

**SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO DEL CLORO  
RESIDUAL EN EL AGUA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN  
DEL SECTOR DISTRITO ESTADIO DEL ÁREA  
METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.**

**DIEGO ARMANDO GONZÁLEZ JAIMES**

**OSCAR IVÁN NEIRA TRIANA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

**SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO DEL CLORO RESIDUAL EN EL AGUA DE LA  
RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SECTOR DISTRITO ESTADIO DEL ÁREA  
METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.**

**DIEGO ARMANDO GONZÁLEZ JAIMES  
OSCAR IVÁN NEIRA TRIANA**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial  
Para optar por el Título de Ingeniero Civil

Director:

**ING. ANDRÉS ALMEYDA ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2014

# CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	13
1. GENERALIDADES	13
1.1 SECTOR DISTRITO ESTADIO	13
1.2 ANTECEDENTES DE LA CALIDAD DEL AGUA	14
1.3 MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA	15
1.4 QUIMICA DE LA CLORACIÓN	15
1.5 COMPORTAMIENTO DEL CLORO EN EL AGUA	15
1.5.1 COMPORTAMIENTO DEL CLORO EN LA PTAP	15
1.5.2 COMPORTMIENTO DEL CLORO EN LA RED	16
1.6 CALIDAD DEL AGUA	17
1.7 DECAIMIENTO DEL CLORO CON EL VOLUMEN DE AGUA	17
1.8 PARAMETROS DE LA CALIDAD A EVALUAR	17
1.8.1 TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA	17
1.8.2 PROCEDENCIA DEL AGUA	18
2. PROCESO DE MODELACIÓN DEL CLORO RESIDUAL	18
2.1 METODOLOGÍA PLANTEADA	18
2.1.1 RECOLECCIÓN Y ANALISIS DE DATOS	19
2.1.2 VERIFICACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL MODELO HIDRÁULICO	19
2.1.3 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA	20
2.1.4 DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE DECAIMIENTO K	21
2.1.5 SIMULACIÓN Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS	22

<b>2.1.6</b>	<b>COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LOS OBTENIDOS EN CAMPO</b>	<b>22</b>
<b>2.1.7</b>	<b>APLICACIÓN DEL MODELO</b>	<b>23</b>
<b>3.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>24</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>25</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>26</b>

## **LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1. Constante K. Punto de muestreo ubicado en el barrio Don Bosco</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 2. Constante K. Punto de muestreo ubicado en el barrio Girardot</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 3. Constante K. Punto de muestreo ubicado en el barrio Comuneros</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 4. K Promedio en puntos de muestreo</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 5. Comparación de resultados</b>	<b>23</b>

## **LISTA DE FIGURAS.**

<b>Figura 1. Fuentes de agua (amb S.A E.S.P)</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2. Evolución de la cantidad del cloro residual en función de la cantidad de cloro introducido.</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3. Metodología planteada.</b>	<b>18</b>
<b>Figura 4. Modelo en Epanet</b>	<b>19</b>
<b>Figura 5. Decaimiento del cloro residual</b>	<b>20</b>
<b>Figura 6. Comparación de pruebas. Datos Epanet y datos teóricos</b>	<b>20</b>
<b>Figura 7. Tiempo de permanencia en el punto de muestreo del barrio Don Bosco (25108)</b>	<b>21</b>
<b>Figura 8. Tiempo de permanencia en el punto de muestreo del barrio Girardot (23189)</b>	<b>21</b>
<b>Figura 9. Tiempo de permanencia en el punto de muestreo del barrio Comuneros (15310)</b>	<b>21</b>
<b>Figura 10. Concentración del cloro residual en los tres nodos de estudio</b>	<b>23</b>
<b>Figura 11. Tiempo de Permanencia del agua en los tres nodos de estudio</b>	<b>23</b>
<b>Figura 12. Resultado de comparación general</b>	<b>24</b>
<b>Figura 13. Concentraciones bajas de Cl en el sector.</b>	<b>25</b>

## RESUMEN

**TITULO: SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO DEL CLORO RESIDUAL EN EL AGUA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SECTOR DISTRITO ESTADIO DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. \***

**AUTORES:** OSCAR IVAN NEIRA TRIANA \*\*  
DIEGO ARMANDO GONZALEZ JAIMES \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Cloro residual, modelo de calidad del agua, velocidad de reacción, tiempo de permanencia y constante de decaimiento del cloro.

**DESCRIPCIÓN:** Este proyecto se orientó a crear una metodología para el modelamiento del cloro residual del agua potable distribuida en el sector hidráulico del distrito Estadio del Área Metropolitana de Bucaramanga y dar así un primer paso en la creación de un modelo computarizado calibrado en el que se pueda vigilar y controlar la calidad del agua que llega a cada uno de los usuarios. Con la ayuda del software EPANET se hacen simulaciones cuyos resultados se comparan con los datos reales, que frecuentemente el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A E.S.P) y la Secretaria de Salud recopilan manualmente, para el control de la calidad del agua. El modelo obtenido tiene las restricciones de que el tanque Estadio es simulado como embalse, es decir, las concentraciones de cloro no cambian en el transcurso del día; además el modelo no tiene en cuenta las filtraciones que podrían darse de las aguas residuales en las tuberías de agua potable lo que conllevaría a un decaimiento más rápido de las concentraciones del cloro residual. Los resultados muestran que este tipo de modelación es una herramienta efectiva de trabajo para hacer seguimiento a la calidad del agua en la red de distribución. Se observó también que el comportamiento del cloro residual es afectado por el tiempo de permanencia del agua en las tuberías el cual se incrementa cuando existen tanques de almacenamiento dentro de la red y velocidades de flujo bajas. Dentro de las conclusiones a las que se llega en este proyecto es que el agua distribuida por el *amb S.A E.S.P* en el sector estudiado es de muy buena calidad al cumplir con la normativa colombiana vigente.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Ingeniero civil.

## ABSTRACT

**TITLE: MODELING AND SIMULATION OF RESIDUAL CHLORINE IN WATER DISTRIBUTION NETWORK SECTOR DISTRICT ESTADIO BUCARAMANGA METROPOLITAN AREA.\***

**AUTHORS:** OSCAR IVAN NEIRA TRIANA \*\*  
DIEGO ARMANDO GONZALEZ JAIMES \*\*

**KEYWORDS:** Residual chlorine, water quality model, reaction speed, residence time and chlorine decay constant.

**DESCRIPTION:** This article was aimed to create a methodology for modeling of residual chlorine in the water distributed in the Distrito Estadio Sector at Area Metropolitana de Bucaramanga and thus give a first step towards the creation of a computer model calibration in which you can monitor and control the quality of water reaching each user. With the help of software EPANET simulations whose results are compared to the actual data that often the Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A E.S.P) and the health secretary collected manually for checking water quality. The model obtained has restrictions that the Estadio tank is simulated as a reservoir, that is chlorine concentrations do not change during the day, and the model does not consider the leaks that may occur from sewage to pipes potable water, which would entail to a faster decay of residual chlorine concentrations. The results show that this type of modeling is an effective tool for tracking the water quality in the network. It was also observed that the behavior of the residual chlorine was affected by the residence time of water in the pipe which increases when the storage tanks within the network and where the flow rates are low. In the conclusions reached is that the water distributed by the *amb S.A E.S.P* in the area studied is of very good quality because it satisfies with Colombian regulations.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Ingeniero civil.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la simulación de la calidad del agua constituye uno de los temas de mayor importancia en los sistemas de acueductos urbanos donde el cloro ha jugado un papel importante actuando como desinfectante y siendo uno de los parámetros fundamentales en los modelos de control de calidad.

Las concentraciones de cloro residual en las redes de distribución desde la salida de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) hasta el usuario, resulta ser de carácter fundamental para evitar la contaminación microbiológica, además la Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que no se ha observado ningún efecto adverso a humanos expuestos a concentraciones de cloro menores a 2.0 mg/l en el agua potable.

Para lograr el manejo efectivo de los recursos hídricos disponibles, prevenir la contaminación y reducir los conflictos que usualmente genera el acceso al agua potable, requiere el establecimiento de políticas y estrategias claramente definidas, así como la elaboración de reglamentos para controlar la concentración del cloro residual en el agua.

La normativa vigente en Colombia, establecen los criterios para la protección y el control de la calidad del agua para consumo humano y crea el Índice de Riesgo para el Consumo de Agua Potable (IRCA), por medio del Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 de 2007, este indicador IRCA busca proteger la población abastecida, midiendo el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano.

Según el *amb S.A E.S.P.*, en su página web señala que la ciudad de Bucaramanga presentó un IRCA en promedio de 0.65% para el año 2013, el cual clasifica el agua "*sin riesgo*" y "*apta para el consumo humano*", Llamarla apta para consumo humano, implica la garantía de que el agua que se va a consumir tenga el tratamiento y la desinfección necesarios, así como el control de los parámetros microbiológicos, tanto en la captación como en la distribución [9].

Para garantizar que el agua que circula por la redes de distribución del *amb S.A E.S.P.* es potable y apta para el consumo humano, la entidad aplica en la

PTAP una dosis del cloro en el agua y mide la concentración en diferentes puntos de la red para controlar su potabilización y pueda ser consumida por el usuario. Sin embargo, es de gran dificultad realizar controles manuales en toda la red, lo que genera incertidumbre en la concentración del desinfectante en muchos tramos del sistema.

Con base en lo anterior, se detectó la necesidad de simular y modelar el comportamiento del cloro residual en las redes de distribución mediante un software, que para efectos de este estudio se optó por Epanet, debido a ser la herramienta computacional, en el cual el *amb S.A E.S.P.* tiene modelada, simulada y calibrada la red de distribución hidráulicamente, además sus empleados se encuentra capacitados y familiarizados para operarla.

Para llevar a cabo este proyecto, se vio la necesidad de realizar el modelo en una zona representativa de la ciudad donde se combinan factores socio – económicos y locativos, la cual generan una confiabilidad en el modelo para posteriormente aplicarlo en su totalidad a la red, la zona escogida fue la alimentada por el tanque estadio y llamado sector distrito Estadio.

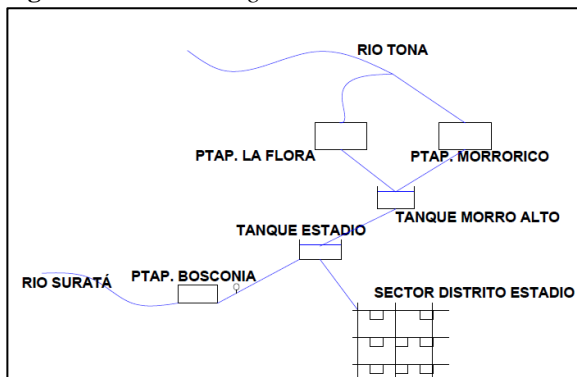
Con el presente proyecto se busca realizar un estudio detallado que genere un primer avance para la simulación y modelación matemática computarizada de la red de distribución del *amb S.A E.S.P.*, en la que pueda observarse las variaciones de los parámetros más relevantes en la medición de la concentración del cloro residual presente en el agua del distrito.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Sector Distrito Estadio

El sector distrito Estadio se encuentra ubicado al noroccidente del Área Metropolitana de Bucaramanga y es uno de los más representativos e importantes por sus condiciones socio-económicas y locativas, este sector es abastecido por el tanque Estadio, el cual es alimentado 23 horas en promedio al día por el agua proveniente de PTAP de Bosconia, (fuente es el río Surata), (ver Figura 1), la hora faltante es abastecida por el tanque de almacenamiento Morro Alto, el cual es alimentado por las PTAP la Flora y Morro Rico (fuente es el río Tona y Suratá).

**Figura 1.** Fuentes de agua amb S.A E.S.P



Fuente. Página web oficial amb S.A E.S.P

La PTAP Bosconia, es la que abastece en mayor proporción el tanque Estadio, tiene una capacidad instalada de 2000 Lps, es de tipo convencional con tanques desarenadores, presedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación y filtración. Está localizada al Nororiente de la ciudad, en la vía que conduce de Bucaramanga al municipio de Matanza, entre las cotas topográficas 685 y 675 msnm.

El agua es llevada por medio de un sistema de bombeo desde la PTAP Bosconia hasta el tanque Estadio, cuyo volumen es de 8270 m<sup>3</sup>, con un caudal promedio diario demandado de 325 Lps, para abastecer a 42 barrios con aproximadamente 35.000 suscriptores, por medio de 5.400 tuberías fabricadas en distintos materiales como Acero, hierro fundido, hierro galvanizado, hierro dúctil, concreto reforzado y PVC. [8]

La Secretaria de Salud en conjunto con el Laboratorio de Calidad del *amb S.A E.S.P*, tienen instalados en este distrito tres puntos de monitoreo, en los cuales realizan pruebas de todas las variables medibles que afectan la calidad del agua, entre estas variables se encuentra la concentración de cloro residual; estos datos son tomados cada siete días y almacenados en una base datos. Los puntos de monitoreo están ubicados en los barrios Don Bosco, Girardot y Comuneros.

Para el presente estudio es de importancia conocer la fuente de donde proviene el agua, los datos hidráulicos del distrito, las características de la red de distribución, además tener acceso a la información de las bases de datos de los puntos de

monitoreo instalados en el distrito y a los datos de cloración inicial en la PTAP de Bosconia.

## 1.2 Antecedentes de la calidad del agua

Una de las mayores preocupaciones de la humanidad ha sido la calidad de agua que se utiliza para el consumo humano, por lo tanto, disponer de agua de buena calidad es uno de los retos más difíciles para el desarrollo de la civilización.

Desde las primeras civilizaciones, les ha afectado la calidad del agua que consumen, pero este factor no era de gran importancia, debido a que tenían como actividad principal la agricultura y destinaban la mayor parte del agua que captaban para el riego, lo cual centraban su atención al momento de colonizar nuevas tierras solo en la cantidad de oferta hídrica, dejando por un lado la calidad de la fuente de abastecimiento, debieron transcurrir alrededor de 6.000 años antes de que se hablara de procesos de tratamiento y potabilización del agua, tras las graves epidemias de cólera y fiebre tifoidea que devastaron gran parte de la población europea [10].

Debido a la necesidad de controlar las graves enfermedades de transmisión hídrica que azotaron la época, en el año 1830 D.C, se realiza el primer avance significativo, se trataba de incorporar filtros que permiten mejorar las condiciones de calidad del agua que se consumía en Inglaterra. En el mismo siglo, en Estados Unidos se comienzan a incorporar filtros de gran tamaño, dirigidos a mejorar la calidad del agua [10].

La inversión en investigación científica y gracias a las herramientas otorgadas por los avances tecnológicos del último siglo, han facilitado desarrollar nuevos procedimientos para intervenir el agua antes de su distribución, logrando alcanzar niveles tales que permiten su consumo por medio de procesos de desinfección utilizando compuestos químicos como el cloro, que garantiza la eliminación de microorganismos patógenos causantes de enfermedades de origen hídrico que en el siglo pasado fue imposible controlar [10].

Gracias a los avances científicos, se creó una normativa universal que permite caracterizar la potabilidad del agua aun después de realizar procesos de desinfección.

Siendo el objeto de estudio, dar un primer paso en la creación de un modelo que simule la interacción del desinfectante aplicado al flujo con el paso del tiempo, y así llevar un control de la cantidad de cloro residual con la que debe salir de la PTAP.

### 1.3 Modelos de calidad del agua

La necesidad de llevar un control sobre los agentes contaminantes que puede atacar una red de abastecimiento de agua potable, resulta ser una de las prioridades de quienes se dedican a prestar este servicio, lo cual ha generado diversos avances significativos en las últimas dos décadas en modelos matemáticos que simulen el comportamiento de los desinfectantes en las redes de agua potable.

Los modelos matemáticos más destacados que han logrado simular la calidad del agua y el comportamiento de los desinfectantes en la red son; AWWARF Y EPA, 1991; AWWARF, 1996 y Tzatchkov, 2002, todos estos se han probado en redes pequeñas o en sistemas muy simplificados, es decir utilizando tuberías principales [1].

El estudio que actualmente se realiza, busca obtener un modelo de calidad que permita determinar, en todos los puntos de la red y en cualquier instante del período de simulación, la concentración o el valor de un determinado parámetro de calidad, como lo pueden ser; el porcentaje de procedencia del agua desde cada una de las fuentes de suministro, el tiempo de retención del agua en la red antes de ser consumida, el trayecto seguido en la red desde su inyección y la concentración del agente desinfectante que para este caso es el cloro.

### 1.4 Química de la cloración

Lo primero que ocurre cuando el cloro entra en contacto con el agua es que se produce una reacción de hidrólisis, luego se asocia con el amoníaco presente, con la materia orgánica, y con otras sustancias químicas que se encuentran en el agua.

Se producen básicamente dos tipos de reacciones: La primera es por hidrólisis que se produce cuando el cloro reacciona con el agua para formar ion hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ) y ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ) que son los compuestos a los que se les denomina cloro libre.

La segunda son reacciones de oxidación – reducción, que consiste cuando el cloro se combina con las sustancias disueltas en el agua, por ejemplo con el nitrógeno amoniacal formando cloraminas que tienen poderes bactericidas en menor grado que el ácido hipocloroso pero con la ventaja de que estas pueden permanecer más tiempo en el agua destruyendo organismos perjudiciales. [6]

### 1.5 Comportamiento del cloro en el agua

El cloro es uno de los desinfectantes más utilizados, debido a la facilidad de aplicación, medición y control. Solo la cloración garantiza que el agua ya tratada se mantenga libre de gérmenes durante su tránsito por tuberías y depósitos antes de llegar al grifo, además de ser también el método más económico.

#### 1.5.1 Comportamiento del cloro en la PTAP

El proceso de desinfección del agua en la (PTAP) requiere para su ejecución una serie de actividades integrales que permiten establecer una rutina de operación, el perfecto funcionamiento de este proceso se ve reflejado en la calidad del agua que abandona la PTAP y por ende contribuye a la salud de la población.

Por tanto se hace necesario definir en este documento las etapas que ocurren en el proceso de desinfección que se realiza en la PTAP, bajo las regulaciones de la normatividad que rige el funcionamiento de estos sistemas.

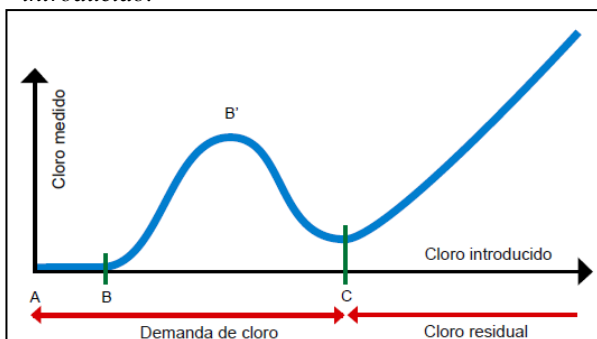
A continuación puede describirse en cuatro etapas el comportamiento del cloro en el proceso de desinfección llevado a cabo en una PTAP. (Ver Figura 2).

En la primera etapa (fase A-B) el cloro se combina inmediatamente con la materia orgánica y al realizar una medición arrojaría como resultado cero (0) mg/l, durante el periodo de descomposición no se realizará ninguna desinfección. A partir del punto B de la Figura 2 (fase B-B') el cloro se combina con compuestos nitrogenados, por lo que ya es posible medir una cantidad de cloro residual, identificado por la curva ascendente. Sin embargo, esta concentración no corresponde a cloro activo, sino a compuestos (cloraminas) a lo que también se les denomina cloro combinado, que reacciona igual que el cloro en los aparatos de medición, presentan un fuerte olor, pero tienen muy poco poder desinfectante. Si se sigue añadiendo cloro (fase B'C), y se realizan

mediciones, se visualizaran en los resultados que la cantidad de cloro descende, puede observarse en la Figura 2 en la curva descendente. Lo que ha ocurrido es que este cloro se consumió en la destrucción de los compuestos generados en la fase anterior. El agua no tiene un olor desagradable pero sigue sin estar desinfectada. A partir del punto C, el cloro introducido está finalmente disponible para cumplir con su rol desinfectante a lo largo de la red.

El cloro medido a partir de este punto C es el cloro total, que es la suma del cloro residual y el cloro combinado [7].

**Figura 2.** Evolución de la cantidad del cloro residual en función de la cantidad de cloro introducido.



Fuente. Revista Hydria [7].

De acuerdo en lo anterior puede decirse que los primeros miligramos de cloro que se introducen al agua no garantizan su desinfección. Por el contrario, se deberá agregar una cantidad variable de cloro para que produzca las reacciones secundarias descritas anteriormente antes de que comience la desinfección. Esa cantidad variable se denomina “demanda de cloro” [7].

En las PTAP, el Laboratorio de Calidad del acueducto realiza ensayos de jarras para conocer la cantidad necesaria de cloro que requiere la desinfección del agua tratada.

Según la Organización Panamericana de la Salud OPS, en el artículo publicado en la revista Hydria ‘Como actúa el cloro en el Agua’ establece que en el agua destinada al consumo humano, la desinfección debe realizarse sobre aguas de buena calidad química para que la demanda de cloro sea mínima. En el caso de aguas de superficie se deberá realizar un tratamiento previo para cumplir con este requisito.

Después de superar la etapa de demanda, se continúa aplicando cloro al flujo, esta concentración adicional se conoce como cloro residual, y está destinada para actuar como desinfectante durante el tiempo que el agua permanezca en la red [7].

### 1.5.2 Comportamiento del cloro en la red de distribución

El comportamiento del cloro en el agua de una red de distribución se debe a condiciones físico – hidráulicas tales como la temperatura, agitación turbulencias, etc., el consumo de cloro en una red se debe principalmente a condiciones de temperatura y la cantidad de materias orgánicas disueltas y otras inorgánicas capaces de ser oxidadas [12].

La disminución de cloro residual esta expresada por la ecuación exponencial:

$$C = C_0 e^{-K*t} \quad (1)$$

Donde  $C$  es la concentración del cloro (mg/l),  $C_0$  es la concentración inicial del cloro (mg/l),  $K$  es la constante de decaimiento ( $h^{-1}$ ) y  $t$  el tiempo de permanencia del agua (h).

El decaimiento del cloro se evalúa en la masa de agua a la cual se le aplica el modelo cinético de primer orden en el que  $K$  varía con  $C_0$ . Cuando el valor de  $C_0$  es alto, se retarda el decaimiento de  $Cl_2$  y se obtienen valores bajos de  $K$  [4].

Las reacciones en el seno del agua están regidas por el movimiento en el cuerpo principal de la corriente, sin que los procesos desarrollados en la pared de las tuberías la afecten. Las ecuaciones cinéticas polinómicas gobiernan estas reacciones donde la velocidad de reacción  $R$  (masa/Volumen/tiempo) es una función de la concentración:

$$R = K_b * C^n \quad (2)$$

Donde  $R$ : velocidad de reacción.

$K_b$  : Coeficiente de velocidad de reacción en el seno del agua.

$C$ : concentración reactiva (masa/volumen).

$n$ : orden de reacción. [6]

*El modelamiento con las reacciones en la pared se recomienda para tramos cortos y donde se conozca con certeza el estado de la tubería [4].*

Para la simulación de este proyecto se trabajó con las ecuaciones antes descritas, las cuales corresponden a las reacciones del flujo en el seno de la tubería, ya que para las reacciones en las paredes se necesita conocer el estado de cada tubería, algo que es de suma dificultad y que no está al alcance de este estudio.

## 1.6 Calidad del Agua

El agua potable o agua para consumo humano es aquella que cumple las condiciones y características físicas, químicas y microbiológicas, señaladas por el decreto 1575 de 2007 y demás normas, que es apta para consumo humano; y que se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos y en la higiene personal [2].

La calidad del agua potable en una red de distribución se preserva gracias al cloro residual libre que no es otra cosa más que la porción de químico que queda en el agua después de un periodo de contacto definido, que reacciona como ácido hipocloroso o como ion hipoclorito [12].

La pérdida del desinfectante residual es un proceso químico que da origen al problema más común de calidad de agua en una red de distribución que es la formación de SPD, (subproductos de la desinfección) la cual es función del tiempo y de su velocidad de desaparición, que puede estar afectada por aspectos como la actividad microbiológica, la temperatura, la nitrificación, la exposición a la luz ultravioleta y la cantidad y tipo de compuestos que generan demanda del desinfectante como compuestos orgánicos e inorgánicos. El cloro reacciona con la materia orgánica y forma SPD, incluyendo trihalometanos (THM) los cuales pueden ser cancerígenos y generar otros problemas a la salud [3].

Según la reglamentación Colombiana el agua potable deberá tener mínimo 0.2 mg/L y un máximo de 1.0 mg/L de cloro residual libre en la red, expresado como cloro ( $\text{Cl}_2$ ) y el cloro total (cloro combinado + cloro residual) deberá tener como máximo una concentración de 1.2 mg/L. [2]

Otras características químicas y físicas que determinan la calidad del agua potable tales como el pH, color, turbiedad, se pueden encontrar en la norma técnica colombiana NTC 813.

## 1.7 Decaimiento del cloro con el volumen de agua

La rapidez con la cual el cloro residual libre desaparece se expresa por la tasa de la reacción (tasa de decaimiento) cloro-agua, dado por la ecuación 2. La reacción de la sustancia con el volumen del agua se debe principalmente a los siguientes factores: temperatura, pH, contenido de materia orgánica e inorgánica, cloraminas y compuestos organoclorados, presencia de metales como hierro ferroso ( $\text{Fe}^{++}$ ), manganeso manganeso ( $\text{Mn}^{++}$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), entre otras sustancias; se debe recalcar que la obtención del tiempo de residencia del agua dentro de las tuberías (edad del agua) será un factor fundamental durante los procesos de reacción. [4]

Actualmente los modelos de calidad del agua aplicados a redes de distribución, utilizan una ecuación cinética de primer orden (ecuación 1), donde el coeficiente  $K$  se obtiene por medio de un ajuste exponencial a los datos medidos, el signo negativo de la constante de reacción  $K$ , significa que ocurre una reacción de disminución. [3]

## 1.8 Parámetros de calidad a evaluar

La concentración de cloro a lo largo de la red distribución, depende del tiempo que se demora una gota de agua en salir de la red (tiempo de permanencia del agua) y de las características de fuente de donde procede.

### 1.8.1 Tiempo de permanencia del agua:

Es una medida de cuánto tiempo pasa el agua dentro de la red. Tiene dos aspectos importantes:

1. Asegurar el tiempo de contacto del cloro.

Una de las condiciones que aseguran que el agua es potable, es la permanencia de por lo menos 30 minutos en los tanques ubicados en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP), haciendo contacto con el cloro [3].

2. Evitar la pérdida de calidad con el tiempo.

Con la permanencia del agua en las tuberías la calidad del agua empeora sensiblemente. Es el caso de sectores no mallados o con tuberías que terminan en puntos ciegos con velocidades muy bajas de flujo [3].

### 1.8.2 Procedencia del agua:

Se utiliza para conocer el origen del agua que circula por determinados puntos de la red y el porcentaje de agua procedente de un embalse o tanque de almacenamiento, es muy útil para casos en los que se mezcla agua de dos fuentes para rebajar un parámetro desfavorable de una de ellas [3].

La PTAP Bosconia es la única fuente de agua potable para el sector Distrito Estadio durante 23 de las 24 horas del día, por lo que este parámetro de calidad no será evaluado en las simulaciones del proyecto.

## 2. PROCESO DE MODELACIÓN DEL CLORO RESIDUAL

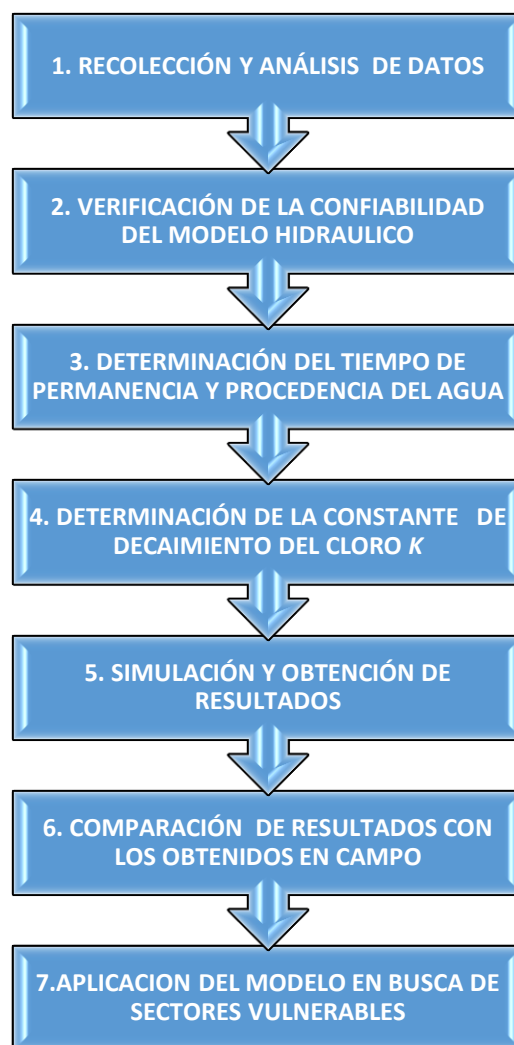
Inicialmente el sistema se modeló hidráulicamente con el software EPANET el cual se optó por las siguientes razones: el acceso al número de tramos permite considerar diferentes tipos de demanda en los nodos con su propia curva de modulación en el tiempo; simula el avance y destino final de las sustancias reactivas cuya concentración crece o decrece en el tiempo, en este caso interesan las que decrecen; permite simular el tiempo de permanencia del agua en la red y simula las reacciones que tienen lugar tanto en el seno del agua como en las paredes de las tuberías. Además EPANET es un software de dominio público y es una herramienta que del *amb S.A E.S.P* ha aprovechado.

Partiendo de los datos estadísticos de concentración de cloro residual en la red de distribución y en la PTAP y al modelo hidráulico que el *amb S.A E.S.P* suministró para la elaboración de este proyecto se procedió a realizar una metodología que ayuda a determinar la concentración del cloro residual en cualquier punto de la red de distribución del sector del Distrito Estadio.

## 2.1 Metodología planteada

Se planteó una metodología presentando los pasos necesarios para la creación de un modelo en el software Epanet, en el que se observe el decaimiento del cloro residual en el agua de toda la red de distribución del sector Distrito Estadio. En la Figura 3 se resume esta metodología, la cual inicia en la recolección y análisis de datos y termina en una aplicación del modelo en busca de sectores vulnerables a la deficiencia del cloro residual.

Figura 3. Metodología planteada.



### 2.1.1 Recolección y análisis de datos.

Consiste en recolectar muestras de las concentraciones de cloro residual en diferentes puntos de la red de distribución de agua potable del sector; además de las muestras en los puntos de salida de la PTAP.

Se utilizó la información suministrada por el laboratorio de calidad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, ubicado en la PTAP la Flora, se seleccionaron los datos necesarios de los tres puntos de muestreo ubicados en el sector, en este caso son los valores de la concentración del cloro residual de tres meses consecutivos agosto, septiembre y octubre del año 2013; se opta por tomar los datos de estos tres meses debido a que son datos representativos, continuos y suficientes para proceder con la metodología. Además se recolectaron los valores de las concentraciones iniciales de cloro residual, es decir, las concentraciones de salida de la PTAP Bosconia que es la que abastece en promedio 23 horas al día el sector Distrito Estadio.

Los tres puntos de muestreo analizados se encuentran localizados en los barrios Don Bosco, Girardot y Comuneros.

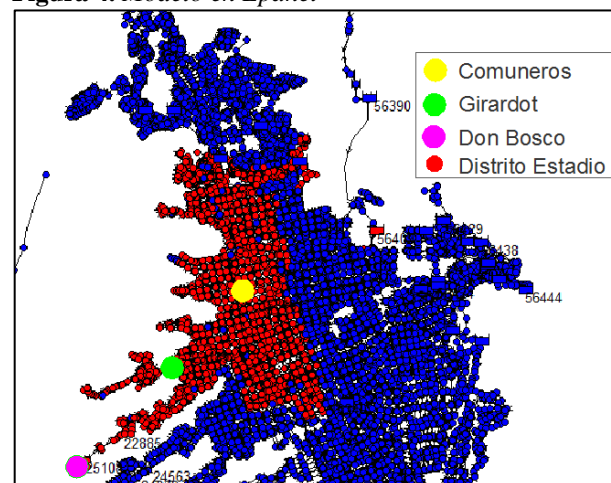
Se recolectaron un total de 13 muestras para cada punto y 92 para la PTAP Bosconia. Los datos recolectados aparecen en las Tablas del 1 al 4 (Ver anexo 1).

Se ubicaron los puntos de muestreo en un plano en el que se podía apreciar el catastro de redes y urbanísticas de toda el área metropolitana de Bucaramanga para facilitar la ubicación en el modelo de Epanet. En este se señalaron los nodos que corresponden a las direcciones de los puntos las cuales se encuentran en la tabla 5 (ver anexo 1)

Los nodos 25108, 23189 y 15310 pertenecientes al modelo hidráulico corresponden a los tres puntos estudiados y ubicados en los barrios Don Bosco, Girardot y Comuneros respectivamente.

En la Figura 4 aparece el modelo hidráulico de Epanet con la ubicación de los tres puntos de muestreo. El nodo resaltado con color amarillo es el 15310, el resaltado con verde es el nodo 23189 y el magenta es el 25108. Todos los nodos que aparecen en rojo pertenecen al sector Distrito Estadio.

Figura 4. Modelo en Epanet



Fuente: modelo\_hidraulico\_amb2013.net

### 2.1.2 Verificación de la confiabilidad del modelo hidráulico.

Se debe tener certeza de que el modelo se basa en la ecuación de decrecimiento cinético de primer orden y dar confiabilidad a los datos obtenidos mediante las simulaciones posteriores.

Se comprobó que la biblioteca de enlace dinámico Epanet2 modelaba el comportamiento de las concentraciones de los químicos especialmente el del cloro residual con base al modelo cinético de decrecimiento de primer orden que tiene como ecuación principal la ecuación 1.

Para ello, se escogió una línea de flujo identificada por medio del modelo, perteneciente a la red de distribución del sector en estudio, en la cual se le determinó por medio de la simulación el tiempo de permanencia y el cloro residual a 20 de sus nodos, que es la cantidad suficiente de datos para encontrar una línea de tendencia.

Con los datos observados en los nodos de la línea de flujo y dado que estos datos fueron los arrojados por Epanet después de la simulación, se realizó la gráfica (Cl R vs T perm) (Figura 5) con los datos de la tabla 6 (ver anexo 1), obteniéndose como resultado una gráfica de tipo exponencial con un coeficiente de correlación 0.999, aproximadamente 1.

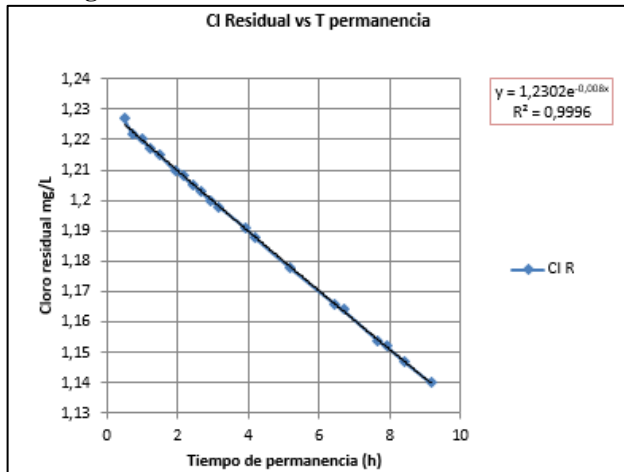
Se escogió un día al azar para realizar esta prueba y fue el 17 de agosto de 2013 en el que el Cl<sub>2</sub>

(cloro inicial) era de 1.23 mg/L y el K de -0.008 (h<sup>-1</sup>).

La ecuación de la línea de tendencia fue la siguiente:

$$C(t) = 1.23e^{-0.008*t} \quad (3)$$

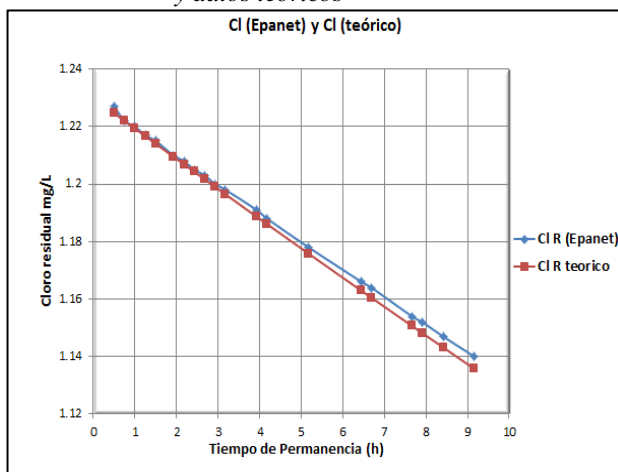
**Figura 5.** Decaimiento del cloro residual



Fuente: los autores.

Una vez obtenida la gráfica de los datos de Epanet se realizó una comparación con la gráfica de los datos teóricos, (ver Figura 6), hallados con los mismos tiempos de permanencia, valores iniciales y coeficiente de decaimiento del cloro, encontrándose así un error máximo de 0.37%, un error que garantiza la confiabilidad de los resultados de las simulaciones posteriores.

**Figura 6.** Comparación de pruebas. Datos Epanet y datos teóricos



Fuente: los autores.

Los datos utilizados para realizar la prueba están ordenados en las Tablas 6 y 7 (ver anexo 1).

### 2.1.3 Determinación del tiempo de permanencia del agua.

Antes de calcular el valor teórico de la constante de decaimiento del cloro en cada punto de muestreo es necesario conocer primero el valor de los tiempos de permanencia del agua en la red hasta llegar a cada uno de estos puntos. Además es importante encontrar la hora en que la demanda de cada uno de los puntos de muestreo es suplida en un 100% por el tanque Estadio, ya que con este dato se verifica que el tiempo de permanencia encontrado es el correcto.

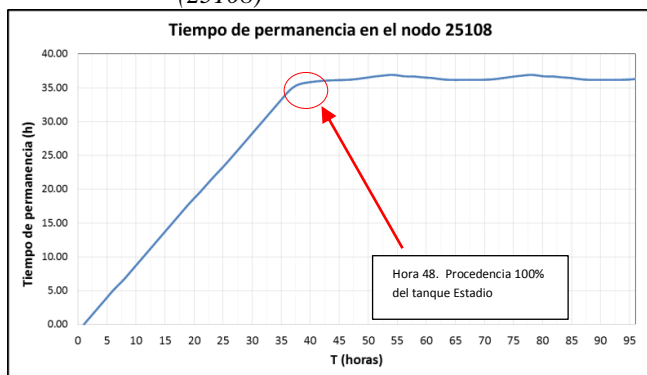
Se simuló el tiempo de permanencia del agua por medio de Epanet tomando un periodo de simulación de 96 horas equivalentes a cuatro días, tiempo necesario para evidenciar el comportamiento del agua en todos los nodos del modelo.

Los tiempos de permanencia del agua que se observaron teniendo en cuenta que la procedencia del tanque Estadio estuviera en 100 % en cada uno de los puntos de muestreo, fueron en promedio de: 36 horas para el punto del barrio Don Bosco, 21 horas para el punto del barrio Girardot y 12 horas en el punto del barrio Comuneros.

Cabe mencionar que la procedencia para este caso de estudio es única, ya que el agua proviene de una única fuente que es el tanque Estadio que es abastecido por la PTAP Bosconia y que a su vez es abastecida por el río Suratá.

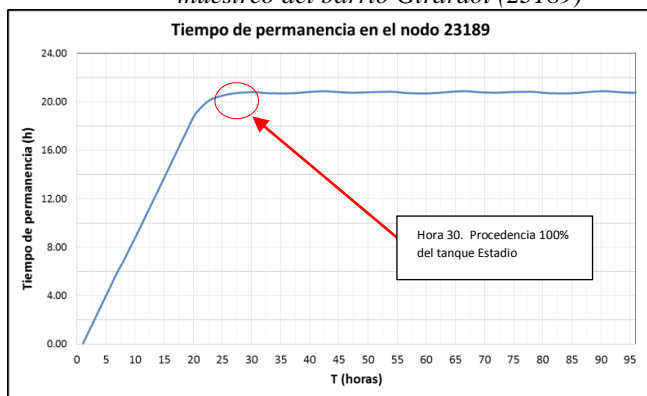
Las figuras 7, 8 y 9 muestran el comportamiento del tiempo de permanencia del agua en cada punto de muestreo a lo largo del periodo de simulación.

**Figura 7.** Tiempo de permanencia en el punto de muestreo del barrio Don Bosco (25108)



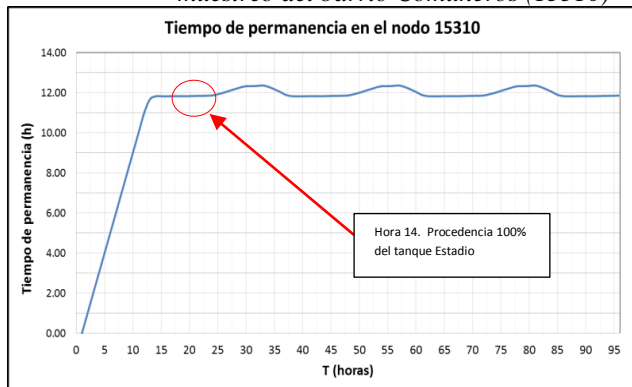
Fuente. modelo\_hidraulico\_amb2013.net

**Figura 8.** Tiempo de permanencia en el punto de muestreo del barrio Girardot (23189)



Fuente. modelo\_hidraulico\_amb2013.net

**Figura 9.** Tiempo de permanencia en el punto de muestreo del barrio Comuneros (15310)



Fuente. modelo\_hidraulico\_amb2013.net

### 2.1.4 Determinación de la constante de decaimiento del cloro K.

El cálculo teórico de la constante de decaimiento del cloro K es uno de los pasos determinantes de esta metodología, debido a que esta es la que determina que tan rápido decae la concentración del cloro residual con el tiempo, y es la que puede generar gran parte de los errores. Esta constante es diferente para cada día dependiendo de gran cantidad de factores como temperatura, pH, rugosidad de la tubería, entre otros.

Para cada punto de muestreo y días escogidos se halló la constante de decaimiento del cloro K con base en la ecuación 4. Estos cálculos aparecen en las Tablas 1, 2 y 3 que a continuación aparecen.

$$\frac{\ln \frac{C_0}{C}}{t} = K \quad (\text{h}^{-1}) \quad (4)$$

**Tabla 1.** Constante K. Punto de muestreo ubicado en el barrio Don Bosco

Fecha	Cl <sub>2</sub> R (muestra) mg/L	t permanencia (h)	K (h <sup>-1</sup> )
17/08/2013	0.9	36.5	0.0086
24/08/2013	0.86	36.5	0.0060
31/08/2013	0.82	36.5	0.0088
07/09/2013	0.76	36.5	0.0121
14/09/2013	0.81	36.5	0.0112
12/10/2013	0.98	36.5	0.0044
19/10/2013	0.8	36.5	0.0092
26/10/2013	0.78	36.5	0.0094

**Tabla 2.** Constante K. Punto de muestreo ubicado en el barrio Girardot.

FECHA	Cl <sub>2</sub> R (muestra) mg/L	t permanencia (h)	K (h <sup>-1</sup> )
17/08/2013	0.87	20.86	0.0166
31/08/2013	0.69	20.86	0.0236
07/09/2013	0.71	20.86	0.0244
14/09/2013	0.81	20.86	0.0196
19/10/2013	0.92	20.86	0.0094
26/10/2013	0.87	20.86	0.0112

**Tabla 3.** Constante  $K$ . Punto de muestreo ubicado en el barrio Comuneros.

FECHA	Cl <sub>2</sub> R (muestra) mg/L	t permanencia (h)	K (h <sup>-1</sup> )
05/08/2013	0.87	11.83	0.0279
13/08/2013	0.86	11.83	0.0127
02/09/2013	0.93	20.86	0.0122
28/10/2013	0.8	20.86	0.0077

Una vez hallados estos valores para cada uno de los días, se procedió a calcular el valor promedio de  $K$  de cada punto de muestreo como se indica en la Tabla 4 para luego encontrar un valor de  $K$  generalizado (promedio de todos los  $K$  calculados) con el cual se realizan las simulaciones, cuyos resultados de concentración del cloro residual se comparan posteriormente con los resultados teóricos calculados para cada sitio de muestreo.

**Tabla 4.**  $K$  Promedio en puntos de muestreo

Punto Muestreo	K promedio h <sup>-1</sup>
Don Bosco	0,0087
Girardot	0,0149
Comuneros	0,0136

$$K (\text{promedio}) = 0.0124 \text{ h}^{-1}$$

Como se observa el valor de  $K$  es diferente en cada muestra, por lo que este no puede deducirse solo una vez. En próximos modelos debe procurarse calcularlo con los datos más recientes que se obtengan e ir ajustando el modelo.

### 2.1.5 Simulación y obtención de resultados.

En este paso se busca obtener los resultados con los que posteriormente se compararan con aquellos calculados con las tres constantes  $K$  más divergentes al promedio hallado en el paso anterior. Para poder realizar la simulación son necesarios tan solo dos datos: la concentración del cloro inicial y la constante de decaimiento  $K$ .

En este caso una vez obtenido el valor de  $K$  (promedio) se procedió a realizar la simulación con la concentración de cloro residual inicial

promedio de los tres meses, cuyo valor era 1.16 mg/L.

Dentro de los resultados del modelo se encuentra la diferencia del comportamiento en cada nodo de los dos parámetros modelados (concentración del cloro residual y tiempo de permanencia del agua). Estos se pueden apreciar en las Figuras 10 y 11.

### 2.1.6 Comparación de resultados con los obtenidos en campo.

A partir de las comparaciones entre los resultados de la simulación y los obtenidos en campo se puede crear criterio de la confiabilidad del modelo creado.

La comparación es general y se realizó entre los valores calculados a partir de la constante  $K$  cuyo valor es 0.0044 (h<sup>-1</sup>) y los resultados de la simulación utilizando el  $K$  promedio cuyo valor es 0.0124 (h<sup>-1</sup>).

El valor 0.0044 (h<sup>-1</sup>) corresponde a la constante de decaimiento del cloro residual que más se alejó del promedio hallado en el paso anterior.

Esta comparación general se realiza con el fin de encontrar los valores de cloro residual inicial y de la constante de decaimiento del cloro  $K$  con los que se busca modelar y obtener resultados con una menor desviación, para ello se utilizaron los siguientes datos:

A continuación se presenta el cálculo utilizado en el proceso de comparación.

Punto de muestreo del barrio Don Bosco:

Fecha: 12 de octubre de 2013.

Cl<sub>2</sub> R (inicial): 1.15 mg/L.

K: 0.0044 h<sup>-1</sup>.

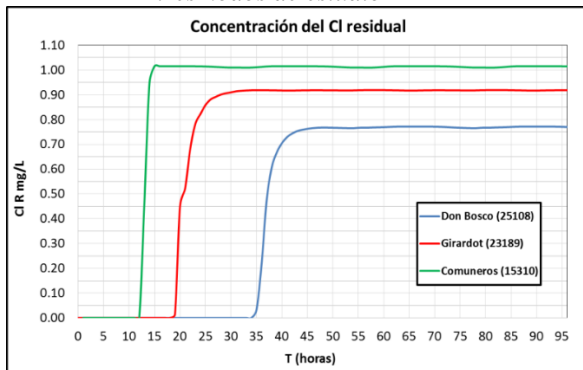
La simulación se realizó con los siguientes datos:

Cl<sub>2</sub> R (inicial): 1.16 mg/L.

K: 0.0124 h<sup>-1</sup>.

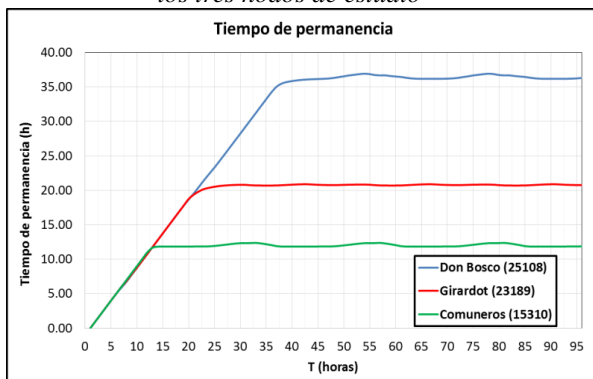
La figura No.12 ayuda a comprender los resultados de esta comparación.

**Figura 10.** Concentración del cloro residual en los tres nodos de estudio



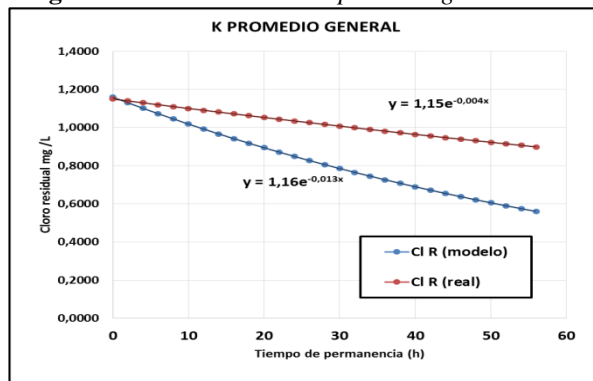
Fuente: modelo\_hidraulico\_amb2013.net

**Figura 11.** Tiempo de Permanencia del agua en los tres nodos de estudio



Fuente: modelo\_hidraulico\_amb2013.net

**Figura 12.** Resultado de comparación general



Fuente. Los autores.

De esta comparación se obtuvo que el valor de la concentración del cloro residual calculado en la simulación en un tiempo de permanencia equivalente a 36 horas fue de 0.726 mg/L, lográndose así un error de 26.5% en relación al valor real que es de 0.98 mg/L.

Adicionalmente se realizan otras dos comparaciones con datos calculados a partir de la constante  $K$  más alejada al valor de  $-0.0124$  ( $h^{-1}$ ) y pertenecientes a los otros dos puntos de muestreo ubicados en el barrio Girardot y Comuneros.

Los datos encontrados en las comparaciones están registrados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Comparación de resultados

Nodo	Cl <sub>2</sub> R (real)	Cl <sub>2</sub> R (modelo)	K (teórico)	% Error
25108	0,98	0,72	0,0044	26,5
23189	0,71	0,88	0,0024	23,9
15310	0,86	0,99	0,028	15,1

De estas comparaciones se puede concluir que entre más tiempo permanezca el agua en la red de distribución, la dificultad de encontrar una constante  $K$  que se ajuste a la realidad va a ser mayor, sabiendo que la permanencia del agua en la red para el nodo 25108, 23189 y 15310 son 36, 21 y 12 horas respectivamente.

### 2.1.7 Aplicación del modelo en busca de sectores vulnerables.

De acuerdo con los resultados del modelo anterior se pudo observar que en la hora 72 de la simulación, hora en la que el agua ha llegado a todos los nodos de la red, en todos los barrios del Distrito Estadio la concentración de cloro residual es aceptable debido a que los valores calculados están en los rangos exigidos por la norma (0.2 – 1.2 mg/L).

No obstante se encontraron puntos en la red donde la concentración es baja en comparación al resto del sector, estos puntos se pueden clasificar en dos tipos:

- 1) Un primer tipo de puntos se encuentran por toda la red, y corresponden a tuberías no malladas y terminan en un nodo (ciego) que no se encuentra reconectado a la red, con un

promedio de concentración de cloro residual equivalente a 0,5 mg/l.

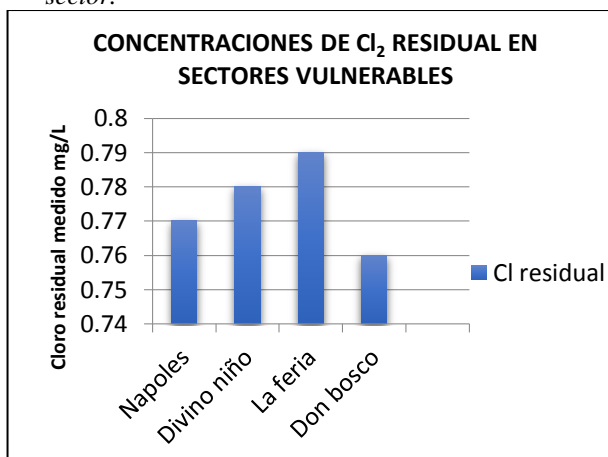
Según las anteriores características, estos nodos pueden corresponder a hidrantes o secciones de tuberías disponibles para purgas en la red.

- 2) El segundo tipo de puntos están localizados en los sectores más alejados del tanque de almacenamiento Estadio, y donde el agua debe realizar recorridos muy extensos para llegar a su destino, este recorrido se puede medir mediante los tiempos de procedencia los cuales son entre 40 a 50 horas, y la concentración se encuentra en el rango de 0.7 mg/l a 0.8 mg/l (ver Anexo H Figura 1).

Los barrios vulnerables a la deficiencia del  $Cl_2$  residual son:

1. Don Bosco
2. Nápoles
3. El Divino niño.
4. La feria

**Figura 13.** Concentraciones bajas de  $Cl_2$  residual en el sector.



Fuente. Los autores.

Estas concentraciones bajas no representan ningún riesgo para el consumo del agua, debido a que la concentración mínima reglamentada es de 0.2 mg/l.

En la Figura 1 del Anexo H se esquematiza las diferentes concentraciones del cloro residual en la hora 72 de la simulación.

### 3. CONCLUSIONES.

Por el interés práctico que presenta este tema, se centran las principales conclusiones de trabajo de investigación, en una serie de recomendaciones y experiencias observadas durante su desarrollo.

- ✓ El proceso de simulación se debe prolongar en un periodo continuo de funcionamiento de mínimo 72 horas, para que se puedan observar a través del modelo los efectos inmediatos de la evolución de la calidad del agua (concentración del cloro residual) sobre la red de distribución del sector Distrito Estadio.
- ✓ Durante cada simulación se debe encontrar el coeficiente de decaimiento del cloro, ya que para cada día y para cada tubería es diferente, pues este depende de muchos factores como la temperatura, el material de las tuberías, el pH, la concentración de otras sustancias, etc.
- ✓ El consumo de cloro residual en las redes de distribución de agua potable depende de algunos factores como la velocidad a la que circula el agua, el tiempo de residencia, el diámetro de la tubería, y del decaimiento del cloro en el seno del agua y en las paredes de la tubería.
- ✓ La discrepancia de los resultados, se pueden asociar a las variables que no se estudiaron como son; el tipo de mezclado en los tanques los cuales son modelados como embalses, la pérdidas de cloro residual en el tramo PTAP – Tanque de almacenamiento Estadio y la combinación de agua de diferentes plantas de tratamiento (La Flora, Morrórico y Bosconia).
- ✓ Actualmente en la planta de tratamiento Bosconia se suministra a la red una cloración inicial suficiente para garantizar el cumplimiento de la normatividad colombiana en lo que concierne a los niveles máximos y mínimos permisibles del desinfectante residual.

- ✓ Para crear un buen modelo se deben tener más puntos de muestreo en el sector durante un tiempo considerable, y de este modo encontrar un valor para la constante de decaimiento del cloro más cercano a la realidad.

### REFERENCIAS.

[1] Alcocer Yamanaka Víctor Hugo. Flujo estocástico y transporte en redes de distribución de agua potable. [PhD Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.

[2] Decreto 1575 de 2007 Mayo 09. Artículo 2. Definiciones agua potable.

[3] Epanet y cooperación. Introducción al cálculo de redes de agua por ordenador. Capítulo 5.

[4] Lewis A. Rossman, Epanet 2 manual de usuario. P 41-46.

[5] Rosario Vidal, Fernando Martínez, Manuel Ayza. Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable. Ingeniería del Agua, vol. 1. Universidad Politécnica de Valencia, 1994, p 56.

[6] Machuca Rivera Silvana Carolina. Simulación del transporte de sustancias presentes en redes de distribución. [Tesis de grado]. Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. 2013.

[7] Organización Panamericana de la Salud OPS, “Como actúa el cloro en el Agua”. Hydria, No 14, Julio 2008, pp. 18-19.

[8] Saldarriaga Juan, Jurado Cesar. “Metodología para la Definición de Planos Óptimos de Presiones”. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá, mayo 2008.

[9] Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. <http://www.amb.com.co> [citado 10 de enero de 2014]

[10] Dirección técnica de gestión de acueducto y alcantarillado. Informe control de la calidad del agua en Colombia – 2003

[11] Tratamiento y purificación del agua. <http://www.lenntech.es/processos/desinfeccion/quimica/desinfectantescloro>. [Citado 11 enero de 2013]

[12] Francisco Ramírez Quirós. “Desinfección del agua con cloro y cloraminas”. Editorial canal Educa. Madrid, España 2005. Pp 20-34.

## ANEXOS

### ANEXO A.

**Tabla 1.** *Cloro residual a la salida de la planta Bosconia*

<b>Cl<sub>2</sub> Residual PLANTA BOSCONIA</b>			
	<b>Ago-13</b>	<b>Sep-13</b>	<b>Oct-13</b>
<b>DÍA</b>	<b>Cl<sub>2</sub> R</b>	<b>Cl<sub>2</sub> R</b>	<b>Cl<sub>2</sub> R</b>
1	1.00	1.20	1.18
2	1.38	1.20	1.15
3	1.36	1.08	1.10
4	1.21	1.10	1.21
5	1.08	1.18	1.27
6	1.34	1.18	1.20
7	1.15	0.94	1.07
8	1.03	1.02	1.18
9	0.98	1.30	1.38
10	0.85	1.20	1.15
11	0.90	1.30	1.21
12	1.00	1.22	1.22
13	1.58	1.22	0.98
14	0.94	1.17	0.75
15	1.23	1.22	1.11
16	1.12	1.30	1.18
17	1.14	1.15	1.12
18	1.02	1.20	1.15
19	1.40	1.10	0.95
20	1.10	1.18	0.95
21	1.08	1.54	0.91
22	1.07	1.52	1.04
23	1.00	1.26	1.67
24	1.23	1.40	1.10
25	1.33	1.20	1.12
26	1.41	1.20	1.25
27	1.64	1.36	0.94
28	1.28	1.54	1.03
29	1.13	1.03	1.03
30	0.69	1.15	1.00
31	1.10		1.08

**ANEXO B.**

**Tabla 2.** *Cloro residual en el punto de muestreo barrio Don Bosco*

<b>Cl<sub>2</sub> residual B. Don Bosco</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Cl<sub>2</sub> residual</b>
03/08/2013	1.010
10/08/2013	1.160
17/08/2013	0.900
24/08/2013	0.860
31/08/2013	0.820
07/09/2013	0.760
14/09/2013	0.810
21/09/2013	1.080
28/09/2013	1.160
05/10/2013	1.080
12/10/2013	0.980
19/10/2013	0.800
26/10/2013	0.780

**ANEXO C.**

**Tabla 3.** *Cloro residual en el punto de muestreo barrio Girardot*

<b>Cl<sub>2</sub> residual B. Girardot</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Cl<sub>2</sub> residual</b>
03/08/2013	1.160
10/08/2013	1.220
17/08/2013	0.870
24/08/2013	1.070
31/08/2013	0.690
07/09/2013	0.710
14/09/2013	0.810
21/09/2013	1.220
28/09/2013	1.490
05/10/2013	1.080
12/10/2013	1.150
19/10/2013	0.920
26/10/2013	0.870

**ANEXO D.**

**Tabla 4.** *Cloro residual en el punto de muestreo barrio Comuneros*

<b>Cl<sub>2</sub> residual B. Comuneros</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Cl residual</b>
05/08/2013	0.870
06/08/2013	1.080
13/08/2013	0.860
26/08/2013	1.310
27/08/2013	0.980
02/09/2013	0.930
03/09/2013	1.140
23/09/2013	1.140
30/09/2013	1.160
01/10/2013	1.220
07/10/2013	0.970
15/10/2013	0.780
28/10/2013	0.800

**ANEXO E.**

**Tabla 5.** *Ubicación puntos de muestreo.*

<b>Barrio</b>	<b>Nodo en Epanet</b>	<b>Dirección.</b>
Comuneros	25108	Cra 18 Calle 19 Equina
Don Bosco	23189	Cra 15 W Calle 31
Girardot	15310	Calle 25 # 6-73

**ANEXO F.**  
**Tabla 6. Resultados por Epanet**

<b>Nodo</b>	<b>T perm. (h)</b>	<b>Cl<sub>2</sub> R</b>
10426	0.5	1.227
11106	0.75	1.222
268091	1	1.22
11105	1.25	1.217
11107	1.5	1.215
268096	1.93	1.21
11103	2.18	1.208
10692	2.43	1.205
11104	2.68	1.203
10982	2.93	1.2
11243	3.18	1.198
15804	3.93	1.191
15879	4.18	1.188
15167	5.18	1.178
14976	6.45	1.166
15208	6.69	1.164
15405	7.662	1.154
268437	7.913	1.152
273799	8.412	1.147
15419	9.163	1.14

**ANEXO G.**

**Tabla 7.** Datos teóricos cloro residual

<b>t (h) perm</b>	<b>Cl<sub>2</sub> R final</b>
0,5	1,2247
0,75	1,2220
1	1,2193
1,25	1,2167
1,5	1,2141
1,93	1,2095
2,18	1,2069
2,43	1,2043
2,68	1,2017
2,93	1,1990
3,18	1,1964
3,93	1,1887
4,18	1,1861
5,18	1,1758
6,45	1,1629
6,69	1,1605
7,662	1,1507
7,913	1,1482
8,412	1,1432
9,163	1,1358

ANEXO H.

Figura 1. Concentración del cloro residual en la hora 72 de la simulación.

