota de tabla. Elaboración propia.

#### 5.10.2. Puntos de vertimiento

Los sitios de vertimiento fueron establecidos en el convenio 051 y provienen de una muestra de 21 curtiembres que decidieron hacer parte de la modelación que se desarrolló durante este proyecto, a pesar de ser 21 establecimientos, se decidió establecer 7 efluentes ya que las descargas de muchas de las curtiembres se realizan de manera colectiva, además de esto se debió establecer la ubicación de estos y su posible influencia en el cuerpo de agua a partir de un trazado realizado en AutoCAD (Ver Anexo 2: Segmento a modelar), este procedimiento también fue de gran utilidad al momento de definir las rutas de los segmentos que se ingresaron al modelo WASP, a continuación se presenta el consolidado de los vertimientos seleccionados junto con sus coordenadas y trazado.

Tabla 10.  
*Coordenadas de los vertimientos*

Vertimiento	Coordenadas		Distancia (m)
	Norte	Este	
Vertimiento N° 1 (V-1)	5.20814	-73.60338	7,3
Vertimiento N° 2 (V-2)	5.19986	-73.60686	107
Vertimiento N° 3 (V-3)	5.19833	-73.61072	4,4

Vertimiento N° 4 (V-4)	5.19261	-73.61650	8,3
Vertimiento N° 5 (V-5)	5.19275	-73.61761	69
Vertimiento N° 6 (V-6)	5.18878	-73.62380	53,3
Vertimiento N° 7 (V-7)	5.18780	-73.62716	141,2

Nota de tabla. Elaboración propia

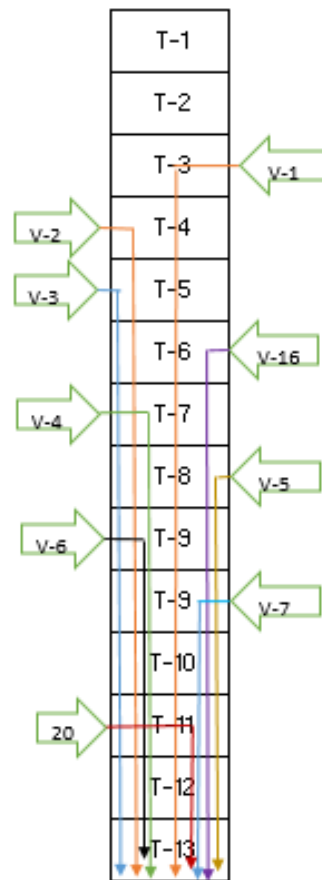


Figura 9. Rutas de los segmentos a modelar

### 5.10.3. Parámetros hidráulicos

En una de las fases previas a la modelación se debe realizar la configuración de los factores que intervienen en el transporte dispersivo del parámetro a modelar, el menú donde se suministra esta información recibe el nombre de Pantalla de intercambios (Exchanges screen), durante esta etapa se debe definir la función de intercambio y el recorrido principal de la modelación, dicho trazado hace referencia a la segmentación que se realizó sobre el cuerpo de

agua sin tener en cuenta los vertimientos o tributarios, además de esto se deben suministrar datos temporales (fecha y hora) y el coeficiente de dispersión del cuerpo de agua, esto solo aplica para el trazado principal debido ya que es en este donde se estudiará el comportamiento del contaminante a lo largo de su recorrido.

La dispersión tiene lugar en las interacciones del contaminante con las propiedades hidráulicas del sistema, cuando una sustancia llega a un cuerpo de agua por medio de un vertimiento o cualquier otro tipo de descarga el comportamiento de este atraviesa diferentes etapas, la primera está relacionada con la forma en que se diluye el contaminante que a su vez está influenciado por el caudal de descarga y la flotabilidad del vertimiento, cuando estos dos factores son despreciables en el comportamiento de la sustancia ya que han sido superados por las condiciones hidráulicas y físicas del cuerpo receptor, el contaminante vertido pasa a la segunda etapa donde con ayuda del caudal presente en el sistema hídrico se mezcla con la masa de agua a lo ancho y profundo del río, el tiempo que tarda dicha mezcla es directamente proporcional a las dimensiones del cuerpo de agua, una vez el contaminante está homogenizado tanto transversal como verticalmente llega la tercera y última fase de la difusión que consiste en eliminar las diferencias en cuanto a las concentraciones que presenta la sustancia vertida en el recorrido que realiza el cuerpo de agua.

Para predecir el transporte de contaminantes es necesario conocer el coeficiente de dispersión longitudinal, para el cálculo de este factor existen fórmulas empíricas y otras técnicas que emplean trazadores, estas últimas requieren de una gran inversión, un elevado recurso económico y técnico, su mayor limitación está dada por la validez de los datos que se obtienen, ya que estos solo aplican para las condiciones de flujo que se presentan en el sistema al momento de realizar las mediciones, para que los cálculos encontrados empleando técnicas de trazadores

sean representativos, se deben aplicar estos métodos cada vez que se presente un cambio estacional en la zona de estudio, ya que estos generalmente se encuentran acompañados de variaciones en el caudal del cuerpo de agua.

Las ecuaciones empíricas planteadas por diferentes autores suelen ser útiles cuando se aplican en sistemas que poseen propiedades similares a las que se usaron cuando se calibraron estas fórmulas, los resultados obtenidos con este proceso suelen ser muy dispersos cuando se hace una comparación entre las ecuaciones planteadas. Barchiesi et al. afirma que para obtener la mejor estimación del coeficiente de dispersión longitudinal se debe utilizar la ecuación desarrollada por Fisher 1979, ya que emplea información hidrodinámica detallada (Barchiesi, Caminal, Garcia, Herrero, & Díaz, 2015) .

La ecuación planteada por Fischer presenta límites al momento de su aplicación, esta fórmula asume que el contaminante vertido debe estar totalmente homogenizado con el cuerpo receptor tanto transversal como verticalmente por lo que es recomendable aplicar esta fórmula en tramos de río donde no se presenten fuertes recirculaciones o corrientes secundarias con altos caudales. La dispersión por corte es la que predomina en este tipo de ecuación, esta difusión es la que se encarga de eliminar las diferencias entre las concentraciones que se presentan a lo largo del río, ya que las mezclas están influenciadas por la dispersión transversal del cuerpo de agua y no por la dispersión vertical de este, por lo anterior es necesario que la relación entre el ancho y la profundidad de la sección a modelar sea mayor a seis.

A continuación, se presenta la ecuación de Fischer y las variables que intervienen en esta

$$E_x = \frac{0.011 * U^2 * B^2}{D * u^*}$$

$E_x$  = *coeficiente de dispersión*

$B = \text{ancho del río}$

$U = \text{velocidad media de los aforos}$

$D = \text{radio hidráulico}$

$u^* = \text{velocidad de corte}$

Los caudales de los segmentos se desarrollaron con la ecuación de Manning creada a partir de las características geométricas e hidráulicas del cuerpo de agua, está dada por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{A * S^{\frac{1}{2}} * R^{\frac{2}{3}}}{n}$$

Donde:

Q= caudal; S=Pendiente de la línea de energía del agua; n=Coeficiente de rigurosidad del río; R=Radio hidráulico; A= Área de la sección transversal del río.

La información relacionada con el coeficiente de rigurosidad  $n$  y la pendiente  $s$  se tomaron de la misma base de datos, que se revisó para definir los segmentos y el tramo a modelar, estos datos fueron determinados a partir de la prueba de trazadores realizada en cada uno de los tramos establecidos para la modelación de dicho documento.

El área de la sección transversal  $A$  del río al igual que el radio hidráulico  $R$  fueron calculados según el ancho establecido para cada uno de los segmentos y los niveles registrados en la estación limnométrica Villapinzón-2120815 siendo esta la más próxima a la zona de estudio.



Figura 10. Estaciones limnimétricas de la cuenca alta

A continuación, se presenta la selección de datos y los resultados encontrados. Se inició el proceso haciendo una solicitud a la CAR de los niveles medios diarios registrados mensualmente durante este año en la estación Villapinzón, para luego promediarlos y obtener los datos presentados en la siguiente tabla

Tabla 11.  
Niveles medios estación Villapinzón

<b>NIVELES MEDIOS MENSUALES (cm) 2120712 EL TRIUNFO</b>													
<b>Año</b>	<b>MES</b>												<b>Promedio</b>
	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>	
2016	17,8	16,4	16,6	21,9	32,1	35,9	45,5	36,3	40,5	30,1	45,9	29,7	30,7

Nota de tabla. Elaboración propia.

Posterior a esto se procedió a encontrar la varianza y la desviación estándar de dichos datos con el fin de seleccionar el valor mensual que se encuentre menos alejado del promedio, estos valores poseen un grado de incertidumbre elevado debido a la influencia del régimen de lluvias durante el transcurso del año.

$$\text{Varianza } (\sigma^2) = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{\text{numero de datos}}$$

$$\sigma^2 = \frac{165.4 + 205.1 + 198.4 + 77.4 + 2.0 + 27.0}{12} = \mathbf{104.5}$$

$$\text{Desviación estandar } (\sigma) = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{104.5} = \mathbf{10.2}$$

A partir de la desviación estándar podemos concluir los valores que se encuentran con una diferencia menor de 10.2 cm no se consideran anómalos y su incertidumbre es menor a medida que se reduce su diferencia, teniendo en cuenta esto tenemos que el promedio de niveles para diciembre 30 cm es el más indicado para encontrar los cálculos hidráulicos posteriores.

### Área de la sección, perímetro mojado y radio hidráulico

Para determinar estos factores se debió establecer la geometría de las secciones, para esto se debe clasificar el cuerpo de agua según la forma como se deposita el sedimento en el lecho del río, Schumm en 1963 propuso clasificar los cauces empleando como criterios el índice de sinuosidad ( $p$ ) y la pendiente del cuerpo de agua ( $S$ ).

Tabla 12.  
Tabla de Schumm

Forma del Transporte de Sedimento	Estabilidad del Cauce		
	Estable	Deposito	Erosión
En suspensión del 85 al 100%	P>2.1 S: baja	El principal depósito ocurre en las márgenes que origina el estrechamiento del cauce. El depósito en el fondo es menor.	Predomina la erosión del fondo. Poca ampliación de márgenes.
En suspensión del 65 al 85% y en el fondo del 15 al 35%	P<2.1 S: moderada	Es importante el depósito en las márgenes y también en el fondo.	Es importante la erosión del fondo y la ampliación de márgenes.

De fondo del 35 al 70%	$1 < P < 1.5$ S: alta	Depósito en el fondo y formación de islas.	La erosión del fondo es baja, y la ampliación del cauce es muy importante.
------------------------	--------------------------	--	--

Notad de tabla. Elaboración propia a partir de Gracia, J., & Maza, J. (2002). Manual de Ingeniería de Ríos. Mexico D. F.: Universidad Nacional Autónoma de Mexico.

El índice de sinuosidad se determina a partir de la siguiente relación

$$P = \frac{\text{Longitud del Thalweg}}{\text{Longitud del Valle}}$$

- *Longitud de Thalweg*

Es la longitud de la línea que se encuentra en medio de la parte más profunda del río y donde la corriente es más rápida.

- *Longitud del Valle*

Es la longitud en línea recta donde se encuentra el segmento, desde el punto inicial del tramo en estudio.

$$P = \frac{7243.653 \text{ m}}{5581.995 \text{ m}} = 1.298$$

Teniendo en cuenta la pendiente de cada segmento y el índice de sinuosidad encontrado se deduce que el cuerpo de agua posee una forma parabólica ya que sufre un mayor depósito de sedimento en sus márgenes y un mayor porcentaje de erosión en la mitad de la sección.



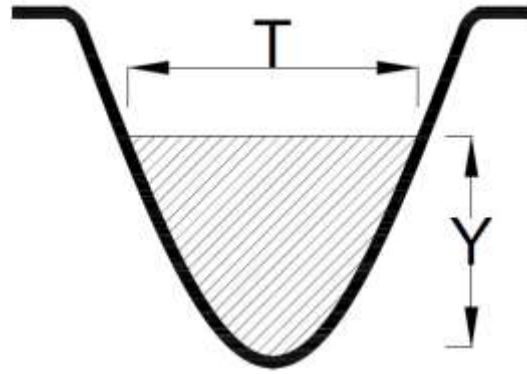


Figura 11. Geometría de la sección.

Las expresiones empleadas para el desarrollo de estos cálculos fueron las siguientes:

$$\text{Area mojada } (A) = \frac{2}{3}Ty$$

$$\text{Perímetro mojado } (p) = T + \frac{8 * y^2}{3 * T}$$

$$\text{Radio hidráulico } (R) = \text{es el cociente de } \frac{A}{p}$$

A continuación, se muestra el consolidado de datos empleados para la ecuación de

Manning:

Tabla 13.  
Caudales a partir de la ecuación de Manning

I.D	Cauce	Secciones batimétricas				Área mojada (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio hidráulico (m)	Caudal a partir de Manning (m <sup>3</sup> /h)
		Distancia (m)	Distancia acumulada (m)	Ancho (m)	Nivel (m)				
T-1	R. Bogotá	0	0	6,73	0,30	1,33	6,76	0,20	1,263
T-2	R. Bogotá	207,637	207,637	6,73	0,30	1,33	6,76	0,20	1,263
T-3	R. Bogotá	799,635	1007,272	6,73	0,30	1,33	6,76	0,20	1,142
T-4	R. Bogotá	801,514	1808,786	6,56	0,30	1,30	6,60	0,20	0,810
T-5	R. Bogotá	614,523	2423,309	6,56	0,30	1,30	6,60	0,20	0,649
T-6	R. Bogotá	847,603	3270,912	6,26	0,30	1,24	6,30	0,20	0,857
T-7	R. Bogotá	165,111	3436,023	6,49	0,30	1,29	6,53	0,20	1,094
T-8	R. Bogotá	538,147	3974,17	6,49	0,30	1,29	6,53	0,20	2,105

<b>T-9</b>	R. Bogotá	837,994	4812,164	6,88	0,30	1,36	6,91	0,20	1,097
<b>T-10</b>	R. Bogotá	903,505	5715,669	8,35	0,30	1,65	8,38	0,20	1,199
<b>T-11</b>	R. Bogotá	1083,835	6799,504	6,29	0,30	1,25	6,33	0,20	0,814
<b>T-12</b>	R. Bogotá	170,389	6969,893	7,47	0,30	1,48	7,50	0,20	1,063
<b>T-13</b>	R. Bogotá	273,76	7243,653	7,47	0,30	1,48	7,50	0,20	0,695
<b>T-14</b>	Q. San Pedro	0	0	4,35	0,30	0,86	4,40	0,20	0,298
<b>T-15</b>	Q. San Pedro	9,285	9,285	4,35	0,30	0,86	4,40	0,20	0,298
<b>T-16</b>	Q. San Pedro	300,625	309,91	4,35	0,30	0,86	4,40	0,20	0,499
<b>T-17</b>	Q. Chingacio	0	0	1,01	0,30	0,20	1,24	0,16	0,066
<b>T-18</b>	Q. Chingacio	33,808	33,808	1,01	0,30	0,20	1,24	0,16	0,066
<b>T-19</b>	Q. Chingacio	162,416	196,224	1,01	0,30	0,20	1,24	0,16	0,045
<b>T-20</b>	Q. Chingacio	444,768	640,992	1,01	0,30	0,20	1,24	0,16	0,036

Nota de tabla. Elaboración propia

### **Velocidad de corte**

Los coeficientes de dispersión se pueden calcular con el uso de diferentes métodos en este caso Fischer tiene en cuenta la variación de las velocidades en el cuerpo de agua y la influencia de estas en la dispersión del contaminante, estas fluctuaciones son dependientes de la profundidad y de la velocidad del corte del cuerpo de agua. Cardini et al. (2004) han planteado la siguiente expresión:

$$u^* = \frac{3.13 * U * n}{h^{1/6}}$$

Donde

$u^*$ = velocidad de corte;  $U$ = velocidad de la corriente;  $n$ = coeficiente de Manning y  $h$  la profundidad de la sección (nivel del cuerpo de agua)

Los valores de coeficiente de Manning y profundidad se tomaron de la tabla 14, la velocidad de cada segmento se determinó a partir de la siguiente expresión:

$$Q = A * Velocidad \rightarrow Velocidad = \frac{Q}{A}$$

Donde:

$Q$ = caudal encontrado a partir de la ecuación de Manning y  $A$ = es el área de la sección (ancho multiplicado por el nivel)

Se sustituyeron los valores en la ecuación y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 14.  
*Resultado velocidad de corte*

I.D	Coefficiente de Manning	Nivel (m)	Caudal a partir de Manning (m <sup>3</sup> /h)	Velocidad de la corriente (m/s)	Velocidad de corte (m/s)
T-1	0,06	0,30	1,263	0,0158	0,0036
T-2	0,06	0,30	1,263	0,0158	0,0036
T-3	0,06	0,30	1,142	0,0143	0,0033
T-4	0,08	0,30	0,810	0,0104	0,0032
T-5	0,08	0,30	0,649	0,0083	0,0026
T-6	0,08	0,30	0,857	0,0115	0,0035
T-7	0,05	0,30	1,094	0,0142	0,0027
T-8	0,05	0,30	2,105	0,0273	0,0052
T-9	0,06	0,30	1,097	0,0134	0,0031
T-10	0,06	0,30	1,199	0,0121	0,0028
T-11	0,06	0,30	0,814	0,0109	0,0025
T-12	0,05	0,30	1,063	0,0120	0,0023
T-13	0,05	0,30	0,695	0,0078	0,0015
T-14	0,15	0,30	0,298	0,0058	0,0033
T-15	0,15	0,30	0,298	0,0058	0,0033
T-16	0,15	0,30	0,499	0,0097	0,0056
T-17	0,4	0,30	0,066	0,0055	0,0084
T-18	0,4	0,30	0,066	0,0055	0,0084
T-19	0,4	0,30	0,045	0,0038	0,0058
T-20	0,4	0,30	0,036	0,0030	0,0046

Nota de tabla. Elaboración propia

Calculadas todas las variables involucradas en la ecuación de Fischer se procede a sustituirlas en la ecuación inicial  $E_x = \frac{0.011*U^2*B^2}{d*u^*}$  y a obtener los coeficientes de dispersión por cada tramo:

Tabla 15.  
*Valores del coeficiente de dispersión*

I.D	Área mojada (m <sup>2</sup> )	Radio hidráulico (m)	Velocidad de la corriente (m/s)	Velocidad de corte (m/s)	Coefficiente de dispersión (m <sup>2</sup> /s)
T-1	1,33	0,20	0,0158	0,0036	0,1738
T-2	1,33	0,20	0,0158	0,0036	0,1738
T-3	1,33	0,20	0,0143	0,0033	0,1571
T-4	1,30	0,20	0,0104	0,0032	0,0815

T-5	1,30	0,20	0,0083	0,0026	0,0653
T-6	1,24	0,20	0,0115	0,0035	0,0823
T-7	1,29	0,20	0,0142	0,0027	0,1742
T-8	1,29	0,20	0,0273	0,0052	0,3353
T-9	1,36	0,20	0,0134	0,0031	0,1542
T-10	1,65	0,20	0,0121	0,0028	0,2044
T-11	1,25	0,20	0,0109	0,0025	0,1048
T-12	1,48	0,20	0,0120	0,0023	0,1946
T-13	1,48	0,20	0,0078	0,0015	0,1273
T-14	0,86	0,20	0,0058	0,0033	0,0107
T-15	0,86	0,20	0,0058	0,0033	0,0107
T-16	0,86	0,20	0,0097	0,0056	0,0179
T-17	0,20	0,16	0,0055	0,0084	0,0002
T-18	0,20	0,16	0,0055	0,0084	0,0002
T-19	0,20	0,16	0,0038	0,0058	0,0002
T-20	0,20	0,16	0,0030	0,0046	0,0001

Nota de tabla. Elaboración propia

Debido a que los coeficientes de dispersión de los segmentos se encuentran en un rango muy bajo se procedió a calcular el número de Peclet con el fin de establecer qué tipo de flujo predomina sobre el analito en el cuerpo de agua, este coeficiente es de gran influencia tanto para las ecuaciones de gobierno del modelo como para los cambios físicos que se pueden presentar en el cuerpo de agua.

La concentración de una sustancia introducida en un cuerpo de agua depende de tres factores principales: la advección (transporte del cromo por las corrientes presentes en el cuerpo de agua), la dispersión (esparcimiento de la concentración del analito) y los procesos de transformación relacionados con los factores químicos y biológicos, el número adimensional de Peclet nos permite identificar qué fenómeno tiene una mayor influencia sobre la sustancia de interés. Por otro lado, tenemos que el planteamiento de la red nodal de la modelo, establecida a partir de las distancias y tiempos de cada uno de los segmentos influye en la precisión del

software, un intervalo corto hace que las ecuaciones de gobierno estarán más próximas y podrán brindar resultados más representativos.

El número de Peclet se encuentra en diferentes rangos según distintos autores, Petroni. R, menciona que este coeficiente tiende a ser infinito cuando el transporte advectivo predomina sobre el soluto (Petroni, 2000), Sámano 2011 establece que un número de Peclet mayor a uno ( $Pe > 1$ ) indica que la advección predomina sobre la difusión (Sámano, 2011).

Para calcular el número de Peclet se empleó la ecuación formulada por García et al., 2014 expresada de la siguiente forma:

$$Pe = \frac{C_a}{C_d} \rightarrow C_a = \frac{U * \Delta t}{\Delta x} ; C_d = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2}$$

Dónde:

$C_a$  es el número de Courant para flujo advectivo,  $C_d$  es el número de Courant para flujo dispersivo,  $U$  es la velocidad media de circulación,  $\Delta t$  y  $\Delta x$  son los pasos de tiempo y distancia utilizados en el modelo y  $D$  = coeficiente de dispersión.

Se sustituyeron los términos de la ecuación y se obtuvieron los resultados de la siguiente tabla:

Tabla 16.  
Valores de Peclet y Courant.

<b>ID</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Velocidad de la corriente (m/s)</b>	<b>Tiempo de retención (s)</b>	<b>Coefficiente de dispersión (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Número de Courant advectivo</b>	<b>Número de Courant dispersivo</b>	<b>Número de Peclet</b>
T-1	0	0,0158	0,0	0,1738	0	0,0000	0,00
T-2	207,637	0,0158	13146,2	0,1738	1	0,0530	18,87
T-3	799,635	0,0143	55984,0	0,1571	1	0,0138	72,69
T-4	801,514	0,0104	77133,4	0,0815	1	0,0098	102,22
T-5	614,523	0,0083	73797,6	0,0653	1	0,0128	78,37
T-6	847,603	0,0115	73563,2	0,0823	1	0,0084	118,64

T-7	165,111	0,0142	11640,5	0,1742	1	0,0744	13,44
T-8	538,147	0,0273	19711,6	0,3353	1	0,0228	43,82
T-9	837,994	0,0134	62459,2	0,1542	1	0,0137	72,90
T-10	903,505	0,0121	74723,9	0,2044	1	0,0187	53,45
T-11	1083,835	0,0109	99440,4	0,1048	1	0,0089	112,70
T-12	170,389	0,0120	14228,3	0,1946	1	0,0954	10,49
T-13	273,76	0,0078	34950,3	0,1273	1	0,0594	16,85
T-16	300,625	0,0097	31130,3	0,0179	1	0,0062	162,35
T-20	444,768	0,0030	146895,434	0,0001	1	0,0001	9775,26

Nota de tabla. Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior el número de Peclet es mayor que uno en todos los segmentos, el valor más bajo es de 10.49 en el tramo T-12, teniendo en cuenta los resultados obtenidos tanto para el coeficiente de dispersión como para el número de Peclet se asume que el cromo como analito objeto de estudio está influenciado por el transporte advectivo como consecuencia de las corrientes propias del cuerpo de agua y se infiere que la dispersión transversal en cada una de los segmentos es despreciable para el tramo de estudio, siguiendo los lineamientos establecidos por García et al., 2014 se asigna al coeficiente de dispersión un valor de  $1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .

### 5.11. Balance de materia para el cálculo de las concentraciones de cromo en los vertimientos

La concentración de Cr III que se descarga en el efluente se calculó a partir de un balance de masa, los propietarios de una de las tenerías de la zona de estudio nos informan que durante el proceso de curtido se agrega una solución llamada cromo batido que contiene los siguientes compuestos:

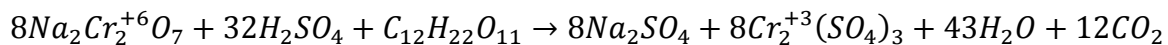
Dicromato de sodio  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

Ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ : 50 Kg

Carbohidrato (azúcar o melaza)  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$

El dicromato de sodio se suele mezclar con ácido sulfúrico para lograr llevar su pH a 3, la adición de carbohidratos cumple la función de reducir gran parte del oxígeno presente en el compuesto con el fin de establecer condiciones de reducción y brindar mayor estabilidad al cromo que se encuentra en la sal (dicromato de sodio), la reacción química de los compuestos empleados en el batido antes y después de homogenizarse en el proceso de curtido se muestran a continuación.

**Reacción general reducción del cromo en presencia de azúcar:**



En la ecuación se asignan cargas para revisar los cambios en los estados de oxidación de los elementos que forman cada uno de los compuestos. Para este caso y por la importancia sobre la toxicidad del cromo hexavalente, es posible verificar la reducción de cromo +6 a cromo +3 en la reacción.

- Estado de oxidación del cromo en el dicromato de sodio  $Na_2Cr_2O_7$ : +6
- Estado de oxidación del cromo en el sulfato de cromo  $Cr_2(SO_4)_3$ : +3

El ajuste de las cantidades estequiometrias en ambos lados de la ecuación se verifican con los balances para cada uno de los elementos que hacen parte de la reacción, estos se especifican en la tabla No.17.

Tabla 17.  
*Balance de especies químicas en ambos lados de la ecuación.*

Balance del lado izquierdo de la ecuación		Balance del lado derecho de la ecuación	
Na	16	Na	16
Cr	16	Cr	16
O	195	O	195

H	86	H	86
S	32	S	32
C	12	C	12
Nota de tabla. Elaboración propia			

Se debe calcular el porcentaje de masa que se encuentra en el sulfato de cromo obtenido después de la reacción, tenemos 2 moles de cromo en 1 mole de sulfato de cromo, empleamos la formula mencionada a continuación.

$$\% \text{Masa}_{Cr} = \frac{\text{Masa del cromo}}{\text{Masa del compuesto}} * 100$$

$$\text{Masa}_{Cr^{+3}} = n_{Cr} * \text{peso atomico}_{Cr}$$

$$\text{Masa}_{Cr^{+3}} = 2 \text{ mol} * 51.9 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 103.8 \text{ gr } Cr^{+3}$$

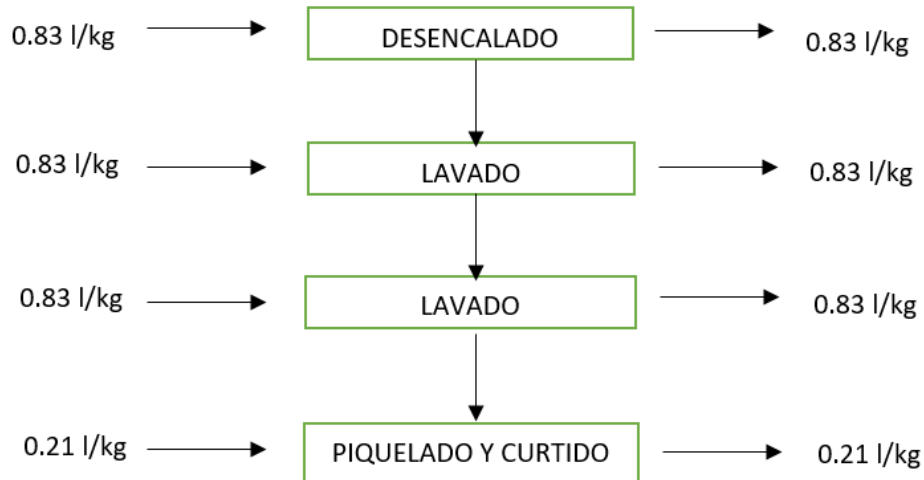
$$\text{Masa}_{Cr_2^{+3}(SO_4)_3} = n * \text{peso molecular}$$

$$\text{Masa}_{Cr_2^{+3}(SO_4)_3} = 1 \text{ mol} * 390.8 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 390.8 \text{ gr } Cr_2^{+3}(SO_4)_3$$

$$\% \text{Masa}_{Cr^{+3}} = \frac{103.8 \text{ gr}}{390.8 \text{ gr}} * 100 = 26.6 \%$$

Teniendo en cuenta el porcentaje de masa encontrado, el 26.6 % del sulfato de cromo obtenido durante la reacción, está conformado por cromo trivalente (Cr +3).





*Figura 12.* Balance del consumo de agua en el proceso de curtido  
 U.S. EPA - CIATEC, A.C. (2006). Manual de buenas prácticas ambientales para la curtiembre en Centroamérica. Ciudad de México: U.S. EPA.

Teniendo en cuenta el esquema anterior el volumen de agua que ingresa al proceso de curtido es de 0.21 l/kg y el volumen total del efluente es de 2.7 l/kg. Corredor, J. menciona que una industria se considera pequeña cuando procesa hasta 100 pieles por mes (3.3 pieles/día), para las pieles de la Sabana de Bogotá, se encontró que su peso oscila entre 20 y 25 kg/piel. Guerrero, M. señala que según datos de ACICAM (2013), el 71% de las empresas manufactureras de cuero en el país estaban ubicadas en Bogotá y Cundinamarca y según su tamaño, el 98% eran pequeñas y medianas empresas. Los censos realizados por el Centro Nacional de Producción Más Limpia en el 2004 establecen que priman las empresas pequeñas sobre las medianas en el sector de Villapinzón se tiene que el 65.2% de estas industrias son microempresas, en ese sentido se toman las tenerías de la zona de estudio como pequeñas industrias con una producción de 3.3 pieles por día.

A continuación, se procede a encontrar el caudal estándar de las curtiembres. Se debe iniciar haciendo la conversión de unidades:

$$3.3 \frac{\text{pieles}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 0.14 \frac{\text{pieles}}{\text{h}}$$

Teniendo en cuenta que el peso promedio de las pieles en la sabana de Bogotá es de 22.5 Kg se hace la siguiente conversión:

$$0.14 \frac{\text{pieles}}{\text{h}} * \frac{22.5 \text{ Kg}}{1 \text{ piel}} = 3.15 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Siguiendo los volúmenes mencionados en el proceso de producción se calculan los caudales de entrada y salida.

$$\text{Entrada: } 3.15 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 0.21 \frac{\text{l}}{\text{Kg}} = \mathbf{0.66 \frac{l}{h}}$$

$$\text{Salida: } 3.15 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 2.7 \frac{\text{l}}{\text{kg}} = \mathbf{8.50 \frac{l}{h}}$$

Para encontrar las concentraciones del cromo tanto en el afluente como en el efluente, se debe establecer la relación de entre el peso de la piel a curtir y la cantidad de sal de cromo que se debe adicionar. Según la guía ambiental para la industria del curtido y preparado de cueros, desarrollada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial se establece que: “En la industria del cuero se usan únicamente sales de cromo trivalente con ofertas que varían desde el 1,5 a 8 % calculado sobre el peso del cuero”. Para el presente proyecto se decidió establecer a partir de la bibliografía consultada y de los operarios de curtiembres que el porcentaje de cromo en relación al peso de la piel a procesar es del 7%.

Teniendo en cuenta que para que una curtiembre pequeña procese los 3.15 kg de cuero por hora, se deben emplear 0.221 kg de sulfato de cromo y 0.66 litros de agua, se establece la siguiente regla de tres:

$$0.66 \text{ litro} - - - \longrightarrow 0.221 \text{ Kg}$$

$$1 \text{ litro} - - - \longrightarrow X$$

$$\frac{1 \text{ l} * 0.221 \text{ Kg}}{0.66 \text{ l}} = 0.335 \text{ Kg}$$

Para el afluente tenemos una concentración de dicromato de potasio de 335000 mg por litro de agua, tomando el porcentaje de masa del cromo que se encuentra dentro de la sal (26.6%), la concentración de cromo trivalente presente en el afluente es de 88775 mg/l. Para el efluente de la curtiembre se establece nuevamente la regla de tres, esta vez teniendo en cuenta el caudal de la salida de todo el proceso.

$$8.50 \text{ litro} - - - \longrightarrow 0.221 \text{ Kg}$$

$$1 \text{ litro} - - - \longrightarrow X$$

$$\frac{1 \text{ l} * 0.221 \text{ Kg}}{8.50 \text{ l}} = 0.026 \text{ Kg}$$

Tenemos que la concentración del cromo trivalente para el efluente es de 6890 mg/l.

Tabla 18.  
Concentraciones y caudales de los puntos de vertimiento

Nomenclatura	Cr	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
	trivalente (µg Cr/L) ppm		
V-1	6890000	0,0085	2,36111E-06
V-2	6890000	0,0085	2,36111E-06
V-3	6890000	0,0085	2,36111E-06
V-4	6890000	0,0085	2,36111E-06
V-5	6890000	0,0085	2,36111E-06
V-6	6890000	0,0085	2,36111E-06
V-7	6890000	0,0085	2,36111E-06

Nota de tabla. Elaboración propia

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la modelación del cromo en la cuenca alta del Río Bogotá, empleando el modelo WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) como herramienta de dicha simulación, el periodo de tiempo establecido fue de 24 horas. El cuerpo de agua objeto de la modelación se dividió en trece segmentos, sobre los cuales tienen incidencia siete vertimientos y dos tributarios que son las quebradas Chingacio y San Pedro.

Los trece segmentos que constituyen el tramo principal o cuerpo receptor se agruparon con el fin de dar a conocer los resultados de manera más clara, para ello se tomaron dos criterios, el primer factor que se tuvo en cuenta fue la continuidad de los segmentos, reuniendo aquellos que están ubicados uno inmediatamente después del otro, el segundo criterio consistió en agrupar todos los segmentos cuya grafica indica un comportamiento igual o muy similar.

Los cambios mencionados en relación a la modelación inicial, se presentan a partir del anexo E en adelante.

### 6.1. Resultados de la modelación en los segmentos T-2, T-3, T-4 y T-5

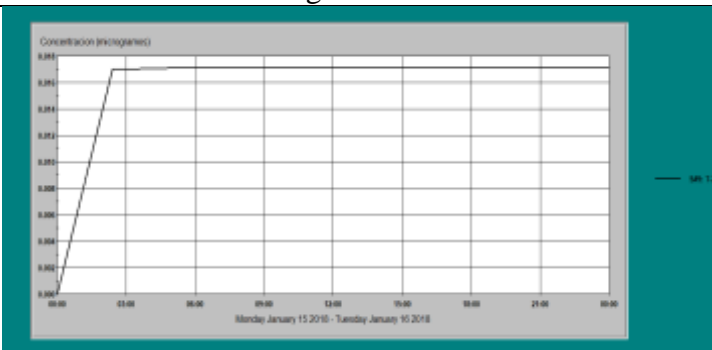
Tabla 19.

Graficas de los segmentos T-2, T-3, T-4 y T-5



Segmento - 2

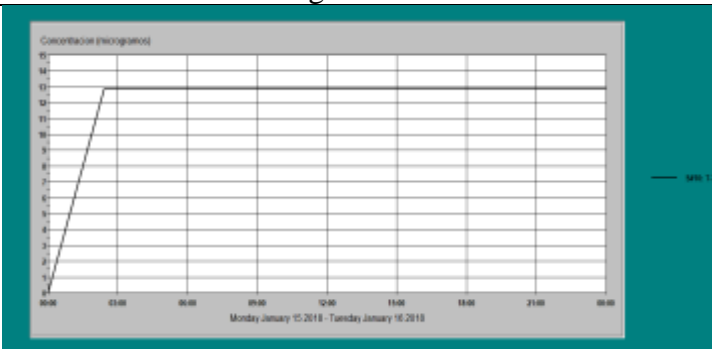
Segmento - 2



Segmento - 3

	S#9: T-2 (I) X	S#9: T-2 (I) Y
1	1/15/2018 0:00:00	0.00
2	1/15/2018 0:00:08	0.00
3	1/15/2018 2:24:08	0.02
4	1/15/2018 4:48:08	0.02
5	1/15/2018 7:12:08	0.02
6	1/15/2018 9:36:08	0.02
7	1/15/2018 12:00:00	0.02
8	1/15/2018 14:24:08	0.02
9	1/15/2018 16:48:08	0.02
10	1/15/2018 19:12:08	0.02
11	1/15/2018 21:36:08	0.02
12	1/16/2018 0:00:08	0.02

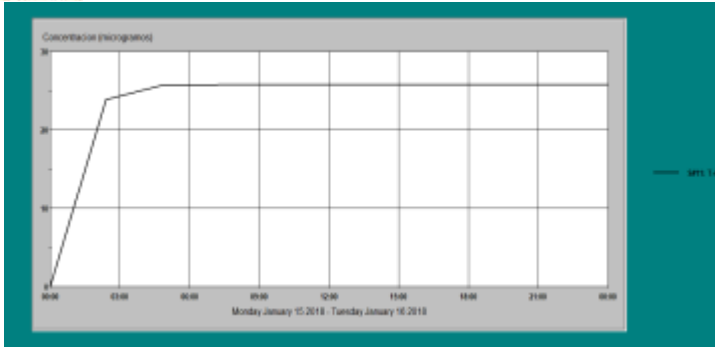
Segmento - 3



Segmento - 4

	S#10: T-3 (I) X	S#10: T-3 (I) Y
1	1/15/2018 0:00:00	0.00
2	1/15/2018 0:00:08	0.07
3	1/15/2018 2:24:08	12.83
4	1/15/2018 4:48:08	12.90
5	1/15/2018 7:12:08	12.90
6	1/15/2018 9:36:08	12.90
7	1/15/2018 12:00:00	12.90
8	1/15/2018 14:24:08	12.90
9	1/15/2018 16:48:08	12.90
10	1/15/2018 19:12:08	12.90
11	1/15/2018 21:36:08	12.90
12	1/16/2018 0:00:08	12.90

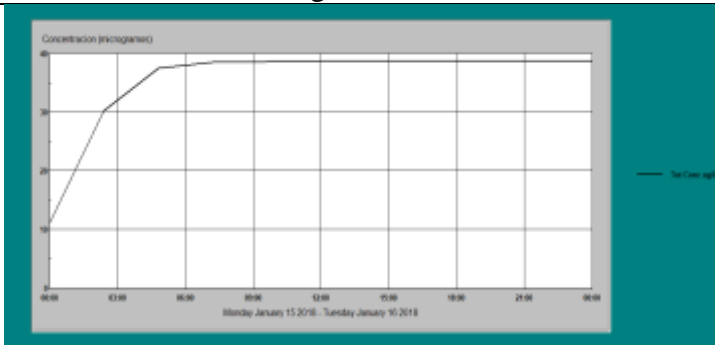
Segmento - 4



	SH11: T-4 (I)X	SH11: T-4 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	0.00
2	1/15/2018 0:00:08	0.04
3	1/15/2018 2:24:08	23.86
4	1/15/2018 4:48:08	25.69
5	1/15/2018 7:12:08	25.78
6	1/15/2018 9:36:08	25.78
7	1/15/2018 12:00:00	25.78
8	1/15/2018 14:24:08	25.78
9	1/15/2018 16:48:08	25.78
10	1/15/2018 19:12:08	25.78
11	1/15/2018 21:36:08	25.78
12	1/16/2018 0:00:08	25.78

Segmento - 5

Segmento - 5



	Tot Conc ug/L (I)X	Tot Conc ug/L (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	11.06
2	1/15/2018 0:00:08	11.06
3	1/15/2018 2:24:08	30.17
4	1/15/2018 4:48:08	37.45
5	1/15/2018 7:12:08	38.49
6	1/15/2018 9:36:08	38.61
7	1/15/2018 12:00:00	38.63
8	1/15/2018 14:24:08	38.63
9	1/15/2018 16:48:08	38.63
10	1/15/2018 19:12:08	38.63
11	1/15/2018 21:36:08	38.63
12	1/16/2018 0:00:08	38.63

Nota de tabla. Elaboración propia 1

Los segmentos T-2, T-3, T-4 y T-5 ubicados en la tabla 19 presentan un comportamiento similar, los cuatro tienen un incremento de concentración hasta un determinado punto a lo largo del periodo de modelación, posterior a esto los segmentos se estabilizan y no presentan más variaciones. El punto donde se detiene el incremento de las concentraciones varía según el segmento, para T-2 el incremento inicia en las 00:00 horas y termina a las 02:24:08 horas, el cambio que se presenta es leve, va desde una concentración inicial de 0  $\mu\text{g/L}$  hasta 0.02  $\mu\text{g/L}$ . En el segmento T-3 se observa que el incremento en la concentración de cromo inicia a los 00:00:08 segundos con un valor de 0.07  $\mu\text{g/L}$  y finaliza a las 04:48:08 horas con una concentración de 12.90  $\mu\text{g/L}$ . Para el segmento T-4 los cambios inician al mismo tiempo y con una concentración igual a la presentada en el segmento T-3 y se detienen a las 07:12:08 horas con una concentración final de 25.78  $\mu\text{g/L}$ . En el segmento T-5 el incremento es más progresivo en relación a los segmentos anteriores, la concentración inicial es de 11.06  $\mu\text{g/L}$ , los cambios inician a las

02:24:08 horas una vez iniciada la modelación con un valor de  $30.17 \mu\text{g/L}$  y se detienen a las 12:00:00 horas con una concentración final de  $38.63 \mu\text{g/L}$ .

Se infiere que distintos factores tienen influencia sobre estos cuatro segmentos, para el T-2 tenemos un aumento de concentración casi despreciable ya que este no recibe ninguna descarga o tributario que pueda alterar la presencia de cromo propia del cuerpo de agua. En cuanto a los tres segmentos siguientes T-3, T-4 y T-5 se puede observar que cada uno presenta una concentración final mayor al anterior de  $12.90 \mu\text{g/L}$ , por lo que se deduce que los vertimientos que llegan a dichos segmentos aportan una concentración cercana al valor mencionado, siguiendo la ruta de flujos del tramo a modelar se tiene que los vertimientos acumulados para los tramos T-3, T-4 y T-5 son 1, 2 y 3 respectivamente, que multiplicados por la concentración que se infiere aporta cada vertimiento ( $12.90 \mu\text{g/L}$  aproximadamente), se obtiene la concentración final mencionada para cada segmento.

De los resultados obtenidos durante la modelación para estos cuatro segmentos, se puede observar que todos tienen tendencia a incrementar su concentración como consecuencia de la descarga de los efluentes provenientes de las curtiembres, excepto el segmento T-2, en este, el incremento en la concentración no es significativo ya que no recibe vertimientos, la variación en los resultados se le atribuye a las ecuaciones de gobierno del modelo, que además de involucrar cargas contaminantes, emplean caudales, volúmenes y coeficientes de dispersión.

Los segmentos T-3, T-4 y T-5 presentan cargas de  $12.90 \mu\text{g/L}$ ,  $25.78 \mu\text{g/L}$  y  $38.63 \mu\text{g/L}$  respectivamente, en cuanto a los dos primeros (T-3 y T-4), la diferencias entre las concentraciones finales se deben a que T-4 capta carga contaminante del vertimiento V-1 y de la descarga que cae directamente sobre él, V-2, se interpreta de esta forma debido a que durante pruebas realizadas sobre el modelo se comprobó que los segmentos que anteceden de forma

inmediata influyen en el siguiente, esto se debe a la red nodal que plantea el modelo y al método de solución que emplea para la solución de las ecuaciones. En cuanto a la concentración final del segmento T-5, se debe tener en cuenta que en el inicio de la modelación la concentración es 11.06  $\mu\text{g/L}$ , por ello su concentración final es más alta, además de esto el segmento que lo antecede recibe descargas que influyen en los cambios que se puedan presentar sobre T-5.

Otro factor relevante en los resultados, es el tiempo que tardan en estabilizar los cambios de las concentraciones, los periodos fueron los siguientes: T-3 tardo 04:48:08 horas, para T-4 tenemos 07:12:08 horas y finalmente T-5 con 12:00 horas, estas diferencias se deben a que el cromo tardo mayor tiempo en diluirse con el fluido del cuerpo de agua receptor, teniendo en cuenta lo anterior se deduce que, cuando el segmento demanda un mayor periodo de tiempo su zona de mezcla y tiempo de retención son más extensos. Las diferencias en la zona de mezcla tienen lugar en lo que se denomina campo lejano, en esta fase los cambios que se puedan presentar están sujetos a las condiciones hidrodinámicas del segmento, para este caso se atribuyen estas diferencias a los vertimientos acumulados que anteceden a dichos segmentos, en cuanto al campo cercano o zona de turbulencia se observó que los tres segmentos presentaron cambios a las 02:24:08 horas de iniciada la modelación.

La zona de mezcla es dependiente a diferentes factores, uno de los más importantes es la cantidad de agua disponible para la dilución de la descarga, se realizaron ensayos aumentando la profundidad de los segmentos para incrementar el volumen de agua disponible, al realizar este cambio se observó que los segmentos tardaban más tiempo en estabilizar, por lo que se infiere que aumentaba la zona de mezcla, pero la concentración final era la misma. El caudal también se modificó con el fin de observar los posibles cambios que se llegaran a presentar; al incrementar el caudal de descarga de los vertimientos, las concentraciones finales también incrementaron, esto

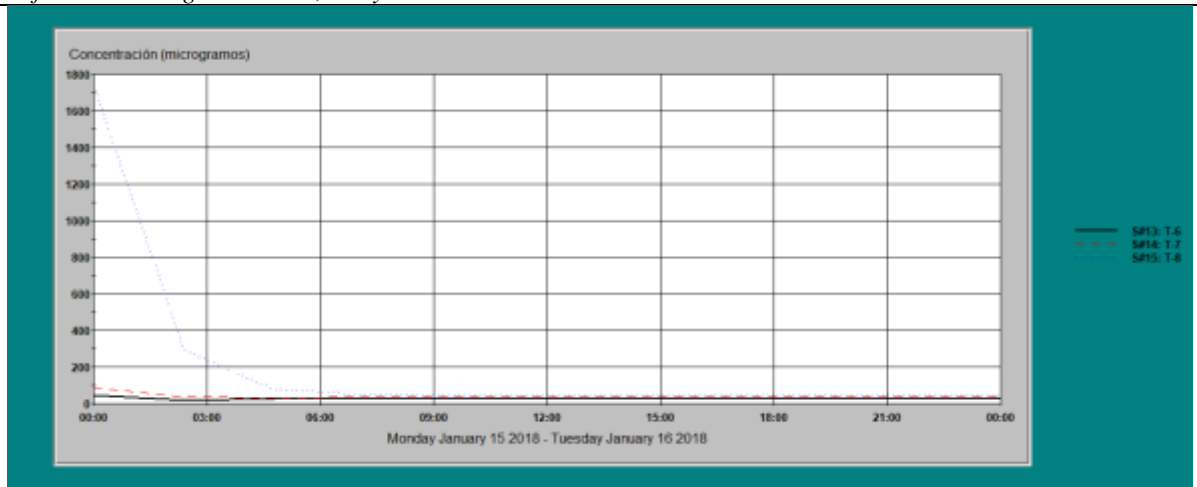


se le atribuye a un aumento de la carga contaminante, siendo este un factor relevante en las ecuaciones de gobierno del modelo.

### 6.2. Resultados de la modelación en los segmentos T-6, T-7 y T-8

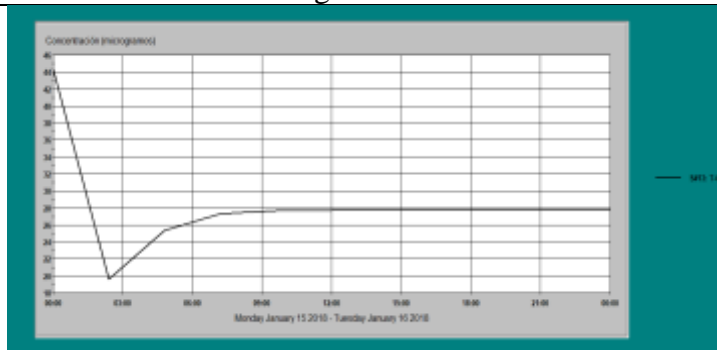
Tabla 20.

Graficas de los segmentos T-6, T-7 y T-8



Segmento - 6

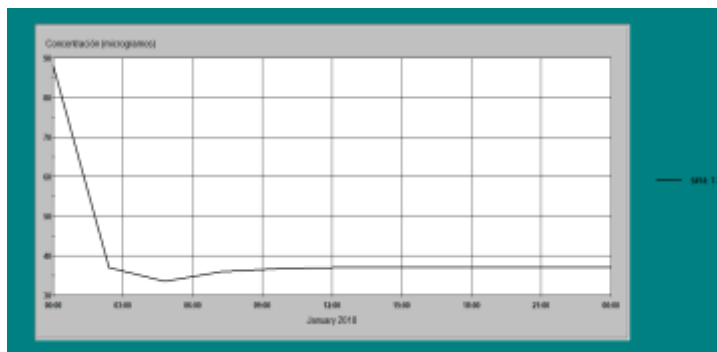
Segmento - 6



Segmento - 7

	SP13: T-6 (I)X	SP13: T-6 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	44.38
2	1/15/2018 0:00:08	44.29
3	1/15/2018 2:24:08	19.66
4	1/15/2018 4:48:08	25.38
5	1/15/2018 7:12:08	27.33
6	1/15/2018 9:36:08	27.68
7	1/15/2018 12:00:00	27.73
8	1/15/2018 14:24:08	27.74
9	1/15/2018 16:48:08	27.74
10	1/15/2018 19:12:08	27.74
11	1/15/2018 21:36:08	27.74
12	1/16/2018 0:00:08	27.74

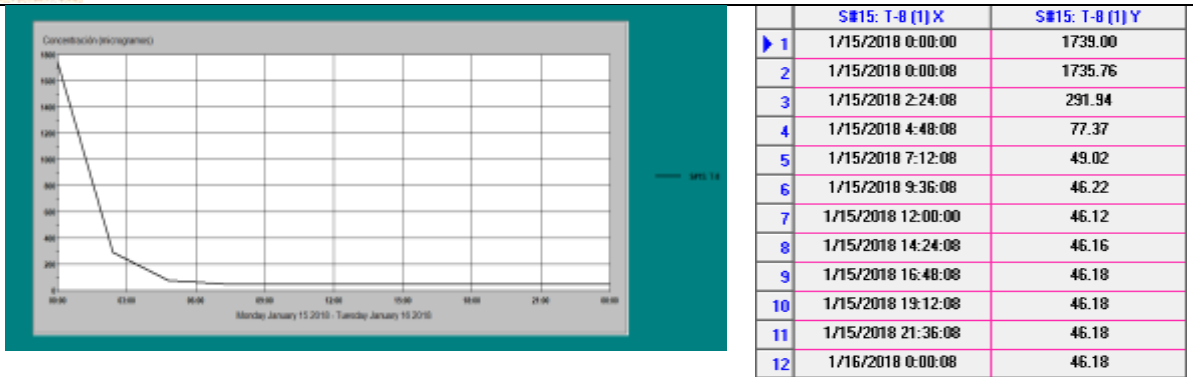
Segmento - 7



Segmento - 8

	Tot Conc ug/L (I)X	Tot Conc ug/L (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	88.00
2	1/15/2018 0:00:08	87.93
3	1/15/2018 2:24:08	37.00
4	1/15/2018 4:48:08	33.46
5	1/15/2018 7:12:08	35.86
6	1/15/2018 9:36:08	36.72
7	1/15/2018 12:00:00	36.51
8	1/15/2018 14:24:08	36.94
9	1/15/2018 16:48:08	36.94
10	1/15/2018 19:12:08	36.94
11	1/15/2018 21:36:08	36.94
12	1/16/2018 0:00:08	36.94

Segmento - 8



Nota de tabla. Elaboración propia

En la tabla 20 los segmentos T-6, T-7 y T-8 muestran un descenso en la concentración del cromo hasta llegar a un punto donde se detienen los cambios, las concentraciones iniciales de estos tres segmentos son elevados en comparación a la mayor concentración alcanzada en lo que los anteceden (T-2, T-3, T-4 y T-5). Los cambios en los tres segmentos de la gráfica inician a los 0:00:08 segundos una vez iniciada la modelación. El segmento T-6 recibe a la quebrada San Pedro, la concentración de cromo inicial disminuye hasta las 14:24:08 horas a partir de este momento se estabiliza, partiendo de una concentración de 44.38  $\mu\text{g/L}$  y terminando en 27.74  $\mu\text{g/L}$ . Para el segmento T-7 se tiene la descarga de uno de los vertimientos, las concentraciones descienden hasta las 14:24:08 horas, pasando de 88  $\mu\text{g/L}$  a 36.94  $\mu\text{g/L}$ , por ultimo tenemos el segmento T-8, este cuenta con la concentración inicial más elevada en relación a los otros dos, inicia en 1739.00  $\mu\text{g/L}$  y estabiliza a las 16:48:08 horas con una concentración final de 46.18  $\mu\text{g/L}$ .

La disminución en las concentraciones de los segmentos se le atribuye a que el segmento T-6 recibe a la quebrada San Pedro, esta posee una concentración de cromo de 0  $\mu\text{g/L}$  y tiene un caudal y un volumen mayor al de los vertimientos que se descargan en los segmentos T-7 y T-8, durante el desarrollo del proyecto se realizaron cambios en el caudal de la quebrada, se observó que existe una relación inversamente proporcional entre este parámetro y la concentración final,

cuando se disminuyó el valor de este, se observó una concentración final mayor en los tres segmentos. Los cambios en cuanto a la dilución que logra hacer el tributario en el segmento T-6, repercuten en los segmentos T-7 y T-8, después de hacer diversos ensayos se logró establecer la relación que tienen los segmentos contiguos, además de esto T-7 posee la longitud más corta de todo el tramo haciendo reducida la distancia entre T-6 y T-8.

Los segmentos T-6 y T-7, logran diluir el cromo a las 14:24:08 horas una vez iniciada la modelación, a pesar de que los dos segmentos llegan a su zona de recuperación en el mismo periodo de tiempo, no quiere decir que estos posean una zona de mezcla de dimensiones iguales, ya que esta está sujeta a la distancia de cada segmento. Por otro lado, tenemos que T-8 tarda 16:48:08 horas por lo tanto su zona de mezcla tarda más en diluir el cromo presente en ella, esto se puede atribuir a la elevada concentración inicial de dicho segmento.

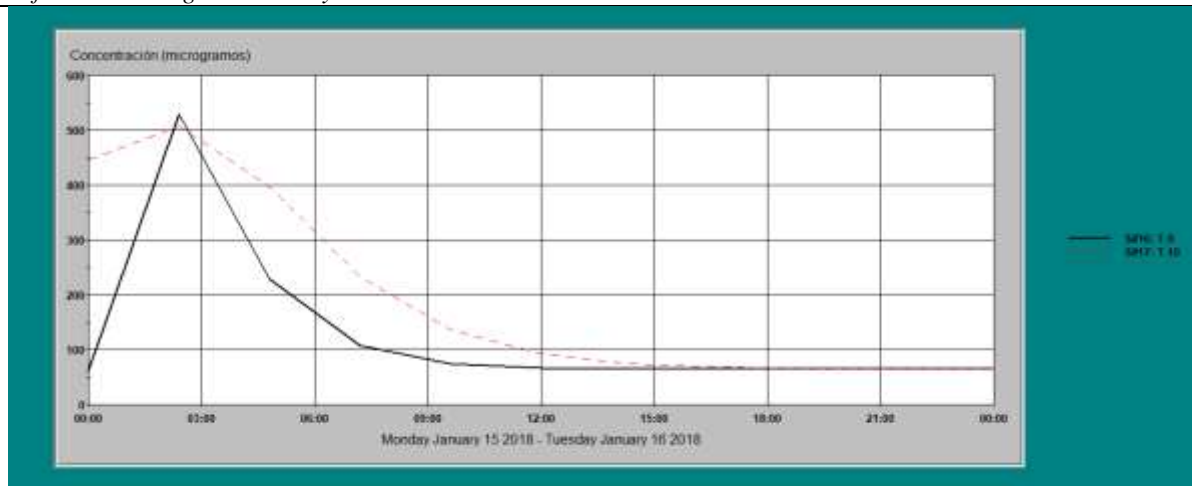
El mayor porcentaje de dilución del cromo tiene lugar en la zona de turbulencia perteneciente a la zona de mezcla del tramo T-6 con el tributario T-16 (quebrada San Pedro), en los resultados se puede observar que las concentraciones disminuyen de manera relevante en las primeras horas, pero que los cambios inician pasados 00:00:08 segundos una vez se inicia la modelación, los tramos presentan un leve incremento en las concentraciones cuando estas se encuentran por debajo del 50 % de la concentración inicial, este cambio se deduce que tiene lugar en el campo lejano de las zonas de mezcla, en el segmento T-6 se debe a que el transporte advectivo que predomina en el tramo a modelar logra transportar las concentraciones de los segmentos que se encuentran aguas arriba, en cuanto a los segmentos T-7 y T-8 estos incrementos en las concentraciones se deben a las descargas de los vertimientos, los efectos del tributario se presentan primero debido a que la masa de agua que cae al tramo es mucho mayor a la que aportan los vertimientos.

Entre los cambios que se hicieron a estos tres segmentos, se encuentra un incremento de 4 veces la profundidad de T-6 llevándola de 0.3 m a 1.2 m, se observa que las concentraciones en los segmentos a pesar de que tardan más tiempo en presentarse, al final son mayores durante la zona de mezcla en relación a la modelación inicial, este cambio se puede dar debido a que el volumen de T-6 supera notablemente el aportado por el tributario T-16.

### 6.3. Resultados de la modelación en los segmentos T-9 y T-10

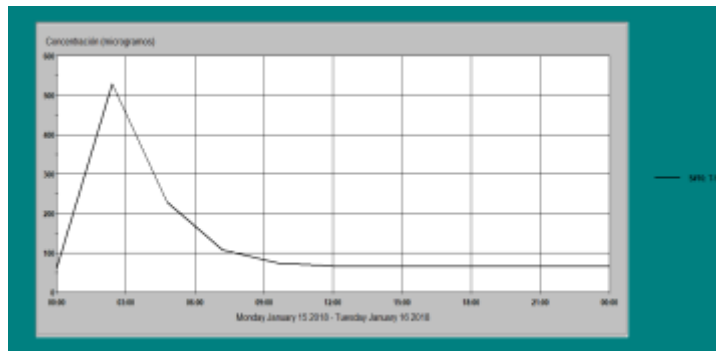
Tabla 21.

Graficas de los segmentos T-9 y T-10



Segmento – 9

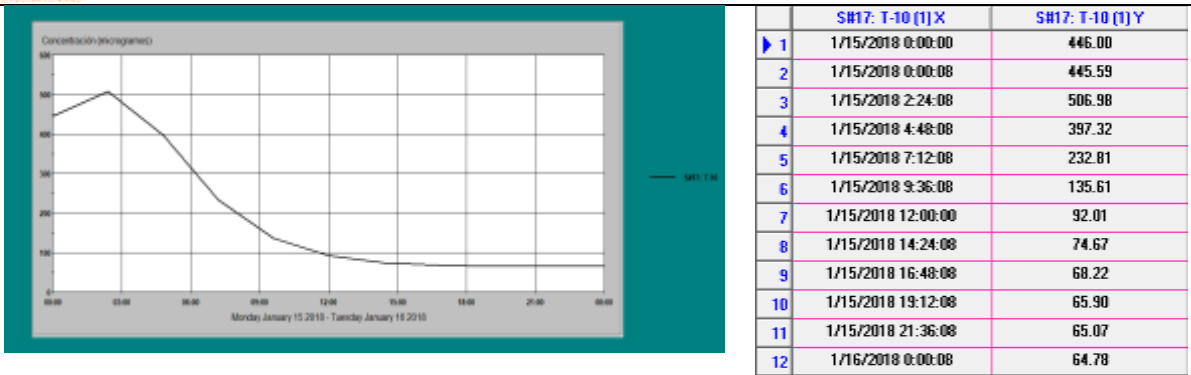
Segmento - 9



Segmento – 10

	SH#16: T-9 (I) X	SH#16: T-9 (I) Y
1	1/15/2018 0:00:00	59.68
2	1/15/2018 0:00:08	62.29
3	1/15/2018 2:24:08	528.72
4	1/15/2018 4:48:08	229.00
5	1/15/2018 7:12:08	107.36
6	1/15/2018 9:36:08	74.37
7	1/15/2018 12:00:00	66.71
8	1/15/2018 14:24:08	65.06
9	1/15/2018 16:48:08	64.72
10	1/15/2018 19:12:08	64.65
11	1/15/2018 21:36:08	64.63
12	1/16/2018 0:00:08	64.63

Segmento - 10



Nota de tabla. Elaboración propia

El segmento T-9 es el único en todo el tramo que recibe descargas de dos vertimientos, este presenta su concentración más alta a las 02:24:08 horas llegando a 528.72  $\mu\text{g/L}$  posterior a esto inicia nuevamente su descenso hasta estabilizar a las 21:36:08 horas con una concentración final de 64.63  $\mu\text{g/L}$ . El incremento que representa la gráfica se debe a que este segmento recibe la descarga de dos vertimientos, esto quiere decir que debe depurar el doble de carga contaminante en relación a los segmentos que lo anteceden, lo que se observa en la gráfica desde la concentración inicial hasta el pico más alto está representando al campo cercano o zona de turbulencia de la zona de mezcla, en esta fase influyen de manera relevante las características hidrodinámicas de los efluentes, posterior a esto el descenso en las concentraciones son producto de la dilución del cromo en el campo lejano de la zona de mezcla, influenciado principalmente por la corriente del cuerpo de agua receptor, esta zona de mezcla logra diluir el mayor porcentaje de cromo a las 21:36:08 horas, teniendo en cuenta que el segmento tardo un elevado periodo de tiempo en estabilizar, se puede decir que la zona de mezcla es extensa como consecuencia de la carga contaminante que recibe el segmento.

Con el fin de observar el comportamiento de la zona de mezcla, teniendo como indicador el tiempo que tardan los segmentos en recuperarse, se aumentó el volumen del segmento haciendo un incremento del nivel del mismo, se observó que el pico de la gráfica alcanza una

concentración menor, pero el segmento no logra recuperarse dentro del periodo del tiempo de modelación y presenta una concentración final ligeramente más alta, esto resulta útil en cuestiones de saneamiento ya que si se realizan captaciones a lo largo del segmento, disminuir las concentraciones durante la zona de mezcla reduce el nivel de cromo presente en el agua de consumo, por otro lado, tenemos que la concentración final más elevada se atribuye a que la carga contaminante aportada por los vertimientos no alcanza a diluirse en el periodo de modelación propuesto.

El segmento T-10 presenta un comportamiento similar al del tramo T-9, a diferencia del anterior este no recibe ningún tipo de vertimiento o tributario, a las 02:24:08 horas presenta un incremento en su concentración pasando de 445.59  $\mu\text{g/L}$  a 506.98  $\mu\text{g/L}$ , este es el único aumento de concentración que se registra en este segmento ya que desde los 0:00:08 segundos de iniciada la modelación, comienza a decrecer la concentración inicial.

Los incrementos que se presentan en T-10 son producto del transporte advectivo que prima en el tramo principal, el flujo logra transportar los componentes hasta este segmento, llevando un volumen de agua a un proceso de dilución, en este segmento no se puede establecer una zona de mezcla definida, ya que carece de una zona de turbulencia o dispersión al no tener una descarga directa. Se puede decir que el segmento T-10 solo cuenta con la fase de campo lejano influenciada principalmente por el flujo advectivo de la corriente de agua del tramo principal, por lo tanto, la dilución posible del contaminante es más lenta y no alcanza a completarse en el periodo de modelación.

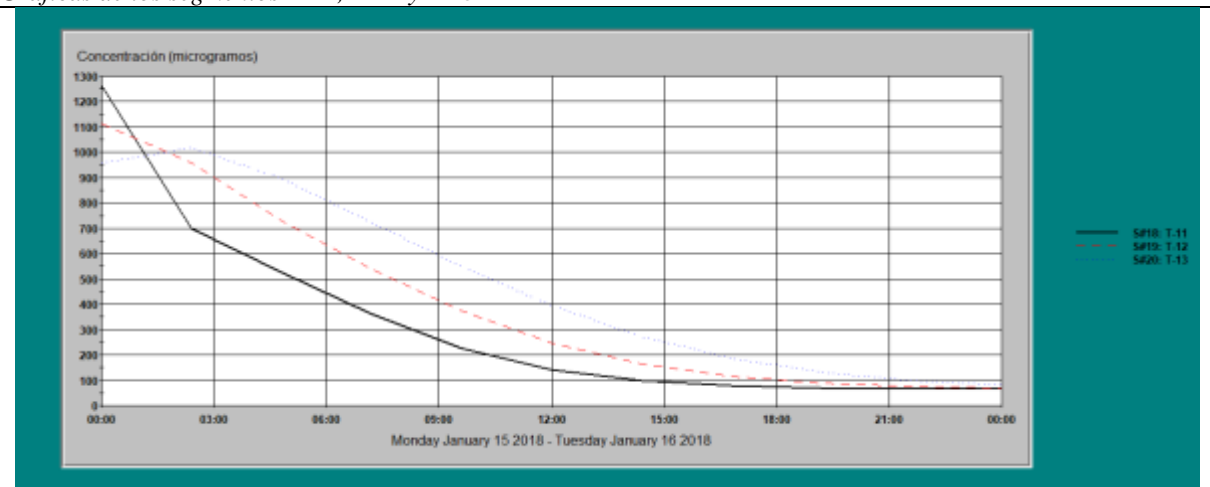
En los tramos anteriores se establece una relación debido a la influencia que se observó del segmento T-9 sobre T-10, al incrementar las concentraciones en los caudales de T-9 se aumenta la carga contaminante que llega al cuerpo de agua receptor como consecuencia de esto

las concentraciones finales en T-9 son más altas al igual que incrementan las concentraciones al final del periodo de modelación en T-10. Por otro lado, tenemos que al incrementar el volumen en T-9 la zona de mezcla no se alcanza a establecer en ninguno de los dos segmentos y al final las concentraciones son más elevadas al no alcanzar la dilución máxima posible del cromo.

#### 6.4.Resultados de la modelación en los segmentos T-11, T-12 y T-13

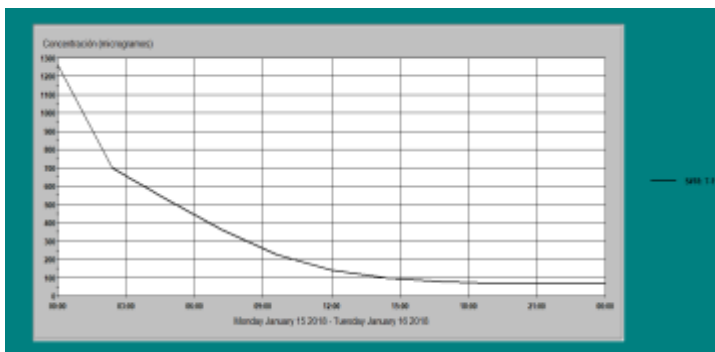
Tabla 22.

Graficas de los segmentos T-11, T-12 y T-13



Segmento - 11

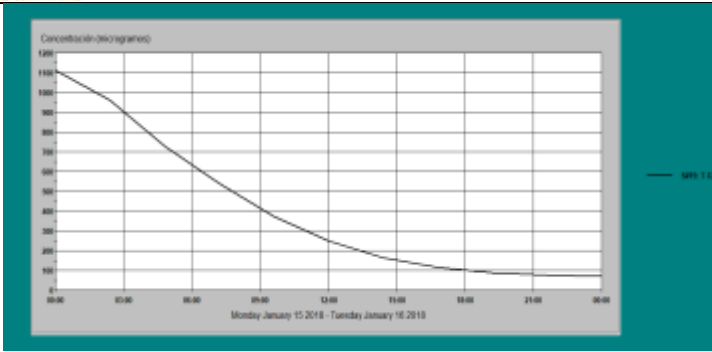
Segmento - 11



Segmento - 12

	S#18: T-11 (T)X	S#18: T-11 (T)Y
1	1/15/2018 0:00:00	1265.00
2	1/15/2018 0:00:08	1264.00
3	1/15/2018 2:24:08	698.83
4	1/15/2018 4:48:08	524.20
5	1/15/2018 7:12:08	360.29
6	1/15/2018 9:36:08	224.96
7	1/15/2018 12:00:00	141.50
8	1/15/2018 14:24:08	98.44
9	1/15/2018 16:48:08	78.65
10	1/15/2018 19:12:08	70.16
11	1/15/2018 21:36:08	66.70
12	1/16/2018 0:00:08	65.33

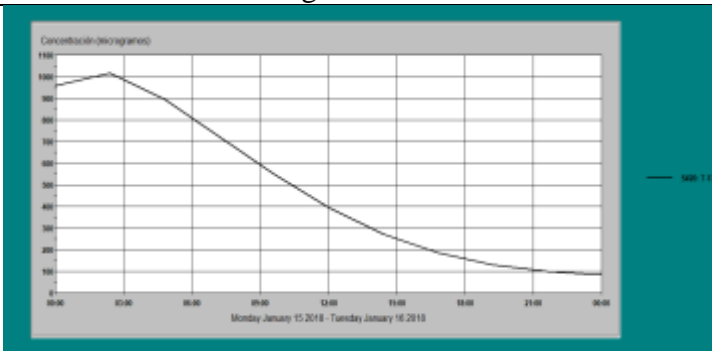
Segmento - 12



	SH19: T-12 (I)X	SH19: T-12 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	1112.00
2	1/15/2018 0:00:08	1112.15
3	1/15/2018 2:24:08	959.55
4	1/15/2018 4:48:08	727.61
5	1/15/2018 7:12:08	538.97
6	1/15/2018 9:36:08	374.06
7	1/15/2018 12:00:00	246.98
8	1/15/2018 14:24:08	163.06
9	1/15/2018 16:48:08	114.28
10	1/15/2018 19:12:08	88.37
11	1/15/2018 21:36:08	75.49
12	1/16/2018 0:00:08	69.40

Segmento - 13

Segmento - 13



	SH20: T-13 (I)X	SH20: T-13 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	959.00
2	1/15/2018 0:00:08	959.15
3	1/15/2018 2:24:08	1017.40
4	1/15/2018 4:48:08	895.73
5	1/15/2018 7:12:08	723.45
6	1/15/2018 9:36:08	549.20
7	1/15/2018 12:00:00	393.61
8	1/15/2018 14:24:08	271.01
9	1/15/2018 16:48:08	185.52
10	1/15/2018 19:12:08	131.43
11	1/15/2018 21:36:08	99.79
12	1/16/2018 0:00:08	82.39

Nota de tabla. Elaboración propia

Los segmentos T-11 y T-12 presentan una disminución continua, T-11 recibe a la quebrada Chingacio, la concentración de cromo presente en este tributario es inferior a la del segmento, se deduce que el tributario ayuda a diluir la concentración de cromo inicial en estos dos segmentos, para T-11 tenemos 1265 µg/L al inicio del periodo de la modelación y termina a las 00:00:08 segundos del día siguiente con 65.33 µg/L, en cuanto al segmento T-12 la concentración inicial es de 1112 µg/L y finaliza con 69.40 µg/L. A pesar de que los segmentos presentan el mismo comportamiento la reducción en las concentraciones es menos progresiva en T-11 en este los cambios van de 1264 µg/L a 698.83 µg/L, mientras que en T-12 pasa de 1112.15 µg/L a 959.55 µg/L. Por otro lado, tenemos que T-13 el último segmento del tramo presenta un leve incremento en su concentración a las 02:24:08 horas pasando de 959 µg/L a 1017.40 µg/L, posterior a esto las concentraciones decrecen hasta llegar a 82.39 µg/L, este incremento se les atribuye a las descargas acumuladas a lo largo del tramo.



La disminución en las concentraciones de estos tres segmentos se debe a que la carga contaminante que lleva la descarga del tributario es mucho menor a la del segmento receptor, logrando diluir las concentraciones del tramo principal, los segmentos continuos a T-11 al igual que este, también presentan dilución de su concentración inicial debido al transporte advectivo que predomina sobre los constituyentes en el tramo principal. El flujo de la corriente también contribuye al incremento de la concentración en el segmento T-13, siendo este el de menor concentración de los tres que se involucran en este fragmento del tramo principal, en este segmento el flujo advectivo lleva su concentración por encima de 1000  $\mu\text{g/L}$  al igual que T-11 y T-12.

La influencia de la quebrada sobre los segmentos se comprobó incrementando el caudal de dicho tributario, logrando incrementar el volumen de descarga al igual que la carga contaminante, una vez hecho este cambio las concentraciones al final de la modelación fueron menores en relación a la modelación principal, cabe aclarar que durante este cambio ninguno de los segmentos llegó a estabilizar durante el periodo de modelación.

Con el fin de encontrar una zona de mezcla en estos tres segmentos, se realizaron cambios en el volumen del cuerpo receptor, ampliando el nivel de los segmentos, para lograr un mayor volumen de agua disponible, a partir de esto se observó que la dilución transcurría más lenta y al final las concentraciones eran más altas, por lo que se infiere que el periodo de tiempo de la modelación no fue suficiente para que los segmentos definieran su zona de mezcla.

Posteriormente se realizó el cambio contrario, disminuyendo el nivel de los segmentos, al final se observaron unas concentraciones finales mucho mayores a las arrojadas por el cambio anteriormente mencionado, a pesar de que el volumen de agua a diluir en el cuerpo receptor era

menor, la descarga del tributario no es suficiente para estabilizar los cambios en el periodo de tiempo de modelación indicado.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. Conclusiones

El área de los segmentos junto con el caudal de los cuerpos de agua y los fluidos involucrados dentro de la modelación, son los factores más influyentes en los resultados finales de las concentraciones del cuerpo de agua receptor respecto al tiempo.

Factores como el caudal, volumen y área de los segmentos, son determinantes en las ecuaciones de gobierno que rigen el modelo, el incremento o disminución de estos dos factores influyen en los valores de las variables que conforman las ecuaciones, los cambios más relevantes tienen lugar en los términos advectivos, dispersivos y en las tasas de carga, siendo estas últimas encontradas de manera autónoma por el modelo cuando este multiplica el caudal por la concentración.

El volumen de agua disponible en el cuerpo receptor es determinante en el comportamiento del cromo. Las modificaciones que sufra el volumen del segmento son directamente proporcionales a la velocidad con que el modelo reporta los cambios de concentración, en este sentido, se tiene que, a mayor volumen de agua disponible, más tiempo tardara el modelo en registrar los cambios en la dilución del cromo.

El transporte advectivo predomina sobre el cuerpo de agua receptor desplazando el cromo que se encuentra en el fluido por medio de la corriente de agua, se identificó que los cambios que se realizan en los segmentos repercuten de manera directa cuando estos son continuos, disminuir el caudal reduce la velocidad de la corriente, logrando limitar la relación de los segmentos que se encuentran continuos dentro del tramo principal.

La velocidad de la corriente y el volumen del tramo principal son determinados por el caudal con el que se configure el trayecto del cuerpo receptor, cuando se disminuye este caudal, las concentraciones que el modelo registra en los segmentos son mucho mayores, lo contrario sucede cuando se aumenta dicha variable, dicho fenómeno ocurre por la reducción en el volumen de agua disponible.

La zona de mezcla inicia en la descarga del efluente y culmina cuando la sustancia contaminante ha logrado su máxima dilución posible. El tiempo se tomó como indicador para establecer la extensión de la zona de mezcla, teniendo en cuenta el criterio anterior, se concluyó que los segmentos que tardan mayor tiempo en estabilizar los cambios de las concentraciones poseen una zona de mezcla más extensa.

Los fragmentos en donde el modelo no presenta estabilización en sus concentraciones, se concluyó que la zona de mezcla es muy amplia y no logra la dilución máxima posible de cromo durante las 24 horas en las que se desarrolló la modelación.

Los segmentos que se encuentran cerca de las quebradas Chingacio y San Pedro, presentan una mayor dilución del cromo.

La principal herramienta asociada a la modelación realizada con el software WASP para establecer programas de saneamiento, es la zona de mezcla, esta cumple un papel importante al momento de establecer puntos de captación ya que brinda información clara sobre las diversas etapas de dilución por las que atraviesa el cromo a lo largo de los segmentos que conforman el tramo principal.

La normatividad colombiana no establece un límite máximo en las concentraciones de cromo trivalente (Cr III) para aguas superficiales o potables. Sin embargo, las elevadas

concentraciones de este metal en aguas con condiciones específicas de pH y temperatura, pueden acondicionar el medio para la formación de cromo hexavalente, sustancia de interés sanitario altamente tóxica, la cual, para destinación del recurso para consumo humano, según lo establecido en el Artículo 38 del Decreto 1594 de 1984 no puede tener una concentración superior a 0.05 mg/L. Por todo lo anterior, será interesante evaluar la especiación de este metal y los riesgos asociados a su transporte aguas abajo, donde se hace captación en la planta de tratamiento de agua potable Tibitoc.

## **7.2. Recomendaciones**

Las variables hidráulicas y de calidad de agua que se usen durante la modelación deben determinarse de manera experimental con métodos de campo y laboratorio, evitando al máximo el uso de ecuaciones empíricas ya que la veracidad de estos datos incrementa la exactitud de las predicciones que se realicen con el modelo.

La modelación de la dinámica de contaminantes conservativos es una herramienta interesante de gestión, para el caso de la Cuenca Alta del Río Bogotá, donde se tiene una problemática asociada a los vertimientos con cromo. Si bien durante los últimos años se han generado instrumentos y acciones para mitigar las problemáticas que generan este tipo de industrias, no se puede desconocer que en la actualidad permanece la problemática. Con el fácil acceso y que permitan una representación más aproximada de la realidad, este tipo de instrumentos serían un complemento oportuno para la gestión del riesgo o alertas tempranas ante el ingreso para la Planta de Tratamiento de Tibitoc.

Las modelaciones aplicadas a cuerpos de agua de alta montaña como la Cuenca Alta del Río Bogotá, deben ser antecedidas por un análisis del modelo que se pretende usar, ya que esto

permite conocer la influencia de los factores que más inferencia tienen sobre las predicciones y simulaciones del software, esto resulta de gran utilidad al momento de generar un plan de trabajo eficiente que articule las habilidades y recursos necesarios para suplir la demanda de información del modelo.

Los estudios de predicción y simulación sobre la Cuenca Alta del Río Bogotá empleando modelos matemáticos, deben realizarse en periodo de estiaje y de lluvias, ya que los dos presentan condiciones diferentes para el cuerpo de agua, alterando las condiciones y constituyentes del recurso hídrico, por lo tanto la capacidad de asimilación y depuración del río que se puede estimar a través del modelo cambiara al igual que se deben replantear las medidas de contingencia y de mitigación relacionadas con el cuerpo de agua.

Además de las concentraciones de cromo trivalente (Cr III), se debe determinar el valor de pH, ya que este es un factor relevante en la solubilidad del cromo, esto permitirá inferir de manera más clara el comportamiento del metal dentro del cuerpo de agua.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- aktiva Servicios Financieros. (2013). *EL CUERO Y SUS MANUFACTURAS EN COLOMBIA*. Obtenido de AKTIVA: <http://aktiva.com.co/blog/Estudios%20sectoriales/2013/cuero.pdf>
- Allison, J., & Allison, T. (2005). *Partition coefficients for metals in surface water, soil, and waste*. Athens: U.S. EPA.
- Alvarez, A., Cuello, J., & Trento, A. (2006). Transporte de sedimentos y metales pesados con WASP 7.0. *Mecánica computacional*, 1425-1440.
- Amaya, L., Arriola, D., & Cerna, Z. (2015). *Modelación de la calidad fisicoquímica de las aguas del Río Suquiapa*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Ambrose, R., & P.E., J. (2009). *WASP7 Stream transport - model theory and User's guide*. Atlanta: U.S. EPA.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2013). *Metodología para la definición de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Autoridad Nacional del Agua. (2017). *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua*. Lima: Servicios Gráficos de Anghelo M. Rodriguez Paredes.
- Barbosa, S. (2013). *Modelación hidrodinámica y de calidad de agua del sistema integrado embalse Muña-Río Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Barchiesi, G., Caminal, F., Garcia, C., Herrero, H., & Díaz, J. (2015). Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en ríos usando ADCP. *Revista Iberoamericana del Agua*, 26-37.
- Bedoya, J. (2007). *Modelo de simulación de transporte de metales pesados en la cuenca baja del río Tunjuelo*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Boglione, R., Cassina, D., Gentinetta, F., Griffa, C., & Panigatti, M. (2012). Usod de Escherichia Coli para biorremediación de efluentes contaminados por cromo (VI). *Avances de Ciencias e Ingeniería*, 11-24.
- Camacho, L., & Díaz - Granados, M. (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y de calidad del agua en ríos - caso río Bogotá. *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de Iso Recursos Hídricos*, 73-82.
- Campos, S. (2010). Contaminación en la cuenca alta del río Bogotá: diagnóstico y ensayo. *Revista Épsilon*, 191-202.
- Cardini, J., Márisco, D., Oliver, N., & Zabalett, A. (2004). Efecto de los coeficientes de dispersión sobre la modelación bidimensional del transporte de contaminantes. Caso de estudio. *Mecánica computacional*, 1-14.

- Cardona, C. (2009). *Desarrollo de un modelo espacio - temporal de la hidrodinámica y la temperatura de un cauce fluvial, caso estudio Fucha*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Carvajal, R., Gaitán, A., & Téllez, J. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia*, 50-61.
- Carvajal, L., Moreno, A., & Toro, M. (2008). Revisión de criterios y metodologías de diseño de redes para el monitoreo de la calidad del agua en ríos. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 57-68.
- Castaño, J. (2015). *Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Castillo, J., & Espinoza, C. (2005). *Modelo de simulación para la calidad del agua en un río*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Castro, M. (2015). *Aplicación del Qual2Kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, Departamento de Caldas, Colombia*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Chamon, A., Elahi, S., Faiz, B., & Mondol, M. (2013). Chromium in urban soil-plant-water ecosystems. *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*, 173-187.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water Quality Modeling*.
- Chapra, S., Pelletier, G., & Tao, H. (2012). *Qual 2K: A Modeling framework for simulating river and stream water quality ( version 2.12)*. Medford: Tufts University.
- Consorcio Ecoforest Ltda.- Planeación Ecológica Ltda. (2006). *Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca río Alto Bogotá - 2120-19*. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). *Boletín del Índice de calidad del agua en corrientes superficiales "ICA" 2016 - II*. Bogotá : Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Corredor, J. (2006). El residuo líquido de las curtiembres estudio de caso: Cuenca Alta del Río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 14-28.
- Cotton, F., & Wilkinson, G. (1980). *Advanced inorganic chemistry*. United States of America: Jhon Wiley & Sons.
- Díaz, B. (2004). *Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Díaz, F., & Pájaro, Y. (2012). Remoción de cromo hexavalente de aguas contaminadas usando quitosano obtenido de exoesqueleto de camarón. *Revista Colombiana de Química*, 283-298.
- Espinoza, R., Vinicio, A., & Zavaleta, R. (2013). *Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del Río Suquiaipa, Santa Ana*. San Salvador: Universidad de El Salvador.



- Gacia, H. (2008). *Modelación de la calidad del agua en corrientes naturales mediante sistemas no lineales acoplados*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Gamboa, A. (2008). *Propuesta de elaboración de un software para la evaluación del impacto ambiental de proyectos, obras o actividades*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- García, R., Marcó, L., Yacelli, G., & Torres, G. (2014). Dispersión de contaminantes en cuenca Tumaque entre Lara y Yaracuy en Venezuela. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 79-93.
- Gobernación de Cundinamarca. (2015). *Diagnóstico económico, ambiental y social de los curtidores de Choconta y Villapinzon (Cundinamarca)*. Bogotá : Convenio 051 Gobernación de Cundinamarca - Secretaria de Ambiente - Univerisdad Nacional de Colombia.
- Gracia, J., & Maza, J. (1998). Capítulo 11 - Morfología de Ríos. En U. N.-I. Ingeniería, *Manual de Ingeniería de Ríos* (págs. 1-39). Ciudad de Mexico: Comisión Nacional del Agua.
- Gracia, J., & Maza, J. (2002). *Manual de Ingeniería de Ríos*. Mexico D. F.: Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- Green, P., Darby, J., M. ASCE, P., & Laybourne, S. (2013). Effects of Storage Conditions on Chromium (III) and Chromium (VI) in Two Types of Potable Water. *Journal of Environmental Engineering* , 302-306.
- Guadalupe, G. (2013). *Laboratoriode hidráulica de canales*. Chihuahua: Universidad Autonoma de Chihuahua.
- Hernández, F., Nolasco, E., & Salguero, M. (2016). *Determinación del índice de calidad del agua NSF y modelación del cromo hexavalente en la parte alta del Río Suquiapa, Santa Ana, El Salvador*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Hernández, J. (2014). *Análisis de la capacidad predictiva de un modelo dinámico de calidad del agua aplicando técnicas de computación evolutiva, optimización multiobjetivo y procesamiento recursivo de datos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Hernandez, J., & Martinez, D. (2016). *Modelación hidrodinamica y de la calidad del agua para la evaluación ambiental de vertimientos generados a la ciénaga Mesolandia, Atlántico - Colombia*. Barranquilla: Universidad de La Costa.
- Lopez, S., Mijaylova, P., Ramírez, E., & Cardoso, L. (2016). *Tratamiento de efluentes del proceso de curtido del cromo*. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua, Subcoordinación de Tratamientode Aguas Residuales.
- Lozano, G., Peña, L., & Zapata, M. (2003). Selección del modelo de simulación de calidad de agua en el proyecto "modelación de corrientes hidricas superficiales en el departamento del Quindio". *Seminario Internacional La Hidroinformatica en la Gestión Integrada de los Rcurso Hídricos*, 49-56.
- Martínez Buitrago, S. Y., & Romero Coca, J. A. (2016). REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA INDUSTRIA DE LAS CURTIEMBRES EN SUS PROCESOS Y PRODUCTOS: UN ANÁLISIS DE SU COMPETITIVIDAD. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 113-124.

- McKechnie, D., Sahoo, D., Sato, C., & Schnoor, J. (1987). *Processes, coefficients, and models for simulating toxic organics and heavy metals in surface waters*. Georgia: Environmental research laboratory office of research and development U.S. Environmental Protection Agency.
- Mendez Pampin, R. (2007). *Producción limpia en la industria de curtiembre*. Coruña España.
- Ministerios de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Guía ambiental para la industria del curtido y preparado de cuero*. Bogotá: Panamericana Formas e Impresos S.A.
- Nordberg, G. (1998). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Madrid, España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Subdirección General de Publicaciones.
- Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá. (2018 de Marzo de 2017). *Orarbo*. Obtenido de Orarbo: <http://orarbo.gov.co/es/indicadores?id=1007&v=1>
- Oliveira, H. (2012). Chromium as an Environmental Pollutant: Insights on Induced Plant Toxicity. *Journal of Botany*, 1-9.
- Osorio, L. (2011). *Iniciativas Ambientales en la Cuenca Alta del Río Bogotá: Curtiembres de Villapinzón y Chocontá y manejo integral del agua en Tominé*. Bogotá: Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia.
- Peña, C. (2010). *Procesos de monitoreo a la calidad hídrica del río Bogotá realizados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR -*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Petroni, R. (2000). Desarrollo y aplicación de un modelo bidimensional de calidad de agua. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 34-44.
- Ramírez. (2012). *Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España*. Valencia: Universidad Politecnica de España.
- Ríos, J. (2013). *Transporte de contaminantes en sistemas fluviales y evaluación de la aplicabilidad del modelo WASP en las cuencas de los Ríos Elqui y Choapa, región de Coquimbo, Chile*. La Serena: Universidad de La Serena-Facultad de Ingeniería de Minas.
- Rodriguez, A. (2016). *Metodología para el análisis de zonas de mezcla de vertidos puntuales en medios fluviales*. Santander: Universidad de Cantabria - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- Rodriguez, M. (1983). *Estudio de un modelo de autodepuración natural para la cuenca del río Ebro*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Rojas, Z. (2010). *Estudio económico-financiero del aprovechamiento de las grasas extraídas del residuo de descarte "unche" derivado del proceso de curtición en el municipio de Villapinzón - Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .
- Sámano, L. (2011). *Modelos numéricos de calidad del agua en un sistema de información geográfica*. Santander: Universidad de Cantabria.

- Santos, T. (2015). *Resumen ejecutivo modelación de calidad de agua del río Bogotá y quebradas Chingacio y San Pedro con efluentes de curtiembre*. Bogotá: Convenio 051. Gobernación de Cundinamarca - Universidad Nacional de Colombia.
- Sotelo, A. (2012). *Especiación del cromo en la solución del suelo de tres suelos enmendados con biosólidos bajo diferentes condiciones oxidoreductoras*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Tobón, C. (2013). *Metabolismo social para el manejo sostenible de los recursos naturales. El agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- U.S. EPA - CIATEC, A.C. (2006). *Manual de buenas prácticas ambientales para la curtiembre en Centroamérica*. Ciudad de México: U.S. EPA.
- UNAL-CAR, I. (2009). *Cartilla de producción más limpia en curtiembres*. Bogotá D.C.
- Universidad de los Andes - Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP. (2002). *Modelación de la Calidad del Agua del Río Bogotá*. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP.

# ANEXOS

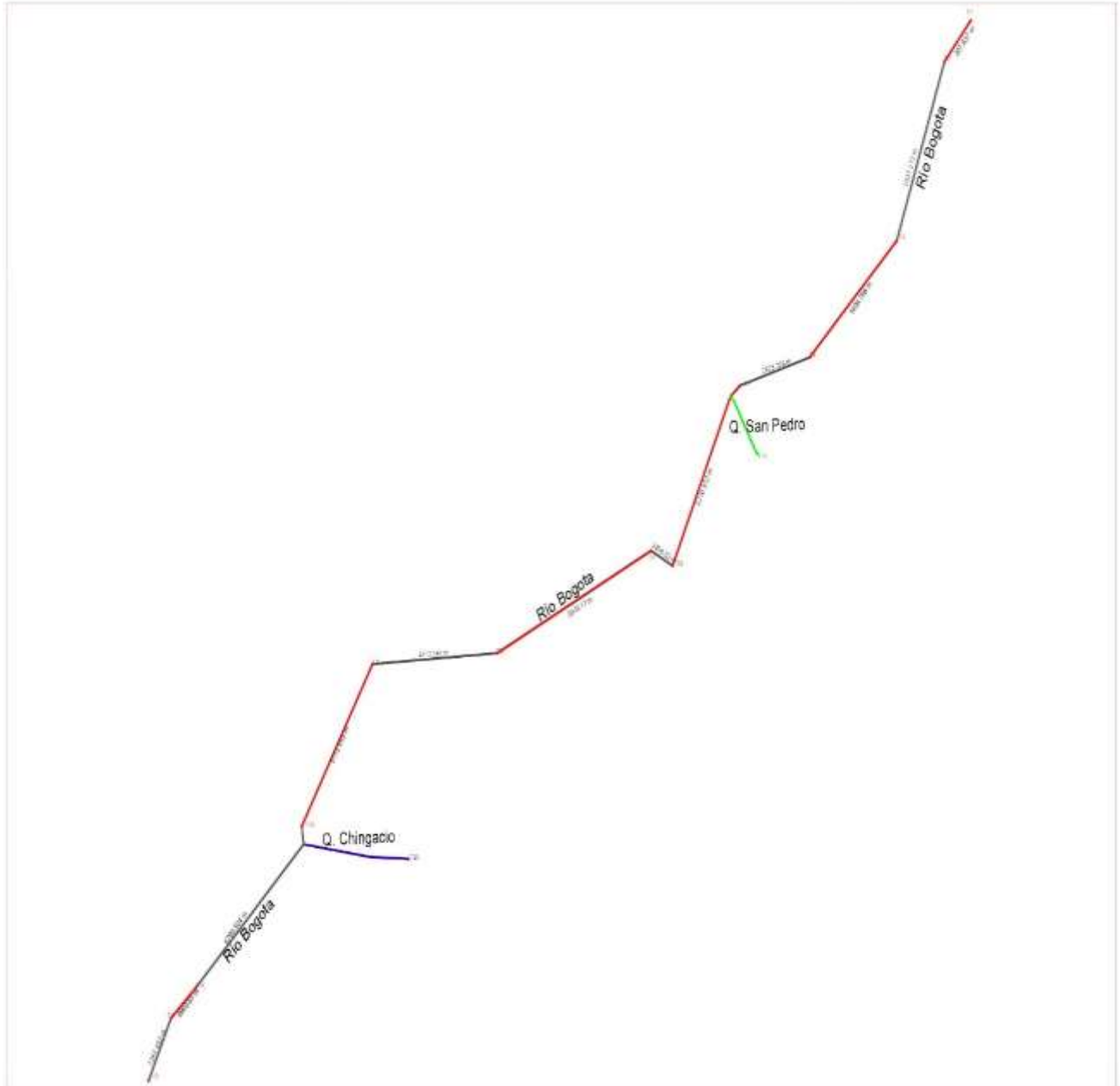
### Anexo A. Balance de materia de las etapas de curtido.

Etapa	Proceso	Descripción	Entradas	Salidas: Sólidos (s), líquidos (l), gas (g)
Almacenamiento	Salado	Adición de sal para preservar la piel	Sal	Sal (s)
	Remojo	Rehidratación de la piel	Enzimas Calcio Carbonato Agua Humectantes, bactericidas, detergentes, desinfectantes.	Grasa del descarte (s), materia orgánica (l), Tensoactivos (l) y Cloruros.
Ribera	Pelambre y encalado	Hinchazón de la epidermis, depilado, endurecimiento de fibras para facilitar el curtido	Sulfuro de sodio, cal, enzimas, sodio, hidrosulfito.	Sulfuro de hidrogeno (g). grasa, pelo (s), Materia orgánica (s), pH >11, aceite y grasa (l). Grasa (s), proteínas disueltas (l).
	Descarne	Remoción de tejido graso, tejido subcutáneo, músculo y grasa		Grasa (s), proteínas disueltas (l).
	Dividido	Separación de la carnaza y la flor		
Curtido	Desencalado	Eliminación de residuos de cal y sodio	Ácido fórmico, ácido sulfúrico, amonio, sulfato, sodio, bisulfito.	Sulfuro de hidrógeno (g), cal (l), sulfuro de sodio (l), nitrógeno orgánico (l).
	Purga	Eliminación de impurezas por medio de enzimas	Enzimas	Materia orgánica (l)
	Piquelado	Acidificación de la piel para prevenir hinchazón y permitir la fijación de sales de cromo.	Ácido fórmico, ácido sulfúrico	Cloruros, pH bajo (l).
	Desengrase		Sal, solventes	Solventes (g), aceites y grasas (l), materia orgánica (l)
	Alcalinización	Adición de sales para aumentar el pH y facilitar la reacción del cromo 3+	Bicarbonato de sodio, óxido de magnesio, carbonato de sodio.	Carbonato de sodio (l), ácidos orgánicos (l).
	Deshidratación	Aplicación de presión para eliminar humedad		
	Separación	Cortado para obtener el espesor deseado		Polvo de cromo (s)
Recurtido, teñido, engrase	Recurtido catiónico	Acidificación, adición de sales de cromo para aumentar la elasticidad y suavidad	Sulfato de cromo, ácidos orgánicos	Materia orgánico (l), cromo (l).
	Teñido	Otorgamiento del color deseado de la piel	Agentes colorantes	Amoniaco (g), tintes, ácido, amoníaco (l).

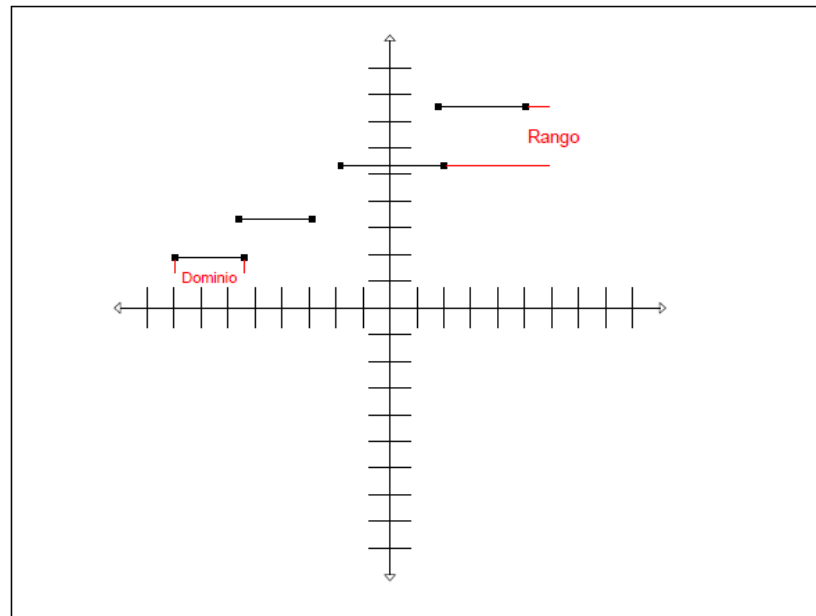
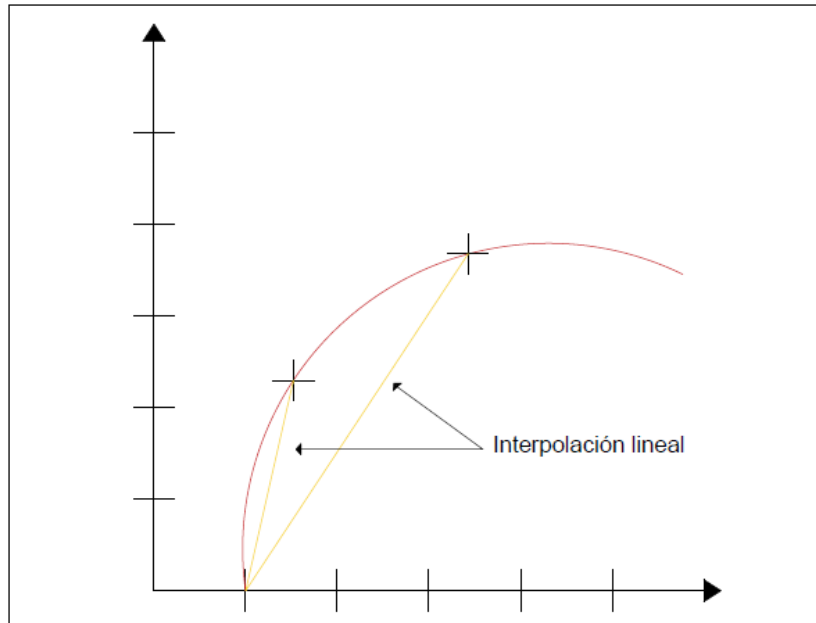
<b>Etapa</b>	<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Entradas</b>	<b>Salidas: Sólidos (s), líquidos (l), gas (g)</b>
	Engrase	Saturamiento del cuero con grasa animal	Aceite animal	Aceites y grasa (l), materia orgánica (l).

Nota de tabla. Tomado de Osorio, L. (2011). Iniciativas Ambientales en la Cuenca Alta del Río Bogotá: Curtiembres de Villapinzón y Chocontá y manejo integral del agua en Tominé. Bogotá: Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia.

**Anexo B. Segmento a modelar.**



### Anexo C. Tipos de interpolación del modelo WASP.





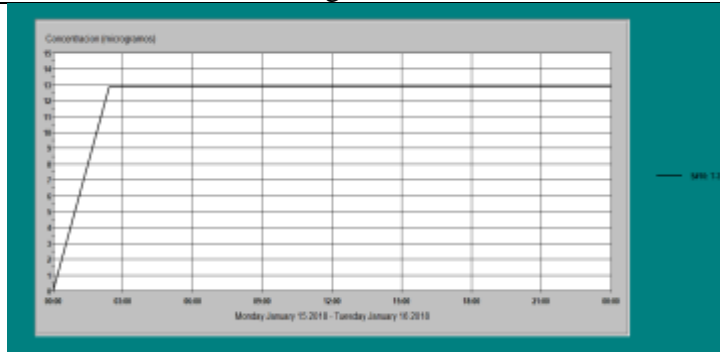
### Anexo D. Datos de los vertimientos para la modelación

Nomenclatura	Cr trivalente ( $\mu\text{g Cr/L}$ ) ppm	Caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Distancia (m)	SST ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )*	Coefficiente de partición (Kd) ( $\text{m}^3/\text{g}$ )	Fracción disuelta
V-1	6890000	0,0085	2,36111E-06	7,3	6000		0,97031
V-2	6890000	0,0085	2,36111E-06	107	6000		0,97031
V-3	6890000	0,0085	2,36111E-06	4,4	6000		0,97031
V-4	6890000	0,0085	2,36111E-06	8,3	6000	0,0000051	0,97031
V-5	6890000	0,0085	2,36111E-06	69	6000		0,97031
V-6	6890000	0,0085	2,36111E-06	53,3	6000		0,97031
V-7	6890000	0,0085	2,36111E-06	141,2	6000		0,97031

\* El resultado de los SST fue tomado de la muestra 2323-16 ESTACIÓN LM CHINGACIO determinados en el reporte 2016-2 de la CAR.

**Anexo E. Relación de los segmentos contiguos**

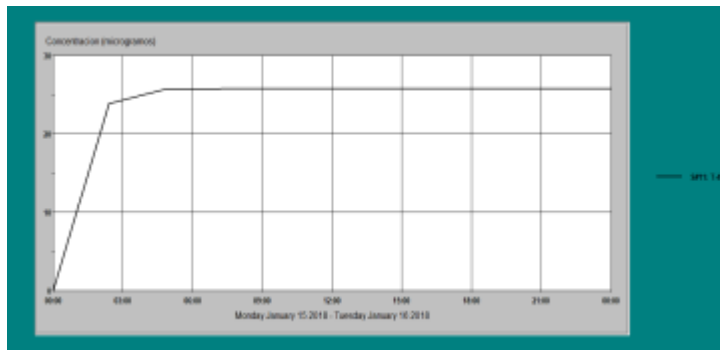
Segmento - 3



Segmento - 3

	SW10: T-3 (I)X	SW10: T-3 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	0.00
2	1/15/2018 0:00:08	0.07
3	1/15/2018 2:24:08	12.83
4	1/15/2018 4:48:08	12.90
5	1/15/2018 7:12:08	12.90
6	1/15/2018 9:36:08	12.90
7	1/15/2018 12:00:00	12.90
8	1/15/2018 14:24:08	12.90
9	1/15/2018 16:48:08	12.90
10	1/15/2018 19:12:08	12.90
11	1/15/2018 21:36:08	12.90
12	1/16/2018 0:00:08	12.90

Segmento - 4

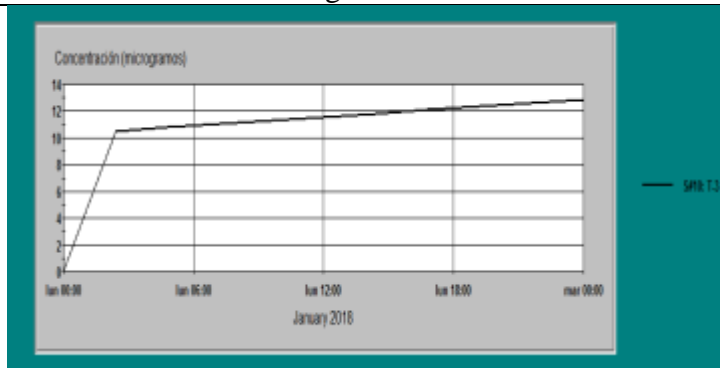


Segmento - 4

	SW11: T-4 (I)X	SW11: T-4 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	0.00
2	1/15/2018 0:00:08	0.04
3	1/15/2018 2:24:08	23.86
4	1/15/2018 4:48:08	25.69
5	1/15/2018 7:12:08	25.78
6	1/15/2018 9:36:08	25.78
7	1/15/2018 12:00:00	25.78
8	1/15/2018 14:24:08	25.78
9	1/15/2018 16:48:08	25.78
10	1/15/2018 19:12:08	25.78
11	1/15/2018 21:36:08	25.78
12	1/16/2018 0:00:08	25.78

Después de las modificaciones de caudal en el vertimiento que cae al segmento 3

Segmento - 3

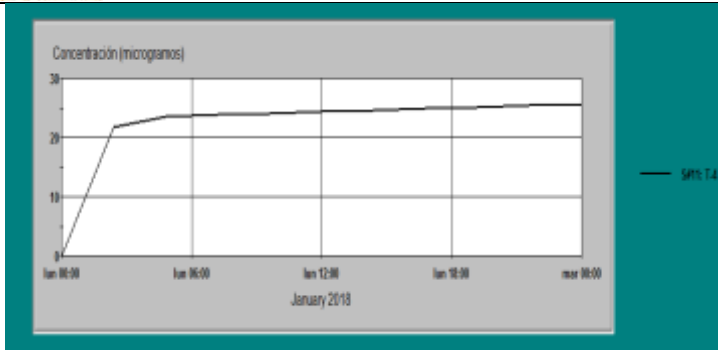


Segmento - 3

	SW10: T-3 (I)X	SW10: T-3 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	0.00
2	1/15/2018 0:00:08	0.06
3	1/15/2018 2:24:08	10.48
4	1/15/2018 4:48:08	10.79
5	1/15/2018 7:12:08	11.05
6	1/15/2018 9:36:08	11.30
7	1/15/2018 12:00:00	11.56
8	1/15/2018 14:24:08	11.82
9	1/15/2018 16:48:08	12.08
10	1/15/2018 19:12:08	12.33
11	1/15/2018 21:36:08	12.59
12	1/16/2018 0:00:08	12.85

Segmento - 4

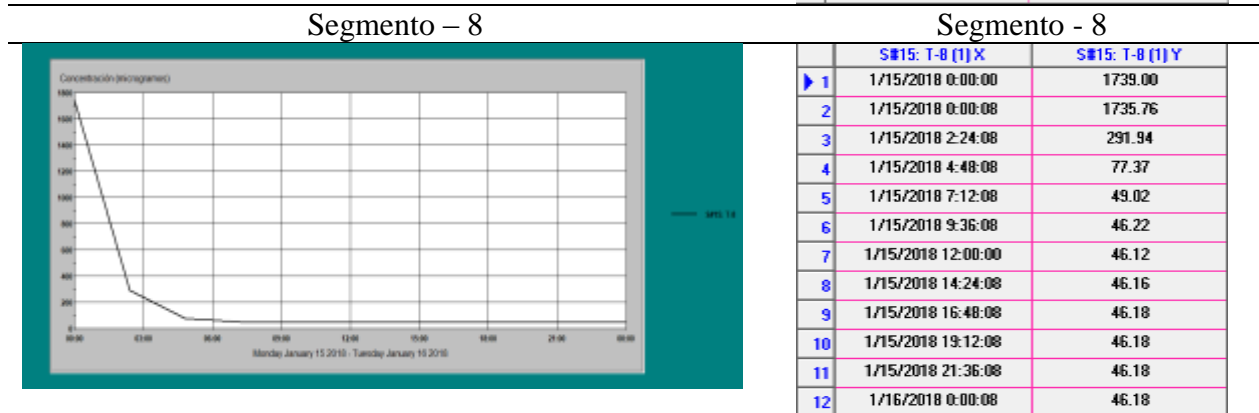
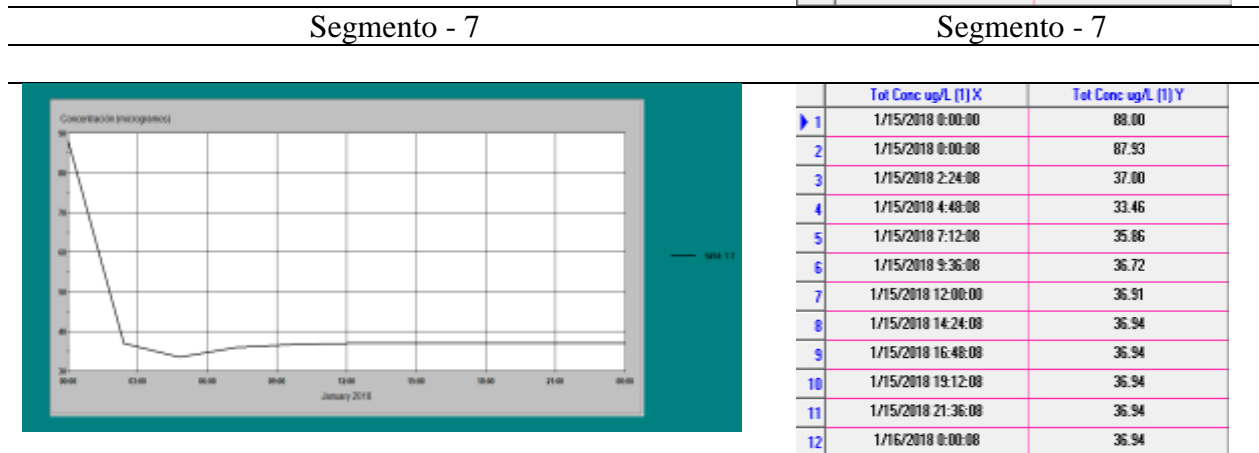
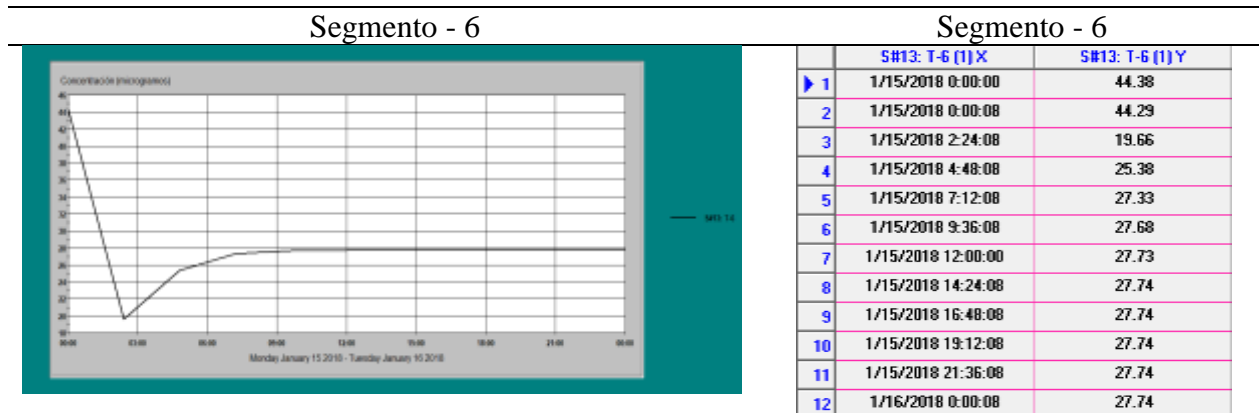
Segmento - 4



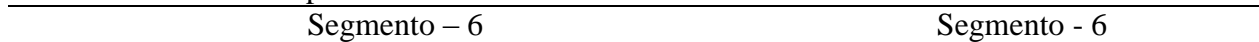
	S#11: T-4 (I)X	S#11: T-4 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	0.00
2	1/15/2018 0:00:08	0.04
3	1/15/2018 2:24:08	21.68
4	1/15/2018 4:48:08	23.51
5	1/15/2018 7:12:08	23.84
6	1/15/2018 9:36:08	24.10
7	1/15/2018 12:00:00	24.36
8	1/15/2018 14:24:08	24.62
9	1/15/2018 16:48:08	24.88
10	1/15/2018 19:12:08	25.14
11	1/15/2018 21:36:08	25.39
12	1/16/2018 0:00:08	25.65

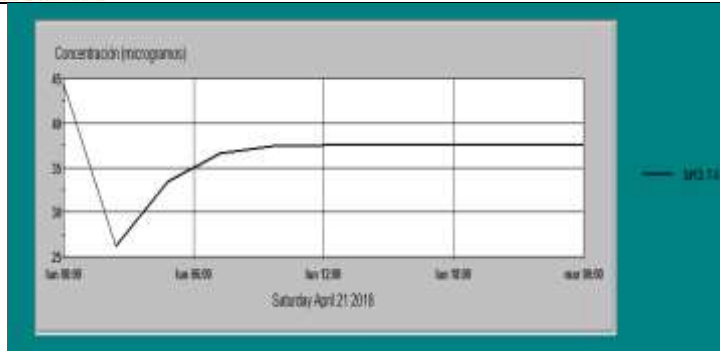
En las tablas de resultados se pueden observar la relación que tienen los segmentos más próximos, después de reducir un 20% el caudal del vertimiento V-1 que realiza su descarga en el segmento T-3 se presenta una reducción en las concentraciones tanto en el segmento T-3 como en el segmento T-4.

**Anexo F. Dilución del tributario T-16**



Después de reducir en un 20% el caudal del tributario T-16

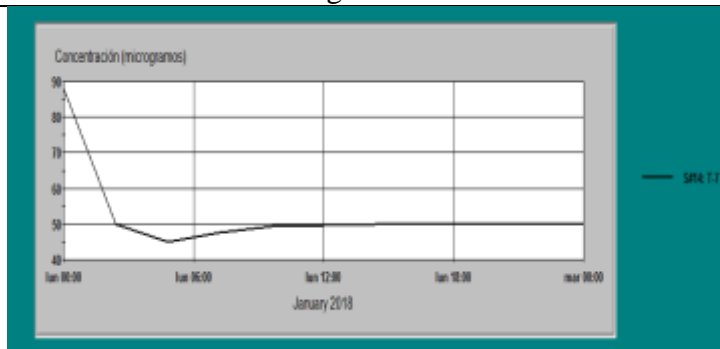




	S#13: T-6 (I)X	S#13: T-6 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	44.38
2	1/15/2018 0:00:08	44.32
3	1/15/2018 2:24:08	26.14
4	1/15/2018 4:48:08	33.42
5	1/15/2018 7:12:08	36.58
6	1/15/2018 9:36:08	37.34
7	1/15/2018 12:00:00	37.50
8	1/15/2018 14:24:08	37.53
9	1/15/2018 16:48:08	37.53
10	1/15/2018 19:12:08	37.53
11	1/15/2018 21:36:08	37.53
12	1/16/2018 0:00:08	37.53

Segmento - 7

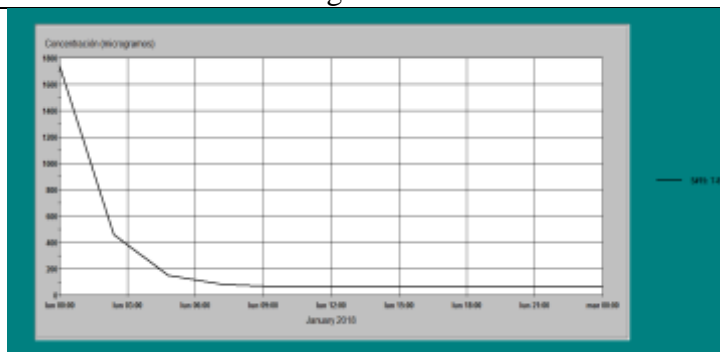
Segmento - 7



	S#14: T-7 (I)X	S#14: T-7 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	88.00
2	1/15/2018 0:00:08	87.95
3	1/15/2018 2:24:08	50.00
4	1/15/2018 4:48:08	44.84
5	1/15/2018 7:12:08	47.61
6	1/15/2018 9:36:08	49.24
7	1/15/2018 12:00:00	49.77
8	1/15/2018 14:24:08	49.92
9	1/15/2018 16:48:08	49.96
10	1/15/2018 19:12:08	49.96
11	1/15/2018 21:36:08	49.97
12	1/16/2018 0:00:08	49.97

Segmento - 8

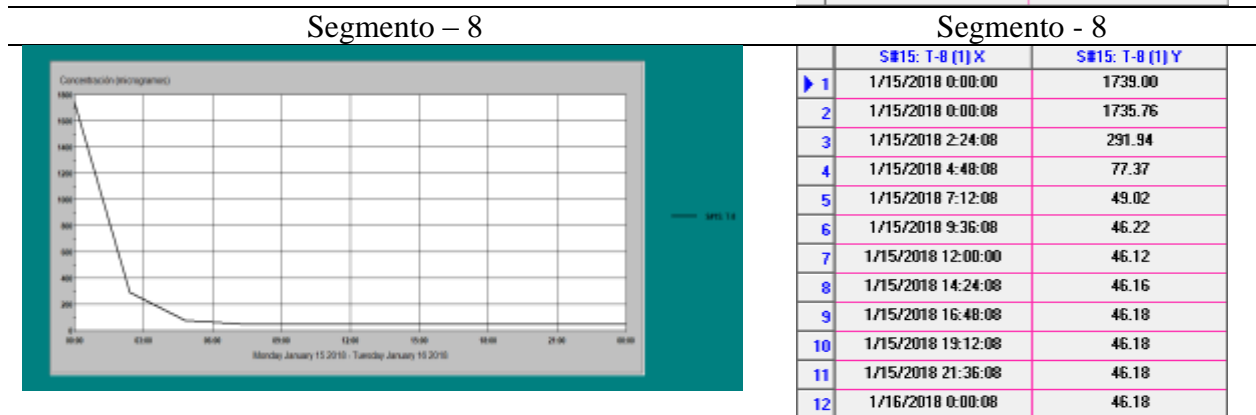
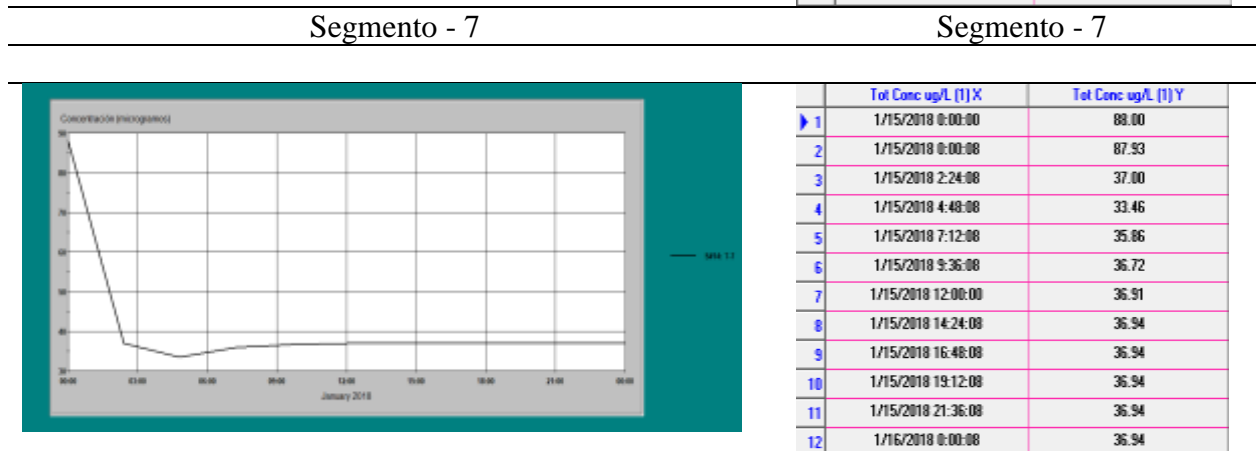
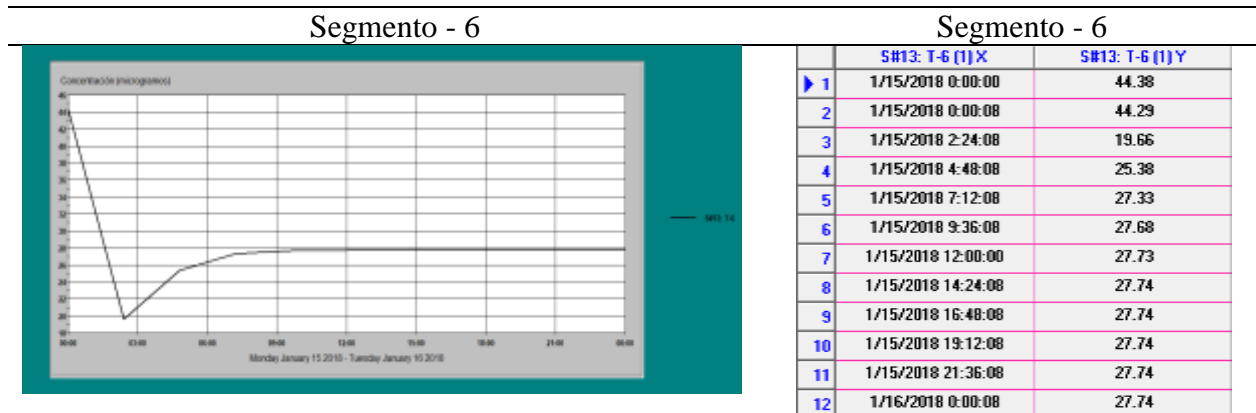
Segmento - 8



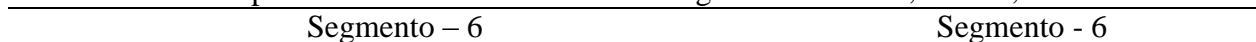
	S#15: T-8 (I)X	S#15: T-8 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	1739.00
2	1/15/2018 0:00:08	1736.61
3	1/15/2018 2:24:08	460.49
4	1/15/2018 4:48:08	151.64
5	1/15/2018 7:12:08	80.71
6	1/15/2018 9:36:08	65.82
7	1/15/2018 12:00:00	63.00
8	1/15/2018 14:24:08	62.53
9	1/15/2018 16:48:08	62.46
10	1/15/2018 19:12:08	62.46
11	1/15/2018 21:36:08	62.46
12	1/16/2018 0:00:08	62.46

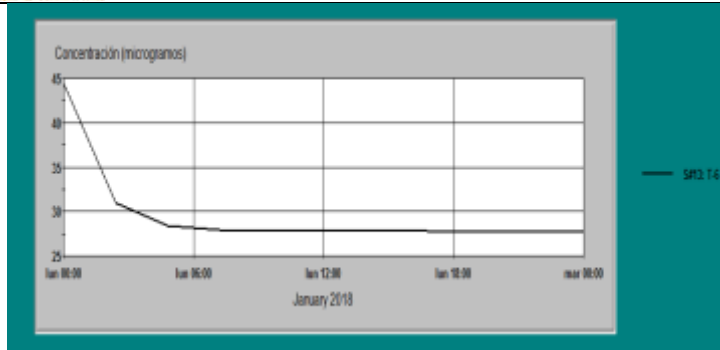
Como se puede observar en las concentraciones finales de cada uno de los segmentos, al reducir el caudal del tributario T-16, es menor la dilución que tiene lugar en el tramo principal.

**Anexo G. Relación de la zona de mezcla con el volumen del segmento T-6**



Después de Incrementar el nivel del segmento T-6 de 0,3 m a 1,2 m

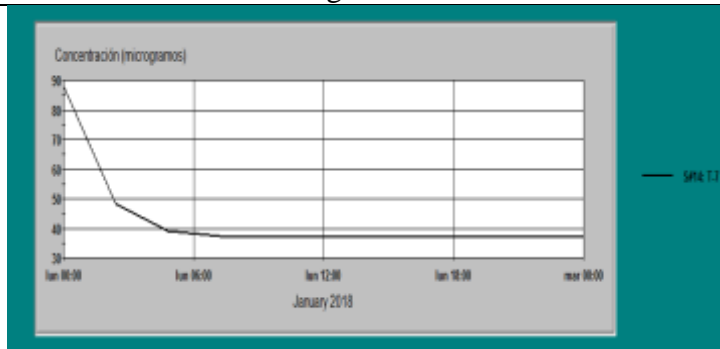




	SW13: T-6 (I)X	SW13: T-6 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	44.38
2	1/15/2018 0:00:08	44.36
3	1/15/2018 2:24:08	30.95
4	1/15/2018 4:48:08	28.34
5	1/15/2018 7:12:08	27.92
6	1/15/2018 9:36:08	27.82
7	1/15/2018 12:00:00	27.78
8	1/15/2018 14:24:08	27.76
9	1/15/2018 16:48:08	27.75
10	1/15/2018 19:12:08	27.75
11	1/15/2018 21:36:08	27.74
12	1/16/2018 0:00:08	27.74

Segmento - 7

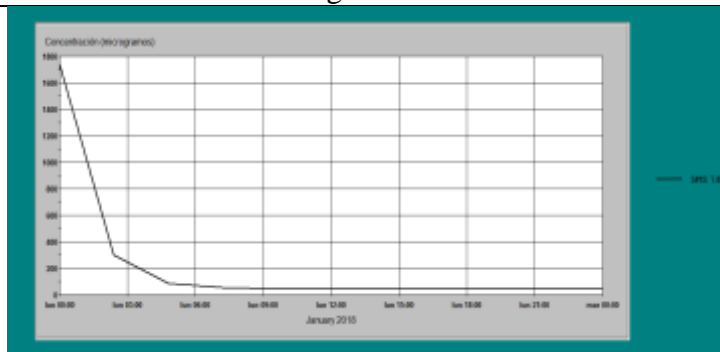
Segmento - 7



	SW14: T-7 (I)X	SW14: T-7 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	88.00
2	1/15/2018 0:00:08	87.93
3	1/15/2018 2:24:08	48.35
4	1/15/2018 4:48:08	39.19
5	1/15/2018 7:12:08	37.43
6	1/15/2018 9:36:08	37.09
7	1/15/2018 12:00:00	37.01
8	1/15/2018 14:24:08	36.97
9	1/15/2018 16:48:08	36.96
10	1/15/2018 19:12:08	36.95
11	1/15/2018 21:36:08	36.95
12	1/16/2018 0:00:08	36.95

Segmento - 8

Segmento - 8



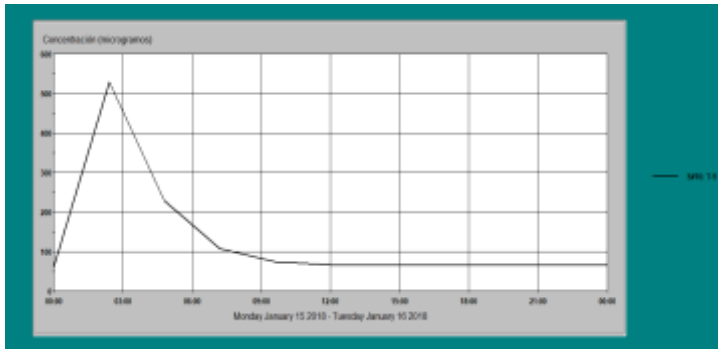
	SW15: T-8 (I)X	SW15: T-8 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	1739.00
2	1/15/2018 0:00:08	1735.76
3	1/15/2018 2:24:08	299.40
4	1/15/2018 4:48:08	85.32
5	1/15/2018 7:12:08	52.44
6	1/15/2018 9:36:08	47.26
7	1/15/2018 12:00:00	46.41
8	1/15/2018 14:24:08	46.25
9	1/15/2018 16:48:08	46.21
10	1/15/2018 19:12:08	46.19
11	1/15/2018 21:36:08	46.19
12	1/16/2018 0:00:08	46.18

En las tablas de resultados anteriores se puede observar como al incrementar el volumen del segmento T-6, las concentraciones durante las zonas de mezcla de éste y los segmentos siguientes (T-7 y T-8) son más altas en relación a las concentraciones de la modelación inicial.

### Anexo H. Cambios en el volumen del segmento T-6

Segmento – 9

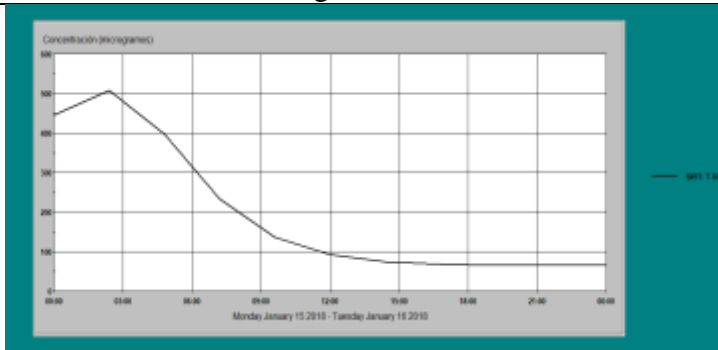
Segmento - 9



	S#16: T-9 (I) X	S#16: T-9 (I) Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	59.68
2	1/15/2018 0:00:08	62.29
3	1/15/2018 2:24:08	528.72
4	1/15/2018 4:48:08	229.00
5	1/15/2018 7:12:08	107.36
6	1/15/2018 9:36:08	74.37
7	1/15/2018 12:00:00	66.71
8	1/15/2018 14:24:08	65.06
9	1/15/2018 16:48:08	64.72
10	1/15/2018 19:12:08	64.65
11	1/15/2018 21:36:08	64.63
12	1/16/2018 0:00:08	64.63

Segmento – 10

Segmento - 10

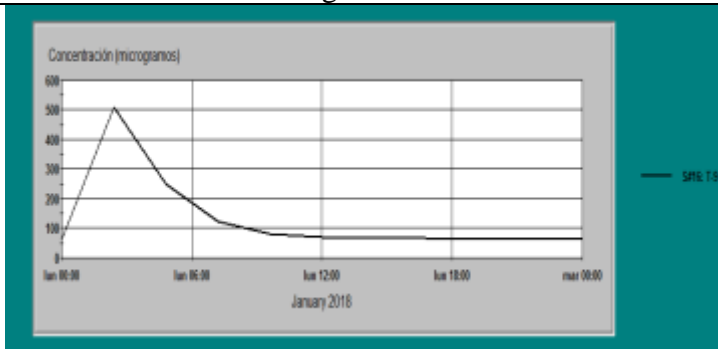


	S#17: T-10 (I) X	S#17: T-10 (I) Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	446.00
2	1/15/2018 0:00:08	445.59
3	1/15/2018 2:24:08	506.98
4	1/15/2018 4:48:08	397.32
5	1/15/2018 7:12:08	232.81
6	1/15/2018 9:36:08	135.61
7	1/15/2018 12:00:00	92.01
8	1/15/2018 14:24:08	74.67
9	1/15/2018 16:48:08	68.22
10	1/15/2018 19:12:08	65.90
11	1/15/2018 21:36:08	65.07
12	1/16/2018 0:00:08	64.78

Después de incrementar en un 20% el nivel del segmento T-9

Segmento – 9

Segmento - 9

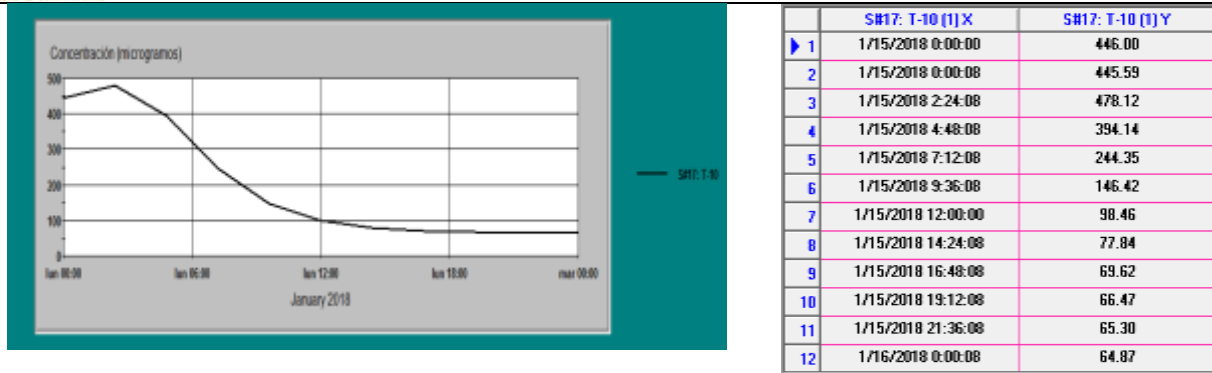


	S#16: T-9 (I) X	S#16: T-9 (I) Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	59.68
2	1/15/2018 0:00:08	61.85
3	1/15/2018 2:24:08	508.70
4	1/15/2018 4:48:08	250.00
5	1/15/2018 7:12:08	123.29
6	1/15/2018 9:36:08	81.48
7	1/15/2018 12:00:00	69.32
8	1/15/2018 14:24:08	65.92
9	1/15/2018 16:48:08	64.99
10	1/15/2018 19:12:08	64.73
11	1/15/2018 21:36:08	64.66
12	1/16/2018 0:00:08	64.64

Segmento – 10

Segmento - 10



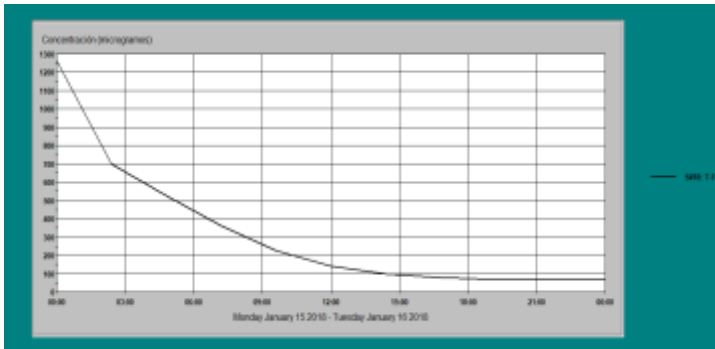


Con los cambios realizados las concentraciones que se presentan a lo largo de la modelación logran disminuir, al final el modelo muestra que durante el periodo de tiempo no se logra diluir el máximo cromo posible, ya que no se observa una estabilidad en las concentraciones reportadas.

**Anexo I. Dilución del tributario T-20**

Segmento - 11

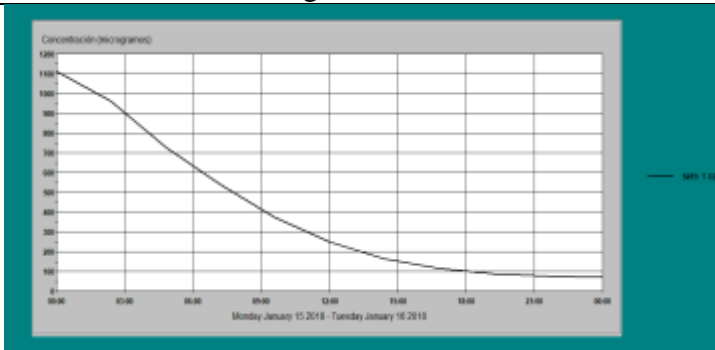
Segmento - 11



	SH18: T-11 (I)X	SH18: T-11 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	1265.00
2	1/15/2018 0:00:08	1264.00
3	1/15/2018 2:24:08	698.83
4	1/15/2018 4:48:08	524.20
5	1/15/2018 7:12:08	360.29
6	1/15/2018 9:36:08	224.96
7	1/15/2018 12:00:00	141.50
8	1/15/2018 14:24:08	98.44
9	1/15/2018 16:48:08	78.65
10	1/15/2018 19:12:08	70.16
11	1/15/2018 21:36:08	66.70
12	1/16/2018 0:00:08	65.33

Segmento - 12

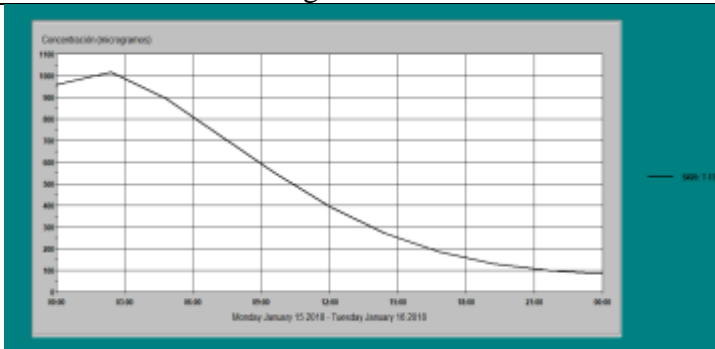
Segmento - 12



	SH19: T-12 (I)X	SH19: T-12 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	1112.00
2	1/15/2018 0:00:08	1112.15
3	1/15/2018 2:24:08	959.55
4	1/15/2018 4:48:08	727.61
5	1/15/2018 7:12:08	538.97
6	1/15/2018 9:36:08	374.06
7	1/15/2018 12:00:00	246.98
8	1/15/2018 14:24:08	163.06
9	1/15/2018 16:48:08	114.28
10	1/15/2018 19:12:08	88.37
11	1/15/2018 21:36:08	75.49
12	1/16/2018 0:00:08	69.40

Segmento - 13

Segmento - 13

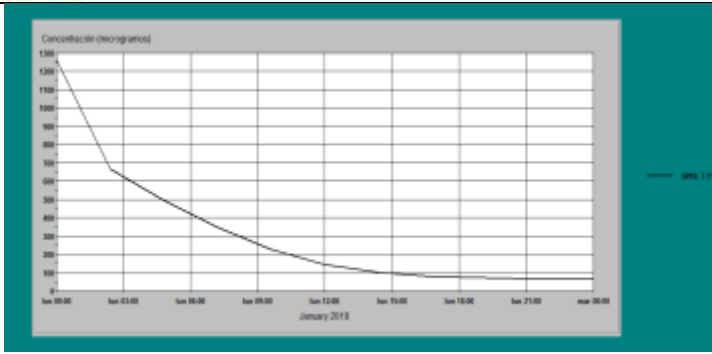


	SH20: T-13 (I)X	SH20: T-13 (I)Y
1	1/15/2018 0:00:00	959.00
2	1/15/2018 0:00:08	959.15
3	1/15/2018 2:24:08	1017.40
4	1/15/2018 4:48:08	895.73
5	1/15/2018 7:12:08	723.45
6	1/15/2018 9:36:08	549.20
7	1/15/2018 12:00:00	393.61
8	1/15/2018 14:24:08	271.01
9	1/15/2018 16:48:08	185.52
10	1/15/2018 19:12:08	131.43
11	1/15/2018 21:36:08	99.79
12	1/16/2018 0:00:08	82.39

Despues de incrementar el caudal del tributario T-20

Segmento - 11

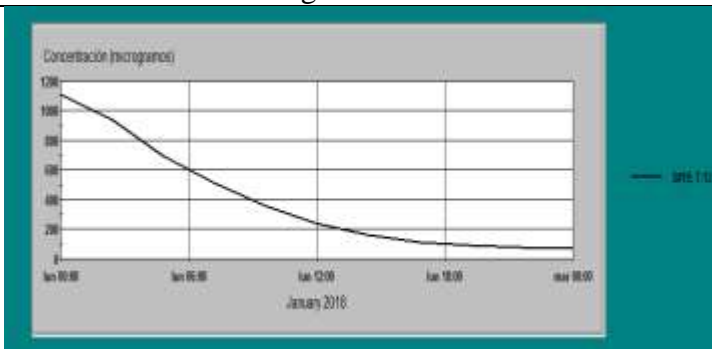
Segmento - 11



	SH18: T-11 (I)X	SH18: T-11 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	1265.00
2	1/15/2018 0:00:08	1263.95
3	1/15/2018 2:24:08	667.41
4	1/15/2018 4:48:08	494.39
5	1/15/2018 7:12:08	349.08
6	1/15/2018 9:36:08	225.15
7	1/15/2018 12:00:00	144.71
8	1/15/2018 14:24:08	101.12
9	1/15/2018 16:48:08	80.18
10	1/15/2018 19:12:08	70.84
11	1/15/2018 21:36:08	66.90
12	1/16/2018 0:00:08	65.30

Segmento – 12

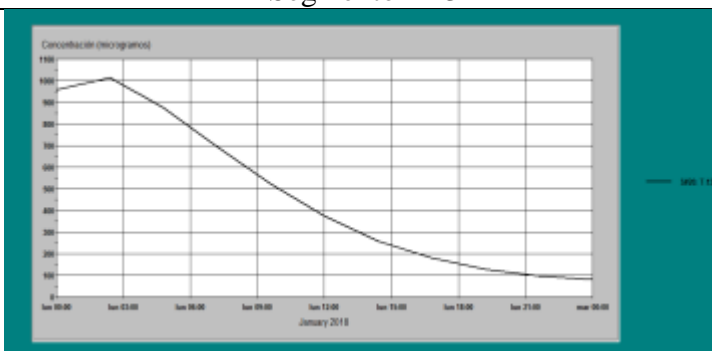
Segmento - 12



	SH19: T-12 (I)X	SH19: T-12 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	1112.00
2	1/15/2018 0:00:08	1112.16
3	1/15/2018 2:24:08	943.34
4	1/15/2018 4:48:08	696.16
5	1/15/2018 7:12:08	512.10
6	1/15/2018 9:36:08	359.02
7	1/15/2018 12:00:00	240.82
8	1/15/2018 14:24:08	161.28
9	1/15/2018 16:48:08	114.05
10	1/15/2018 19:12:08	88.46
11	1/15/2018 21:36:08	75.53
12	1/16/2018 0:00:08	69.34

Segmento – 13

Segmento – 13



	SH20: T-13 (I)X	SH20: T-13 (I)Y
▶ 1	1/15/2018 0:00:00	959.00
2	1/15/2018 0:00:08	959.15
3	1/15/2018 2:24:08	1013.53
4	1/15/2018 4:48:08	875.03
5	1/15/2018 7:12:08	693.60
6	1/15/2018 9:36:08	522.24
7	1/15/2018 12:00:00	374.70
8	1/15/2018 14:24:08	259.63
9	1/15/2018 16:48:08	179.25
10	1/15/2018 19:12:08	128.12
11	1/15/2018 21:36:08	98.03
12	1/16/2018 0:00:08	81.41

Cuando se incrementa el caudal del tributario se observan concentraciones menores al final del periodo de modelación.