

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**CALIDAD DE AGUA EN REDES MATRICES:  
MODELACIÓN MODERNA VS. MODELACIÓN TRADICIONAL**

*María A. Peñuela, Juan Saldarriaga*

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email:ma.penuela635@uniandes.edu.co; jsaldarr@uniandes.edu.co

**RESUMEN**

Este documento pretende exponer un análisis que permita observar el comportamiento del cloro a lo largo de una red de distribución de agua potable (RDAP). Para lograr estos objetivos se utilizaron programas tales como EPANET la cual permite realizar una modelación de las concentraciones de cloro a lo largo de la red en los diferentes nudos; por otro lado se utilizó EXCEL con el cual fue posible programar la información obtenida de la red y así determinar la metodología a utilizar: la moderna o la tradicional. Utilizando las herramientas fue posible evaluar mediante la metodología moderna y tradicional las concentraciones de cloro en la red matriz de Bogotá para nudos específicos, los cuales se dividen en dos grupos diferentes: el primero eran los nudos lejanos a las fuentes de abastecimiento y el segundo era el de los nudos cercanos a las fuentes. De esta manera fue posible determinar que para los nudos cercanos a las fuentes de agua la modelación moderna era irrelevante ya que se observaban resultados bastante similares a los de la modelación tradicional mientras que en los nudos lejanos se observaba todo lo contrario. Según lo anterior fue posible concluir que para las RDAP de tamaños pequeños es redundante realizar la modelación moderna, mientras que para redes de grandes magnitudes es absolutamente necesario.

**ABSTRACT**

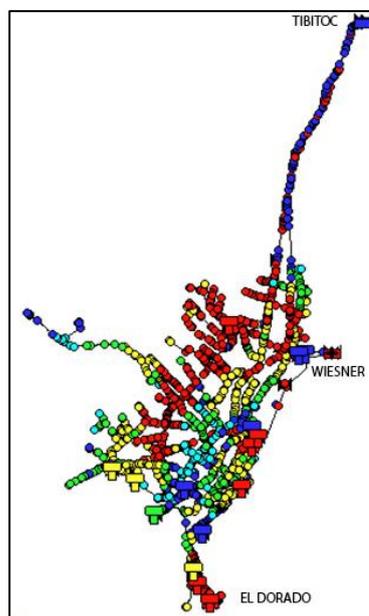
This document aims to present an analysis about the chlorine behavior over a drinking water distribution networks. Computing tools were used to achieve these objectives, those tools were EPANET which allows a complete chlorine concentrations modeling along the network in the different knots, secondly EXCEL was used to program the information obtained from the network and thus to determine the methodology to be used: modern or traditional. Using the tools mentioned, allowed to analyze the chlorine concentration in the Bogota drinking water distribution network, using the modern and the traditional methodology. The process of analysis consisted in the evaluation of two different groups of junctions: the first group were the junctions away of the water sources and the second group were the junction near of the water sources; Therefore it was possible to determine that the modern methodology was irrelevant for the junctions near the sources because the results were similar or equal to those obtained in the traditional methodology, on the other hand the modern methodology took a great importance in the results obtained for the junctions away of the sources. According to the results it was possible to determine that for small drinking water distribution network the modern methodology was irrelevant, but for large drinking water distribution networks this methodology was absolutely necessary for founding the correct chloride concentrations.

**PALABRAS CLAVES:** Concentración de Cloro; RDAP; Metodología Moderna y Tradicional.

## INTRODUCCIÓN

La importancia de la modelación para la calidad del agua se da debido a que la necesidad de consumir agua de buena calidad se ha identificado desde hace varios siglos, ya que se estableció que la mala salud estaba relacionada con una mala calidad del agua. En las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) se introduce el cloro a la red en la salida de las plantas potabilizadoras, tanques y bombes; sin embargo no es posible realizar un monitoreo del cloro residual a lo largo de toda la red en los casos de redes de distribución de gran magnitud. Por esta razón la modelación de la calidad del agua tiene una gran importancia en el cálculo de las concentraciones de cloro que están llegando a los consumidores.

En este estudio se pretendía evaluar el impacto que tiene la modelación moderna vs la tradicional en una RDAP de gran magnitud; por esta razón se tomó el caso de la Red Matriz de Agua Potable de la Ciudad de Bogotá, la cual surte a aproximadamente un millón setecientos mil clientes con más de 17 mil kilómetros de redes (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2011).



**Figura 1.-** Red Matriz de Bogotá. Se muestra la ubicación de las PTAPs.

## DESINFECCIÓN

Para lograr un adecuado proceso de desinfección es necesario llevar a cabo una desinfección primaria y una secundaria; la primaria consiste en el tratamiento eficiente del agua en la fuente. Para esto se utilizan diferentes tipos de tratamiento convencionales. En el tratamiento secundario se encuentra la desinfección con químicos el cual pretende garantizar que el químico añadido permanezca constante con una mínima y máxima concentración a lo largo de toda la red.

El desinfectante mayormente utilizado es el cloro; esto se debe a su bajo costo en el mercado, a su capacidad oxidante y adicionalmente debido a que es posible mantener ciertas concentraciones de este a lo largo de la RDAP.

Algunos de los aspectos más importantes en cuanto a la desinfección es lograr una acción contra las biopelículas y la materia orgánica natural presente en la masa de agua que es transportada por la RDAP.

En el caso que la desinfección no se realice de forma eficiente desde la fuente hasta el consumidor final, permitiría en las RDAP la posibilidad del rápido crecimiento de las bacterias mencionadas anteriormente y pondría en riesgo la salud de los consumidores debido a la serie de enfermedades causadas principalmente por las bacterias presentes en el agua.

## MODELACIÓN TRADICIONAL DE CALIDAD DEL AGUA

EPANET fue la herramienta utilizada en este estudio para obtener un análisis completo de la calidad del agua en la red más grande e importante de Colombia. Es por esto que es importante entender la forma de operación del sistema utilizado por el programa y entender cuáles son las ecuaciones utilizadas para modelar la calidad del agua. Según esto se debe tener en cuenta antes del análisis que las ecuaciones están basadas en el principio de conservación de masa y se encuentra acoplado con las cinéticas de reacción. Los modelos que se entrarán a analizar a continuación serán el de Rossman et al., 1993 y Rossman y Boulos, 1996 (Manual del Usuario-EPANET, 2002).

Con el análisis realizado mediante esta modelación es posible calcular, en espacio y tiempo, las concentraciones de distintos desinfectantes utilizados en las RDAP ya que los programas utilizados con este fin analizan la hidráulica de la red sin importar su tamaño o tipo de distribución y así mismo modelan la calidad del agua. De esta forma utilizando modelos dinámicos que simulan la variación en el tiempo y el modelo de conservación de masa en una dimensión, es posible describir la pérdida de desinfectante en una tubería de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C(t,x)_{ij}}{\partial t} = -U_{ij} \left[ \frac{\partial C(t,x)_{ij}}{\partial x} \right] + k_{ij} C(t,x)_{ij} = 0 \quad [1]$$

donde  $C_{ij}$  es la concentración del desinfectante ( $ML^{-3}$ ) en el punto  $x$  y en el tiempo  $t$ ,  $U_{ij}$  es la velocidad del flujo en la tubería ( $LT^{-1}$ ),  $k_{ij}$  es la constante de decaimiento ( $T^{-1}$ ) e  $i$  es el nudo aguas arriba y  $j$  es el nudo aguas abajo; estos son los nudos que conectan la tubería. Algunos métodos numéricos han sido utilizados para calcular la tasa de decaimiento del cloro. Por esta razón se ha reportado que la tasa de reacción se encuentra determinada por el modelo de masa-flujo el cual tiene en cuenta la reacción cinética de primer orden, expresada como:

$$R = -k_b C \quad [2]$$

donde  $k_b$  corresponde a la constante de masa de primer orden, con unidades de ( $T^{-1}$ ) y  $C$  es la concentración de desinfectante en ( $ML^{-3}$ ) que para el caso de estudio corresponde a cloro. El decaimiento de cloro que resulta de las reacciones que este genera durante su transporte; depende de las constantes de reacción en la pared y en la masa de agua, de la tasa de reacción y de la superficie que esté en contacto con el flujo de agua, teniendo en cuenta el tipo de material de cada tubería. La tasa de reacción en la pared se encuentra determinada por la siguiente expresión:

$$R = \frac{4k_w k_f C}{D(k_w + k_f)} \quad [3]$$

donde  $D$  es el diámetro de la tubería en unidades de ( $L$ ),  $K_w$  es la constante de reacción en la pared de la tubería en ( $LT^{-1}$ ) y  $k_f$  es la tasa de transferencia de masa ( $LT^{-1}$ ); sin embargo para poder determinar el coeficiente de decaimiento del cloro es necesario tener en cuenta la constante de reacción en la masa de agua. Por esto la ecuación resultante de combinar esta constante con la tasa de reacción en la pared es:

$$K = k_b + \frac{4k_w k_f}{D(k_w + k_f)} = k_b + \frac{k_w k_f}{R_h(k_w + k_f)} \quad [4]$$

donde  $K$  es el coeficiente de decaimiento del cloro y  $R_h$  es el radio hidráulico de la tubería. Por otro lado el coeficiente de transferencia de masa que varía desde el interior de la masa de agua que viaja por las tuberías hacia las paredes de estas, se encuentra identificado por la siguiente expresión:

$$k_f = \frac{Sh \cdot d}{D} \quad [5]$$

donde Sh es el Número de Sherwood (adimensional) y d es la difusividad molecular del reactivo ( $L^2T^{-1}$ ).

## NÚMERO DE SHERWOOD

El número de Sherwood proporciona una medida de la transferencia de masa que se produce por convección y ocurre en la superficie de la tubería (Incropera, DeWitt. 1999); refleja el cociente entre la transferencia de masa por convección y difusión. En RDAP este número se encuentra determinado por los tipos de flujo que se presenta al interior las tuberías; por esta razón las ecuaciones para determinar el valor adimensional se encuentra directamente relacionado con los valores del Número de Reynolds (Re) que se generan dependiendo de la velocidad del fluido, el tipo de fluido y la sección de la tubería. Las ecuaciones para determinar el Número de Sherwood (Sh) al interior de una tubería para los diferentes tipos de flujo son:

Para un  $Re < 1$ , que representa el régimen estacionario:

$$Sh = 2 \quad [6]$$

Para  $1 < Re < 2300$ , que representa el régimen laminar:

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668\left(\frac{D}{L}\right)Re\left(\frac{\nu}{d}\right)}{1+0,04\left[\left(\frac{D}{L}\right)Re\left(\frac{\nu}{d}\right)\right]^{2/3}} \quad [7]$$

Para  $Re > 2300$ , que representa el régimen turbulento:

$$Sh = 0,023 * Re^{0,83} * \left(\frac{\nu}{d}\right)^{0,333} \quad [8]$$

donde D es el diámetro de la tubería (L), L es la longitud de la tubería (L), Re es el número de Reynolds (adimensional), d es la difusividad molecular del reactivo ( $L^2T^{-1}$ ), y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua a 20°C y corresponde a  $1,41 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  (Ramírez y Saldarriaga. 2010).

## MODELACIÓN MODERNA DE LA CALIDAD DEL AGUA

La metodología moderna para la modelación de calidad del agua, tiene en cuenta durante su desarrollo diferentes aspectos tales como los hidráulicos de las tuberías, el transporte de masa y la demanda en la pared de las tuberías (Lari, Reeuwijk, Maksimovic, 2010). Por esta razón se realiza un modelo de equilibrio que tiene en cuenta todos los aspectos para definir el coeficiente de decaimiento del cloro; de esta manera se pretende explicar de manera sencilla el modelo de equilibrio que describe el estado del coeficiente de decaimiento y adicionalmente describe una formulación de las ecuaciones que desarrollan el proceso del decaimiento del cloro. Esto se realizará debido a que la modelación tradicional para calidad del agua limita algunos procesos que son relevantes a la hora de determinar las concentraciones de cloro en algunos puntos de la red.

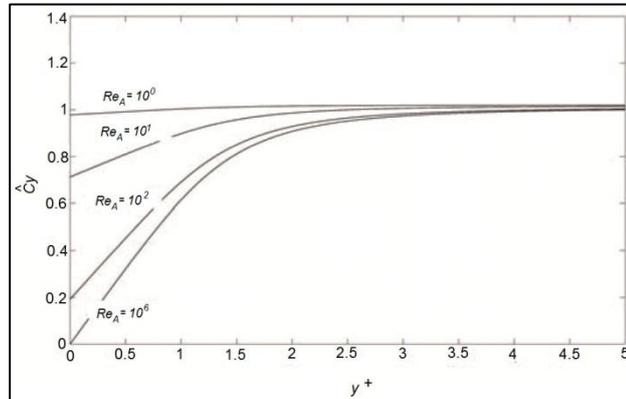
El modelo de equilibrio se rige por tres parámetros adimensionales; Re, Pe y Sh. Sin embargo para la modelación de la calidad de agua es conveniente reemplazar Pe por el Número de Schmidt y Sh por:

$$Sc = \frac{\nu}{d} \quad [9]$$

$$Re_{k_w} = ShSc^{-1} = \frac{k_w \delta}{\nu} \quad [10]$$

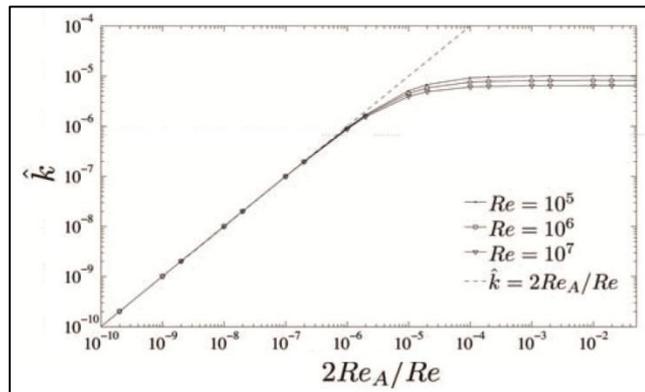
En la modelación de calidad del agua la interpretación de  $Re_{K_w}$  es la demanda adimensional en la pared de la tubería de radio determinado y fluido establecido.

Para poder realizar un adecuado análisis del efecto de la demanda en la pared en relación con la variación que se observa al graficar el perfil de concentraciones, es necesario realizar variaciones en el  $Re_{K_w}$ , manteniendo el  $Re$  y el  $Sc$  constantes en  $Re=10^6$  y  $Sc=10^3$ . Los resultados de estas comparaciones se presentan en la Figura 2.



**Figura 2.-**  $\hat{C}_y$  Como una función de  $y^+$  para varios  $Re_{K_w}$  (Lari, Reeuwijk, Maksimovic. 2010).

Para poder determinar la relación existente entre la tasa de decaimiento y la velocidad, Lari, et al. 2010 realizaron una simulación con  $Re$  de  $10^5$ ,  $10^6$  y  $10^7$ ; los resultados de esta simulación se muestran en la Figura 3.

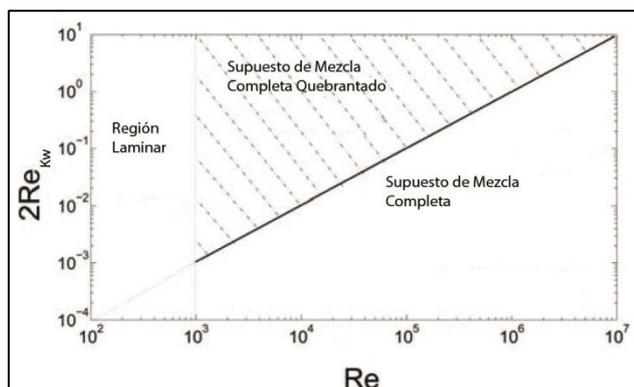


**Figura 3.-** Tasa de decaimiento vs.  $Re_{K_w}$  (Lari, Reeuwijk, Maksimovic. 2010).

Es importante resaltar que el supuesto de mezcla completa depende de  $Re$  y  $Re_{K_w,M}$  por esta razón es posible determinar el  $Re_{K_w,M}$  teniendo en cuenta el  $Re$ . Según esto se puede determinar el  $Re_{K_w,M}$  de la siguiente forma:

$$Re_{K_w,M} = 10^{-6} Re \quad [11]$$

En la Figura 4 se presenta una de los principios más importantes para el desarrollo de este estudio; esto se debe a que realizando la comparación entre el  $Re$  y el  $Re_{K_w}$  fue posible indicar las regiones de validez para el supuesto de mezcla completa y de la misma forma indicar aquellas en las que no se cumple este supuesto.



**Figura 4.-** Zonas de validez para el Supuesto de Mezcla Completa (Lari, Reeuwijk, Maksimovic. 2010).

El modelo de equilibrio que se ha desarrollado debido a que el supuesto de mezcla no siempre se cumple en las redes de distribución de agua potable muestra una ecuación que rige el decaimiento en las tuberías que no están en este supuesto:

$$K = \frac{k_w}{r_h(\bar{u}) \left(1 + k_w^{-1} \frac{k_w}{\bar{u}}\right)} \quad [12]$$

donde:

$$k_w = \frac{9\sqrt[3]{b}}{2\pi\sqrt[3]{3}Sc^{2/3}} \frac{u_t}{\langle \bar{u} \rangle} \quad [13]$$

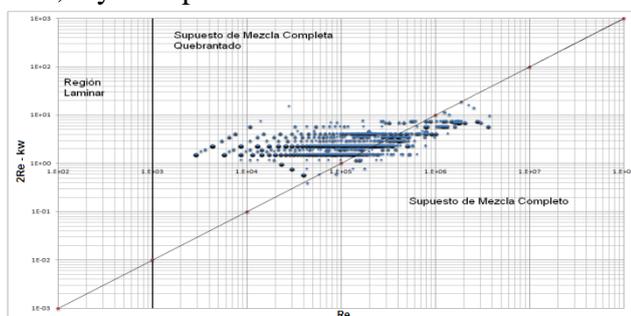
donde  $b = a \cdot 9,5 \times 10^{-4}$  y  $u_t$  es la velocidad de fricción ( $LT^{-1}$ )

## RESULTADOS

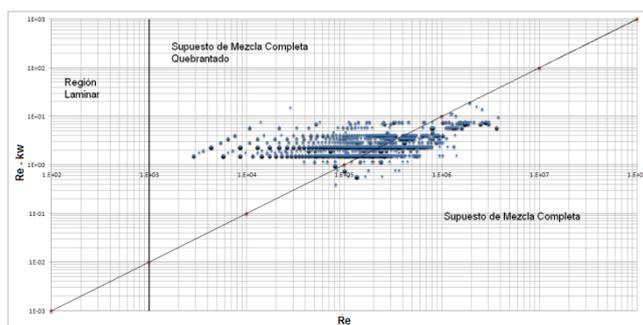
### Región de Validez

En este proyecto, se pretende hallar un valor más real del cloro mediante modelación moderna y adicionalmente para poder observar la variación de la región de validez dependiendo de las velocidades promedio en la red y por lo tanto la variación en el Número de Reynolds, se decidió realizar la modelación moderna para 3 demandas diferentes en la red, utilizando la curva de demandas; una para la demanda máxima, otra para un punto medio de demanda en la red y finalmente para una demanda mínima.

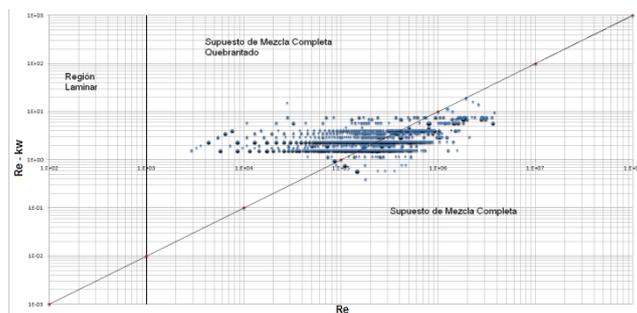
Se observó que a medida que la demanda era mayor un menor número de tuberías se encontraban en la zona de supuesto de mezcla completa quebrantado. A continuación se presentan los resultados obtenidos para las diferentes tuberías de la red durante la hora de demanda mínima, media y máxima en las Figuras 5, 6 y 7 respectivamente.



**Figura 5.-** Región de Validez para la Demanda Mínima en la Red.



**Figura 6.-** Región de Validez para la Demanda Media en la Red.



**Figura 7.** Región de Validez para la Demanda Máxima en la Red.

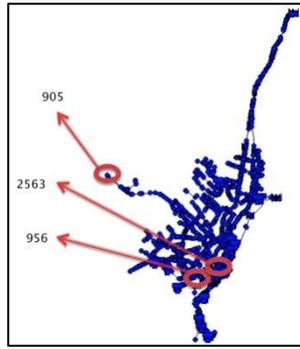
### Concentraciones de Cloro en la Red

Al conocer la región de validez en la que se encuentra cada tubería es posible determinar bajo que metodología se debe evaluar cada tubo de la red. De esta manera es posible obtener las nuevas constantes de reacción en la pared que se deben utilizar para modelar la calidad del agua bajo el programa EPANET. En esta sección se pretende mostrar los resultados obtenidos para las concentraciones de cloro en diferentes puntos de la red para la modelación moderna en las condiciones de demanda mínima, media y máxima, así como un ajuste para determinar la concentración obtenida bajo esta metodología y adicionalmente las concentraciones obtenidas bajo la modelación tradicional.

Para observar el comportamiento del decaimiento del cloro a lo largo de la red se tomaron seis puntos diferentes en la red, de los cuales tres corresponden a nudos cercanos a los tres embalses de abastecimientos de agua que corresponden a Tibitoc, Wiesner y el Dorado, las tres principales plantas de tratamiento para el sistema de agua potable de Bogotá y por otro lado se tomaron los tres nudos más lejanos de las tres fuentes de abastecimiento. Este análisis permitirá observar que consecuencias trae la modelación moderna vs la tradicional.

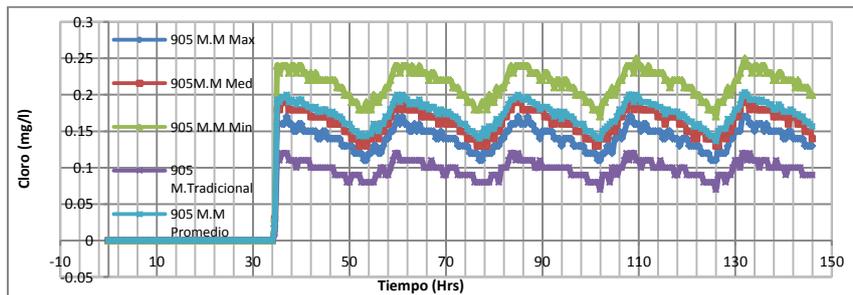
### *Nudos Lejanos*

En la Figura 8 se presenta la ubicación en la Red Matriz de Bogotá de los tres nudos lejanos que se pretende analizar. Los nudos fueron seleccionados según su altura piezométrica y adicionalmente según observaciones realizadas al modelar los datos de calidad en el programa EPANET.

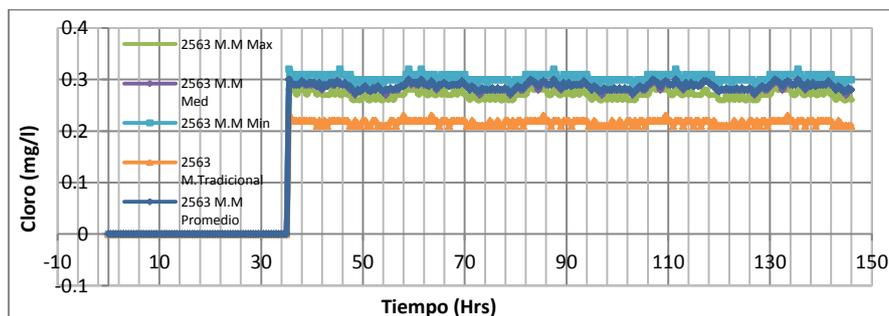


**Figura 8.-** Ubicación de los nudos lejanos de los embalses (EPANET).

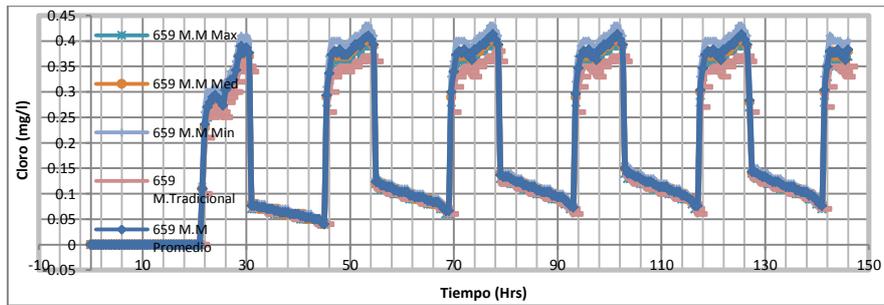
En la Figura 9 se observa que bajo la modelación tradicional resultan concentraciones de cloro menores que aquellas que se obtienen al realizar la modelación moderna en el nudo. Realizando una comparación entre los resultados obtenidos para la modelación moderna se observa que en el momento en el que los caudales son mínimos se obtienen unas concentraciones de cloro menores a lo largo del tiempo y mayores para los caudales máximos. Esto tiene sentido con los resultados obtenidos para la región de validez, ya que como se mostró anteriormente a medida que aumenta la demanda se tienen menos número de tuberías en el supuesto de mezcla quebrantado, lo que quiere decir que se introduce un menor número de  $k_w$  diferentes al utilizado y cabe resaltar que son de un valor menor al  $k_w$  tomado como constante en la modelación tradicional. Estos resultados son muy similares a los obtenidos en los demás nudos lejanos evaluados, los cuales corresponden a la Figura 10 (nudo 2563) y Figura 11 (nudo 956).



**Figura 9.-** Concentraciones de Cloro en el Tiempo para el Nudo 905.



**Figura 10.-** Concentraciones de Cloro en el Tiempo para el Nudo 2563.

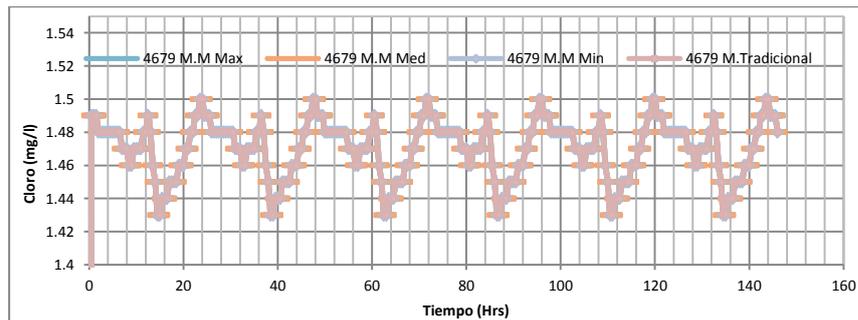


**Figura 11.-** Concentraciones de Cloro en el Tiempo para el Nudo 956.

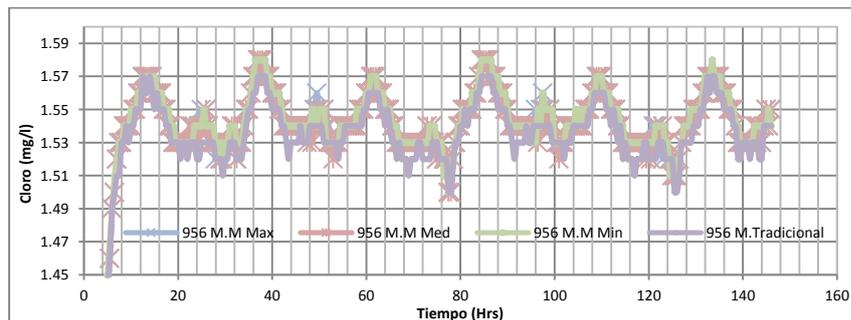
### ***Nudos Cercanos***

Los nudos cercanos analizados corresponden a aquellos nudos que se encuentran cercanos a los embalses de abastecimiento; por esta razón se tomó el nudo 619 (nudo más cercano al embalse Tibitoc), el nudo 4679 (nudo más cercano al embalse Wiesner), el nudo 659 (nudo más cercano al embalse El Dorado).

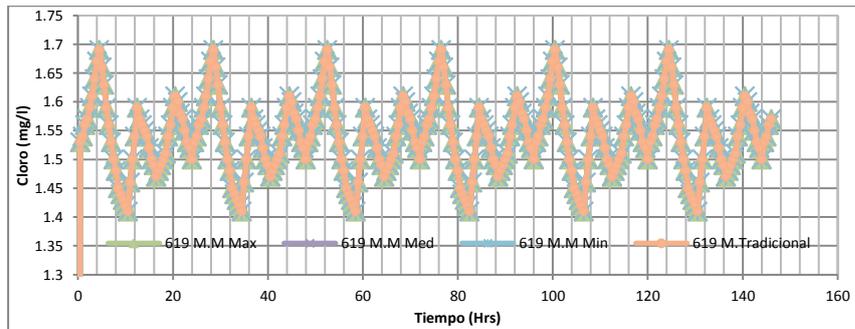
En la Figura 12 se presentan los resultados de las concentraciones de desinfectante bajo la modelación moderna y tradicional en el nudo 4679, el cual corresponde a un nudo cercano a la Planta de Tratamiento de Agua Potable Wiesner. En la figura se observa que los resultados obtenidos para el nudo bajo la Modelación Moderna y la Modelación Tradicional son casi idénticos; por esta razón las variaciones son despreciables. Estos mismos resultados son observados para los otros nudos cercanos evaluados en las Figuras 13 (nudo 659) y Figura 14 (nudo 619).



**Figura 12.-** Concentraciones de Cloro en el Tiempo para el Nudo 4679.



**Figura 13.-** Concentraciones de Cloro en el Tiempo para el Nudo 659.



**Figura 14.-** Concentraciones de Cloro en el Tiempo para el Nudo 619.

En la Tabla 1 se muestran los promedios obtenidos de las concentraciones de cloro mediante las diferentes metodologías utilizadas. En este cuadro se puede observar la variación promedio que se presenta en los diferentes nudos; en este se muestra una vez más como para los nudos cercanos la variación de la concentración del cloro es irrelevante.

**Tabla 1.-** Concentraciones Promedio en los diferentes Nudos evaluados.

| Metodología/Nudos | Modelación Moderna             |                               |                                | Modelación Tradicional |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|
|                   | D. Mínima (mgL <sup>-1</sup> ) | D. Media (mgL <sup>-1</sup> ) | D. Máxima (mgL <sup>-1</sup> ) |                        |
| 905               | 0,16                           | 0,12                          | 0,11                           | 0,07                   |
| 956               | 0,19                           | 0,18                          | 0,17                           | 0,16                   |
| 2563              | 0,23                           | 0,22                          | 0,21                           | 0,16                   |
| 4679              | 1,47                           | 1,47                          | 1,47                           | 1,47                   |
| 659               | 1,52                           | 1,52                          | 1,52                           | 1,52                   |
| 619               | 1,53                           | 1,53                          | 1,53                           | 1,53                   |

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para evaluar el supuesto de mezcla completa en las tuberías o región de validez, Lari et al, 2010 desarrollaron simulaciones que permitían, bajo conceptos hidráulicos, determinar en qué zona de mezcla se encontraba cada una de las tuberías; por lo tanto se dedujo una ecuación que determina bajo qué condiciones se considera una tubería bajo el supuesto de mezcla completa o no. Esta condición es:

$$Re_{K_w} < Re \cdot 10^{-6} \quad [14]$$

En este proyecto se encontró que para los momentos que las demandas en la red eran mínimas, los perfiles de concentración en los nudos fueron máximos. Lo anterior refleja el supuesto que hace la modelación moderna en el cual se deberá tener mayor cuidado en los casos que las velocidades y los Números de Reynolds sean mínimos ya que en estos casos el tiempo de contacto de la masa de agua con las paredes de las tuberías es mayor y de esta manera se espera una mayor constante de reacción o demanda por parte de la pared de la tubería.

La programación realizada en Excel permitió observar la gran importancia que tiene la modelación moderna, ya que se pudo observar que más del 50% de las tuberías se encuentran en el supuesto de mezcla completa quebrantado y por esta razón es erróneo modelarlos bajo la metodología tradicional.

La Red Matriz de Bogotá permite ejemplificar de manera adecuada una RDAP de gran magnitud y adicionalmente permite observar que sucedería en la modelación de calidad de agua de una red pequeña, ya que se pudo determinar las concentraciones de cloro en cada uno de los puntos seleccionados para el análisis; estos puntos correspondían a 3 nudos lejanos de las fuentes de abastecimiento y 3 puntos cercanos a las fuentes. Esta metodología fue utilizada a fin de ejemplificar los resultados que se obtendrían para una RDAP pequeña y una RDAP grande; Al realizar este análisis se pudo observar que para los puntos cercanos a las fuentes de abastecimiento

era irrelevante modelar la calidad del agua bajo la metodología moderna ya que los resultados eran iguales o variaban en cifras que no tendrían relevancia al momento de hablar de concentraciones de cloro, a diferencia de lo que sucedía con los nudos lejanos de las fuentes.

El análisis de calidad de agua mostró resultados claros en cuanto a la modelación que se debe realizar. Se mostró que el tipo de modelación de la calidad del agua que se debe realizar depende del tipo de RDAP que se esté evaluando, pues es claro que para pequeña RDAP es innecesario e irrelevante gastar tiempo y recursos en modelar bajo la metodología moderna. Sin embargo se demostró que para RDAP de gran magnitud es necesario utilizar la metodología moderna ya que el no hacerlo puede mostrar resultados erróneos en los perfiles de concentración y por lo tanto se pueden tener problemas en cuanto a la salud pública de los usuarios finales de las redes de distribución de agua potable.

Finalmente se debe tener en cuenta que para la metodología moderna se utilizó una constante de reacción en la masa constante a lo largo de toda la tubería; por esta razón sería importante ver en estudios futuros si este supuesto si es correcto o si se debe reevaluar. Adicionalmente sería importante determinar en qué momento las RDAP se consideran grandes o pequeñas; se deberá determinar qué cantidad de usuarios máximos comprenden una red pequeña de distribución. De esta forma se podría estandarizar los casos en que se utilicen la modelación moderna o tradicional conociendo los usuarios de la red.

## REFERENCIAS

**Lari, K.S., M.ASCE, Reeuwijk, M.v.,Maksimovic, C** (2010). Simplified Numerical and Analytical Approach for Solutes in Turbulent Flow Reacting with Smooth Pipe Walls. *Journal Of Hydraulic Engineering*, 626-632.

**Lari, K.S., Reeuwijk, M.v., Maksimovic, C** (2010). A Study of wall demand in turbulent pipe flows. *Integrating Water Systems-Boxwall&Maksimovic*, 435-440.

**Ramírez, A.P., & Saldarriaga, J.G** (2010). Tesis: Calidad del Agua en Redes de Distribución de Agua Potable: Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.