

**MODELO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR CLORO RESIDUAL EN EL AGUA
DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE
BUCARAMANGA S.A. ESP (amb)**

URIEL SALOMON BARRAGAN CARDOZO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUIMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2010**

**MODELO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR CLORO RESIDUAL EN EL AGUA
DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE
BUCARAMANGA S.A. ESP (amb)**

URIEL SALOMON BARRAGAN CARDOZO

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
ESPECIALISTA EN QUIMICA AMBIENTAL**

Director:

Esp. CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUIMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

*Al eterno y poderoso **DIOS**, que me ha acompañado en todos los momentos de mi vida desde mi concepción hasta hoy, gracias papito Dios por el inmenso amor que me tienes, por todos los regalos maravillosos que me das, por tu misericordia, por tu unción fresca que renueva mi espíritu todos los días, por tu protección poderoso, por darme a conocer a tú HIJO **NUUESTRO SEÑOR JESUCRISTO Y TU ESPIRITU SANTO** mil y mil gracias, te Alabo y te Bendigo siempre mi DIOS, papito DIOS no permitas nunca que me separe de ti para alcanzar esa morada eterna que tu planeaste para mí antes de que yo naciera y que me compraste con la sangre de tu HIJO JESUS en la cruz de calvario para mi salvación que esa sangre poderosa me guarde de todo mal y peligro me llene de paz y alegría. Amén*

*A las reinas de mi corazón Mamacita Luz Marina y mi Hermana Andrea Paola y mi Abuelita Flor de María Correa de Cardozo motores de mi existencia por las cuales daría mi vida las Amo mucho este triunfo es para ustedes, gracias por seguir conmigo en la lucha de la vida diaria, que el **TODOPODEROSO JEHOVA** de los ejércitos me las guarde de todo mal y peligro, nos permita seguir compartiendo por muchísimos años más llenos de su presencia y paz.*

A mi Querido Padre Salomón Barragán Ruiz, papito gracias por tu ofrenda al dar la vida por nosotros, esperó encontrarnos en la eternidad, te fuiste muy temprano mi querido Padre, desde acá este triunfo es para ti, estas siempre en mi corazón, que el dueño de la vida te permita desde la eternidad seguir viendo las bendiciones que nos regala a diario.

A mis Amigos y Amigas del alma Tarsán, Suys, Catucha, Mini, Dino, Memito, Nicol, Deys, Toby, Tony, Shocotí, Coki, pepito y los pachitos, seres maravillosos que DIOS me ha regalado para demostrarme su amor, amigos como ustedes será difícil encontrar nuevamente, estarán siempre en los recuerdos más bellos de mi vida y de ustedes sabrán mis futuras generaciones. Gracias y Mil Gracias.

AGRADECIMIENTOS

*Al **ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A ESP**, por permitirme adelantar esta monografía en esta gran empresa de la cual me siento orgullosa de pertenecer.*

*A mis compañeros del **Laboratorio de la Sección de Control Calidad de Aguas**, muchas gracias por las muestras de generosidad y comprensión con este su humilde servidor.*

*Al Doctor **Carlos Manuel Parra**, gracias por su gran aporte en la dirección de esta monografía y su voto de confianza en el trabajo diario.*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. MARCO TEORICO	14
1.1 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	14
1.2 HISTORIA.....	15
1.3 FORMULACIÓN DEL MODELO DE LA RED COMO UN REACTOR DE MEZCLA COMPLETA (RMC) Y REACTOR FLUJO PISTON (RFP).....	16
1.4 REACTOR FLUJO CONTINUO Y MEZCLA COMPLETA	17
1.5 REACTOR DE FLUJO PISTÓN	18
2. METODOLOGIA EJECUTADA	20
2.1 SITIO DE APLICACIÓN MODELO PROPUESTO	20
2.2 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO RESIDENCIA TANQUE DISTRIBUCIÓN PLANTA LA FLORA Y RED ORIENTAL	21
3. ANALISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	22
3.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO RMC Y RFP UTILIZANDO LA HOJA DE CÁLCULO EXCEL.	27
3.2 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS RMC Y RFP	29
3.3 MODELACIÓN DEL CLORO RESIDUAL VS EL TIEMPO DE RESIDENCIA DEL AGUA EN LA TUBERÍA	32
4. CONCLUSIONES	34
5. RECOMENDACIONES	36
BIBLIOGRAFIA.....	37

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Red Distribución Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.....	20
FIGURA 2 Decaimiento Cloro con el Tiempo Octubre 5 de 2009.....	23
FIGURA 3 Decaimiento Cloro con el Tiempo Octubre 6 de 2009.....	23
FIGURA 4 Decaimiento Cloro con el Tiempo Octubre 7 de 2009.....	24
FIGURA 5 Decaimiento Cloro con el Tiempo Octubre 9 de 2009.....	24
FIGURA 6 Decaimiento Cloro con el Tiempo Octubre 20 de 2009.....	25
FIGURA 7 Decaimiento Cloro con el Tiempo Octubre 26 de 2009.....	25
FIGURA 8 Decaimiento Cloro con el Tiempo Noviembre 10 de 2009	26
FIGURA 9 Decaimiento Cloro con el Tiempo Noviembre 11 de 2009	26
FIGURA 10 Decaimiento Cloro con el Tiempo Mayo 10 de 2010	27
Figura 11 Comparación de la Concentración del Desinfectante en Campo con el Arrojado por los Modelos Rmc Y Rfp.....	29
FIGURA 12 Variación del Desinfectante vs Tiempo Residencia en la Red	32

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 Resistencia de Zona	21
TABLA 2 Resultados de los Modelos Aplicados en la Red Oriental	
Septiembre 9 de 2010.....	28
TABLA 3 Resultados de la Validación de los Modelos Aplicados en la Red	
Oriental Septiembre 12 de 2010.	30
TABLA 4 Resultados de la Validación de los Modelos Aplicados en la Red	
Oriental Octubre 5 de 2010.....	31

RESUMEN

Título: Modelo experimental para evaluar cloro residual en el agua de las redes de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP (amb)¹

Autor: Uriel Salomón Barragán Cardozo²

Palabras claves: modelo de calidad del agua, decaimiento del cloro, calibración de modelos, reactor de mezcla completa (RMC), reactor de flujo pistón (RFP).

Se realizó un modelo experimental para evaluar cloro residual en el agua de las redes de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. La constante de decaimiento del cloro en el agua fue determinada como una reacción de primer orden, se encontró un valor promedio de 0.08 horas. Se hallaron porcentajes de error inferiores al 10% al comparar los resultados obtenidos del modelo experimental (RMC) y (RFP) con los determinados en campo. El tiempo de residencia del agua dentro de la tubería, usado para la calibración y verificación del modelo fue de 5 horas. El modelamiento del decaimiento del desinfectante en la red de distribución, asumiendo que este se comporta como un reactor de flujo continuo y mezcla completa RMC, fue el que presentó el menor porcentaje de error en los tiempos de residencia modelados. Se evaluó la reacción del cloro residual libre con el agua solamente (excluyendo la reacción del agua con la pared del tubo). Se tomaron 9 muestras de agua a la salida del tanque distribución, posteriormente, a diferentes intervalos de tiempo, se tomó la lectura de la concentración del cloro residual libre en cada muestra; para esto se utilizó el espectrofotómetro HACH DR-5000 basado en la determinación colorimétrica con DPD.

¹ Proyecto de grado

² Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Especialización Química Ambiental
Director: CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ

SUMMARY

Title: An experimental model to evaluate residual chlorine in water distribution networks the Aqueduct Metropolitan of Bucaramanga SA ESP (amb)¹

Author: Uriel Salomón Barragán Salomón Cardozo²

Keywords: water quality model, decay of chlorine, calibration of models, mixed reactor (CMR), plug flow reactor (PFR).

This study is an experimental model to evaluate residual chlorine in water distribution networks in the Aqueduct Metropolitan of Bucaramanga S.A ESP. The decay constant of chlorine in the water was determined as a first order reaction, we found an average of 0.08 hours⁻¹. Error rates were found below 10% when comparing the results of the experimental model (RMC) and (RFP) with those determined in the field. The residence time of water within the pipe, used for calibration and verification of the model was 5 hours. The lower the percentage being error data obtained from residual chlorine found in the distribution network, was reported by the experimental model, assuming that it behaves like a continuous flow reactor and mixed RMC. We evaluated the reaction of free chlorine with water only (excluding the reaction of water with the tube wall.) 9 samples were taken at the outlet water distribution tank, analyzing residual chlorine at different time intervals for this analysis, the spectrophotometer HACH DR-5000 based on the DPD colorimetric method. This work was carried out with the collaboration and equipments proportionated by the amb S.A E.S.P., and it will help for a periodical control of the chlorine residual in different networks of the amb.

¹ Project of grade

² Sciences. School: Chemistry. The director: Carlos Manuel Parra G

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua dentro de un sistema de distribución cambia en su trayectoria desde las fuentes de abastecimiento hasta el usuario final. El cloro utilizado como desinfectante decae una vez introducido en la red y existe el peligro de que ciertas partes de ella queden desprotegidas, con el correspondiente riesgo para la salud de la población. La mayoría de empresas encargadas de entregar agua potable, determinan la dosis necesaria del desinfectante para sus fuentes y si tienen eventuales estaciones de reinyección a través de monitoreos periódicos en la red.

Se aplica cierta dosis en la fuente y se mide en diferentes puntos de la red para ver si la concentración es suficiente. Sin embargo, resulta imposible realizar muestreos en toda la red, lo que genera incertidumbre en la concentración del desinfectante en muchos tramos del sistema (incluso en aquellos con tubería principal). Para garantizar la calidad del agua en las redes de distribución es necesario tener concentraciones en un rango de 0,3 a 2 mg/L según la normatividad colombiana. Vale la pena mencionar que no siempre la menor concentración se presenta en las zonas más alejadas a las plantas de tratamiento, puesto que el decaimiento es proporcional al tiempo de residencia del agua dentro de la red; esto es que pueden presentarse concentraciones reducidas de cloro en zonas con velocidad baja o bien en tanques de almacenamiento. Por otro lado, el control de la concentración del desinfectante puede ser complicado cuando la red es abastecida por varias fuentes a la vez.

Existen modelos matemáticos que simulan el comportamiento de la calidad del agua en las redes de distribución que implementados hacen posible predecir el comportamiento de la concentración del cloro bajo diferentes escenarios de operación en todos los puntos de la red y con esto garantizar una adecuada calidad del agua en todo el sistema. Se han propuesto varios modelos de este tipo (AWWARF y EPA, 1991; AWWARF, 1996; Tzatchkov et al, 2000; Tzatchkov et

al., 2002), pero la mayoría de ellos se han probado en redes pequeñas o en sistemas grandes muy simplificados, es decir, considerando solamente tuberías principales. Cabe señalar que un modelo de calidad del agua es útil precisamente en redes grandes y tomando todas las tuberías, en redes pequeñas, los tiempos son cortos pero se hace necesario que cada acueducto conozca cómo se comporta el desinfectante en la red de distribución para garantizar al usuario final la calidad del agua que va a ser consumida.

1. MARCO TEORICO

1.1 MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Es difícil utilizar los datos de monitorización aisladamente para entender el destino y la transformación de las sustancias que hay en el agua a medida que se mueve a través del sistema de distribución de una ciudad. Incluso las pequeñas ciudades pueden tener kilómetros de tuberías, tanques y bombeos, haciendo imposible alcanzar una extensa monitorización de su calidad. Los caminos de flujo y tiempos de desplazamiento son muy variables a causa de de la disposición en nodos de la red de tuberías y por los cambios continuos de la demanda que ejerce la población. Debido a esto es complicado obtener esta información en un monitoreo puntual que se realiza por lo general en las horas de la mañana obteniendo un solo comportamiento horario, por estas razones, el modelamiento matemático del comportamiento de la calidad del agua en los sistemas de distribución ha tomado mucha importancia para comprender realmente que sucede con el agua cuando esta abandona la planta de tratamiento con una excelente calidad y como esta llega al usuario final quien es el que la consume [1].

Estos modelos matemáticos ofrecen un medio efectivo y económico de estudiar la variación espacial y temporal de un número de constituyentes de la calidad del agua, incluyendo: [1]

- El volumen de agua originaria de una planta o mezcla de plantas
- La edad o tiempo de residencia del agua en el sistema.
- La concentración de un compuesto dentro del sistema
- La concentración y tasa de pérdida de un desinfectante secundario
- La concentración y tasa de desarrollo de subproductos de desinfección como THMs (Trihalometanos).

Los modelos pueden utilizarse para ayudar a los operadores del sistema de acueducto a realizar una gran variedad de estudios relacionados con la calidad del agua. Los ejemplos comprenden lo siguiente:

- Calibrado y pruebas hidráulicas de modelos del sistema por medio de la utilización trazadores químicos
- Localización y determinación del tamaño de instalaciones de almacenamiento y modificación de las operaciones del sistema para reducir la edad del agua.
- Modificar el diseño y operación del sistema para proporcionar la mezcla deseada de aguas de diferentes fuentes.
- Valorar y minimizar el riesgo de exposiciones del consumidor a los subproductos de los desinfectantes.
- Valorar la vulnerabilidad del sistema a incidentes de contaminación externa.

1.2 HISTORIA

Aunque el uso de modelos matemáticos para análisis hidráulico de los sistemas de distribución data de los años treinta (Cross, 1936), los modelos de calidad de agua son un desarrollo relativamente reciente. Los primeros trabajos se limitaron a representaciones en estado estacionario de las redes. En un estudio del flujo de un fango en una red de tuberías, (Wood, 1980) presentó una ampliación a un modelo hidráulico de estado estacionario en el cual se resolvían una serie de ecuaciones simultáneas para cada nodo. Una formulación similar fue presentada posteriormente por Chum y Selznick (1985) en una representación de 166 enlaces para la compañía de Agua del Condado de Alameda, en California, con tres fuentes de agua de diferentes durezas, y por Metzger (1985) en un estudio de mezcla, sedimentación y lavado en sistemas de distribución. En una

generalización de esta formulación, Males y otros (1985) usaron ecuaciones simultáneas para calcular la distribución espacial de la concentración, tiempos de desplazamiento y cualquier otra variable que pudiera estar asociada con enlaces o nodos [1].

Los modelos de calidad de agua en estado estacionario demostraron ser herramientas útiles para investigar el movimiento de un contaminante bajo condiciones constantes. Sin embargo, la necesidad de modelos que representen la dinámica del movimiento de los contaminantes llevó al desarrollo de modelos que simularon la transformación de los contaminantes en un sistema de distribución bajo condiciones variables temporalmente. Las primeras aplicaciones de estos modelos para trazar contaminantes y edad del agua fueron descritos por Grayman y otros, (1988) y Kroon y Hunt (1989). Desarrollos más recientes incluyen el efecto de las reacciones en masa y de pared en simulación de modelos de cloro residual (Rosman y otros,1994), Vasconcelos y otros,1997), de desarrollo de biofilm (Servais y otros,1995), y modelos de formación de Trihalometanos (Vasconcelos y otros,1996). Un desarrollo importante en los años noventa fue el desarrollo de modelos hidráulicos y modelos de calidad del agua en paquetes gráficos simples para el usuario. Ejemplos de paquetes comerciales de modelización de redes que contienen capacidades de modelar la calidad del agua incluyen a CYBERNET, EPANET, H2ONET y Stoner SynerGEE [1].

1.3 FORMULACIÓN DEL MODELO DE LA RED COMO UN REACTOR DE MEZCLA COMPLETA (RMC) Y REACTOR FLUJO PISTON (RFP)

Los procesos de tratamiento de aguas operan, generalmente, como procesos de flujo continuo, con un afluente y efluente definidos durante el período de tratamiento. En ocasiones el proceso es discontinuo, en cochada, con una carga instantánea del reactor y descarga posterior, sin adiciones intermedias de afluente ni extracciones de efluente. La reacción entre el afluente y el efluente está

determinada por las características de dispersión del reactor y por la cinética de las reacciones dentro de él. Los dos extremos fundamentales de características de dispersión de un reactor son el flujo en pistón y el flujo en mezcla completa. En este último el afluente se mezcla instantáneamente con el contenido del reactor, mientras que en el primero el fluido se mueve a través del reactor sin que ocurra su mezcla [2].

El reactor de flujo continuo y mezcla completa este es un reactor ideal, porque el afluente es mezclado instantánea y completamente con el contenido del reactor, es decir las partículas del afluente se dispersan inmediatamente al entrar al reactor en una dispersión infinita, ya que la tubería o tanque tendrá un contenido homogéneo y una composición uniforme en su volumen, por tanto la concentración del efluente es idéntica a la del licor mezclado del reactor [2] .

1.4 REACTOR FLUJO CONTINUO Y MEZCLA COMPLETA

Cuando se clora el agua filtrada en una planta de potabilización el cloro se mezcla de manera instantánea dentro del tanque y en la tubería se comporta como un RMC donde se ve la red como pequeños reactores de mezcla completa, el balance de masa para el cloro, dentro de estos reactores es dado por la siguiente ecuación [2]:

$$\text{Afluente-Efluente-Desaparición}=0$$

$$QCo - QCe - Vr = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

Para una tasa de desaparición del cloro residual en contacto con el agua se satisface una reacción de primer orden entonces

$$r = K Ce \quad \text{Ecuación 2}$$

Reemplazando la ecuación 1 en la 2, se obtiene la ecuación 3 y dividiendo por el caudal que es constante se obtiene

$$(QCo - QCe - VKCe)/Q = 0 \quad \text{Ecuación 3}$$

Despejando la concentración inicial se obtiene la ecuación 4 y al dividir entre el caudal se obtiene el tiempo de residencia que en nuestro caso es la edad del agua dentro de la red de distribución [2].

$$\frac{V}{Q} = \theta$$

$$C_o - C_e - K C_e \theta = 0$$

$$C_o = C_e (1 + K \theta)$$

$$\frac{C_o}{(1 + K \theta)} = C_e \text{ Ecuación 4}$$

En la ecuación 4 la concentración del efluente estará dada por la concentración inicial C_o el tiempo de residencia θ o edad del agua dentro de la tubería o tanque de almacenamiento y la cinética de reacción del cloro con el agua K .

1.5 REACTOR DE FLUJO PISTÓN

El reactor de flujo en pistón o flujo tubular es un reactor ideal, en el cual las partículas de fluido viajan a lo largo del reactor sin mezclarse y por tanto, se descargan en la misma secuencia u orden en que entran al reactor. Todos los elementos del sistema viajan a la misma velocidad, las partículas retienen su identidad y permanecen en el tanque durante un tiempo igual al tiempo teórico de retención. Si se visualiza el concepto del flujo pistón como un flujo en el cual el fluido, al llegar al reactor, es encerrado en paquetes herméticos que luego viajan a lo largo del tanque, sin transferir ninguna sustancia de un paquete a otro, aunque exista mezcla completa dentro de cada paquete, se puede considerar que cada paquete es un mini reactor de cochada en mezcla completa, con base en lo anterior, el modelo de decaimiento del Cloro, en un reactor ideal de flujo en pistón, obedece la ecuación de decaimiento para un reactor de cochada de mezcla completa [2].

$$t = \int_{C_o}^C \frac{dc}{r} \text{ Ecuación 5}$$

Para la tasa de decaimiento de cloro, según una reacción de primer orden se cumple la ecuación 2

$$r = K C_e$$

Reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 5 integrando se obtiene la ecuación 6

$$C_e = C_o e^{-Kt} \text{ Ecuación 6}$$

Donde: C_e = Cloro de salida red o tanque mg Cl_2/L
 C_o = Cloro de entrada en la red o tanque mg Cl_2/L
 K = Constante de decaimiento cloro residual ($horas^{-1}$)
 T = Tiempo de retención (h)

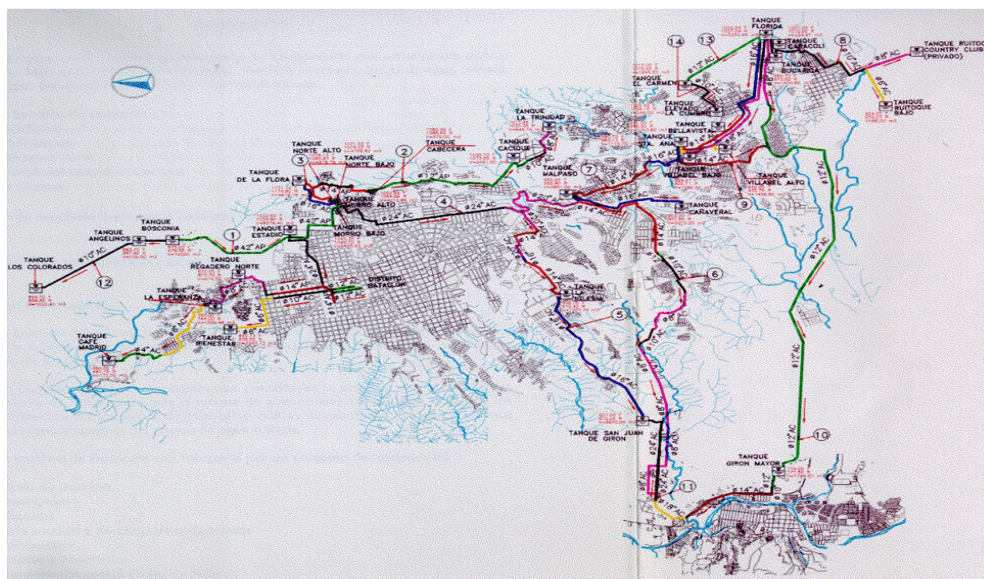
2. METODOLOGIA EJECUTADA

Se presentan los pasos necesarios para aplicar el modelo del decaimiento del cloro residual con el agua tratada en una red de distribución suponiendo un comportamiento en la tubería del agua como un reactor de mezcla completa **(RMC)** y un reactor flujo pistón **(RFP)** y mediante la ayuda computacional con la hoja de cálculo en Excel se compara cual de los dos modelos de reactor presentó el mejor comportamiento del decaimiento del cloro en la red oriental del amb. Para la metodología del estudio experimental se siguió la reportada en la literatura [3] [4].

2.1 SITIO DE APLICACIÓN MODELO PROPUESTO

La zona seleccionada para aplicar el modelo propuesto comprende la Planta de tratamiento de la Flora (sistema Río Toná) y la red oriental de distribución que abastece.

Figura 1 Red de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga



2.2 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO RESIDENCIA TANQUE DISTRIBUCIÓN PLANTA LA FLORA Y RED ORIENTAL

Se determinó de manera teórica el tiempo de residencia del agua en la zona de estudio utilizando como ayuda el modelo hidráulico EPANET que tiene implementado el **amb**. Los tiempos de residencia del agua en la salida de la planta y red de distribución se presentan a continuación:

Tabla 1 Resistencia de Zona

PUNTO MONITOREO	Tiempo residencia red (h)
Tanque distribución Planta	0,50
Barrio Albania CAI-Morrórico	0,58
Barrio Buenos Aires	0,67
Barrio Pinos	0,83
Barrio Alvarez	2,0
Barrio El Prado	4,0
Barrio Altos de Cabecera	3,5
Barrio Altos de Pan Azucar	4,3
Barrio Lagos de Cacique	2,75
Barrio Trinidad	4,67
Barrio Reposo	5

Fuente: El autor

2.3 CINÉTICA DECAIMIENTO DEL CLORO POR REACCIÓN CON EL AGUA

Se evaluó la reacción del cloro residual libre con el agua solamente (excluyendo la reacción del agua con la pared del tubo). Se tomaron 9 muestras de agua a la salida del tanque distribución, posteriormente, a diferentes intervalos de tiempo, se tomó la lectura de la concentración del cloro residual libre en cada muestra; para esto se utilizó el espectrofotómetro HACH DR-5000 basado en la determinación colorimétrica con DPD. Se grafica la concentración versus el tiempo de reacción y utilizando el ajuste exponencial para los datos medidos, se estableció que este fue el mejor modelo para determinar la constante de decaimiento del desinfectante con el tiempo.

3. ANALISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

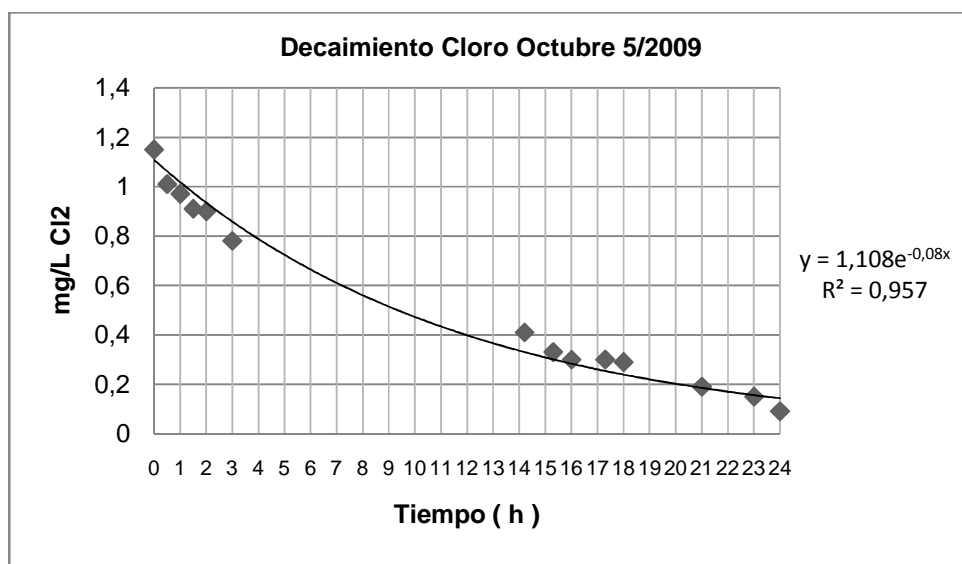
A continuación se presentan las gráficas donde se muestran las ecuaciones para determinar la constante cinética de decaimiento del cloro en la red de distribución con respecto al tiempo. El mejor ajuste matemático de los datos obtenidos obedeció a una ecuación exponencial. Se realizaron 9 muestreos en los cuales se analizó aproximadamente 90 mediciones de cloro residual libre en la salida del agua del tanque de almacenamiento de la Planta la Flora que surte la red oriental.

Según (*Alcocer et al. 2002*) para obtener una constante media representativa de reacción del cloro con el agua correspondiente a la zona de estudio se considera los puntos donde la concentración inicial del desinfectante fuera alta, por lo tanto, el mejor punto para determinarla es a la salida del agua de la planta de tratamiento ya que en este la concentración inicial es más alta, haciendo una apreciación; para poderla determinar suponemos un caudal constante a la salida y una materia orgánica expresada como carbono orgánico total que presente valores entre 1 a 3 mg COT/L [5].

La constante de decaimiento del cloro residual K se obtiene a partir de las curvas de cada uno de los muestreos realizados. Los valores de esta varían entre un valor máximo de 0,13 horas a 0,04 horas, asimismo, la concentración del cloro inicial estuvo alrededor de 1,1 mg Cl_2/L y decae en un tiempo promedio de 20 horas hasta valores cercanos e incluso por debajo de lo recomendado por la resolución 2115/07, que es 0,30 mg Cl_2/L . A mayor valor de la constante de decaimiento, aumenta la velocidad de consumo del desinfectante. Esto se observa en la figura 3 y 4 debido a que en estos dos días por la baja turbiedad y color del agua cruda no se estaba dosificando sulfato de aluminio solo se filtraba el agua quedando en ella sustancias que contribuyen a aumentar el consumo del desinfectante en el tiempo. En los otros días del experimento se dosificó de

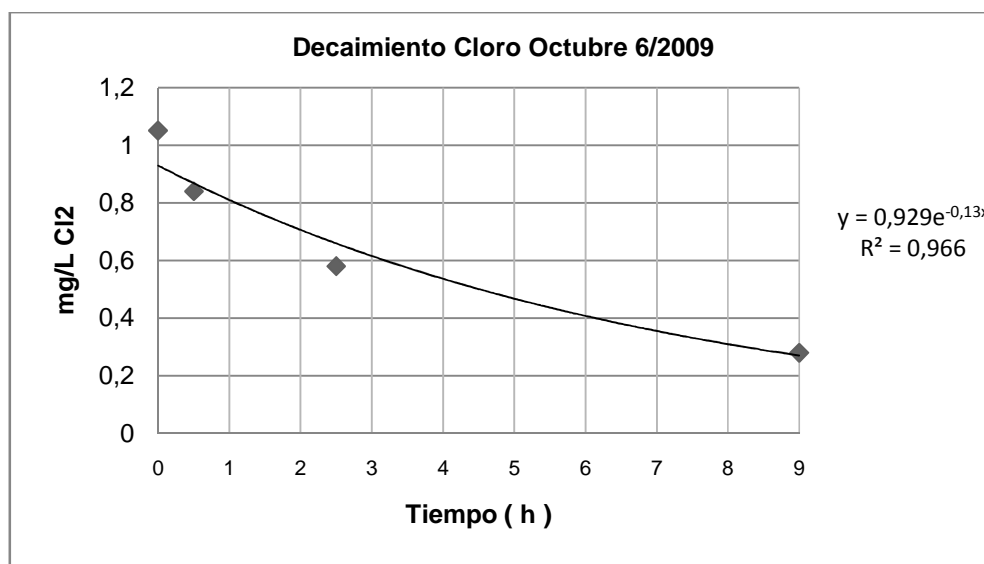
sulfato de aluminio, fluctuando el valor de la constante entre 0.04 horas- 0.08 horas.

Figura 2 Decaimiento Cloro con el tiempo Octubre 5 de 2009



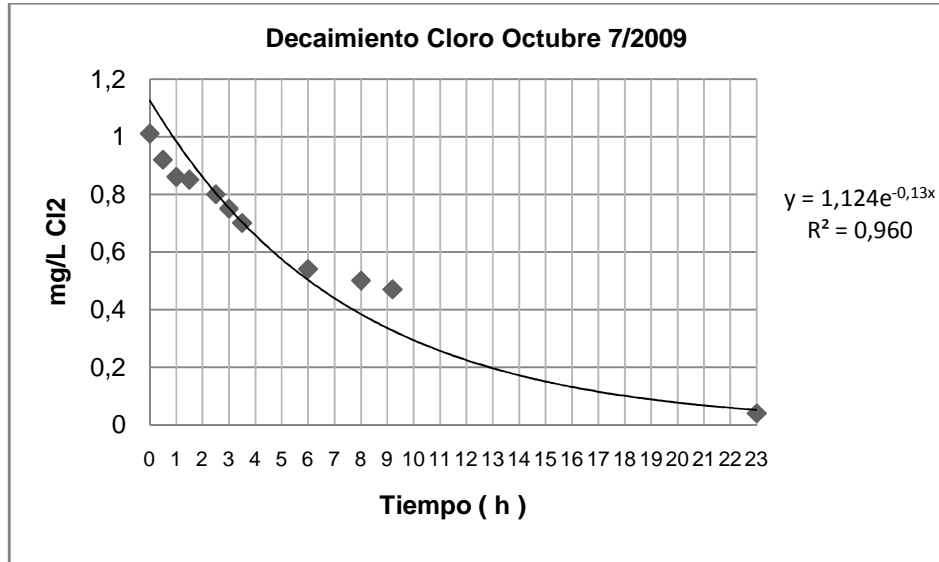
Fuente: El autor

Figura 3 Decaimiento Cloro con el tiempo Octubre 6 de 2009



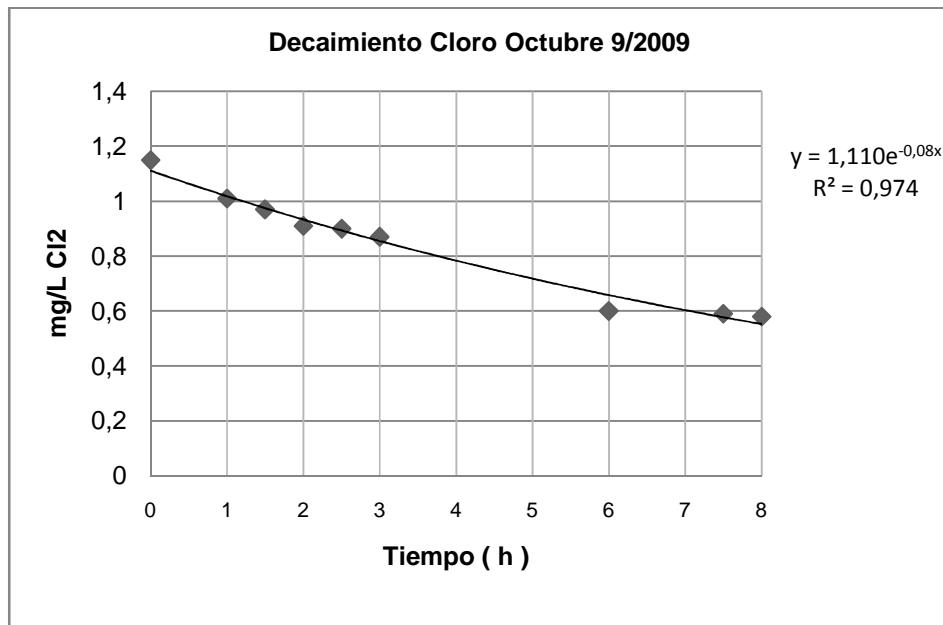
Fuente: El autor

Figura 4 Decaimiento Cloro con el tiempo Octubre 7 de 2009



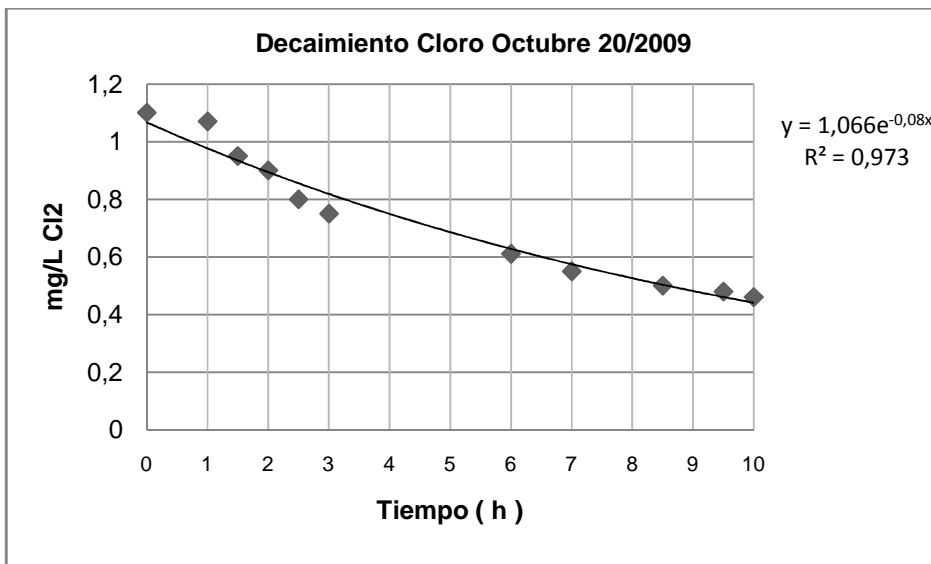
Fuente: El autor

Figura 5 Decaimiento Cloro con el tiempo Octubre 9 de 2009



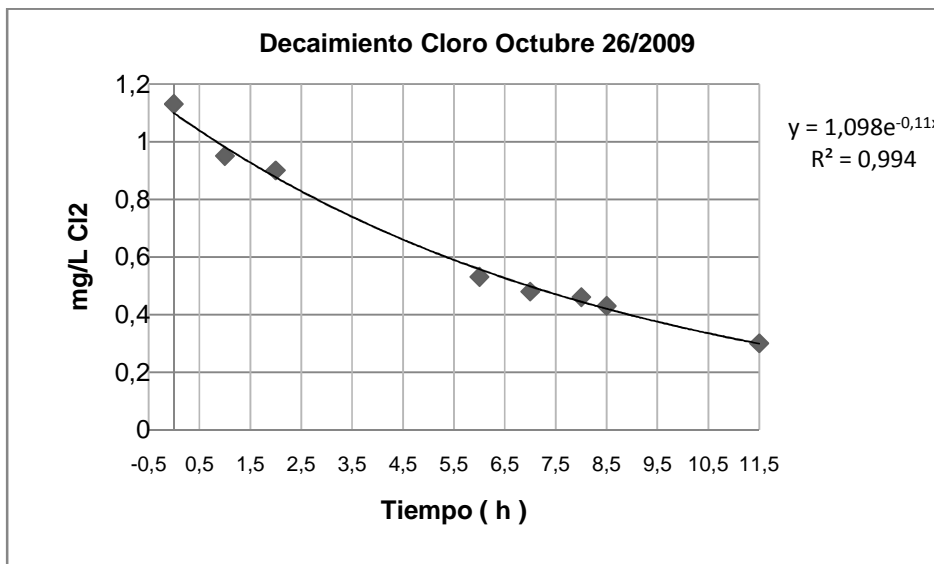
Fuente: El autor

Figura 6 Decaimiento Cloro con el tiempo Octubre 20 de 2009



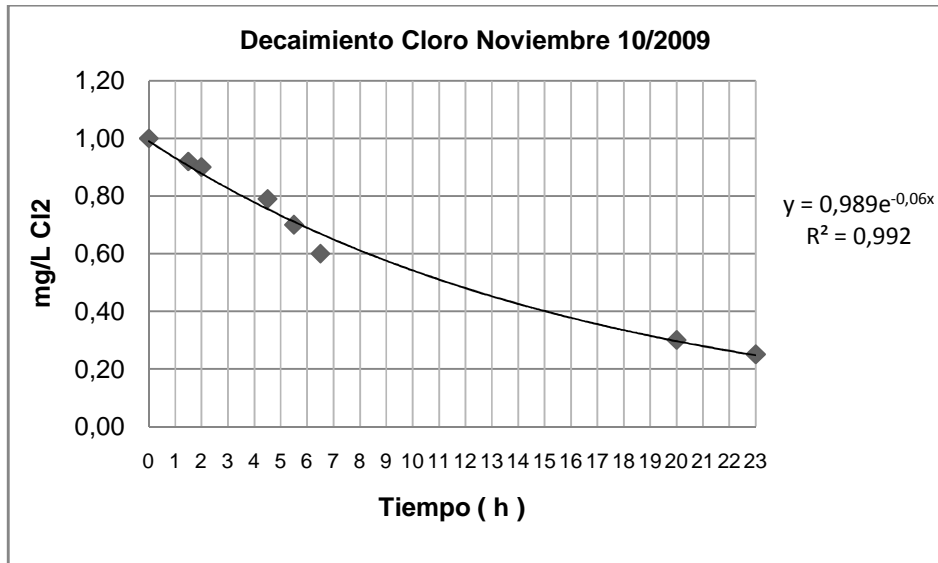
Fuente: El autor

Figura 7 Decaimiento Cloro con el tiempo Octubre 26 de 2009



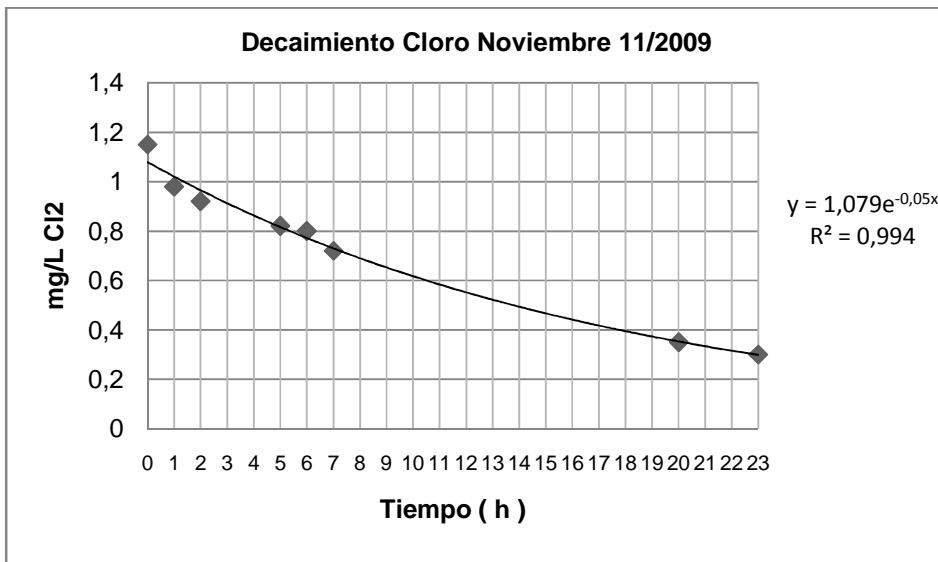
Fuente: El autor

Figura 8 Decaimiento Cloro con el tiempo Noviembre 10 de 2009



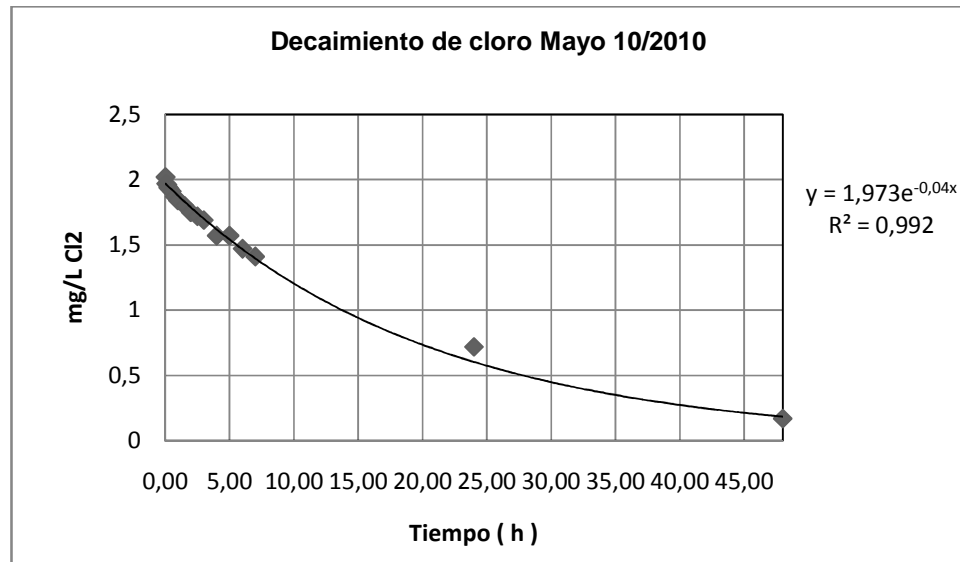
Fuente: El autor

Figura 9 Decaimiento Cloro con el tiempo Noviembre 11 de 2009



Fuente: El autor

Figura 10 Decaimiento Cloro con el tiempo Mayo 10 de 2010



Fuente: El autor

3.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO RMC Y RFP UTILIZANDO LA HOJA DE CÁLCULO EXCEL.

La hoja de cálculo está dividida en una tabla, que contiene 9 columnas la primera que contiene los puntos de monitoreo, la segunda la concentración inicial del cloro al comienzo de la red distribución, la tercera contiene el valor de la constante de decaimiento hallada de manera experimental, la cuarta el tiempo de residencia o edad del agua en la tubería, la quinta columna contiene la ecuación que representa como decae el desinfectante en reactor de mezcla completa es decir aplicando la ecuación 4 con la cual se predice la concentración del cloro en el tiempo, la sexta contiene la ecuación que representa como decae el desinfectante en un reactor de flujo pistón, la séptima involucra la concentración del desinfectante hallada en campo, la octava y novena columna calcula los errores del modelo. A continuación se muestran los resultados de los modelos aplicados en la predicción del decaimiento del desinfectante con respecto al tiempo:

Tabla 2 Resultados de los modelos aplicados en la red oriental Septiembre 9 de 2010.

PUNTO MONITOREO	Concentración Inicial Salida Planta mg/L Cl ₂	Constante decaimiento cinética (h)	Tiempo residencia red (h)	Cloro modelo RMC mg/L Cl ₂	Cloro modelo RFP mg/L Cl ₂	Concentración medida Campo mg/L Cl ₂	Error modelo RMC	Error modelo RFP
Barrio Albania CAI-Morrórico	1,16	0,08	0,58	1,11	1,11	1,12	0,01	0,02
Barrio Buenos Aires	*	0,08	0,67	1,10	1,10	1,10	0,00	0,00
Barrio Pinos	*	0,08	0,83	1,09	1,09	1,11	0,05	0,06
Barrio Álvarez	*	0,08	2	1,00	0,99	0,92	0,64	0,47
Barrio Lagos de Cacique	*	0,08	2,8	0,95	0,93	0,94	0,01	0,01
Barrio Altos de Cabecera	*	0,08	3,5	0,91	0,88	0,91	0,00	0,11
Barrio El Prado	*	0,08	4	0,88	0,84	0,97	0,83	1,63
Barrio Altos de Pan Azucar	*	0,08	4,3	0,86	0,82	0,99	1,61	2,81
Barrio Trinidad	*	0,08	4,7	0,84	0,80	1,07	5,09	7,38
Barrio Reposo	*	0,08	5	0,83	0,78	1,00	2,94	4,95

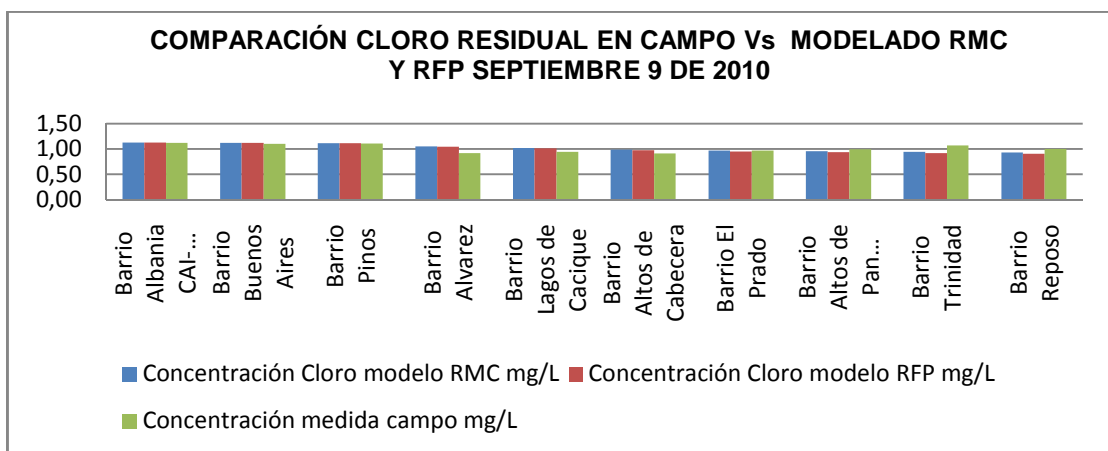
Fuente: El autor

Para aplicar la calibración del modelo en la hoja de cálculo, se utilizó una constante de decaimiento promedio de 0.08 horas⁻¹, el tiempo del agua en la tubería se empleó el determinado con el modelo hidráulico con que cuenta el amb, EPANET; la concentración inicial en la planta fue de 1,16 mg Cl₂/L se tenía dosificación de sulfato de aluminio en el agua cruda, por tanto hay que suponer el caudal constante en la planta. La fecha de la corrida del modelo fue el 9 de septiembre de 2010, donde se determinó el cloro residual en campo en los puntos de monitoreo establecidos por el laboratorio de control calidad. Con base en los

resultados obtenidos se determinó el porcentaje de error. El error fue hallado comparando el valor obtenido en campo menos el dato arrojado por el modelo elevado al cuadrado, esto para eliminar datos negativos y multiplicado por 100; el valor obtenido fue menor al 10%.

En esta modelación se aprecia que el modelo de RMC y RFP predice el decaimiento del cloro residual en la red del sector oriental. En los puntos de monitoreo de los barrios Albania, Buenos Aires, Altos de Cabecera, Pinos, Álvarez, Prado, Altos de Pan de Azúcar se obtuvieron los menores porcentajes de error. En los puntos de los barrios Trinidad y Reposo se presentaron los porcentajes de error más altos (ver tabla 2). En la siguiente figura se presentan los datos medidos en campo de cada punto de monitoreo muestreado con el modelado.

Figura 11 Comparación de la Concentración del desinfectante en campo con el arrojado por los modelos RMC y RFP



Fuente: El autor

3.2 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS RMC Y RFP

El laboratorio de control calidad del amb tiene establecidos puntos de monitoreo en la red oriental, los cuales se monitorean frecuentemente para determinar la calidad del agua que llega a los usuarios, efectuándoles análisis fisicoquímicos y

microbiológicos. Dentro de estos análisis se efectúa la medición de cloro residual en campo. Teniendo los modelos RMC y RFP ya calibrados, se procede a efectuar corridas en diferentes días, conociendo la concentración inicial de la planta y efectuando la medición del desinfectante en campo, para comparar el resultado arrojado por los modelos. A continuación se presentan los resultados de estas modelaciones.

Tabla 3 Resultados de la validación de los modelos aplicados en la red oriental Septiembre 12 de 2010.

PUNTO MONITOREO	Concentración Inicial Salida Planta mg/L Cl ₂	Constante decaimiento cinética (h)	Tiempo residencia red (h)	Cloro modelo RMC mg/L Cl ₂	Cloro modelo RFP mg/L Cl ₂	Concentración medida Campo mg/L Cl ₂	Error modelo RMC	Error modelo RFP
Barrio Albania CAI-Morrórico	1,00	0,08	0,58	0,96	0,95	0,99	0,12	0,12
Barrio Buenos Aires	*	0,08	0,67	0,95	0,95	0,96	0,01	0,01
Barrio Pinos	*	0,08	0,83	0,94	0,94	0,95	0,02	0,02
Barrio Álvarez	*	0,08	2	0,86	0,85	0,90	0,14	0,23
Barrio Lagos de Cacique	*	0,08	2,8	0,82	0,80	0,90	0,65	0,95
Barrio Altos de Cabecera	*	0,08	3,5	0,78	0,76	0,89	1,18	1,80
Barrio El Prado	*	0,08	4	0,76	0,73	0,90	2,03	3,02
Barrio Altos de Pan Azúcar	*	0,08	4,3	0,74	0,71	0,85	1,12	1,99
Barrio Trinidad	*	0,08	4,7	0,73	0,69	0,90	2,96	4,48
Barrio Reposo	*	0,08	5	0,71	0,67	0,89	3,09	4,83

Fuente: El autor

Tabla 4 Resultados de la validación de los modelos aplicados en la red oriental Octubre 5 de 2010.

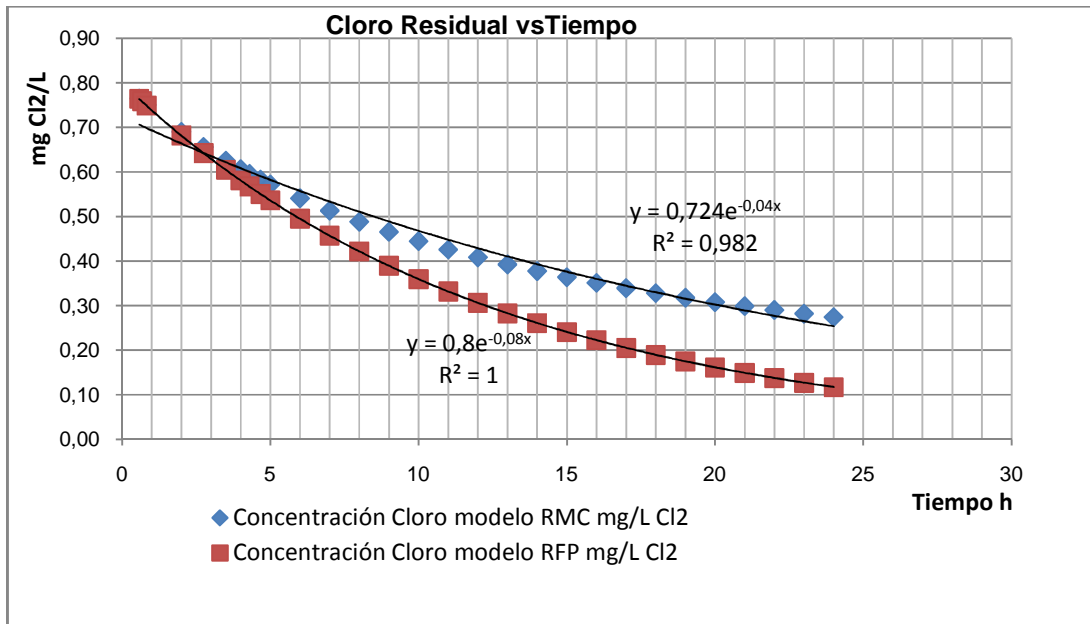
PUNTO MONITOREO	Concentración Inicial Salida Planta mg/L Cl ₂	Constante decaimiento cinética (h)	Tiempo residencia red (h)	Cloro modelo RMC mg/L Cl ₂	Cloro modelo RFP mg/L Cl ₂	Concentración medida Campo mg/L Cl ₂	Error modelo RMC	Error modelo RFP
Barrio Albania CAI-Morrórico	1,10	0,08	0,58	1,05	1,05	1,02	0,10	0,09
Barrio Buenos Aires	*	0,08	0,67	1,04	1,04	0,96	0,71	0,68
Barrio Pinos	*	0,08	0,83	1,03	1,03	0,95	0,66	0,63
Barrio Álvarez	*	0,08	2	0,95	0,94	0,98	0,10	0,18
Barrio Lagos de Cacique	*	0,08	2,8	0,90	0,88	0,93	0,08	0,22
Barrio Altos de Cabecera	*	0,08	3,5	0,86	0,83	0,89	0,09	0,34
Barrio El Prado	*	0,08	4	0,83	0,80	0,93	0,93	1,72
Barrio Altos de Pan Azúcar	*	0,08	4,3	0,82	0,78	0,85	0,10	0,49
Barrio Trinidad	*	0,08	4,7	0,80	0,76	0,92	1,42	2,65
Barrio Reposo	*	0,08	5	0,79	0,74	0,90	1,31	2,65

Fuente: El autor

La validación del modelo RMC presentó el porcentaje de error más bajo en todos los puntos de monitoreo que el modelo RFP. En general, los datos modelados representan el decaimiento del cloro residual en la red de distribución; la tendencia de los datos que arroja el modelo RMC y RFP cumple el ajuste exponencial.

3.3 MODELACIÓN DEL CLORO RESIDUAL VS EL TIEMPO DE RESIDENCIA DEL AGUA EN LA TUBERÍA

Figura 12 Variación del Desinfectante vs tiempo residencia en la red



Fuente: El autor

Graficando los datos obtenidos por los modelos, se determinó como varía el cloro residual con respecto al tiempo que dura el agua en la red de distribución. En el modelo RMC, después de 24 horas de modelamiento el cloro residual permanece dentro del valor mínimo permitido por la normatividad nacional resolución 2115/07. El modelo RFP modela de manera adecuada el desinfectante y es congruente con el modelo RMC el desinfectante hasta 10 horas y luego empieza a alejarse del modelo RMC; es claro que los dos modelos en las primeras 5 horas representan casi de manera similar como decae el cloro ya que este es el tiempo máximo que tarda en llegar el agua al barrio el Reposo; se debe aclarar que el modelo fue calibrado para este tiempo máximo. El agua que llega a cada usuario del amb mantiene su calidad hasta el medidor según lo establece la normatividad vigente a nivel nacional (Decreto 1575/07) y la responsabilidad del usuario es mantener

limpias la conducciones y tanques de almacenamiento, para garantizar principalmente que el desinfectante se mantenga en los niveles permisibles durante el tiempo que dure el agua en ser consumida, esta para garantizar que este exenta de contaminación por origen microbiano.

4. CONCLUSIONES

- El modelamiento del decaimiento del desinfectante en la red de distribución, asumiendo que este se comporta como un reactor de flujo continuo y mezcla completa RMC, fue el que presentó el menor porcentaje de error en los tiempos de residencia modelados.
- La metodología para calcular la constante de decaimiento del cloro residual en una tubería siguió una tendencia exponencial, representada como una reacción de primer orden.
- El modelo está calibrado y validado para una red donde el agua que se distribuye proviene de una sola planta de tratamiento a caudal constante.
- La dosis de cloro que actualmente es aplicada en la Planta la Flora alcanza a cubrir la zona del estudio garantizando el cumplimiento de la normatividad colombiana en lo competente a los niveles máximos y mínimos permisibles del desinfectante residual con que debe contar un agua en Colombia.
- La ecuación para la calibración del modelo RMC se determinó $\frac{1.16}{(1 + 0.08\emptyset)} = C_e$ donde \emptyset es el tiempo de residencia y C_e concentración de cloro en el tiempo.
- La ecuación para la calibración del modelo RFP se determinó $C_e = 1.16e^{-0.08t}$ donde t es el tiempo de residencia y C_e concentración de cloro en el tiempo.
- El modelo RMC y RFP puede predecir las concentraciones del cloro residual en cualquier punto de la red oriental teniendo como mínimo las

siguientes restricciones una concentración inicial de 0.80 mg Cl₂/L y un tiempo de residencia para el RMC de 24 horas y para el RFP el tiempo de 10 horas.

- El modelo RMC y RFP arrojan datos similares con los datos obtenidos en campo durante un tiempo de residencia 5 horas.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda establecer un valor mínimo de cloro residual a la salida de la planta de tratamiento para la red oriental de 0,80 mg Cl₂/L en una eventualidad de un daño del sistema de cloración para conservar los rangos de valores permitidos del desinfectante en el agua que llega al consumidor final, ya que un valor inferior no cumpliría estos límites.
- Se recomienda mantener un valor por encima de un 1,00 mg Cl₂/L en el agua tratada de la Planta la Flora para mantener un buen nivel permitido de cloro residual en la red de distribución durante un tiempo de 24 horas.
- Se recomienda aplicar el modelo a otras redes que abastece la Planta La Flora para mirar su aplicabilidad y poderlo llevar a las otras plantas y modelar el desinfectante en toda la red que maneja el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- Se recomienda determinar cuándo hay nodos o tramos de mezcla del agua de otras plantas como determinar la nueva concentración de mezcla del desinfectante para mirar si aplica o no el modelo.
- Se recomienda aplicar el modelo hidráulico EPANET que tiene implementado el acueducto y que en una parte de este tiene el modulo de calidad de agua con los valores de la constante hallada de manera experimental para ser alimentado para poder modelar de manera continua el desinfectante en los diferentes distritos de presión que maneja el amb.

BIBLIOGRAFIA

[1] Larry W. Mays. Manual de Sistemas de Distribución de Agua. McGraw-Hill edición 2000, pp 9.15-9.17.

[2] Romero Rojas J. Tratamiento de Aguas Residuales. Escuela Colombiana de Ingeniería, edición 1999, pp 257-283.

[3] Tzatchkov, Alcocer, Y. Decaimiento del cloro por reacción con el agua en redes de distribución: Ingeniería hidráulica en México, vol XIX, núm, pp 41-51, enero-marzo, 2004.

[4] ALCOCER, Y. Modelo de calidad del agua en redes de distribución: Ingeniería hidráulica en México, vol XIX, núm, pp 77-88, abril-junio, 2004.

[5] ALCOCER, Y. Implementación y calibración de un modelo de calidad del agua en sistemas de agua potable. Informe técnico. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002, 219 páginas.