

**PROYECTO DE GRADO**

**INGENIERÍA AMBIENTAL**

**CALIDAD DEL AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA  
POTABLE OPTIMIZADAS VS NO OPTIMIZADAS**

**PRESENTADO POR:  
ALEJANDRO HERRERA BÁEZ**

**ASESOR: JUAN SALDARRIAGA VALDERRAMA**

*Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, Departamento de  
Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.**

**2023**



---

## AGRADECIMIENTOS

Al Centro de investigaciones de acueducto y alcantarillado (CIACUA), especialmente a Juan Saldarriaga por su orientación, Laura Enríquez, María Alejandra González, Santiago Gómez y Camilo Salcedo.

Al ingeniero Carlos Rondón, por su orientación con el uso de EPANET.

A mi familia, que siempre me apoyo durante todo el proceso.

A mi novia Gabriela, por siempre darme aliento cuando más lo necesitaba.

A mis amigos del Ambicombo, por siempre creer en mí.

A todos ustedes, simplemente gracias.



---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	9
<b>1.1 Introducción</b> .....	9
<b>1.2 Objetivos</b> .....	10
1.2.1 Objetivo General.....	10
1.2.2 Objetivos Específicos .....	10
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	11
<b>2.1 Cloro en las Redes</b> .....	11
<b>2.2 Formación de Trihalometanos</b> .....	14
<b>2.3 Descripción del software</b> .....	16
2.3.1 EPANET 2.2.....	16
2.3.2 EPANET – MSX .....	17
<b>2.4 Modelo de decaimiento del cloro</b> .....	17
2.4.1 Decaimiento de cuerpo .....	18
2.4.2 Decaimiento de cuerpo de primer orden.....	18
2.4.3 Decaimiento de pared .....	19
2.4.4 Decaimiento de pared de primer orden.....	19
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	20
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	21
<b>4.1 Redes de estudio</b> .....	21
4.1.1 Sector 8 Sub Sector 1 .....	22
4.1.2 Sector 8 Sub Sector 2 .....	23
4.1.3 Sector 8 Sub Sector 3 .....	24
4.1.4 Sector 8 Sub Sector 4 .....	25
4.1.5 Sector 8 Sub Sector 5 .....	26
<b>4.2 Patrón de demanda</b> .....	27
<b>4.3 Optimización de las Redes</b> .....	28
4.3.1 Procedimiento .....	28
4.3.2 Optimización en REDES 2018 por OPUS .....	29
<b>4.4 Características geométricas de las redes optimizadas vs no optimizadas</b> .....	32



---

4.4.1	Planteamiento del escenario .....	33
4.4.2	Procedimiento .....	34
<b>4.5</b>	<b>Modelación de Trihalometanos.....</b>	<b>37</b>
4.5.1	Ecuación de formación de trihalometanos.....	37
4.5.2	Procedimiento EPANET – MSX.....	38
<b>4.6</b>	<b>Tiempos de respuesta de las redes .....</b>	<b>40</b>
4.6.1	Análisis 1: Nodos con presencia de cloro ( $> 0.0$ mg/L) .....	40
4.6.2	Análisis 2: Nodos que incumplen el RAS ( $< 0.3$ mg/L).....	41
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados caracterización geométrica .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelación Sector 8 Sub Sector 1 (S8-SS1) .....</b>	<b>43</b>
5.2.1	Análisis resultados S8-SS1 .....	48
<b>5.3</b>	<b>Modelación Sector 8 Sub Sector 2 (S8-SS2) .....</b>	<b>50</b>
5.3.1	Análisis resultados S8-SS2 .....	55
<b>5.4</b>	<b>Modelación Sector 8 Sub Sector 3 (S8-SS3) .....</b>	<b>57</b>
5.4.1	Análisis resultados S8-SS3 .....	62
<b>5.5</b>	<b>Modelación Sector 8 Sub Sector 4 (S8-SS4) .....</b>	<b>64</b>
5.5.1	Análisis resultados S8-SS4 .....	67
<b>5.6</b>	<b>Modelación Sector 8 Sub Sector 5 (S8-SS5) .....</b>	<b>69</b>
5.6.1	Análisis resultados S8-SS5 .....	74
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>79</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Trihalometanos comunes. Tomado de Pancorbo. F (2011) .....	14
Figura 2. Parámetros que intervienen en la formación de THM. Tomado de Obando et al. (2018) .....	15
Figura 3. Mecanismo de formación de THM. Tomado de Pancorbo. F (2011) .....	16
Figura 4. Red Sector 8 Sub Sector 1 .....	22
Figura 5. Red Sector 8 Sub Sector 2 .....	23
Figura 6. Red Sector 8 Sub Sector 3 .....	24
Figura 7. Red Sector 8 Sub Sector 4 .....	25
Figura 8. Red Sector 8 Sub Sector 5 .....	26
Figura 9. Patrón de demanda 1 .....	27
Figura 10. Patrón de demanda 2 vista EPANET. Tomado de Salcedo. C (2014) .....	27
Figura 11. Patrón de demanda 2 .....	28
Figura 12. Diagrama de flujo optimización de las redes .....	29
Figura 13. Importación de la red en REDES 2018 .....	30
Figura 14. Opciones de diseño OPUS .....	30
Figura 15. Método de Redondeo REDES 2018 .....	31
Figura 16. Ventana diámetros de diseño REDES 2018 .....	31
Figura 17. Diámetros de diseño seleccionados .....	31
Figura 18. Parámetros generales para cálculo de costos .....	32
Figura 19. Otros parámetros de diseño OPUS .....	32
Figura 20. Diagrama de flujo modelación de cloro .....	35
Figura 21. Ajuste opciones de calidad EPANET .....	35
Figura 22. Ajuste calidad en el reservorio EPANET .....	36
Figura 23. Ajuste coeficientes de cuerpo y de pared EPANET .....	36
Figura 24. Ajuste de tiempo e intervalos de modelación EPANET .....	36
Figura 25. Diagrama de flujo modelación THM .....	39
Figura 26. Ejemplo modelación THM en EPANET-MSX .....	39
Figura 27. Configuración herramienta Query análisis 1 EPANET .....	40



---

Figura 28. Configuración herramienta Query análisis 2 .....	41
Figura 29. Resultados cloro S8-SS1 nodo 1241 .....	43
Figura 30. Resultados cloro S8-SS1 nodo 1631 .....	43
Figura 31. Resultados cloro S8-SS1 nodo 1577 .....	44
Figura 32. Resultados cloro S8-SS1 nodo 2057 .....	44
Figura 33. Resultado THM S8-SS1 nodo 1241 .....	45
Figura 34. Resultado THM S8-SS1 nodo 1577 .....	45
Figura 35. Resultado THM S8-SS1 nodo 1631 .....	46
Figura 36. Resultado THM S8-SS1 nodo 2057 .....	46
Figura 37. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS1 .....	47
Figura 38. Resultados tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS1 .....	47
Figura 39. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS1 .....	48
Figura 40. Resultados cloro S8-SS2 nodo 1639 .....	50
Figura 41. Resultados cloro S8-SS2 nodo 1637 .....	50
Figura 42. Resultados cloro S8-SS2 nodo 1002 .....	51
Figura 43. Resultados cloro S8-SS2 nodo 441 .....	51
Figura 44. Resultado THM S8-SS2 nodo 441 .....	52
Figura 45. Resultado THM S8-SS2 nodo 1002 .....	52
Figura 46. Resultado THM S8-SS2 nodo 1637 .....	53
Figura 47. Resultado THM S8-SS2 nodo 1639 .....	53
Figura 48. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS2 .....	54
Figura 49. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS2 .....	54
Figura 50. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS2 .....	55
Figura 51. Resultado cloro S8-SS3 nodo 2281 .....	57
Figura 52. Resultado cloro S8-SS3 nodo 1477 .....	57
Figura 53. Resultados cloro S8-SS3 nodo 265 .....	58
Figura 54. Resultados cloro S8-SS3 nodo 402 .....	58
Figura 55. Resultado THM S8-SS3 nodo 265 .....	59
Figura 56. Resultado THM S8-SS3 nodo 402 .....	59
Figura 57. Resultado THM S8-SS3 nodo 1477 .....	60

---



---

Figura 58. Resultado THM S8-SS3 nodo 2281 .....	60
Figura 59. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS3.....	61
Figura 60. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8_SS3.....	61
Figura 61. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS3 .....	62
Figura 62. Resultado cloro S8-SS4 nodo 379 .....	64
Figura 63. Resultado cloro S8-SS4 nodo 471 .....	64
Figura 64. Resultado THM S8-SS4 nodo 379.....	65
Figura 65. Resultado THM S8-SS4 nodo 471 .....	65
Figura 66. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS4.....	66
Figura 67. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS4 .....	66
Figura 68. Resultados tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS4 .....	67
Figura 69. Resultado cloro S8-SS5 nodo 16 .....	69
Figura 70. Resultado cloro S8-SS5 nodo 2975 .....	69
Figura 71. Resultados cloro S8-SS5 nodo 2954.....	70
Figura 72. Resultado cloro S8-SS5 nodo 221 .....	70
Figura 73. Resultado THM S8-SS5 nodo 16.....	71
Figura 74. Resultado THM S8-SS5 nodo 221 .....	71
Figura 75. Resultado THM S8-SS5 nodo 2954.....	72
Figura 76. Resultado THM S8-SS5 nodo 2975.....	72
Figura 77. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS5.....	73
Figura 78. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS5 .....	73
Figura 79. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS5 .....	74



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 1.....	22
Tabla 2. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 2.....	23
Tabla 3. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 3.....	24
Tabla 4. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 4.....	25
Tabla 5. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 5.....	26
Tabla 6. Coeficientes de cuerpo y de pared modelación EPANET.....	34
Tabla 7. Coeficientes modelación THM EPANET-MSX.....	38
Tabla 8. Resultados geométricos optimización de las redes.....	42
Tabla 9. Porcentajes de reducción del proceso de optimización en las redes.....	42

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Reacción del cloro con el agua.....	11
Ecuación 2 Reacción del hipoclorito de sodio con el agua.....	11
Ecuación 3 Reacción del hipoclorito de calcio con el agua.....	12
Ecuación 4 Disociación del ácido hipocloroso.....	12
Ecuación 5 Modelo de decaimiento del cloro de primer orden.....	18
Ecuación 6 Decaimiento de cuerpo de primer orden.....	18
Ecuación 7 Decaimiento de pared de primer orden.....	19
Ecuación 8 Volumen de agua en una tubería.....	33
Ecuación 9 Perímetro de una tubería.....	33
Ecuación 10 Superficie interna de pared (SIP) de una tubería.....	33
Ecuación 11 Decaimiento de cloro modelo EPANET-MSX.....	37
Ecuación 12 Formación de THM EPANET-MSX.....	37



# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

El agua es el recurso más importante para la subsistencia de la vida humana. Desde el principio de los tiempos, asegurar el acceso a este recurso ha sido un requerimiento para el desarrollo de las civilizaciones. Siempre ha sido un reto garantizar que las redes de distribución de agua potable (RDAP) logren cumplir los requerimientos mínimos hidráulicos de presión y velocidades. Es por esto que en todo el mundo, ha sido materia de estudio e interés para el campo de la ingeniería. Ante un inminente aumento en la demanda mundial del agua por el acelerado crecimiento poblacional, es necesario comenzar a construir redes mucho más resilientes al cambio y asequibles. La construcción de RDAP es bastante compleja debido a que es un problema no lineal mixto y entero; esta característica de no linealidad se debe a las ecuaciones que rigen el comportamiento hidráulico del sistema donde los diámetros son variables discretas que solo pueden tomar ciertos valores pertenecientes a una selección de diámetros comerciales (Robles. A, 2018). Durante los últimos 100 años, se ha venido innovando con diferentes metodologías y herramientas digitales que permitan buscar un diseño más óptimo. Estas metodologías se identifican por tener diámetros menores a los originales pero que cumplen con las restricciones mínimas hidráulicas como velocidades, presiones, volúmenes, entre otros. Entre las metodologías más famosas del mundo se encuentra las mono-objetivo como OPUS o los algoritmos genéticos, y las multiobjetivo se encuentran NGS/II, Galaxy y AMALGAM.

El Cloro es el desinfectante más común del mundo. Durante muchos años se ha utilizado para complementar el proceso de desinfección en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y así conservar la calidad a medida que se distribuye en la red. La aplicación de este desinfectante ha contribuido significativamente a mejorar la calidad del agua en las redes. Sin embargo, ha sido uno de los retos más grandes ya que el cloro tiende a decaer naturalmente por reacciones de consumo y también, con la pared de la tubería. El cloro también es capaz de generar subproductos de desinfección los cuales pueden presentar un riesgo en la salud. Uno de los más comunes son los trihalometanos que se forman gracias a reacciones entre el cloro y la materia orgánica en la red. Estos son de especial cuidado ya que están clasificados como cancerígenos y pueden generar un problema de salud pública. Por esta razón hay que tener un control exhaustivo en las redes para asegurar la mínima concentración posible de estos. Entre los factores más relevantes para la producción de trihalometanos son las zonas de estancamiento en la red, velocidades bajas de flujo e intrusiones de materia orgánica.

Con todo esto mencionado anteriormente, se hace más pertinente encontrar soluciones que no solo distribuyan el agua a través de la red cumpliendo todos los requisitos hidráulicos, sino que también conserven la calidad del agua con la que salen de las PTAP.



Por ende, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Pueden las redes optimizadas mejorar la calidad del agua en las redes de distribución de agua potable? Un factor determinante de las redes optimizadas es que logran disminuir el tiempo de retención y por ende distribuir más eficientemente el desinfectante (Saldarriaga, J, 2023). Con este supuesto, se plantea la siguiente hipótesis: Las redes optimizadas al tener un menor diámetro por tubería, aumentan las velocidades de flujo en la red y, por ende, se reduce el tiempo de retención del agua; como consecuencia principal, el agua se distribuye más rápidamente manteniendo una concentración de cloro mayor en la red y reduciendo el potencial de formación de trihalometanos.

El alcance de esta tesis se basa en modelar el comportamiento de cloro y trihalometanos en las 5 redes del sector 8 de Bogotá con el fin de comprobar la hipótesis anteriormente planteada. Para esto se utilizará el software especializado proporcionado por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) junto a una extensión del mismo, planteado un escenario de modelación de 3 días bajo unas constantes de reacción específicas. La optimización de las redes se realizará por el software REDES 2018 por la metodología OPUS. Los principales resultados de esta tesis consisten en 3 partes: Modelación de cloro en cada subsector por 72 horas, Modelación de Trihalometanos en cada subsector por 72 horas y, Tiempos de respuesta en cada subsector durante 1 hora y 12 horas. Con estos resultados se espera concluir sobre el comportamiento de los dos determinantes de calidad mencionados anteriormente y también, sobre los tiempos de respuestas en las redes optimizadas y no optimizadas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Modelar dos determinantes de calidad del agua (Cloro y Trihalometanos) con el software de EPANET y su extensión EPANET-MSX en dos tipos de redes (Optimizadas y no Optimizadas) para determinar cual tiene un mejor comportamiento en términos de calidad y tiempo de respuesta.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Definir patrones de demanda apropiados para la modelación en las redes.
- ✓ Establecer un escenario de modelación adecuado para hacer los análisis de cloro y Trihalometanos.
- ✓ Optimizar las redes mediante la herramienta REDES 2018 por la metodología OPUS.
- ✓ Seleccionar los coeficientes de cuerpo y de pared apropiados para la modelación.
- ✓ Definir el modelo de formación de Trihalometanos.
- ✓ Modelar el comportamiento del cloro en la red a través de EPANET 2.2.



- ✓ Modelar el comportamiento de Trihalometanos en la red a través de EPANET-MSX 1.0.
- ✓ Definir los tiempos de respuesta de las redes mediante el conteo de nodos que cumplan ciertos criterios.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Cloro en las Redes

El cloro es conocido como el desinfectante más común en el mundo por su efectividad, bajo costo y fácil aplicación (Interempresas, 2004). Su utilización ha sido un éxito durante los últimos 50 años ya que ha logrado reducir sustancialmente la propagación de enfermedades por consumir agua no potable como la colera, las fiebres tifoideas, la disentería, gastroenteritis, entre otras. De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud, la desinfección del cloro es la mejor garantía del agua microbiológicamente potable (OPS). La forma aplicación de cloro más común para potabilizar es con hipoclorito de sodio granulado o en forma líquida. La EPA sugiere que las desinfecciones de agua deben tener una relación de 1 parte de cloro por 100 de agua, el equivalente de agregar 16 onzas de solución de cloro a 12.5 galones de agua (EPA). También, la desinfección puede utilizar productos a base de lejía de cloro aptos para la desinfección, con una proporción de 8 gotas de lejía para un galón de agua.

La reacción química del hipoclorito de sodio en contacto con el agua se puede resumir de la siguiente manera (ITC): Cuando el cloro se disuelve en el agua, se hidroliza rápidamente para formar ácido hipocloroso y ácido clorhídrico.



Donde:

$Cl_2$ : Cloro

$H_2O$ : Agua

$HClO$ : Ácido hipocloroso

$HCl$ : Ácido Clorhídrico

Para el caso del hipoclorito de sodio, se producen la disociación de las siguientes sales



Donde:

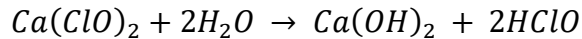
$Na(ClO)$ : Hipoclorito de Sodio



$H_2O$ : Agua

$NaOH$ : Hidróxido de Sodio

$HClO$ : Ácido hipocloroso



*Ecuación 3*

Donde:

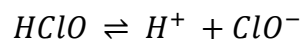
$Ca(ClO)_2$ : Hipoclorito de Calcio

$H_2O$ : Agua

$Ca(OH)_2$ : Hidróxido de Calcio

$HClO$ : Ácido hipocloroso

En cualquiera de los casos: cloro, hipoclorito sódico e hipoclorito cálcico, se acaba formando ácido hipocloroso, que es realmente la especie desinfectante. No obstante, éste se disocia de la siguiente manera:



*Ecuación 4*

Donde:

$HClO$ : Ácido Hipocloroso

$H^+$ : Ion Hidrógeno

$ClO^-$ : Ion Hipoclorito

El ácido hipocloroso es un desinfectante mucho más potente que el Ion hipoclorito, esto se puede atribuir al hecho de que es una molécula de carga neutra lo que le permite penetrar mucho fácil la membrana celular de los patógenos encontrados en el agua (ITC). Profundizando un poco más sobre la desinfección, el cloro tiene la capacidad de romper las uniones químicas moleculares en la bacteria o en el virus. El principio consiste en que los desinfectantes compuestos de cloro pueden intercambiar átomos con otros compuestos como las enzimas en las bacterias y otras células. Cuando las enzimas entran en contacto con el desinfectante, uno o más de los átomos de hidrógeno son sustituido por el cloro, lo cual provoca que la molécula se transforme o se rompa (Lenntech). Si la enzima no funciona correctamente, causa la muerte de la célula conocido como lisis celular.

La pared celular de los microorganismos patógenos está cargada negativamente. De esta manera puede ser penetrado por la molécula de ácido hipocloroso que tiene carga neutra. Como se mencionó anteriormente, el ion hipoclorito está cargado negativamente por lo



cual repelen las dos cargas por fuerzas moleculares y el proceso de desinfección se hace menos efectivo. El ácido hipocloroso puede penetrar capas limosas, paredes celulares y capas protectoras de microorganismos matando de manera efectiva los patógenos (Lenntech). Como resultado, se obtiene una inhibición de la actividad microbiana en el agua garantizando su potabilización. En general, las propiedades de desinfección del cloro en agua se basan en el poder de oxidación de los átomos de oxígeno libre y reacciones de sustitución del cloro.

Para determinar la efectividad del cloro se debe estudiar el pH del agua. La desinfección con cloro tiene un óptimo entre 5.5 a 7.5 (Lenntech). El ácido hipocloroso reacciona más rápidamente con iones hipoclorito; garantizando un 80-100% más de efectividad. El nivel de ácido hipocloroso disminuirá cuando el valor del pH sea más alto. Cuando se tiene un PH de 6, el nivel de ácido hipocloroso es de un 80% y el resto son iones hipoclorito. Sin embargo, cuando el valor del pH es de 8, ocurre lo contrario. Por ende, cuando el valor del pH es de 7.5 las concentraciones se igualan (Lenntech).

El RAS es el reglamento de agua potable y saneamiento en Colombia, dicho reglamento define los parámetros de calidad aceptables que determinan si una muestra de agua es potable o no. Para el caso del cloro, el valor aceptable del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución del agua para consumo humano deberá estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L. La dosis de cloro por aplicar para la desinfección del agua y asegurar el residual libre debe resultar de pruebas frecuentes de demanda de cloro (RAS, 2007)

De acuerdo con Agencia para las sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, la exposición de cloro puede generar los siguientes efectos en la salud. La exposición a bajos niveles de cloro puede producir irritación de la nariz, la garganta y los ojos. La exposición a niveles más altos puede producir tos y alteraciones del ritmo respiratorio y daño de los pulmones. En general, las personas que sufren de problemas respiratorios como alergias, fiebre del heno, o fumadores, tienden a sufrir efectos más graves que personas de buena salud (ASTDR). Estas exposiciones son comúnmente encontradas en muestras de agua distribuida por una red. Sin embargo, el consumo de cloro directo sin ningún tipo de dilución puede traer consecuencias más perjudiciales. Beber cantidades pequeñas de soluciones de hipoclorito (menos de una taza) puede producir irritación del esófago. Beber soluciones concentradas de hipoclorito puede producir daño grave de la parte superior del tubo digestivo y en algunos casos la muerte. (ASTDR). Estos efectos son causados por las propiedades corrosivas de la solución de hipoclorito y no necesariamente por exposición a cloro molecular.



## 2.2 Formación de Trihalometanos

Uno de los grandes problemas de potabilizar agua con cloro son los subproductos de desinfección. Estos se definen como sustancias orgánicas e inorgánicas que se forman durante la reacción de un agente desinfectante con materia orgánica presente de manera natural en el agua (Lenntech). Uno de los subproductos de desinfección más común son los Trihalometanos (THM). Estos se definen como un grupo de compuestos químicos volátiles que se producen en el proceso de potabilización del agua al añadir cloro. Son una clase de compuestos orgánicos basados en una molécula de metano en la que los átomos de hidrógeno presentes habitualmente han sido reemplazados por tres átomos de elementos halogenados como el cloro o el bromo (GreenFacts). Los trihalometanos más comunes en las redes de distribución de agua potable son los siguientes:

- Cloroformo -  $CHCl_3$
- Bromodiclorometano (BDCM) -  $CHBrCl_2$
- Dibromoclorometano (DBCM) -  $CHClBr_2$
- Bromoformo -  $CHBr_3$

A continuación, la Figura 1 muestra una lista de los trihalometanos con su respectiva fórmula química, nombres comunes, otros nombres y una ilustración de la molécula.








Trihalometanos comunes (ordenados por <a href="#">peso molecular</a> )				
Fórmula Molecular	Nombre IUPAC	Nombre común	Otros nombres	Molécula
$CHF_3$	trifluorometano	<a href="#">fluoroformo</a>	Freón 23, R-23, HFC-23	
$CHClF_2$	<a href="#">clorodifluorometano</a>	-	R-22, HCFC-22	
$CHCl_3$	triclorometano	<a href="#">cloroformo</a>	metil tricloruro	
$CHBrCl_2$	bromodiclorometano	-	-	
$CHBr_2Cl$	clorodibromometano	-	-	
$CHBr_3$	tribromometano	bromoformo	metil tribromato	
$CHI_3$	triiodometano	<a href="#">iodoformo</a>	metil triioduro	

Figura 1. Trihalometanos comunes. Tomado de Pancorbo, F (2011)



Las plantas de tratamiento de agua potable deben lidiar con este problema ya que estas son las que encargan del proceso de desinfección antes de bombear el agua a través de la red. De acuerdo con el consultor Ernesto Ciudad, la formación de trihalometanos se hace mayor con el aumento de los siguientes parámetros (Ciudad. E):

- Concentración de precursores y de cloro libre residual
- pH
- Temperatura
- Tiempo de contacto

En la Figura 2, se complementan los parámetros mencionados anteriormente junto a una descripción que permite entender como influyen en la formación de THM (Obando et al. 2018).

Parámetro	Descripción
Materia Orgánica	La materia orgánica caracterizada mediante Carbón Orgánico Total (COT) y disuelto (COD), es el principal precursor. Las sustancias húmicas son las principales precursoras.
Bromuros	Los bromuros son rápidamente oxidados por el cloro a ácido hipobromoso (HOBr), el cual reacciona con la materia orgánica produciendo THMs bromados considerados más tóxicos.
Desinfectante	La tasa de formación de THMs aumenta con la dosis de cloro ( $Cl_2$ ). Considerando una dosis fija de cloro, la producción de THMs se incrementa si aumenta la concentración de COD. No obstante, la mayoría de los modelos de cinética de formación utilizan la dosis inicial de $Cl_2$ , a pesar de que la concentración cambia durante la reacción.
pH	La producción de THMs aumenta con el incremento del pH. Una baja formación a pH cercano a 5 y una mayor tasa a pH cercano 9,4.
Temperatura (q)	La producción de THMs aumenta con la temperatura por lo que su producción cambia usualmente en verano respecto al invierno.
Tiempo de reacción	Más del 50% de la formación final de THMs se reporta desde pocos minutos a varias horas o días después de la adición del cloro.

*Figura 2. Parámetros que intervienen en la formación de THM. Tomado de Obando et al. (2018)*

La formación de trihalometanos está definida por la presencia de materia orgánica en el agua, más específicamente ácidos húmicos y fúlvicos, productos metabólicos de algas y células muertas. La reacción consiste en la sustitución de tres de los cuatro átomos de hidrogeno en las moléculas de metano por átomos de halógenos, formando nuevos compuestos como el cloroformo o el tricloroetano que es un líquido incoloro, volátil y de olor característicos. En la Figura 3 se puede observar el proceso de la reacción descrita anteriormente.

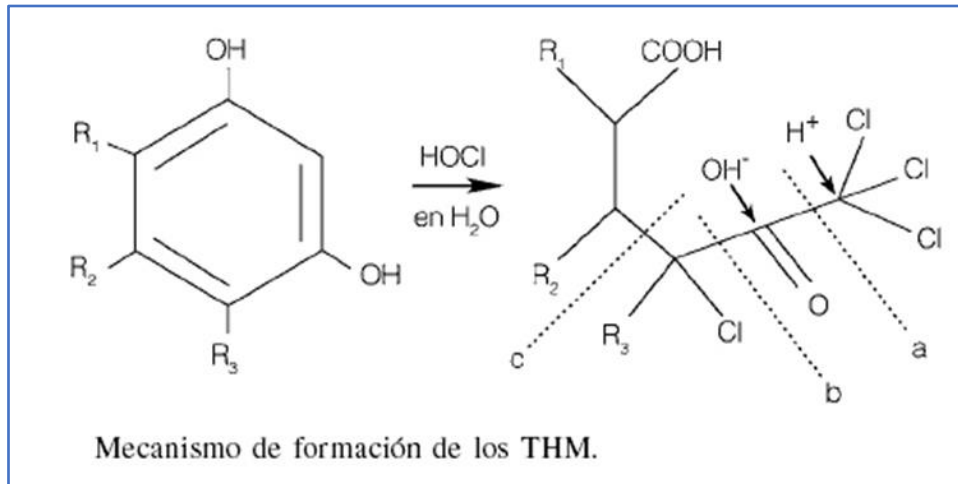


Figura 3. Mecanismo de formación de THM. Tomado de Pancorbo, F (2011)

Tanto el RAS como la OMS establecen que las concentraciones de THM máximas permisibles en una muestra de agua potable son de 100  $\mu\text{g/L}$  (RAS, 2007). Adicionalmente, la OMS también tiene límites permisibles para cada uno de los 4 THM comunes los cuales son (Ciudad. E):

- Cloroformo - 200  $\mu\text{g/L}$
- Bromodiclorometano (BDCM) - 60  $\mu\text{g/L}$
- Dibromoclorometano (DBCM) - 100  $\mu\text{g/L}$
- Bromoformo - 100  $\mu\text{g/L}$

La OMS declara que los Trihalometanos son potenciales causantes de diferentes tipos de cáncer, principalmente cáncer de colon y de vejiga (Ciudad. E). De los 4 trihalometanos mencionados anteriormente, el IARC (Agencia internacional de investigación contra el cáncer) los clasifica en los siguientes grupos:

- Cloroformo – Posible cancerígeno para humanos
- Bromodiclorometano (BDCM) - Posible cancerígeno para humanos
- Dibromoclorometano (DBCM) – No clasificable como cancerígeno para humanos
- Bromoformo - No clasificable como cancerígeno para humanos

## 2.3 Descripción del software

### 2.3.1 EPANET 2.2

EPANET 2.2 es un software de aguas gratuito desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) reconocido por las ingenierías y constructoras más prestigiosas. El programa EPANET 2.2 permite realizar simulaciones en periodos prolongados (uno o



varios días) del comportamiento hidráulico y de la evolución de la calidad del agua en redes de suministro a presión (EPA). Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses (TECPA, 2022). EPANET 2.2 efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de productos químicos suspendidos en el agua a lo largo del periodo de simulación (EPA). El software EPANET 2.2 proporciona un entorno integrado bajo Windows, para la edición de los datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulicas, análisis de calidad del agua y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos (TECPA, 2022). Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución y mapas de isolíneas.

### 2.3.2 EPANET – MSX

EPANET – MSX (Multi-specie Extension) es como su nombre lo indica, una extensión disponible para el programa de EPANET 2.2. Esta extensión permite modelar reacciones químicas y biológicas complejas tanto en el volumen de agua como en la pared de la tubería (EPA). Esta extensión le permite al usuario una flexibilidad al modelar una gran variedad de reacciones químicas de interés, incluyendo, auto descomposiciones de cloraminas a amonio, formación de subproductos de desinfección, crecimiento biológico, reacciones combinadas con constantes multi sistémicas y reacciones de absorción por transferencia de masa limitada por la oxidación en la pared de la tubería (EPA). El programa también es capaz de ajustar las concentraciones iniciales en la fuente y seleccionar los nodos de interés para visualizar los resultados de la modelación. A diferencia de EPANET 2.2 esta extensión se corre por el *Command Prompt* del PC.

## 2.4 Modelo de decaimiento del cloro

El decaimiento del cloro se puede dividir en dos partes, el decaimiento de cuerpo y el decaimiento de pared. Primero, el decaimiento de cuerpo se basa en las reacciones que tiene el cloro con los diferentes compuestos que se encuentran en la RDAP tales como la materia orgánica, generando productos que se mantienen en el agua (Cruz, 2022). Segundo, el decaimiento de pared consiste en la descomposición del cloro provocado por la reacción con la pared de la tubería, la cual puede tener partículas del material, biopelículas, entre otros (Cruz, 2022). Por lo cual, el decaimiento total de cloro se define por la Ecuación 1, la cual se resumen en la sumatoria del decaimiento de cuerpo y el decaimiento de pared.



$$\left(\frac{dC_{Cl}}{dt}\right)_{total} = \left(\frac{dC_{Cl}}{dt}\right)_{Cuerpo} + \left(\frac{dC_{Cl}}{dt}\right)_{Pared}$$

Ecuación 5

Donde:

$C_{cl}$ : Concentración de Cloro  $\left[\frac{M}{L^3}\right]$

#### 2.4.1 Decaimiento de cuerpo

Como se menciona en la tesis de Cruz, un buen modelo de decaimiento de cloro debe garantizar que, para un único grupo de parámetros constantes, este pueda modelar con precisión el fenómeno sin importar que se varíe la dosis de desinfectante, condiciones hidráulicas o parámetros químicos (Cruz, 2022). Por esta razón existen 5 requisitos que se deben cumplir en un modelo de decaimiento de cuerpo sea apropiado y valido los cuales son:

1. Predicción precisa del cloro residual
2. Un número reducido de parámetros
3. La concentración inicial del cloro medida se puede definir como la concentración inicial del modelo, en vez de una concentración más baja después del periodo rápido de decaimiento.
4. Los valores de los parámetros no deben variar en el tiempo máximo que tarde el agua en a travesar el sistema de distribución.
5. Los valores de los parámetros no deben variar para la concentración inicial de cloro en el rango operacional.

Hay que resaltar que los modelos de decaimiento de cuerpo suponen que las características del agua cruda antes del proceso de desinfección no varían con el tiempo (Cruz, 2022). Hay una amplia variedad de modelos que permiten predecir el comportamiento del cloro, sin embargo, para el desarrollo de esta tesis se utilizara el modelo de decaimiento de primer orden.

#### 2.4.2 Decaimiento de cuerpo de primer orden

El supuesto principal de este modelo es que la tasa de decaimiento de cuerpo es proporcional a la concentración de cloro residual en el agua (Fisher. I, Kastl. G, Sathasivan. A, 2011) tal y como se puede ver en la Ecuación 6.

$$\left(\frac{dC_{Cl}}{dt}\right)_{Cuerpo} = -k_b * C_{cl}$$

Ecuación 6



Donde:

$C_{cl}$ : Concentración de cloro residual de cuerpo  $\left[\frac{M}{L^3}\right]$

$k_b$ : Coeficiente de decaimiento de primer orden  $\left[\frac{1}{T}\right]$

### 2.4.3 Decaimiento de pared

El decaimiento de pared se compone de dos partes, la primera es la proporción de área disponible para la reacción y el segundo es la tasa de transferencia de masa entre el fluido y la pared (EPA). El primer factor se define a partir del área superficial por unidad de volumen que se define como  $A = \frac{2}{R}$  o  $A = \frac{4}{D}$ , en donde R es el diámetro de la tubería y D es el diámetro de la tubería (Mora. N, 2022). El segundo factor es la tasa de transferencia de masa y esta se calcula en función del número de Reynolds y la difusión molecular de la especie (EPA). Existen múltiples modelos para simular el decaimiento de pared como por ejemplo el modelo EXPBIO, sin embargo, para esta tesis se utilizará el modelo de decaimiento de primer orden.

### 2.4.4 Decaimiento de pared de primer orden

Este modelo se diseñó para un sistema de distribución de agua potable con compuestos orgánicos producidos por biopelículas y que el cloro fuera el reactivo límite (Cruz. L, 2022).

$$\left(\frac{dC_{cl}}{dt}\right)_{pared} = -\frac{4}{D} * k_{w,1} * C_w \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$D$ : Diámetro de la tubería  $[L]$

$k_{w,1}$ : Coeficiente de decaimiento de pared de primer orden  $\left[\frac{L}{T}\right]$

$C_w$ : Concentración de cloro en la pared  $\left[\frac{M}{L^3}\right]$

Los coeficientes de decaimiento de pared se determinan a partir de información recolectada en campo a lo largo de la RDAP, definiendo valores que se ajusten a la información recolectada por medio de un proceso de calibración (Vasconcelos. J et al. 1997). Cabe resaltar que el valor de este coeficiente depende de múltiples factores como el material de la tubería, los diámetros, edad y estado de la tubería y de la temperatura.



La temperatura es fundamental ya que esta puede acelerar las reacciones y por ende generar más material particulado en la red (Cruz. L, 2022).

### 3. ANTECEDENTES

**“Comparison of two water quality modeling approaches in the trunk network of Bogota’s water distribution system: white-box models versus black-box models using artificial intelligence” Laura Enriquez**

El alcance de este trabajo realizado por Laura Enríquez consiste en verificar si los modelos de caja negra son efectivos para predecir la concentración de cloro y presencia de trihalometanos. La característica principal de estos modelos es que con capaces de tomar un gran conjunto de datos para integrar condiciones operáticas y así identificar una relación entre la entrada y la salida de alguna variable en el sistema. Para este trabajo se utilizó la red troncal de Bogotá cuya red se caracteriza por ser considerablemente grande. La investigadora resalta la importancia de predecir la presencia de estos subproductos de desinfección ya que pueden ser perjudiciales para la salud y potencialmente cancerígenos, generando un problema de salud pública.

**“Impact of Booster Chlorination on Chlorine Decay and THM Production: Simulated Analysis” Carrico. B, Singer. P (2009)**

Este *paper* desarrollado por los investigadores Brian Carrico y Phillip Singer es el resumen de una investigación sobre los posibles efectos de dosificar con cloro una red y re-dosificar en puntos donde sea necesario. La investigación consistió en modelar en una red por medio de EPANET y su extensión EPANET-MSX, y comparar los resultados obtenidos para escenarios de dosificación única y re-dosificación. Los resultados principales fueron los siguientes. Primero que todo el modelo sugiere que la re-dosificación permite cumplir con los objetivos de desinfección al intervenir en los puntos más alejados de la red utilizando una menor cantidad de cloro aplicado al sistema. Segundo, la re-dosificación puede traer más ventajas a puntos en la red ubicados cerca de tanques de almacenamiento mostrando un comportamiento de cloro residual mucho más consistente y una mayor reducción de trihalometanos. Tercero, el decaimiento del cloro por causa de la pared de la tubería puede ser muy significativo en los puntos más alejados de la red. Finalmente, concluyen que los Trihalometanos se forman únicamente por reacciones en el cuerpo o en este caso en el agua. Esto se tiene en cuenta al utilizar EPANET – MSX para calcular los resultados.

**“Trihalomethane prediction modelling in water distribution systems: calculation of the mean residence time” Andrés Araya-Obando, Mark Jones-Sánchez, Luis G. Romero-Esquivel**



Este *paper* escrito por 3 investigadores de Costa Rica profundiza en los principales aspectos que se deben considerar para la construcción de un modelo de predicción, así como en el análisis de dos métodos de cálculo para la determinación del TMR en redes de distribución empleando trazadores. En este se afirma que la determinación del tiempo medio de residencia (TMR) en las redes de distribución requiere de herramientas computacionales que demandan tiempo e inversión por lo que es necesario considerar otros métodos para su estimación. Para llevar a cabo esta investigación realizaron pruebas en una red de distribución a escala piloto conformada por tuberías de PVC de 12 mm de diámetro. Se utilizó cloruro de sodio como trazador mediante adición continua. Concluyeron que los TMR en dos puntos de muestreo y se obtuvo una diferencia de 2,40% y 3,31% respectivamente, demostrando que son dos métodos precisos y de fácil comprensión. Finalmente, concluyen que los modelos construidos a partir de regresiones múltiples pueden ser potencialmente utilizados en Costa Rica, dado que se pueden construir de manera sencilla a partir de condiciones locales y que, además, son suficientemente buenos para predecir la presencia de trihalometanos.

## 4. METODOLOGÍA

La metodología que se llevara a cabo para este trabajo es la siguiente. Primero que todo se hará una descripción de las 5 redes que se utilizaran para modelar. Luego se describen los patrones de demanda utilizados para cada red en periodos de 24 horas. Después se procede a optimizar las redes mediante la metodología OPUS desarrollada por el *Centro de investigaciones de alcantarillado y acueducto* (CIACUA – UNIANDES) para así encontrar un diseño optimizado de cada red. Para ver los resultados de la optimización se calculan los valores de volumen, perímetro y superficie interna de pared para la red optimizada y no optimizada. Con el diseño optimizado de cada red, se plantea el escenario de modelación descrito más adelante para modelar el cloro a través de la red y los trihalometanos en un periodo de 3 días o 72 horas. Los resultados se resumen en 3 tipos: el primero son graficas del comportamiento del cloro, el segundo son graficas del comportamiento de THM y finalmente, graficas del tiempo de respuesta de la red. Las modelaciones se llevarán a cabo con el software EPANET 2.2 y su extensión EPANET-MSX. Cabe resaltar que algunas graficas de ciertos nodos no comienzan desde la hora 0 debido a los largos tiempos de llegada en ciertas especies, sin embargo, esto no afecta los resultados, es una cuestión más visual.

### 4.1 Redes de estudio

Para esta tesis se decidió utilizar las redes que componen el sector 8 de Bogotá. A continuación, se encuentran la descripción de las 5 redes utilizadas acompañado de una figura donde se puede apreciar la red como tal y su distribución por alturas.



#### 4.1.1 Sector 8 Sub Sector 1

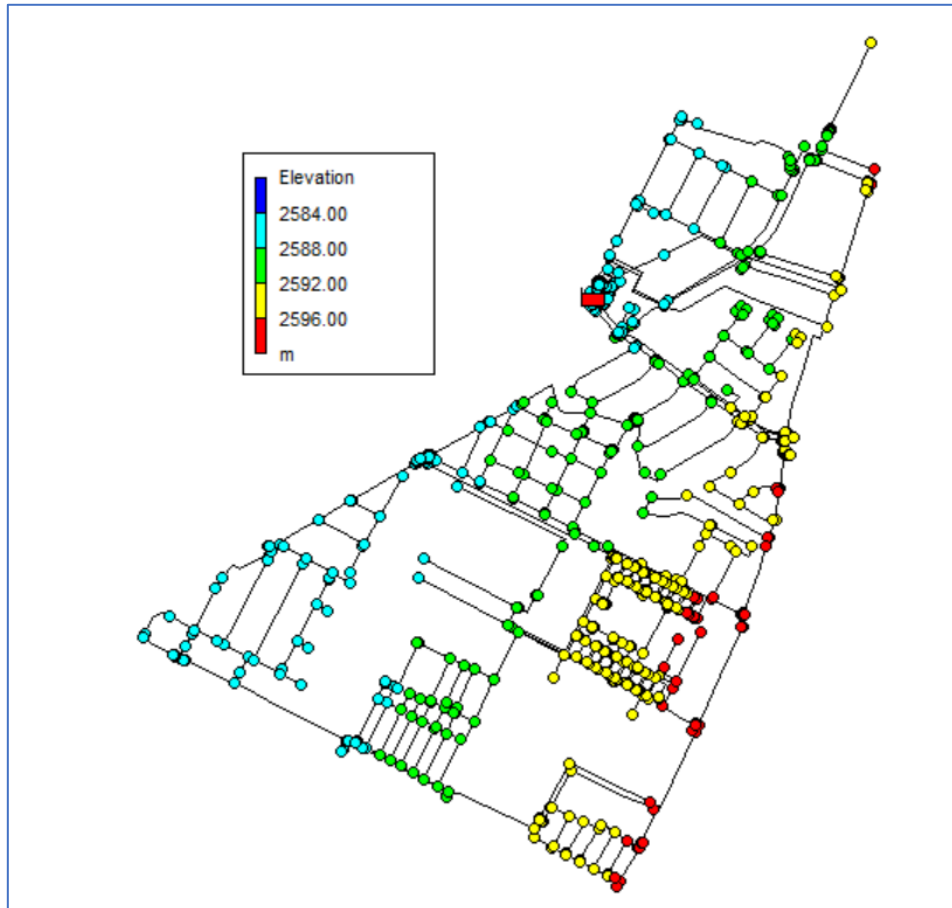


Figura 4. Red Sector 8 Sub Sector 1

Tabla 1. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 1

<b>Red Sector 8 Sub Sector 1</b>	
Número de nodos	642
Número de tuberías	754
Número de reservorios	2
Demanda base promedio (L/s)	0.029



#### 4.1.2 Sector 8 Sub Sector 2

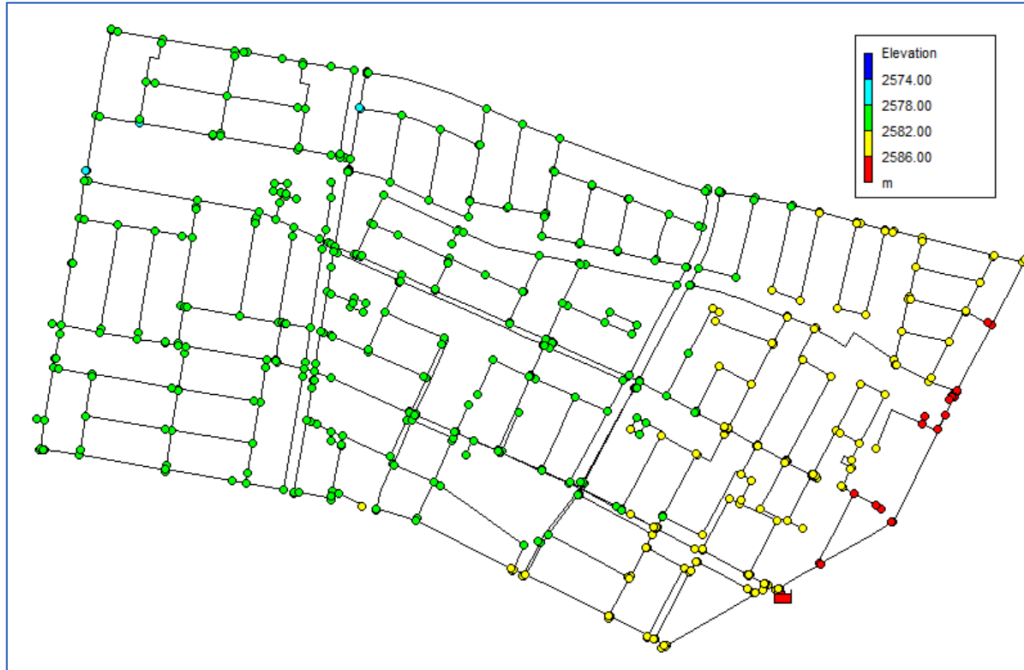


Figura 5. Red Sector 8 Sub Sector 2

Tabla 2. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 2

<b>Red Sector 8 Sub Sector 2</b>	
Número de nodos	593
Número de tuberías	688
Número de reservorios	1
Demanda base promedio (L/s)	0.150



### 4.1.3 Sector 8 Sub Sector 3

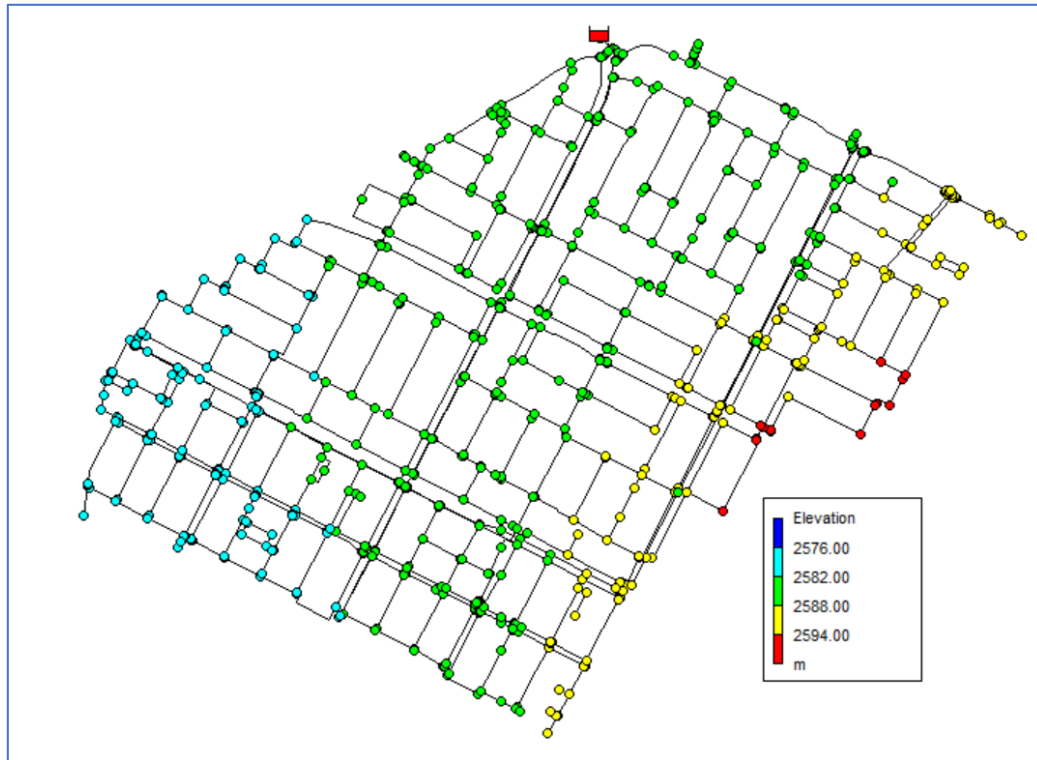


Figura 6. Red Sector 8 Sub Sector 3

Tabla 3. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 3

<b>Red Sector 8 Sub Sector 3</b>	
Número de nodos	845
Número de tuberías	976
Número de reservorios	1
Demanda base promedio (L/s)	0.063



#### 4.1.4 Sector 8 Sub Sector 4

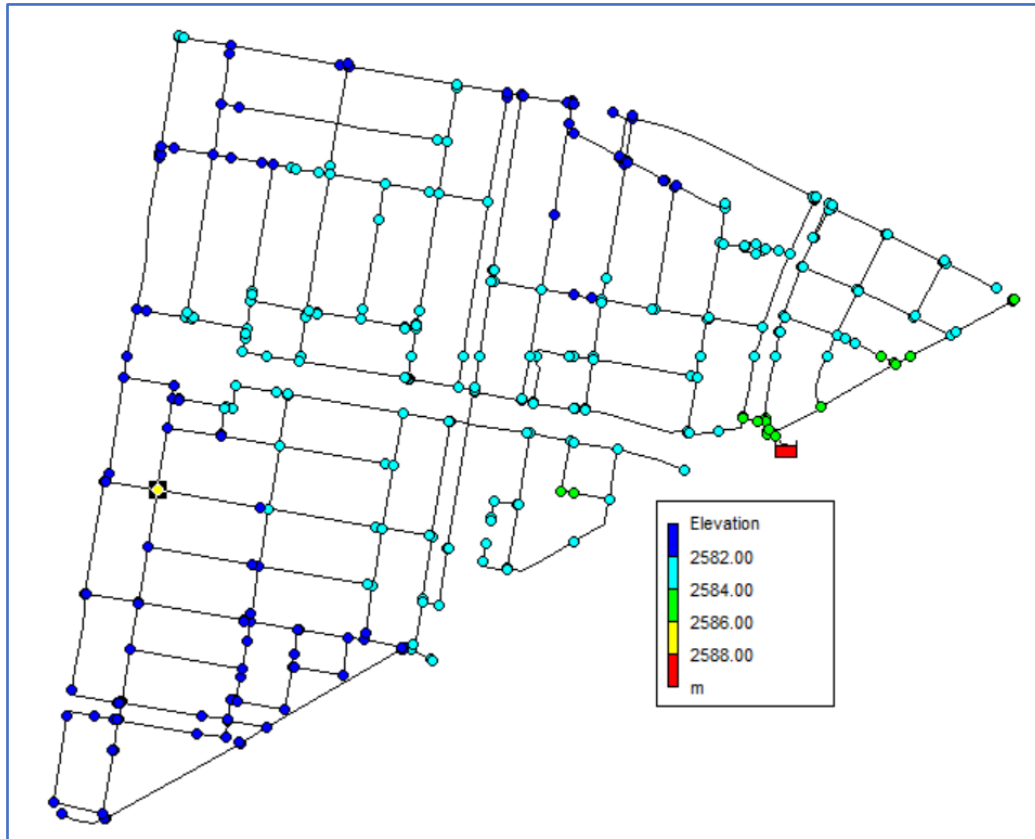


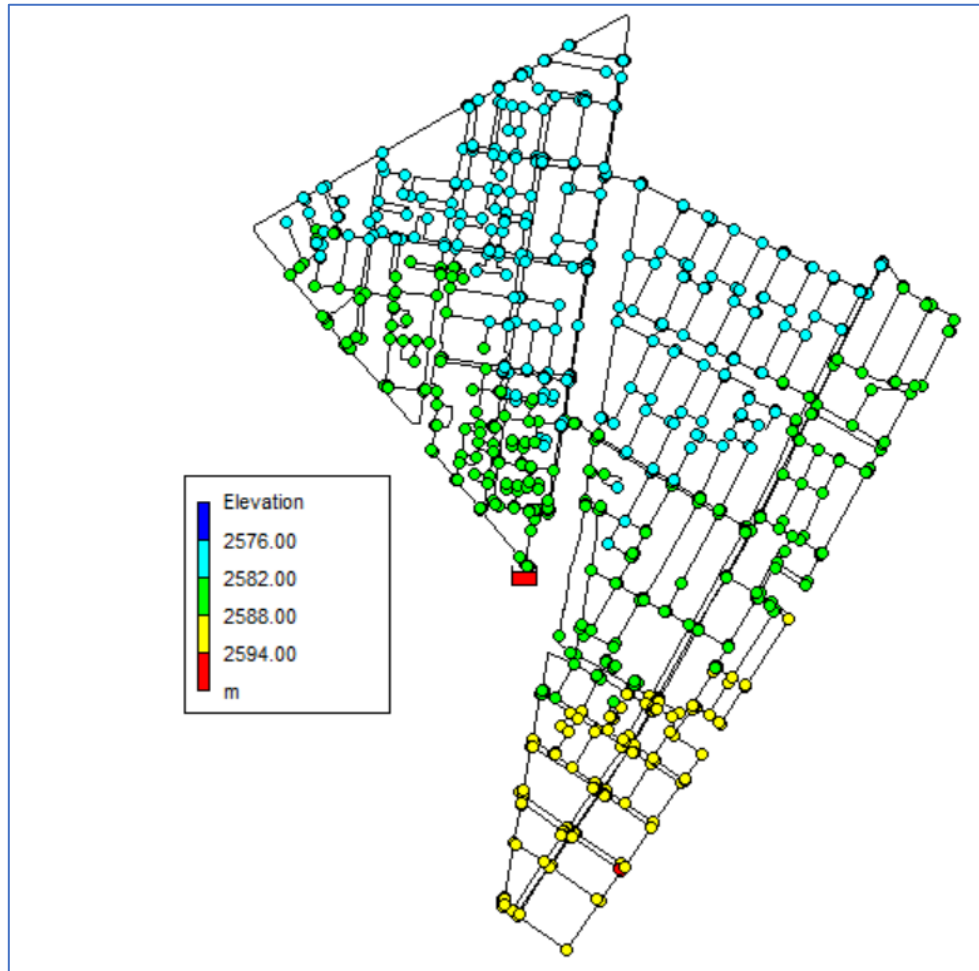
Figura 7. Red Sector 8 Sub Sector 4

Tabla 4. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 4

<b>Red Sector 8 Sub Sector 4</b>	
Número de nodos	378
Número de tuberías	432
Número de reservorios	1
Demanda base promedio (L/s)	0.076



#### 4.1.5 Sector 8 Sub Sector 5



*Figura 8. Red Sector 8 Sub Sector 5*

*Tabla 5. Descripción Red Sector 8 Sub Sector 5*

<b>Red Sector 8 Sub Sector 5</b>	
Número de nodos	962
Número de tuberías	1131
Número de reservorios	1
Demanda base promedio (L/s)	0.058



## 4.2 Patrón de demanda

Los patrones de demanda se definen como periodos de variación de caudal representativos de una zona en particular donde se consume más o menos agua que el promedio, en otras palabras, describen mediante multiplicadores los cambios de la demanda a través de un periodo de tiempo (usualmente de 24 horas). Para llevar a cabo la modelación, es necesario incluir un patrón de demanda con el fin de representar más apropiadamente el comportamiento de una red y que los resultados sean lo más aproximados a la realidad. A continuación, se encuentra el patrón de demanda utilizado en los sub sectores uno, dos, tres y cinco con intervalos de tiempo de 1 hora (AccuModel Inc, 2015).



Figura 9. Patrón de demanda 1

El sub sector 4 tiene una particularidad y es que el patrón de demanda utilizado en las demás redes genera errores de sistemas desbalanceados, lo que se traduce en multiplicadores de demanda muy elevados que la red no puede asimilar. Para solucionar este problema, se decidió utilizar el siguiente patrón de demanda de 96 pasos con intervalos de tiempo de 15 minutos (Salcedo. C, 2014). Al multiplicar los pasos por los intervalos de tiempo se obtiene el patrón de demanda equivalente a 24 horas.

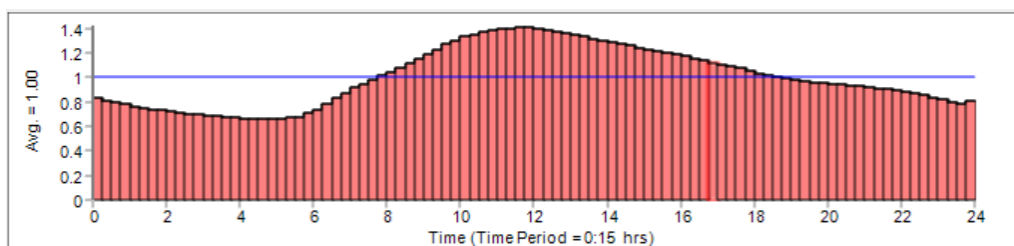


Figura 10. Patrón de demanda 2 vista EPANET. Tomado de Salcedo. C (2014)

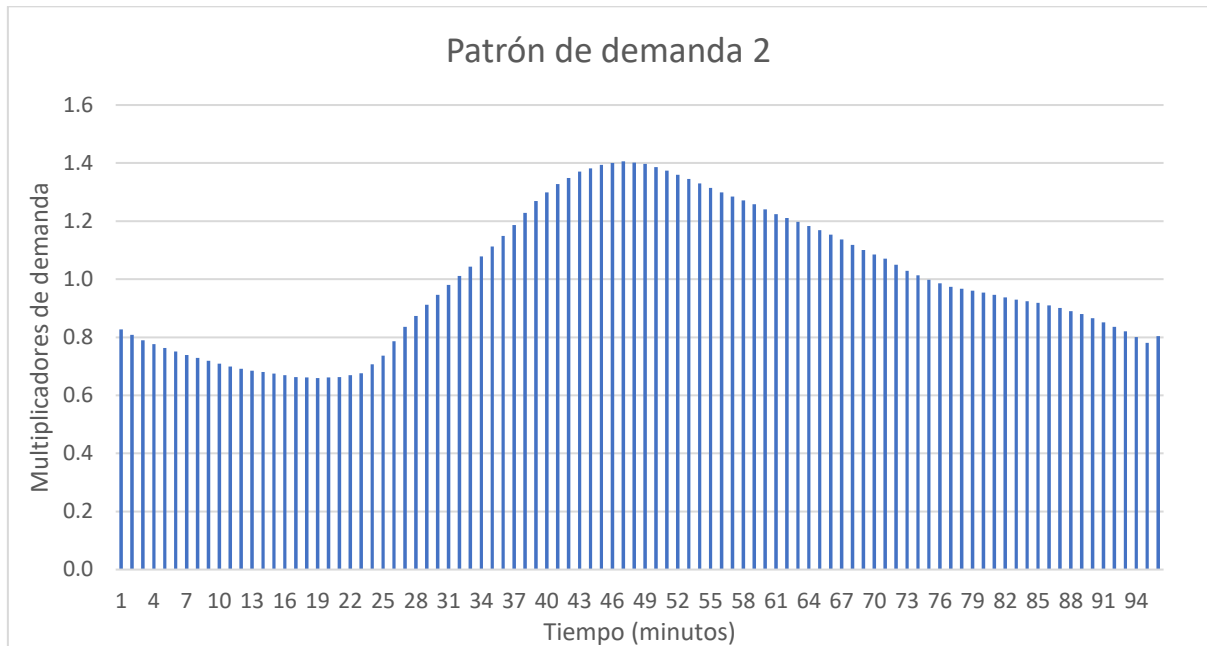


Figura 11. Patrón de demanda 2

### 4.3 Optimización de las Redes

#### 4.3.1 Procedimiento

Para optimizar las redes seleccionadas se siguieron los siguientes pasos. Primero que todo hay que asegurarse de que los archivos inp no tengan ningún patrón de demanda asignado, de ser así, hay que eliminarlo. Adicionalmente, se debe asegurar que la red este configurada en estado estable, esto se configura desde la ventana de EPANET 2.2 ajustando un tiempo de modelación igual a 0 horas. Luego, dependiendo de la red, se multiplica la demanda de cada nodo por el multiplicador del patrón más alto; al hacer esto se garantiza que la optimización pueda cumplir con las restricciones básicas hidráulicas y soportar las demandas en las horas pico. Después, se procede a optimizar las redes mediante la herramienta REDES 2018 con la metodología OPUS para así obtener el diseño óptimo de la red. Posteriormente, a esta nueva red optimizada se le deben ajustar las demandas a las originales, por lo cual se dividen las demandas entre el multiplicador más alto anteriormente utilizado. Por último, se le asigna el patrón de demanda respectivo a cada red para obtener el diseño optimizado final listo para comparar con la red no optimizada. Este procedimiento se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo.

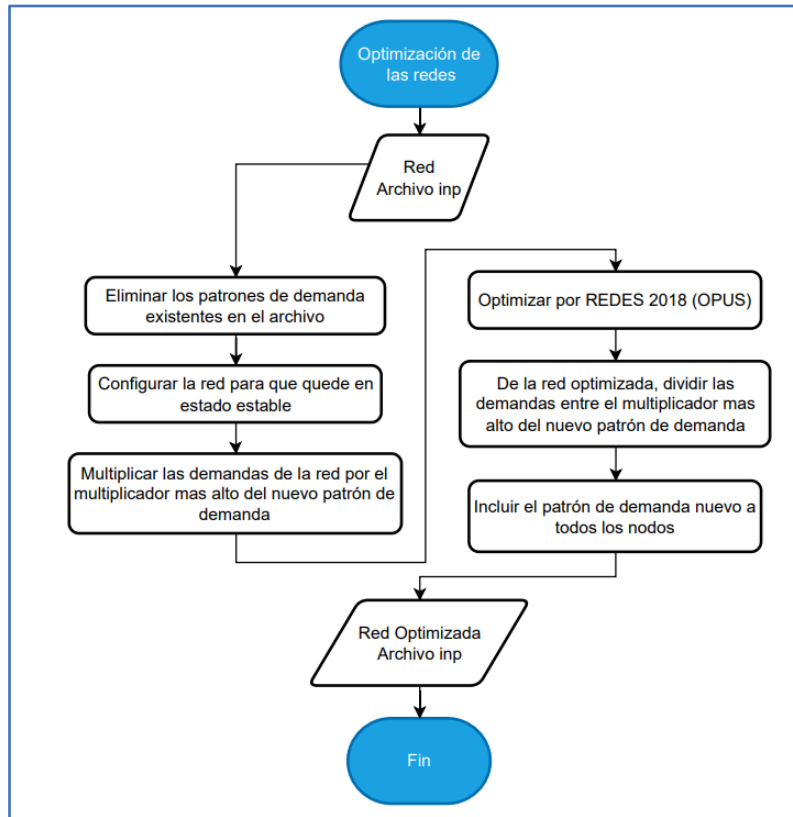


Figura 12. Diagrama de flujo optimización de las redes

#### 4.3.2 Optimización en REDES 2018 por OPUS

Como se mencionó anteriormente, los requisitos primordiales para optimizar las redes son los siguientes. Primero, no pueden tener ningún patrón de demanda asignado en los nodos, segundo, deben de estar en estado estable las redes y, por último, las demandas tienen que estar multiplicadas por el multiplicador más grande del patrón de demanda asignado. Cuando se cumplen estas condiciones, se procede a seguir los siguientes pasos en REDES 2018 para optimizar la red en cuestión. Para la optimización de las redes se sigue el procedimiento utilizado en la tesis de Natalia Mora.

Primero se debe cargar la red al programa REDES 2018, luego se debe buscar la ventana de *diseñar* donde se podrá encontrar la metodología *OPUS*

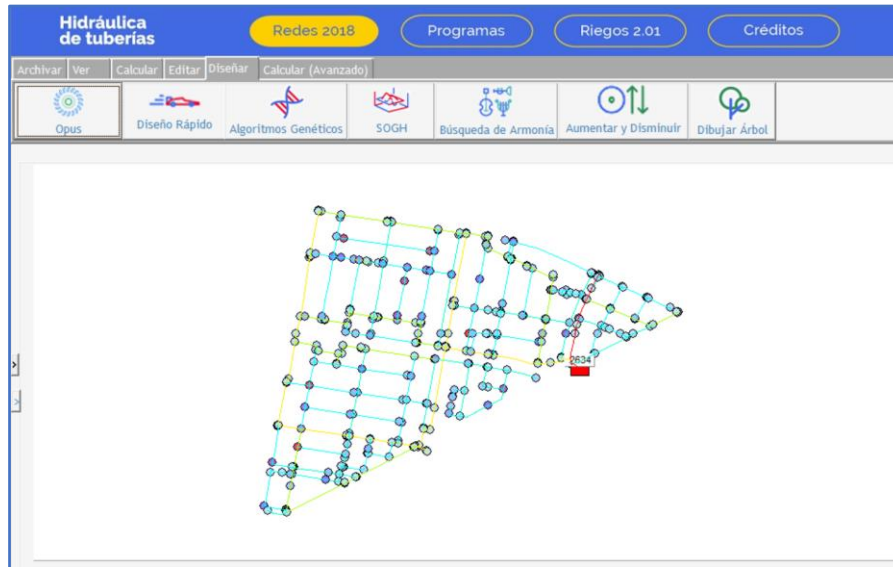


Figura 13. Importación de la red en REDES 2018

Cuando se seleccionan la metodología de OPUS se deben ajustar los siguientes parámetros como se observan en la Figura 14. Opciones de diseño OPUS. Además, en la categoría de diámetros se debe seleccionar el método de redondeo potencial como se puede observar en la Figura 15.



Figura 14. Opciones de diseño OPUS

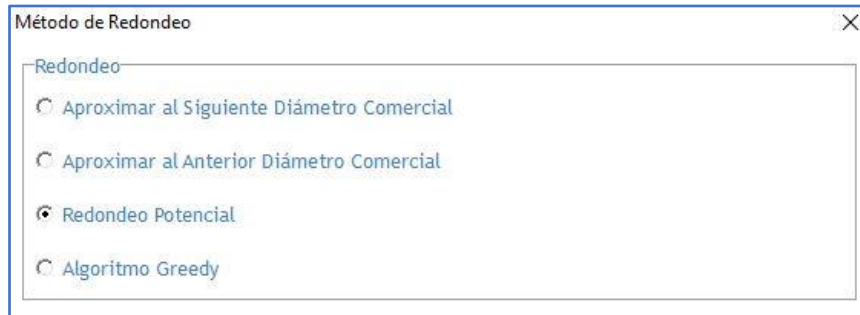


Figura 15. Método de Redondeo REDES 2018

Al continuar, se debe crear una nueva lista de diámetros los correspondientes al listado de PAVCO (Mora. N, 2021) el proceso se puede ver en la Figura 16 y en la Figura 17.

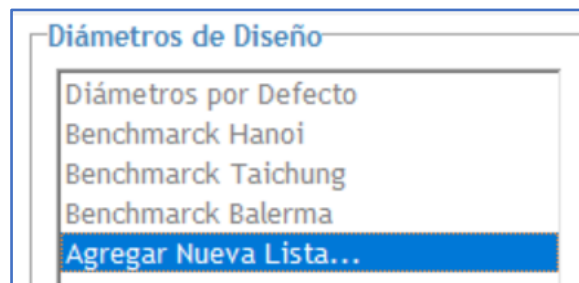


Figura 16. Ventana diámetros de diseño REDES 2018

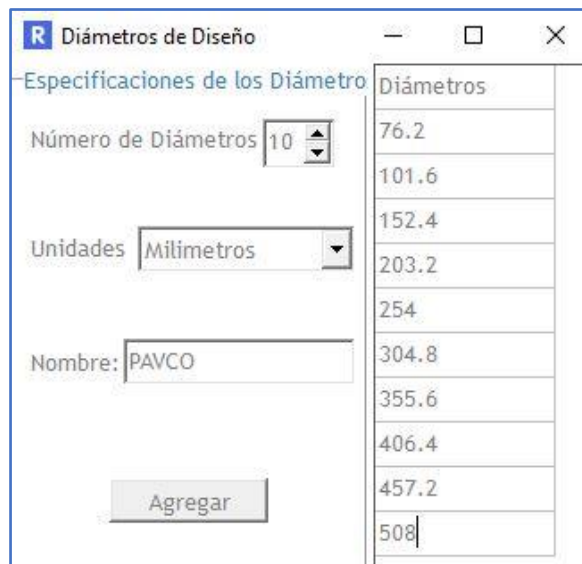


Figura 17. Diámetros de diseño seleccionados

Después, se le deben asignar los coeficientes K y X correspondientes al cálculo de costos de la red. Estos se tomaron de la tesis de Mora, los cuales se utilizaron para estimar los costos diseños optimizados y no optimizados (Mora. N, 2021). Por otra parte, se debe asegurar que la presión mínima sea de 15 MCA (metros de cabeza de agua), la rugosidad



absoluta sea de 0.0015 mm y el coeficiente de Hazen Williams sea de 130, todo esto se puede observar en la Figura 18.

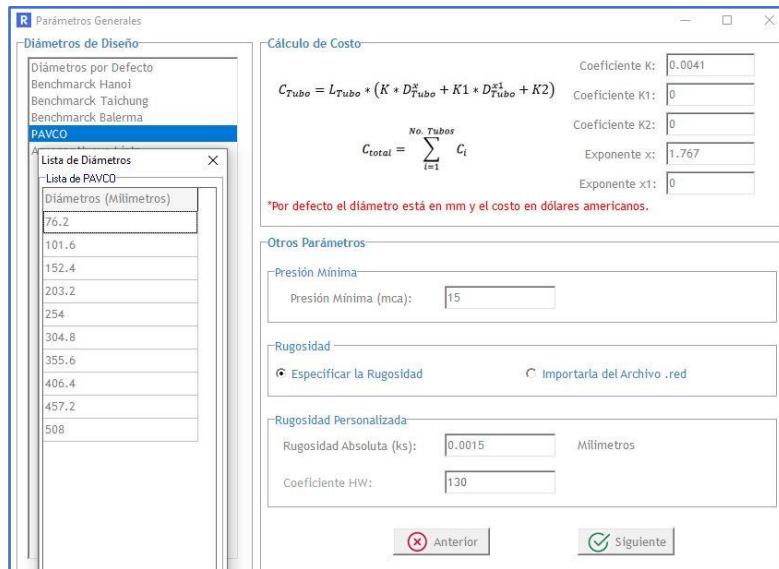


Figura 18. Parámetros generales para cálculo de costos

Finalmente, se deben dejar los siguientes valores en la última ventana de OPUS, nuevamente son valores son tomados de la tesis de Mora.

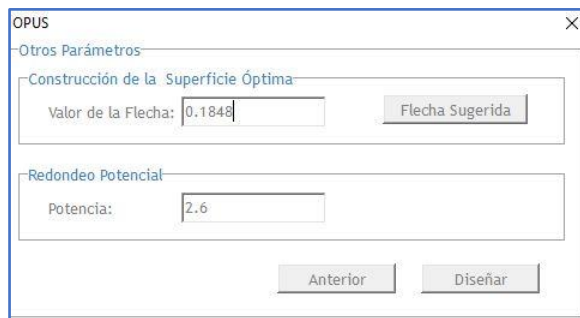


Figura 19. Otros parámetros de diseño OPUS

Al presionar *diseñar*, REDES 2018 encuentra un diseño optimizado de la red listo para descargarse como archivo inp y después de hacerle un par de configuraciones, ya se puede modelar el escenario de cloro en EPANET junto con los trihalometanos en EPANET-MSX.

#### 4.4 Características geométricas de las redes optimizadas vs no optimizadas

Con el fin de entender la capacidad de optimización del programa REDES 2018 se utilizan las siguientes ecuaciones para calcular en la red el volumen de agua en metros cúbicos, el perímetro total en metros y la superficie interna de pared en metros cuadrados.



$$Volumen_i = Longitud_i * \left(\frac{\pi}{4} * Diametro_i\right)^2$$

*Ecuación 8*

Donde:

$Volumen_i$ : Volumen de agua dentro de la tubería [ $m^3$ ]

$Longitud_i$ : Longitud de la tubería [ $m$ ]

$Diametro_i$ : Diámetro en la tubería [ $m$ ]

$\pi$ : Constante matemática

$$Perimetro_i = \pi * Diametro_i$$

*Ecuación 9*

Donde:

$Perimetro_i$ : Perímetro de la tubería [ $m$ ]

$Diametro_i$ : Diámetro en la tubería [ $m$ ]

$\pi$ : Constante matemática

$$SIP_i = Longitud_i * Perimetro_i$$

*Ecuación 10*

Donde:

$Longitud_i$ : Longitud de la tubería [ $m$ ]

$Perimetro_i$ : Perímetro de la tubería [ $m$ ]

Hay que resaltar que las ecuaciones mencionadas anteriormente calculan el volumen, perímetro y SIP de una tubería en cuestión. Para calcular los parámetros de toda la red hay que calcular los de todas las tuberías y sumarlos. Estos resultados se encuentran más adelante.

#### 4.4.1 Planteamiento del escenario

Para hacer el análisis comparativo de las redes con respecto al cloro, se planteó el siguiente escenario de modelación. El reservorio cuenta con una concentración de **5 mg/L** que serán inyectados de manera constante a lo largo del periodo de modelación con una duración de **3 días** o **72 horas**. De esta manera se puede apreciar un análisis en periodo



extendido de la red y con este, comparar los dos tipos de redes (Optimizadas vs No Optimizadas).

#### 4.4.2 Procedimiento

Para hacer la modelación de cloro se siguió el siguiente procedimiento. Primero que todo se deben tener las redes optimizadas y no optimizadas listas con su respectivo patrón de demanda. Después se deben ingresar las redes a EPANET 2.2 y correr una simulación, con esto se verifica que la red funcione de manera correcta y se pueda modelar el escenario de cloro. Luego se debe configurar el parámetro a medir, las unidades de concentración, la calidad en el reservorio y los coeficientes de cuerpo y de pared. Los coeficientes de cuerpo y de pared que se utilizaron para realizar toda la modelación son **0.49** y **0.71** respectivamente, los rangos se pueden encontrar en la Tabla 6. Finalmente se debe ajustar la temporalidad de la modelación y asegurarse de que el paso de tiempo coincida con el patrón de demanda incluido para la red. Este procedimiento se hace para las redes optimizadas y no optimizadas con el fin de comparar cuantitativamente el comportamiento de cloro y poder concluir sobre cual tiene mejor comportamiento. La Figura 20 muestra un diagrama de flujo con el resumen de los pasos mencionados anteriormente para la modelación de cloro.

*Tabla 6. Coeficientes de cuerpo y de pared modelación EPANET*

$k_b \left( \frac{1}{\text{día}} \right)$	$K_w \left( \frac{m}{\text{día}} \right)$	Fuente
0.10 – 0.49	0.31 – 0.71	Nuckols et al. 2001

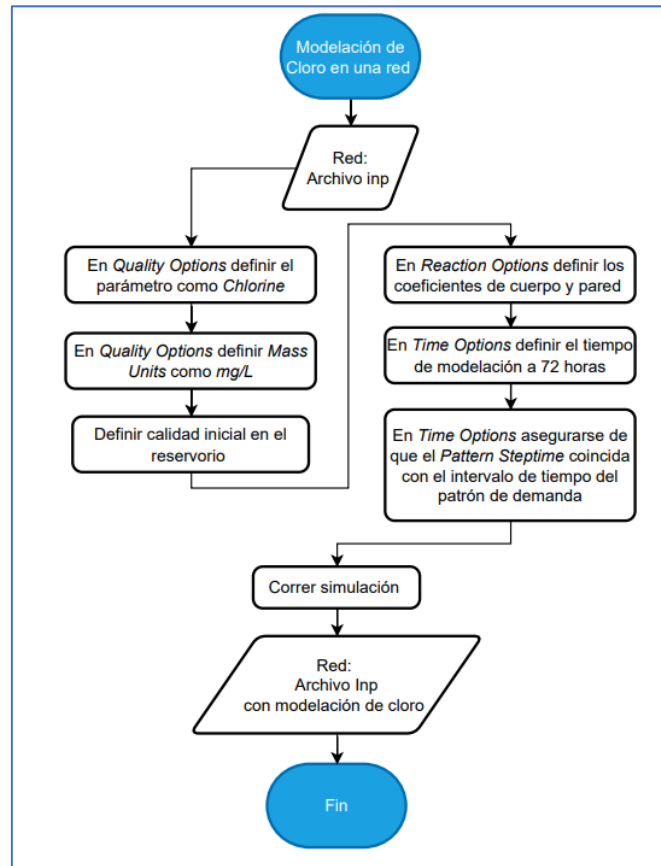


Figura 20. Diagrama de flujo modelación de cloro

A continuación, se proporciona una guía fotográfica con los ajustes de parámetros en EPANET 2.2 para modelar el escenario de cloro anteriormente planteado.

Quality Options	
Property	Value
Parameter	Chlorine
Mass Units	mg/L
Relative Diffusivity	1
Trace Node	
Quality Tolerance	0.01

Figura 21. Ajuste opciones de calidad EPANET



Reservoir 3453	
Property	Value
*Reservoir ID	3453
X-Coordinate	104306.520
Y-Coordinate	110525.050
Description	
Tag	
*Total Head	2634
Head Pattern	
Initial Quality	5
Source Quality	
Net Inflow	-0.44
Elevation	2634.00
Pressure	0.00
Quality	5.00

Figura 22. Ajuste calidad en el reservorio EPANET

Reactions Options	
Property	Value
Bulk Reaction Order	1
Wall Reaction Order	First
Global Bulk Coeff.	-0.49
Global Wall Coeff.	-0.71
Limiting Concentration	0
Wall Coeff. Correlation	0

Figura 23. Ajuste coeficientes de cuerpo y de pared EPANET

Times Options	
Property	Hrs:Min
Total Duration	72:00
Hydraulic Time Step	0:05
Quality Time Step	0:05
Pattern Time Step	1:00
Pattern Start Time	0:00
Reporting Time Step	0:05
Report Start Time	0:00
Clock Start Time	0:00:00 AM
Statistic	NONE

Figura 24. Ajuste de tiempo e intervalos de modelación EPANET



## 4.5 Modelación de Trihalometanos

Como se mencionó anteriormente, EPANET – MSX es una extensión de EPANET 2.2 que permite modelar múltiples especies químicas a lo largo de la red. Con esta herramienta se pueden definir las ecuaciones de formación y también seleccionar los nodos específicos donde se desee observar el comportamiento.

### 4.5.1 Ecuación de formación de trihalometanos

La ecuación de formación de trihalometanos consta de dos partes; la primera es la concentración sugerida de cloro del modelo EPANET - MSX y la segunda es la formación de trihalometanos que consiste en una ecuación lineal donde se multiplica el consumo por una constante de formación.

$$Cl_2 = -k_b * Cl_2 - \left(\frac{4}{D}\right) * \frac{(k_w * k_f)}{(k_w + k_f)} * Cl_2 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$Cl_2$ : Concentración de cloro  $\left[\frac{mg}{L}\right]$

$k_b$ : Coeficiente de cuerpo  $\left[\frac{1}{dia}\right]$

$D$ : Diámetro en la tubería  $[m]$

$k_w$ : Coeficiente de pared  $\left[\frac{m}{dia}\right]$

$k_f$ : Coeficiente de transferencia de masa  $\left[\frac{1}{m}\right]$

$$THM = Y * \left( k_b * Cl_2 + \left(\frac{4}{D}\right) * \frac{k_w * k_f}{(k_w + k_f)} * Cl_2 \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$Cl_2$ : Concentración de cloro  $\left[\frac{mg}{L}\right]$

$k_b$ : Coeficiente de cuerpo  $\left[\frac{1}{dia}\right]$

$D$ : Diámetro en la tubería  $[m]$

$k_w$ : Coeficiente de pared  $\left[\frac{m}{dia}\right]$



$k_f$ : Coeficiente de transferencia de masa  $\left[\frac{1}{m}\right]$

$Y$ : Coeficiente de reacción de Trihalometanos  $\left[\frac{\mu g THM}{mg Cl_2}\right]$

#### 4.5.2 Procedimiento EPANET – MSX

Para la modelación de trihalometanos se deben seguir los siguientes pasos. Primero que todo es necesario tener las redes optimizadas y no optimizadas (archivo inp) lista con el patrón de demanda incluido. Después se procede a construir el archivo msx, este es el archivo principal donde se configura todo para modelar la especie de interés. Este archivo comienza como un txt en blanco y se le tienen que agregar componente por componente. En **Options** se debe ajustar el archivo al sistema internacional y definir el método con el que se resolverán las ecuaciones diferenciales. En **Species** se debe especificar las dos especies a medir, en este caso son Cloro y Trihalometanos. En **coefficients** se deben incluir los coeficientes respectivos para cada ecuación, estos se pueden encontrar en la Tabla 7. En **Pipes** se deben incluir las respectivas ecuaciones de decaimiento de cloro y formación de trihalometanos. En **Sources** se define la fuente de cloro para la red; en todas las redes se definió que la fuente sea el reservorio. En **Quality**, se define la concentración inicial que tendrá la fuente, en este caso será de 5 mg/L como se mencionó anteriormente. Finalmente, en **Report**, se indican los nodos donde se quiere ver el comportamiento de trihalometanos. Cuando se tiene el archivo msx listo, se procede a correr EPANET-MSX. Este programa corre desde el intérprete de comandos en OS/2 y sistemas basados en Windows NT o *Command Prompt* como se puede observar en la Figura 26. Se debe llamar al programa *epanetmsx* junto a los archivos inp y msx; los resultados se deben guardar en un archivo tipo rpt. Por otra parte, los coeficientes utilizados para esta modelación se pueden encontrar en la siguiente tabla.

Tabla 7. Coeficientes modelación THM EPANET-MSX

Coeficiente	Valor	Unidades	Fuente
$k_b$	0.49	$\frac{1}{\text{día}}$	Nuckols et al. 2001
$Y$	40	$\frac{\mu g THM}{mg Cl_2}$	Carrico & Singer (2009)

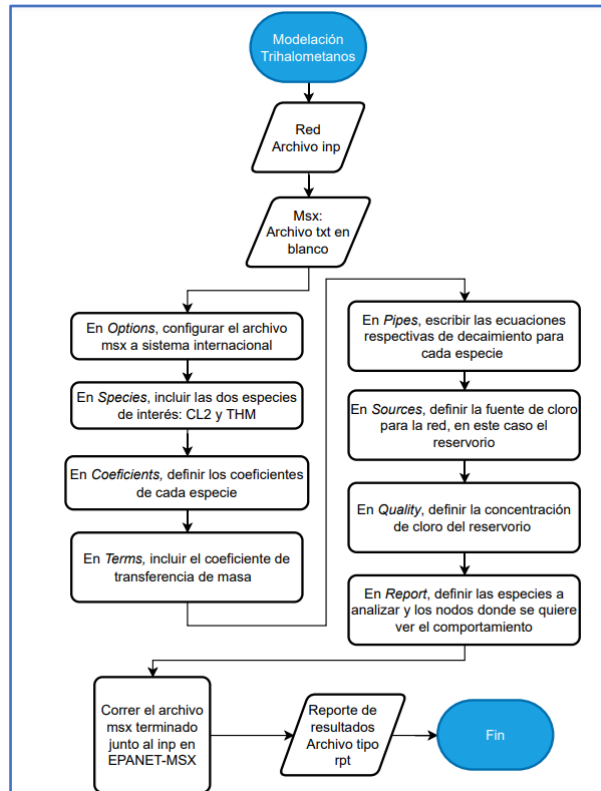


Figura 25. Diagrama de flujo modelación THM

```

Microsoft Windows [Version 10.0.22621.1413]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Admin> cd C:\Users\Admin\Desktop\Universidad\8to Semestre\Proyecto de Grado IAMB - Tesis\Software\EPANET - MSX
C:\Users\Admin\Desktop\Universidad\8to Semestre\Proyecto de Grado IAMB - Tesis\Software\EPANET - MSX> epanetmsx S8_SS3.inp S8_SS3.msx S8_SS3_No_Opti.rpt
... EPANET-MSX Version 1.1
o Processing EPANET input file
o Processing MSX input file
o Computing network hydraulics
o Initializing network water quality
o Computing water quality at hour 72
o Reporting water quality results
... EPANET-MSX completed successfully.
C:\Users\Admin\Desktop\Universidad\8to Semestre\Proyecto de Grado IAMB - Tesis\Software\EPANET - MSX> epanetmsx S8_SS3.OPUS.inp S8_SS3.msx S8_SS3_Opti.rpt
... EPANET-MSX Version 1.1
o Processing EPANET input file
o Processing MSX input file
o Computing network hydraulics
o Initializing network water quality
o Computing water quality at hour 72
o Reporting water quality results
... EPANET-MSX completed successfully.
  
```

Figura 26. Ejemplo modelación THM en EPANET-MSX

Es importante hacer la siguiente aclaración de la modelación de THM. Carrico & Singer (2009) en su *paper: Impact of Booster Chlorination on Chlorine Decay and THM Production: Simulated Analysis* afirman que la formación de THM no se ve influenciada por la pared de la tubería, por lo cual en sus simulaciones únicamente tienen en cuenta el



coeficiente de cuerpo y no el de pared. Además, afirman que el modelo lineal que utilizan en su investigación es suficientemente apropiado para modelar la formación de THM. Por lo cual se tomaron las siguientes decisiones para este trabajo; primero que todo el coeficiente de pared será igual a 0.0, aunque se sabe que esto no es cierto en la realidad, los resultados que se encuentran a continuación son netamente teóricos, Segundo, se utilizara el mismo modelo lineal que ellos proponen en el *paper*, y finalmente, se utilizara el mismo coeficiente Y de  $40 \frac{\mu g THM}{mg Cl_2}$  definido por Carrico y Singer para realizar las modelaciones.

#### 4.6 Tiempos de respuesta de las redes

Para corroborar la efectividad de las redes optimizadas se plantea el análisis de tiempo de respuesta. Este consiste básicamente en medir la cantidad de nodos durante un periodo de modelación bajo cierto criterio. Para la realización de esta tesis se definieron dos tipos de análisis que permiten comparar las redes optimizadas vs no optimizadas. El primero son nodos con presencia de cloro en una ventana de tiempo de **1 hora (60 minutos)** y de **12 horas (720 minutos)**, y el segundo son nodos que incumplen con el mínimo establecido del RAS de 0.3 mg/L de Cloro (Minvivienda, 2007) en una ventana de tiempo de **12 horas (720 minutos)**.

##### 4.6.1 Análisis 1: Nodos con presencia de cloro (> 0.0 mg/L)

Para este análisis es necesario que la red en cuestión ya tenga un escenario de modelación de cloro corrido (72 horas). Con este requisito cumplido se procede a utilizar la herramienta de EPANET *Query* que permite encontrar los nodos que cumplan cierta característica en un tiempo específico. Para este caso se necesita ajustar el *Query* con los nodos *Quality* mayor a 0, en otras palabras, aquellos nodos con concentraciones de cloro mayor a 0.0 mg/L (figura 27). Este análisis permite evidenciar la respuesta de la red para distribuir el cloro a través de esta, mientras más nodos tengan cloro en el menor tiempo mejor se desempeña la red. Este análisis se corre en dos periodos de tiempo, uno de 1 hora con intervalos de 5 minutos y otro de 12 horas con intervalos de 20 minutos.

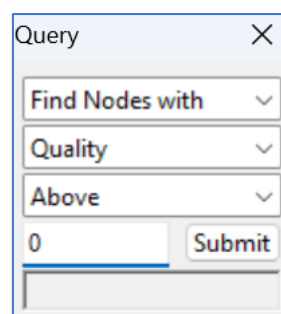


Figura 27. Configuración herramienta *Query* análisis 1 EPANET



#### 4.6.2 Análisis 2: Nodos que incumplen el RAS (< 0.3 mg/L)

Para este análisis, al igual que el anterior, es necesario que la red en cuestión ya tenga un escenario de modelación de cloro corrido. Con este requisito cumplido se procede a utilizar la herramienta de EPANET *Query* que permite encontrar los nodos que cumplan cierta característica en un tiempo específico. Para este caso se necesita ajustar el *Query* con los nodos *Quality* menor a 0.3 (figura 28), en otras palabras, aquellos nodos con concentraciones de cloro menores a 0.3 mg/L. Este análisis permite evidenciar la respuesta de la red para cumplir con el RAS; cuando una red tiene menos nodos que incumplen el RAS en un menor tiempo, la red tiene un mejor tiempo de respuesta. Este análisis se corre en un periodo de 12 horas con intervalos de 30 minutos.

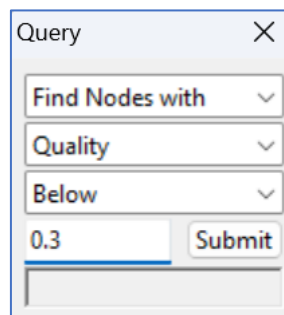


Figura 28. Configuración herramienta *Query* análisis 2



## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 Resultados caracterización geométrica

Con las ecuaciones mencionadas en la metodología se pudo construir la siguiente Tabla 8. En ella, se pueden encontrar los resultados de cada parámetro comparando las redes optimizadas vs no optimizadas.

*Tabla 8. Resultados geométricos optimización de las redes*

Red	Volumen (m3)	Perímetro (m)	SIP (m2)
S8-SS1 No Optimizada	3073.84	431.21	17840.43
S8-SS1 Optimizada	149.45	174.44	6500.65
S8-SS2 No Optimizada	545.77	267.24	13637.40
S8-SS2 Optimizada	183.55	176.43	8797.56
S8-SS3 No Optimizada	694.00	388.85	16779.76
S8-SS3 Optimizada	298.75	273.78	11428.09
S8-SS4 No Optimizada	271.98	171.08	7600.77
S8-SS4 Optimizada	96.45	106.21	4933.17
S8-SS5 No Optimizada	745.84	449.65	18811.48
S8-SS5 Optimizada	219.94	275.06	11165.73

Por otro lado, se tiene también la Tabla 9 que permite evidenciar en que porcentaje se redujo cada parámetro con el diseño optimizado de cada red.

*Tabla 9. Porcentajes de reducción del proceso de optimización en las redes*

Porcentaje de reducción de cada parámetro por optimización en OPUS			
Red	Volumen (m3)	Perímetro (m)	SIP (m2)
S8-SS1	95.14%	59.55%	63.56%
S8-SS2	66.37%	33.98%	35.49%
S8-SS3	56.95%	29.59%	31.89%
S8-SS4	64.54%	37.92%	35.10%
S8-SS5	70.51%	38.83%	40.64%

Después de observar las dos tablas se puede concluir que la reducción es más significativa en el volumen de agua dentro de la red. La reducción de estos 3 parámetros permite identificar que los tiempos de residencia serán menores y por ende el agua se distribuirá más rápidamente a través de la red.



## 5.2 Modelación Sector 8 Sub Sector 1 (S8-SS1)

### Cloro

Nodo 1421

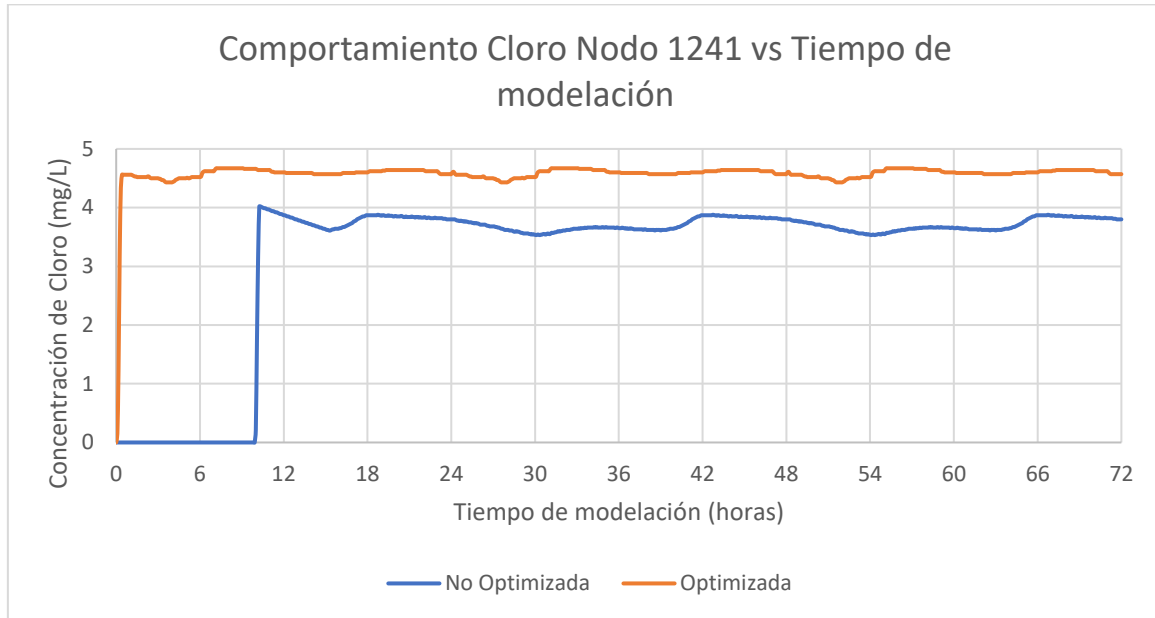


Figura 29. Resultados cloro S8-SS1 nodo 1241

Nodo 1631

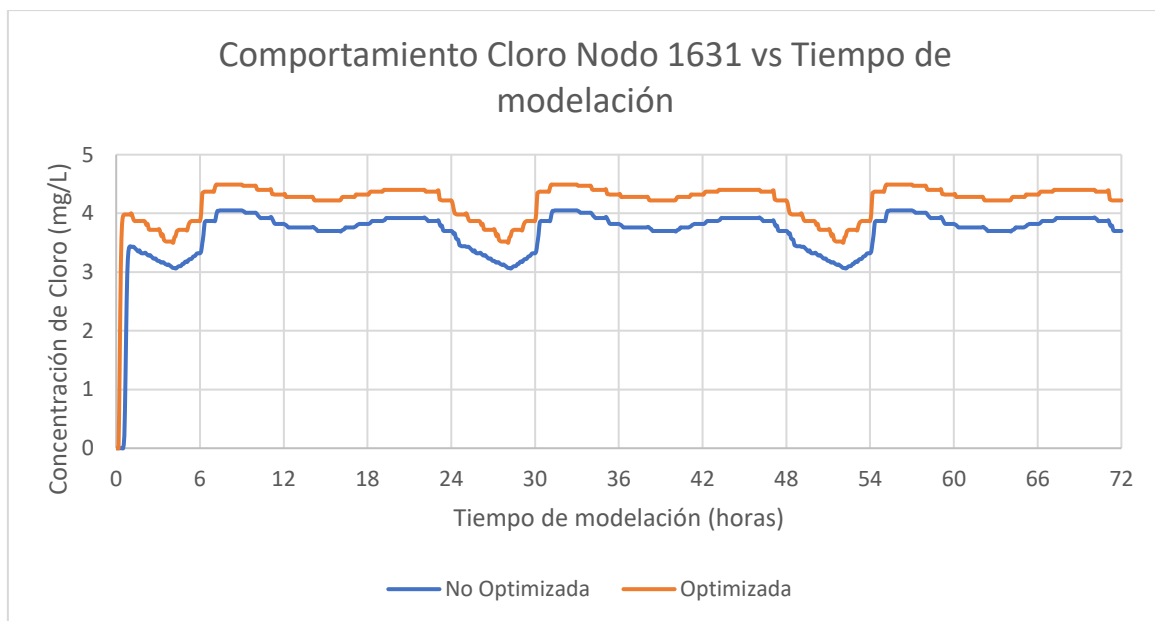


Figura 30. Resultados cloro S8-SS1 nodo 1631



### Nodo 1577

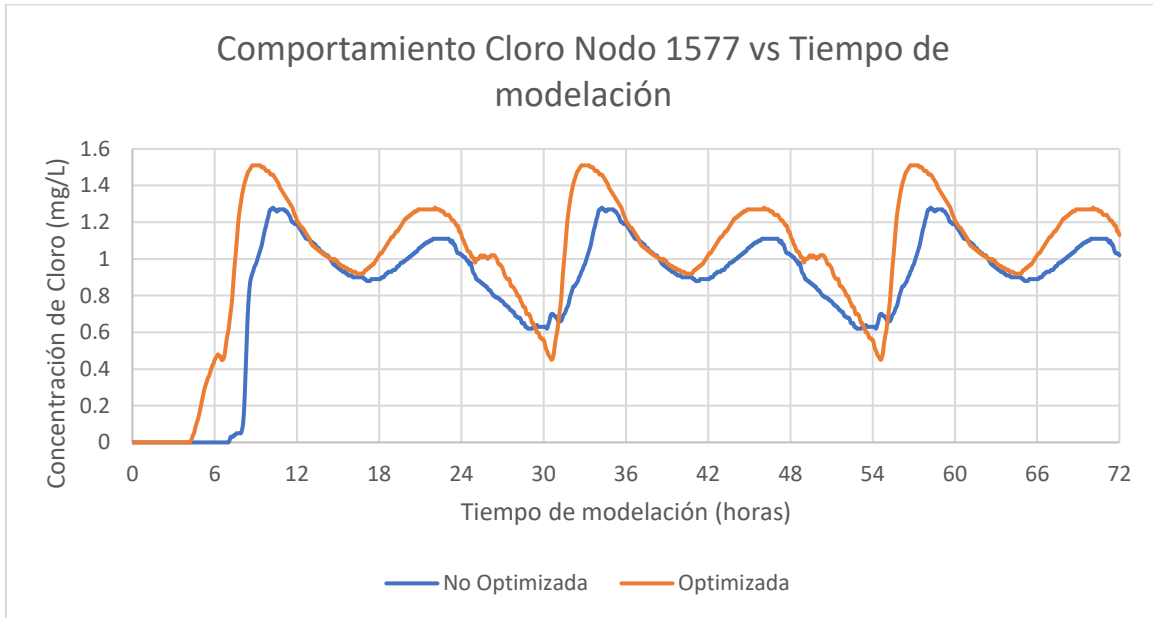


Figura 31. Resultados cloro S8-SS1 nodo 1577

### Nodo 2057

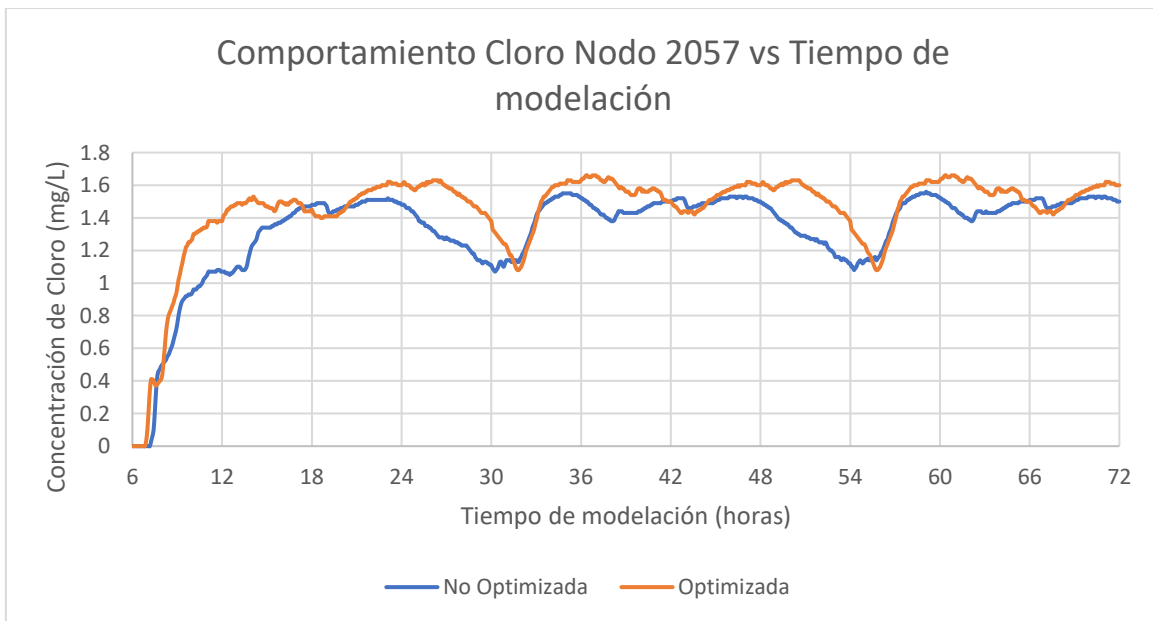


Figura 32. Resultados cloro S8-SS1 nodo 2057



## THM

### Nodo 1241

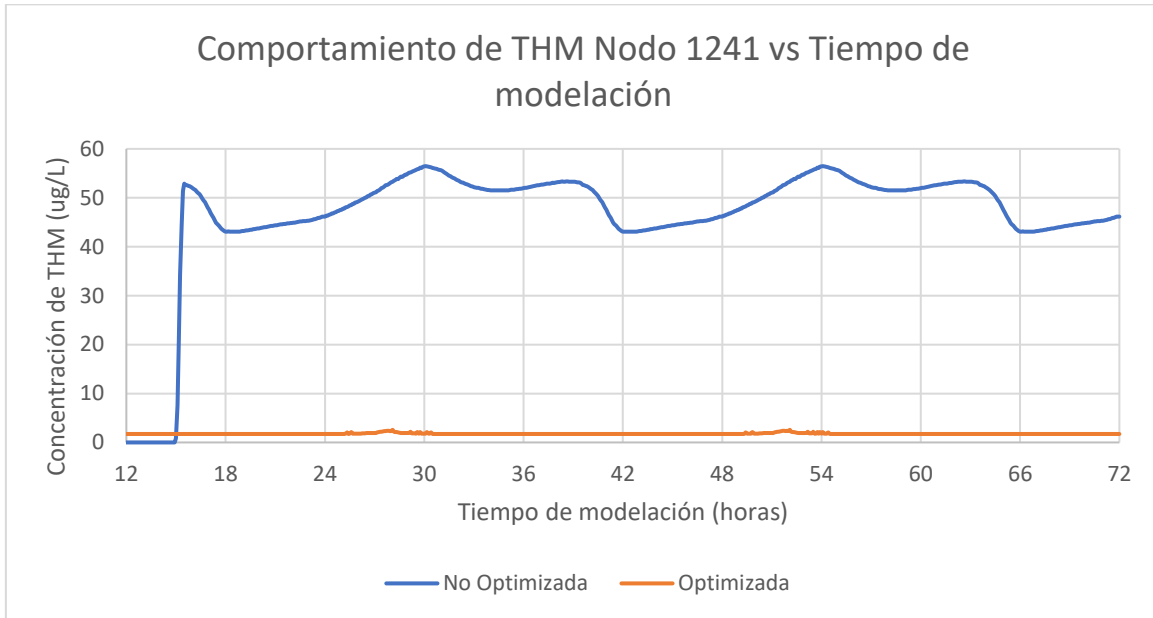


Figura 33. Resultado THM S8-SS1 nodo 1241

### Nodo 1577

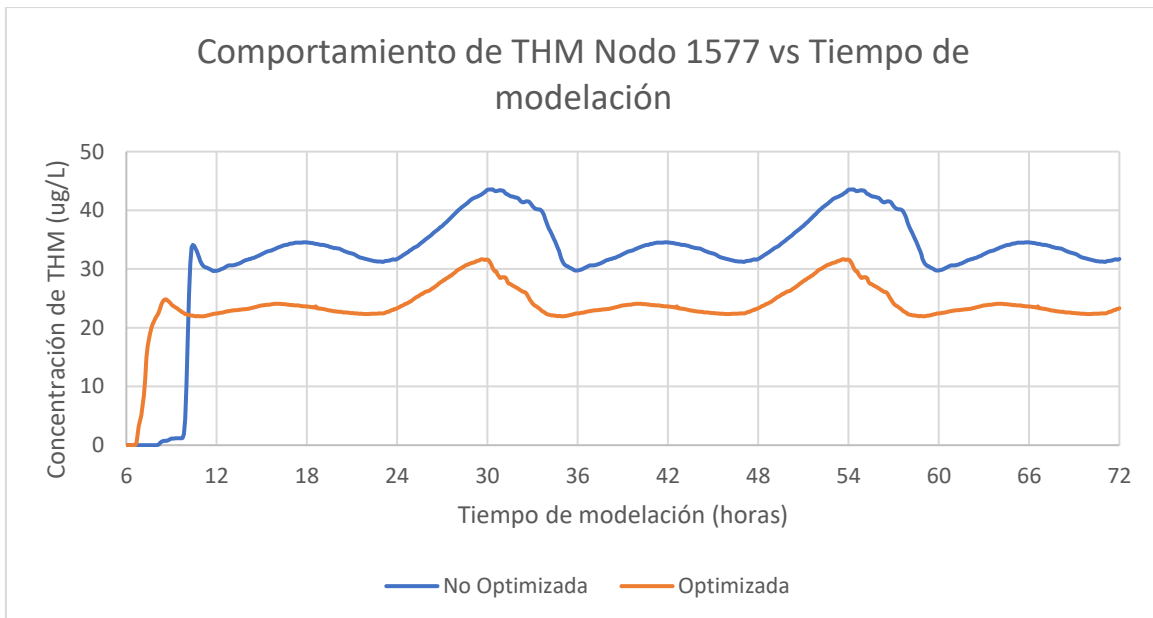


Figura 34. Resultado THM S8-SS1 nodo 1577



Nodo 1631

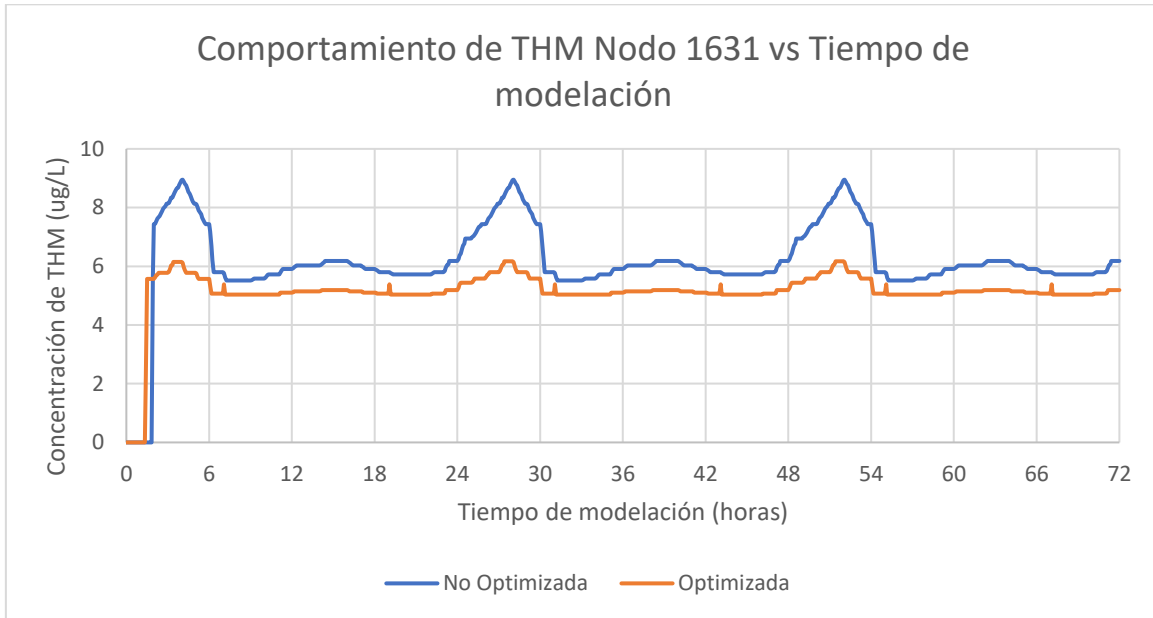


Figura 35. Resultado THM S8-SS1 nodo 1631

Nodo 2057

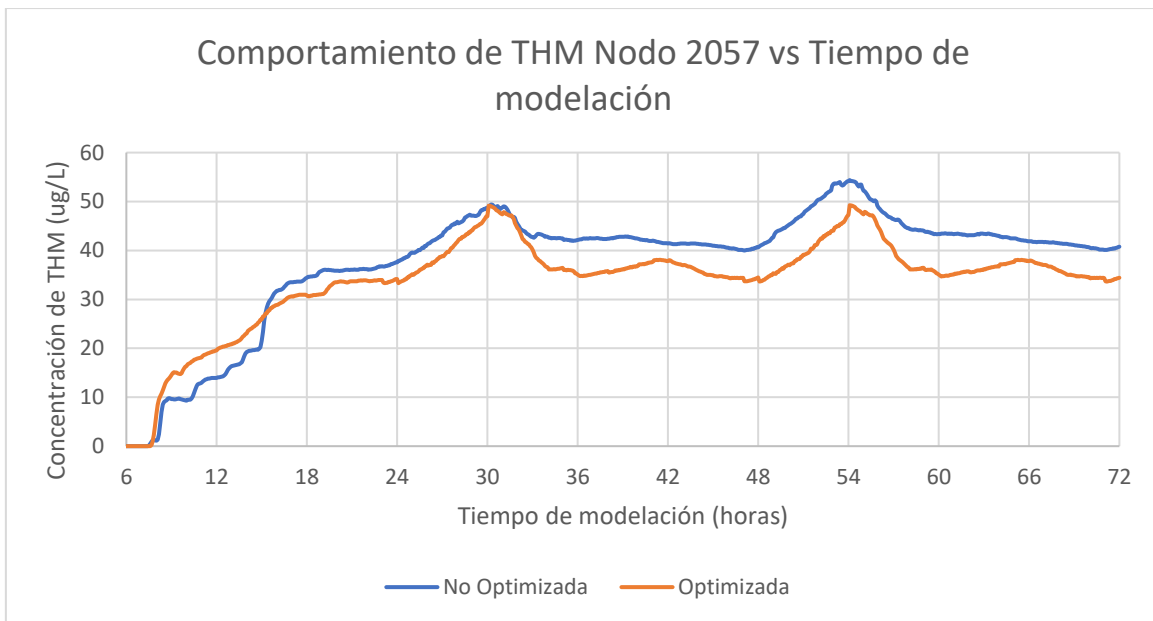


Figura 36. Resultado THM S8-SS1 nodo 2057



## Tiempo de respuesta de la red

### Análisis 1

- 1 hora

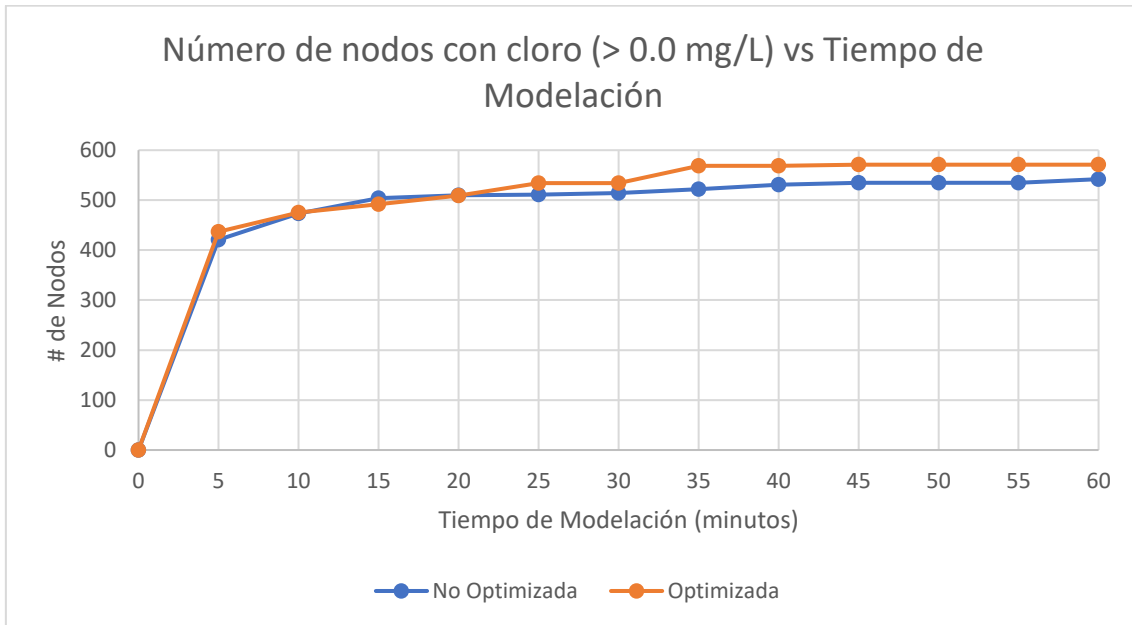


Figura 37. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS1

- 12 horas

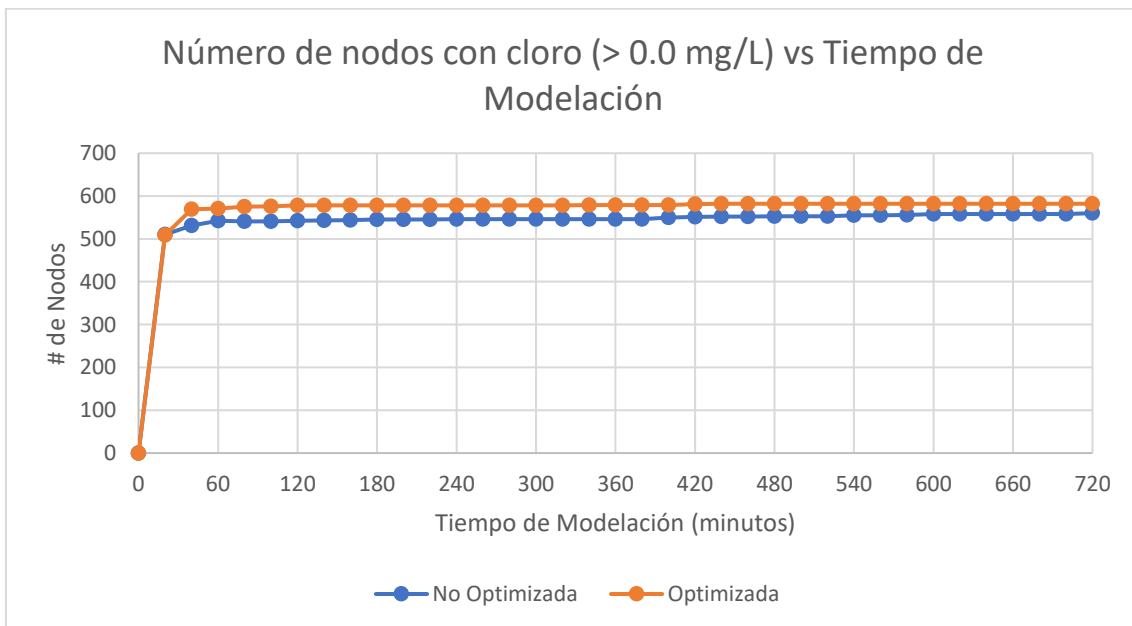


Figura 38. Resultados tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS1



## Análisis 2

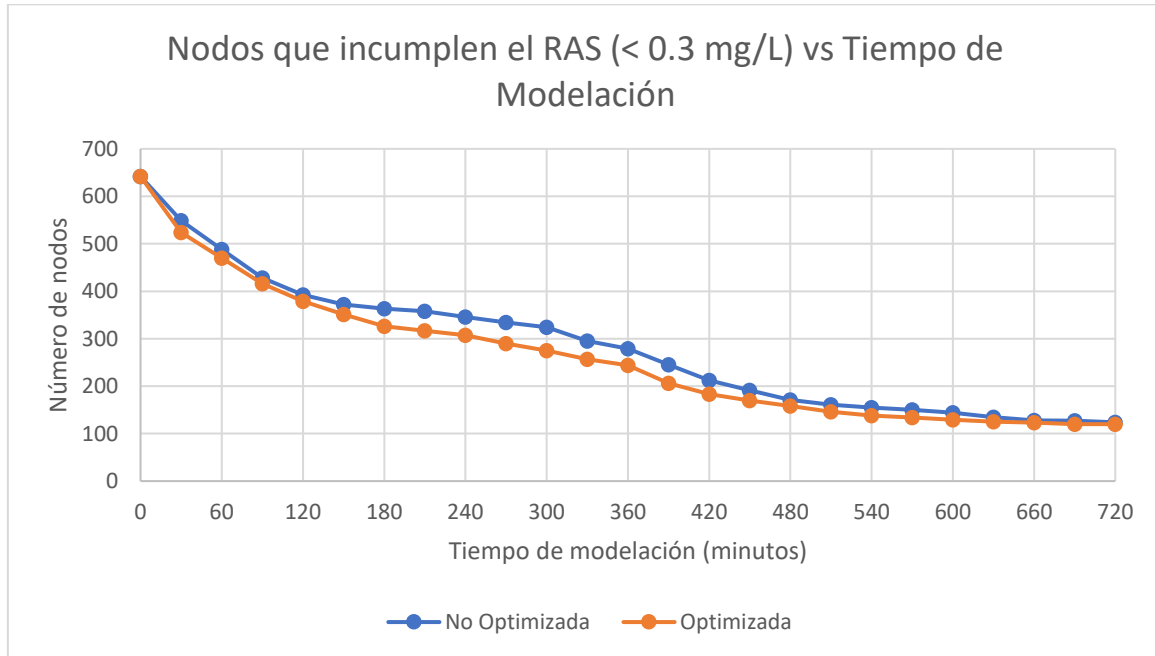


Figura 39. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS1

### 5.2.1 Análisis resultados S8-SS1

#### Cloro

En general, los 4 nodos muestran un buen comportamiento con respecto al análisis del cloro. En todos se puede observar que hubo una mejora con respecto a la concentración de cloro durante el tiempo de modelación. Para el nodo 1241 la red optimizada hace que el cloro llegue más rápido y mantenga una concentración por encima de la red no optimizada. Para el nodo 1631, la red optimizada y no optimizada tiene tiempos de llegadas parecidos, pero la red optimizada mantiene una concentración mayor al de la no optimizada garantizando un mejor desempeño. Para el nodo 1577 se observa que en la red optimizada el cloro llega primero y mantiene una concentración mayor que la no optimizada, pero tiene valles donde el cloro decae más que en la red no optimizada. Sin embargo, el diseño optimizado es resiliente y vuelve a recuperar su concentración de cloro. Finalmente tenemos el nodo 2057 donde las llegadas del cloro son muy parecidas entre redes y la red optimizada mantiene una concentración mayor de cloro que la no optimizada pero no en todos los casos, existen periodos donde la concentración es más estable en la no optimizada y algunos valles coinciden. En conclusión, el diseño optimizado permite que en estos nodos la concentración de cloro sea mayor que en las redes no optimizadas en la gran mayoría del tiempo.



## THM

En general, la simulación de trihalometanos en esta red muestra resultados muy buenos. Para el nodo 1241 se puede observar que el diseño optimizado permite reducir los trihalometanos significativamente, pasando de concentraciones que oscilan entre 50  $\mu\text{g/L}$  a casi 1  $\mu\text{g/L}$ . Para el nodo 1577 se puede observar una aparición de THM mucho más rápida en la red optimizada pero que se mantiene por debajo de las concentraciones observadas en la red no optimizada durante el resto de la modelación. Para el nodo 1631 se pueden observar una aparición de THM muy parecida entre la red optimizada y no optimizada, sin embargo, la red optimizada se mantiene por debajo de las concentraciones encontradas en la red no optimizada. Finalmente, el nodo 2057 se puede observar una aparición de THM muy parecida entre los dos tipos de redes donde predomina en un principio la red optimizada, pero que con el pasar del tiempo se va estabilizando y se mantiene en casi todos los momentos por debajo de las concentraciones encontradas en la red no optimizada. En conclusión, el diseño optimizado permite que los nodos estudiados tengan una menor concentración de THM a lo largo de la modelación.

## Tiempos de respuesta

En general, esta red muestra un buen comportamiento con respecto a los tiempos de respuesta. En el *Análisis 1* de una hora se puede observar que tanto la red optimizada como no optimizada tienen comportamientos parecidos en distribuir el cloro a través de la red, pero que después de los 25 minutos la red optimizada llega a más nodos. Luego, en el *Análisis 1* de doce horas se observa que la red optimizada cubre más nodos en todo el periodo de modelación. Finalmente, el *Análisis 2* nos muestra que los comportamientos entre redes son bastante similares sin embargo la red optimizada logra decrecer más rápido lo cual indica que el cloro se distribuye más rápidamente cumpliendo con los requisitos del RAS. En conclusión, el diseño optimizado permite que el cloro se distribuya de manera más rápida a través de la red garantizando un mejor desempeño cumpliendo las restricciones del RAS.



### 5.3 Modelación Sector 8 Sub Sector 2 (S8-SS2)

#### Cloro

Nodo 1639

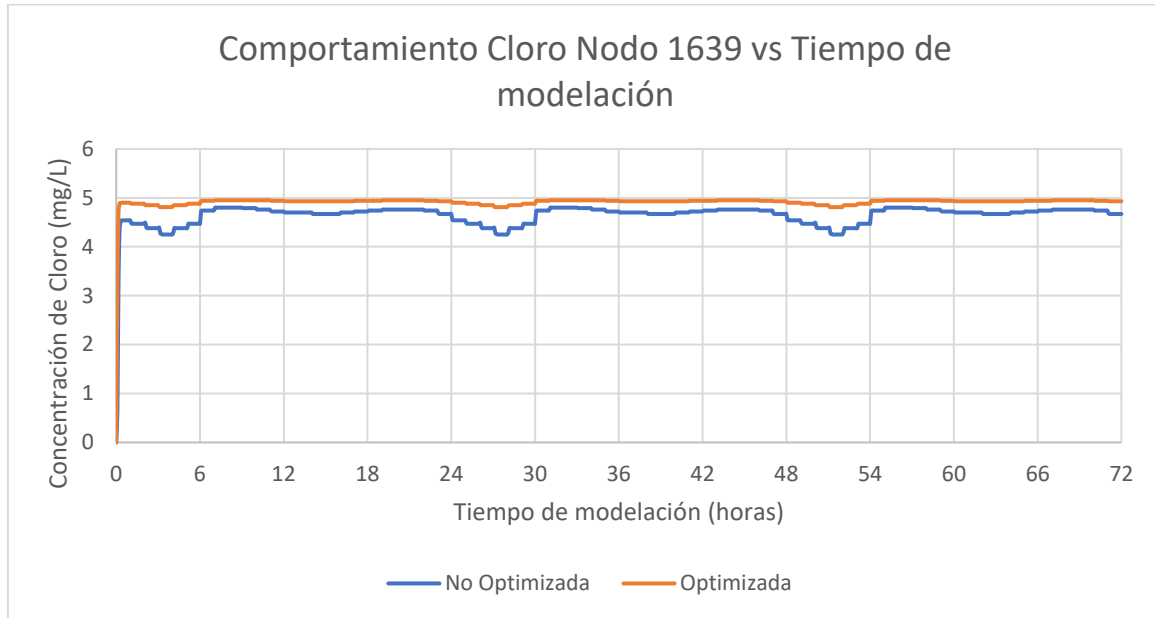


Figura 40. Resultados cloro S8-SS2 nodo 1639

Nodo 1637

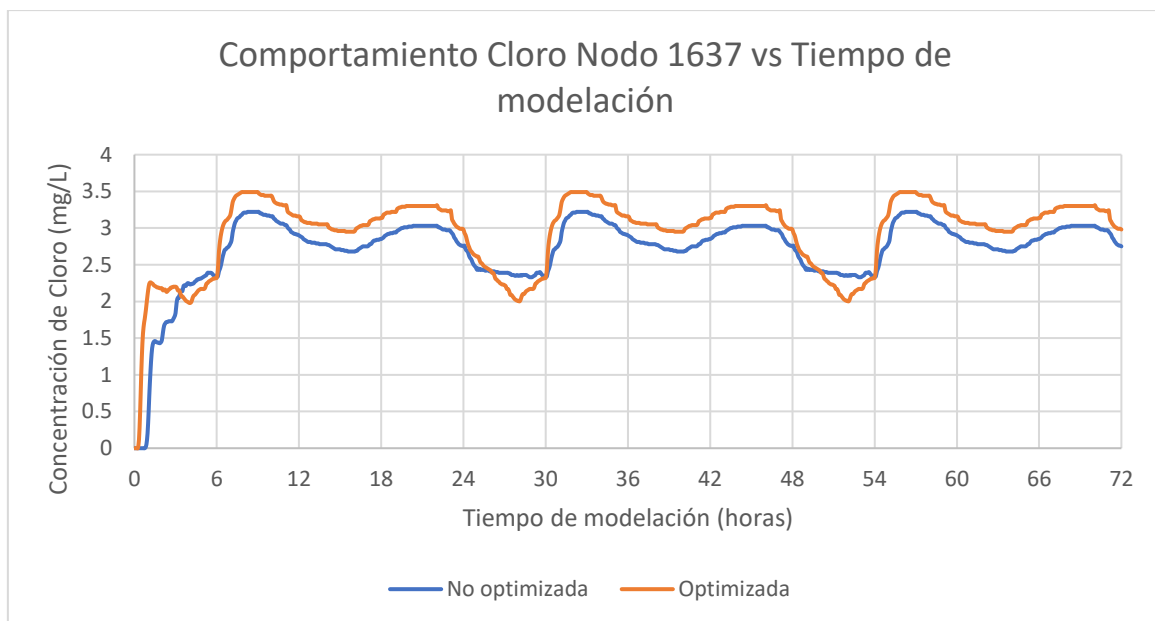


Figura 41. Resultados cloro S8-SS2 nodo 1637



Nodo 1002

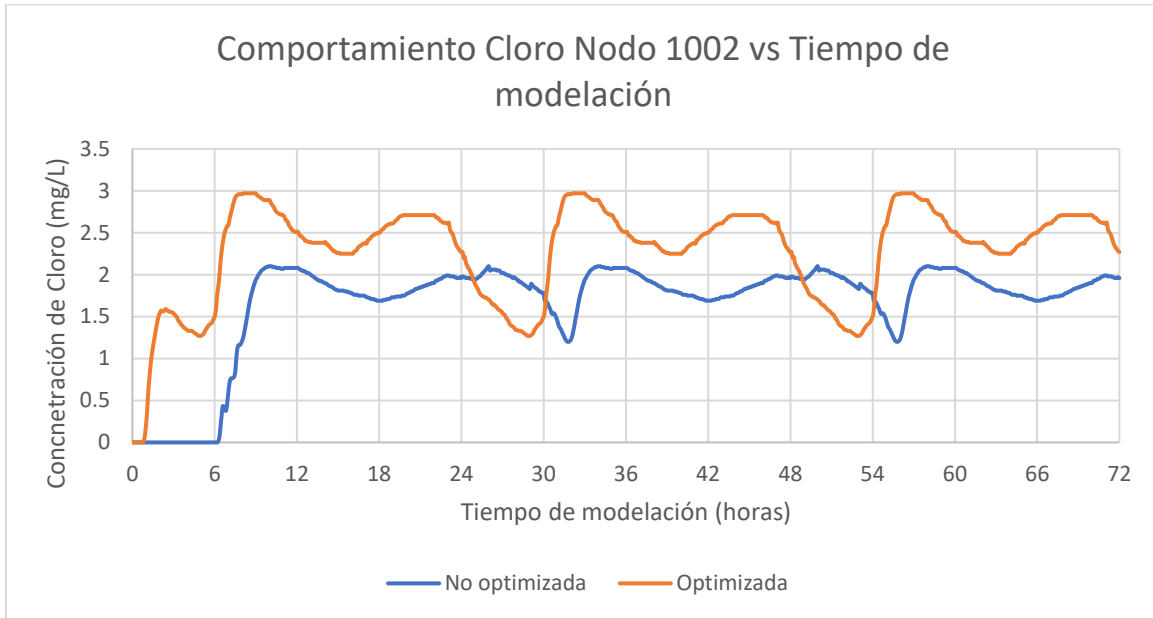


Figura 42. Resultados cloro S8-SS2 nodo 1002

Nodo 441

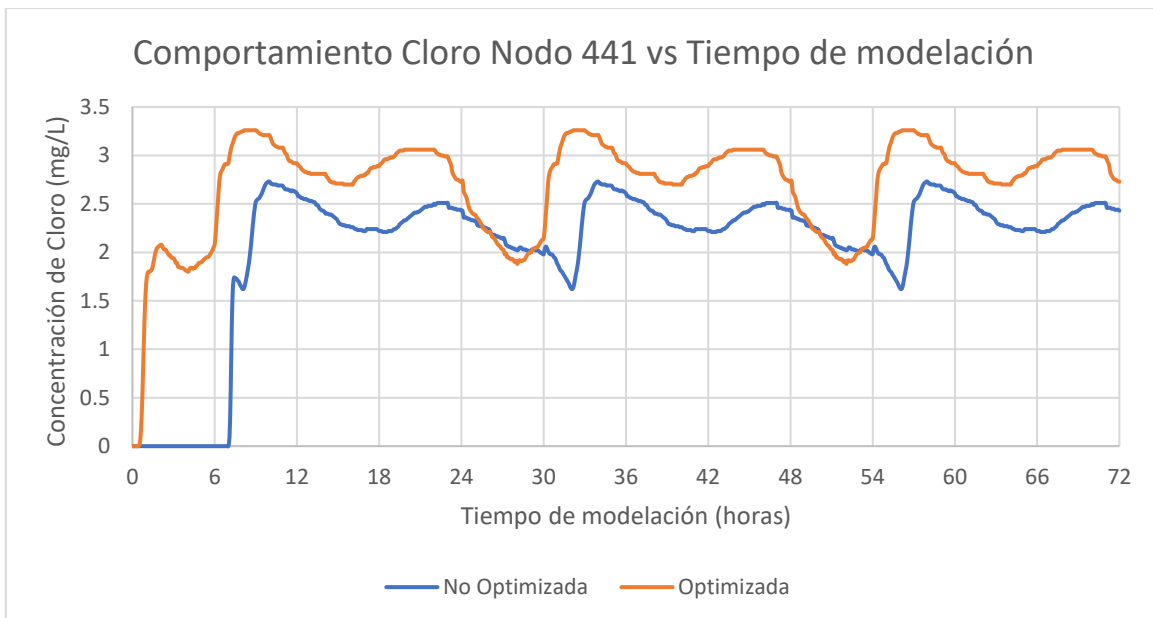


Figura 43. Resultados cloro S8-SS2 nodo 441



## THM

### Nodo 441

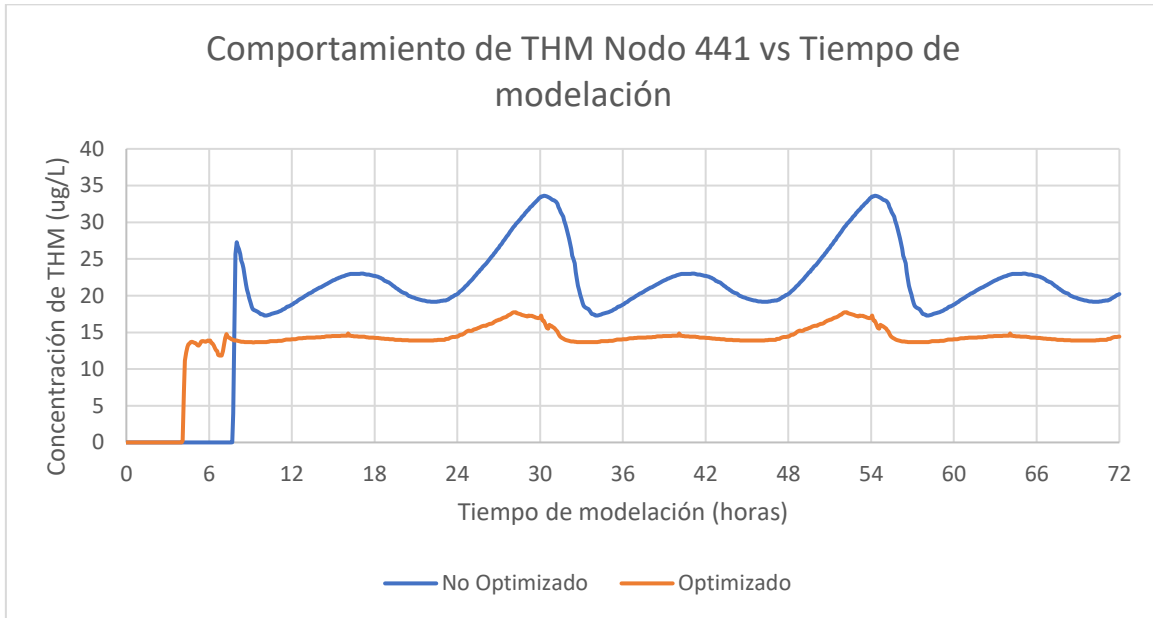


Figura 44. Resultado THM S8-SS2 nodo 441

### Nodo 1002

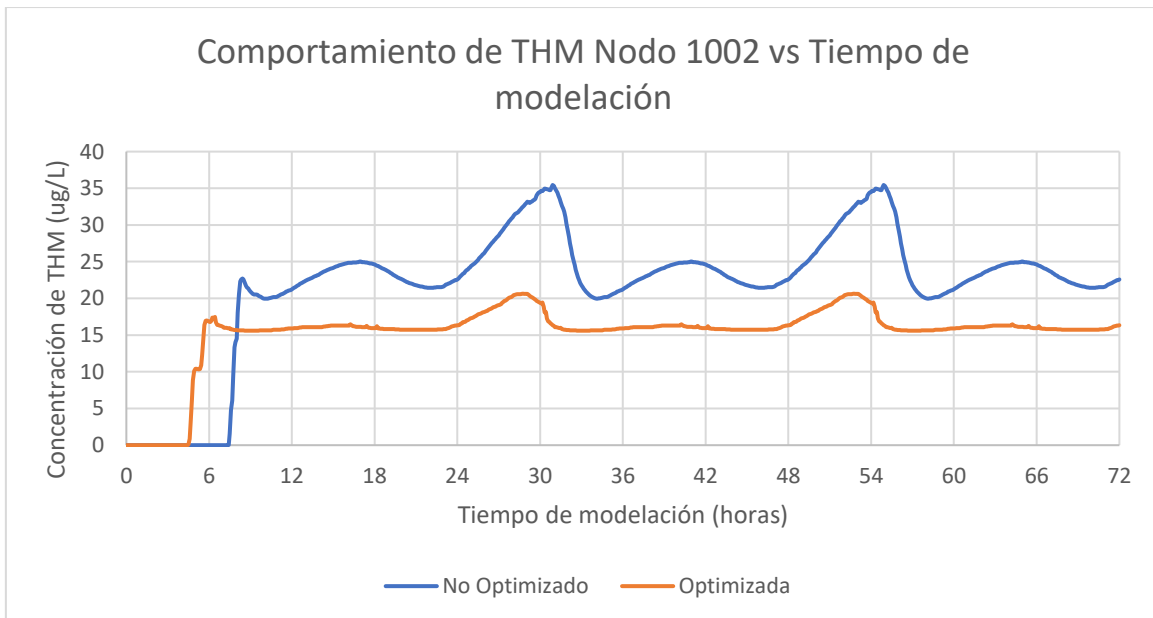


Figura 45. Resultado THM S8-SS2 nodo 1002



Nodo 1637

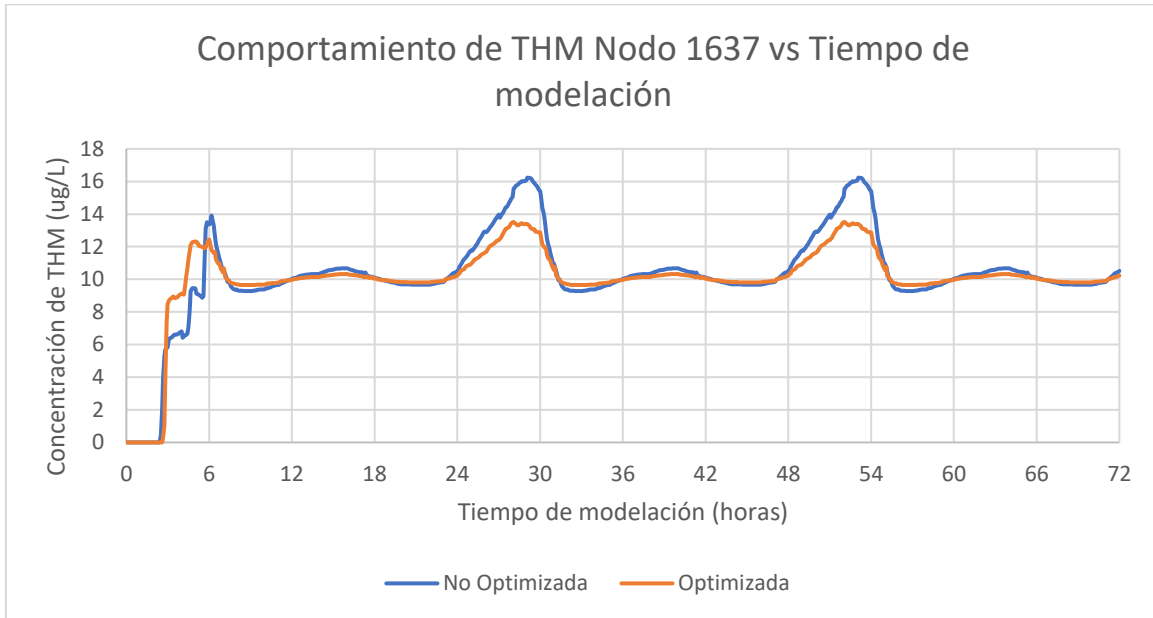


Figura 46. Resultado THM S8-SS2 nodo 1637

Nodo 1639

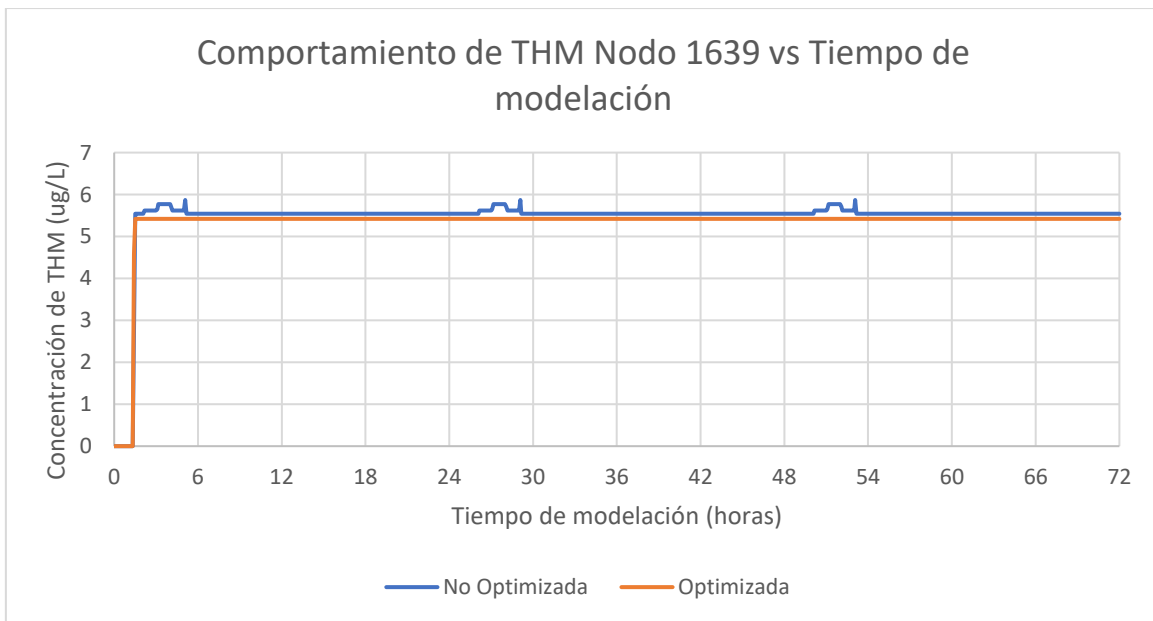


Figura 47. Resultado THM S8-SS2 nodo 1639



## Tiempo de respuesta de la red

### Análisis 1

- 1 hora

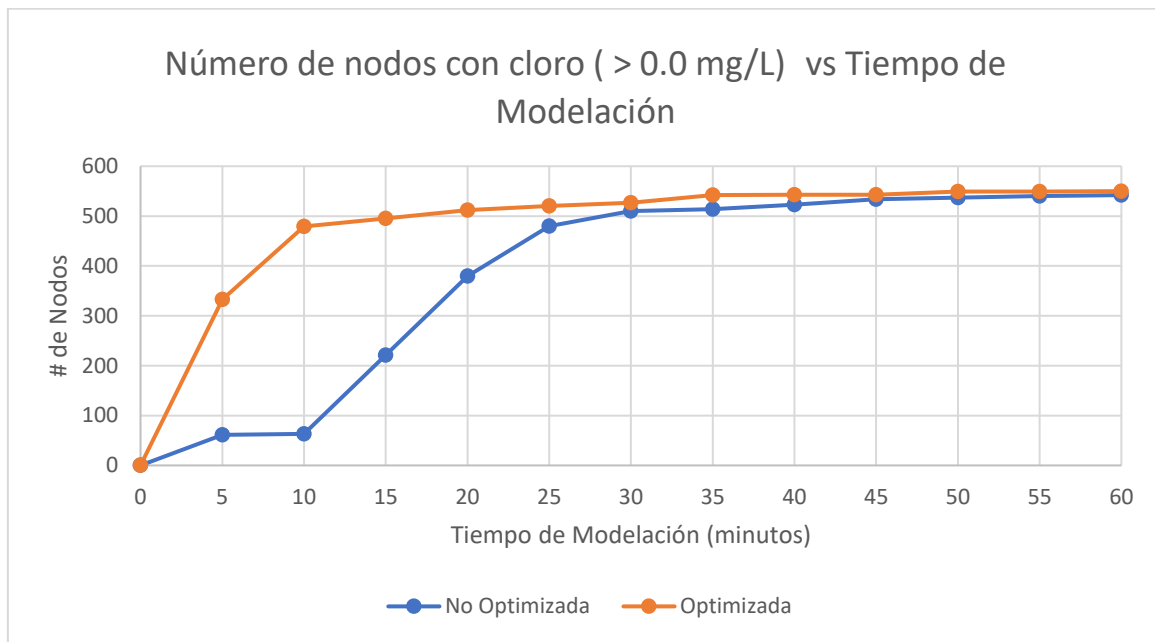


Figura 48. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS2

- 12 horas

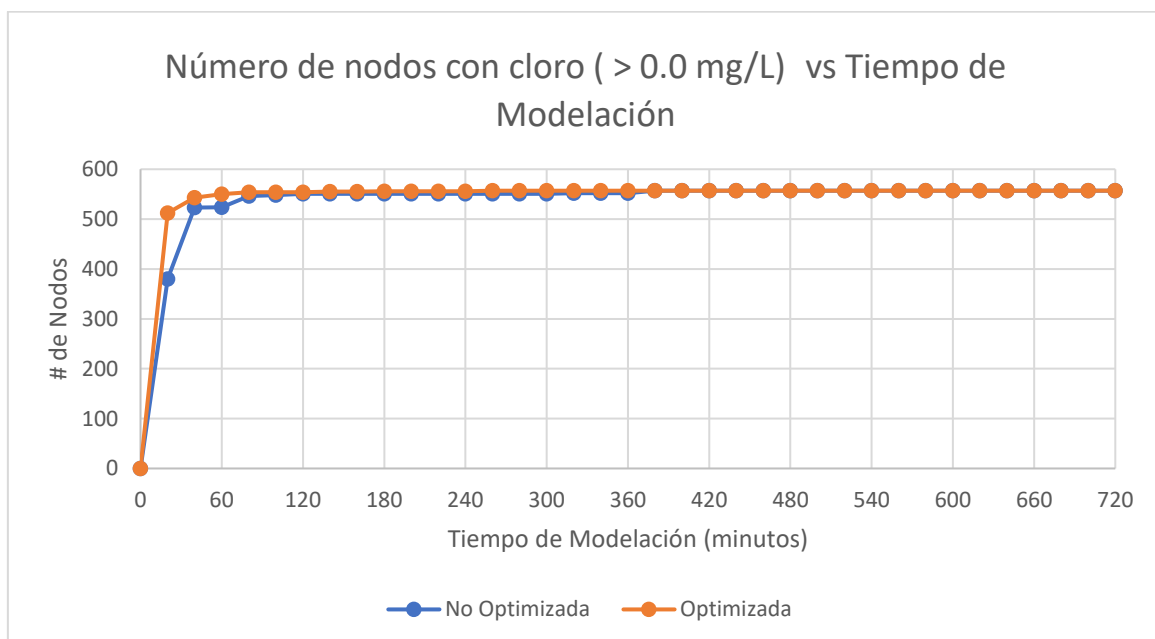


Figura 49. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS2



## Análisis 2

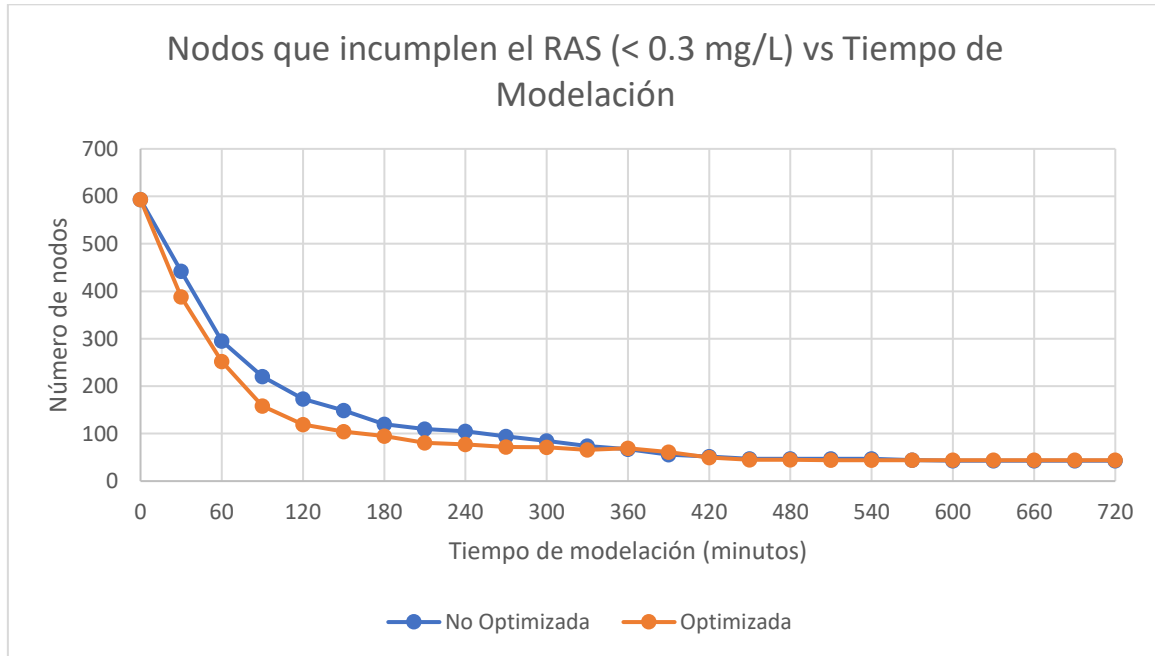


Figura 50. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS2

### 5.3.1 Análisis resultados S8-SS2

#### Cloro

En general, los 4 nodos seleccionados muestran un buen comportamiento con respecto al cloro en la red. Para el nodo 1639 se observa que tanto para la red no optimizada como la optimizada la aparición de cloro es casi inmediata, sin embargo, se puede ver como durante el resto del tiempo de modelación la red optimizada mantiene una concentración mayor de cloro. Para el nodo 1637 se puede ver una aparición un poco más rápida por parte de la red optimizada; en general se ven mayores concentraciones de cloro a excepción de unos valles alrededor de la hora 28 y 52 donde decae más que la red no optimizada. Para el nodo 1002 se tiene una aparición de cloro mucho más rápida por parte de la red optimizada con concentraciones mayores que la red no optimizada en casi todos los casos, sin embargo, existen valles en las horas 29 y 53 que presentan concentraciones menores a las de la red no optimizada. Finalmente, para el nodo 441 se puede ver como el cloro llega mucho más rápido en la red optimizada y se mantienen por encima de la concentración de la red no optimizada durante la mayoría del tiempo a excepción de las horas 28 y 52. En conclusión, la optimización de esta red permite que el cloro se mantenga con una concentración mayor durante el periodo de modelación. Además, se pudo identificar unas horas críticas donde los valles en las redes optimizadas decaían más



rápido que en la no optimizada. El diseño optimizado es capaz de hacer redes resilientes que se puedan recuperar de los valles de concentración.

## **THM**

En general los resultados de THM son buenos. Para el nodo 1639 se tiene que la concentración de THM para la red optimizada y no optimizada es bastante pequeña, sin embargo, la red optimizada logra tener resultados mejores en todo el periodo de modelación. Para el nodo 1637 la formación de THM es bastante similar en las primeras horas de modelación, y aunque la red optimizada toma la delantera, su concentración se estabiliza siguiendo los patrones y se mantiene por debajo de la concentración producida por la red no optimizada. En algunos periodos como a las 9, 21, 45, 56 y 67 horas se pudo identificar unos ligeros picos donde la red optimizada superaba a la no optimizada. Para el nodo 1002 se observa que la red optimizada genera primero una concentración de THM pero que a medida que pasa el tiempo se estabiliza y queda por debajo de la concentración producida por la red no optimizada. Finalmente tenemos el nodo 441 con un comportamiento parecido al nodo anterior, donde la optimizada toma la delantera, pero se estabiliza y queda por debajo de la concentración producida por la red no optimizada. En conclusión, se puede afirmar que en los nodos seleccionados la concentración de THM en el diseño optimizado es menor. Sin embargo, existen unas horas críticas para el nodo 1637 donde la concentración puede ser igual o ligeramente mayor que la red no optimizada.

## **Tiempo de respuesta**

En general, esta red muestra el mejor comportamiento de todas las redes con respecto a los tiempos de respuesta. En el *Análisis 1* de una hora se puede observar que la red optimizada en los primeros 5 minutos de modelación logra distribuir el cloro en 333 nodos mientras que en la red no optimizada solo llega a 61 nodos, lo cual permite evidenciar la efectividad del diseño optimizado. Luego, en el *Análisis 1* de doce horas se observa que ambas redes convergen al mismo número de nodos (557). Finalmente, el *Análisis 2* nos muestra que los comportamientos entre redes son similares sin embargo la red optimizada logra decrecer más rápido lo cual indica que el cloro se distribuye más rápidamente cumpliendo con los requisitos del RAS. En conclusión, el diseño optimizado de este sector permite que el cloro se distribuya de manera más rápida a través de la red garantizando un mejor desempeño cumpliendo con las restricciones del RAS.



## 5.4 Modelación Sector 8 Sub Sector 3 (S8-SS3)

### Cloro

Nodo 2281

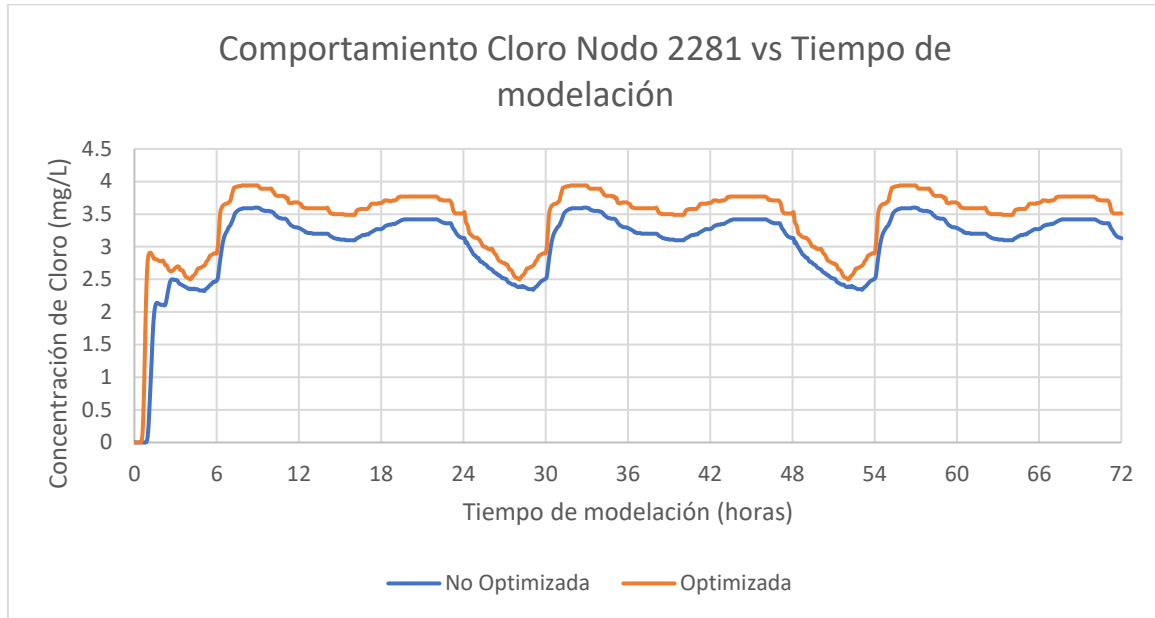


Figura 51. Resultado cloro S8-SS3 nodo 2281

Nodo 1477

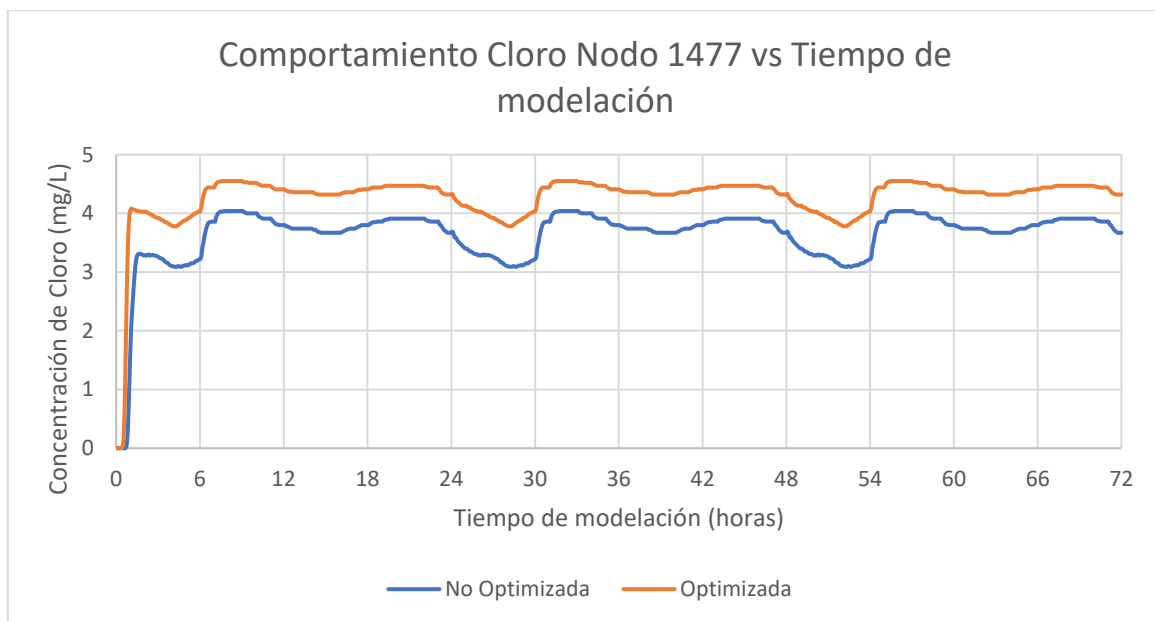


Figura 52. Resultado cloro S8-SS3 nodo 1477



### Nodo 265

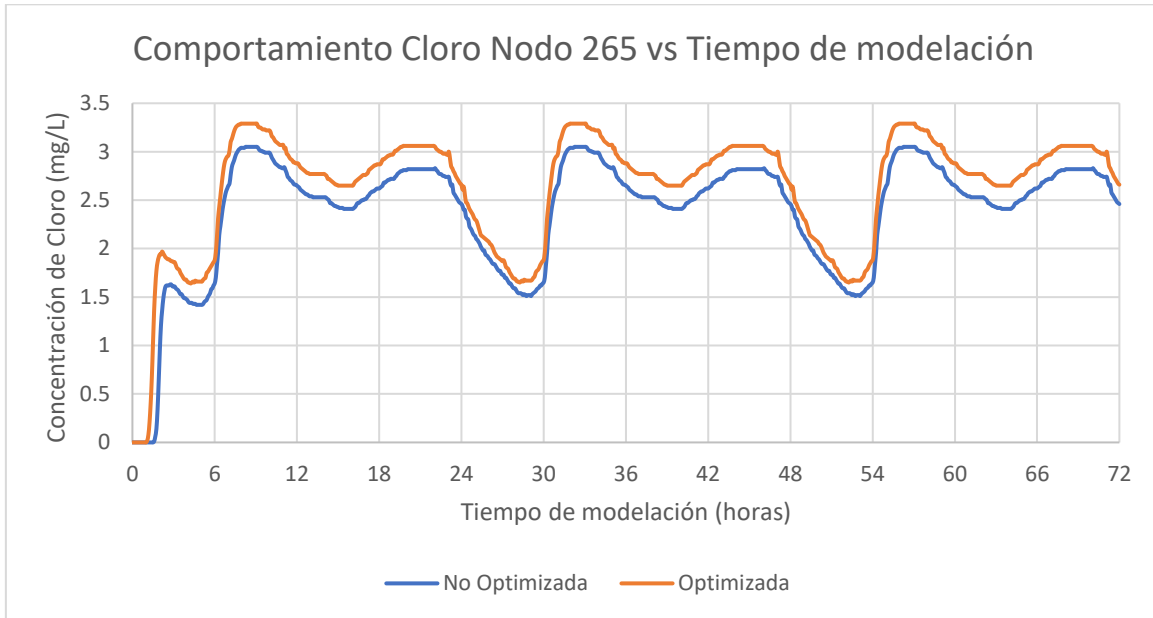


Figura 53. Resultados cloro S8-SS3 nodo 265

### Nodo 402

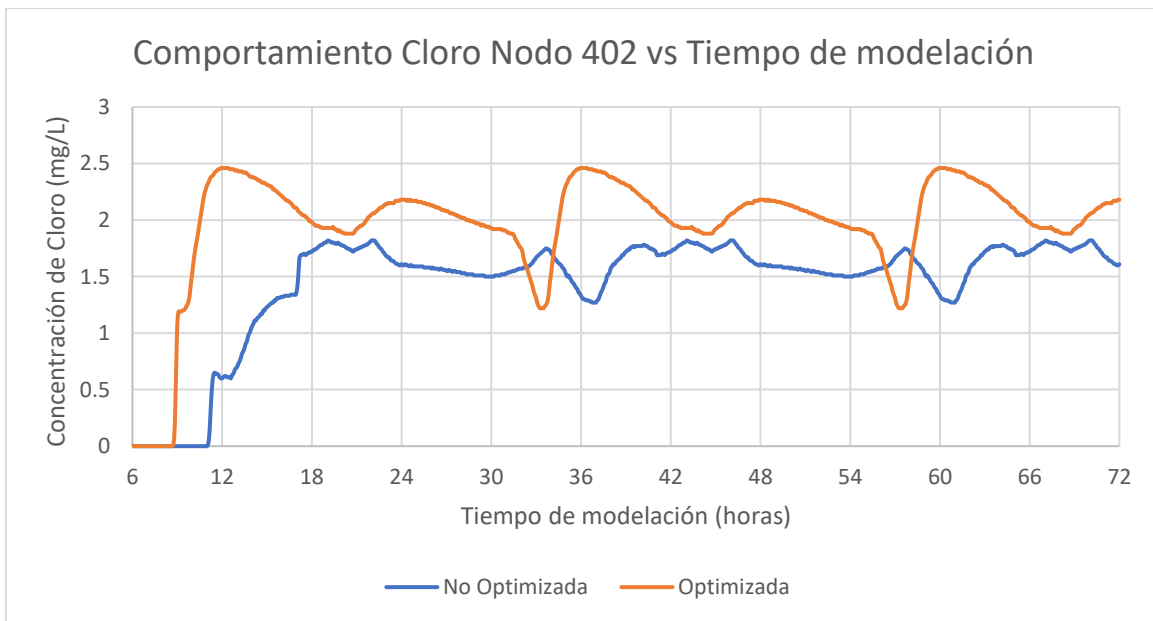


Figura 54. Resultados cloro S8-SS3 nodo 402



### THM

#### Nodo 265

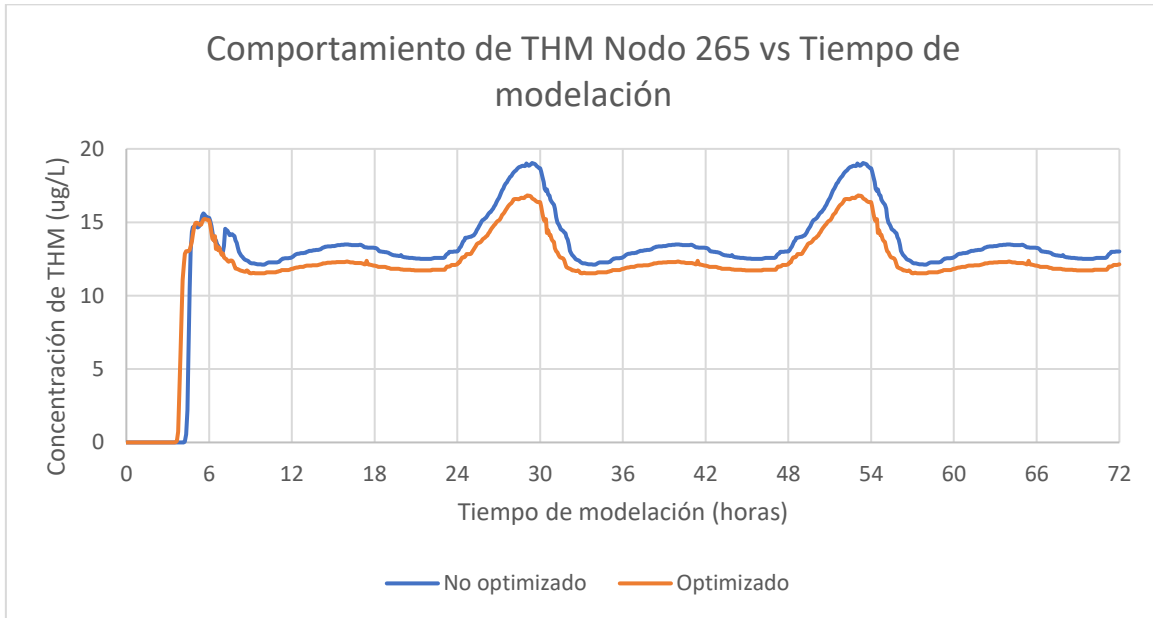


Figura 55. Resultado THM S8-SS3 nodo 265

#### Nodo 402

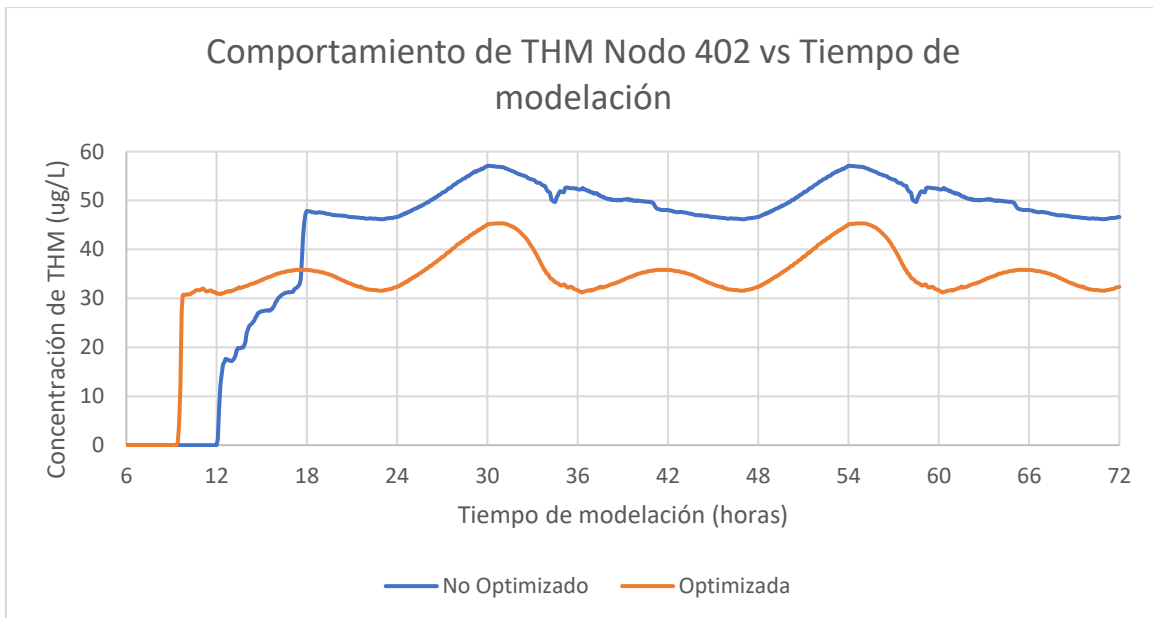


Figura 56. Resultado THM S8-SS3 nodo 402



Nodo 1477

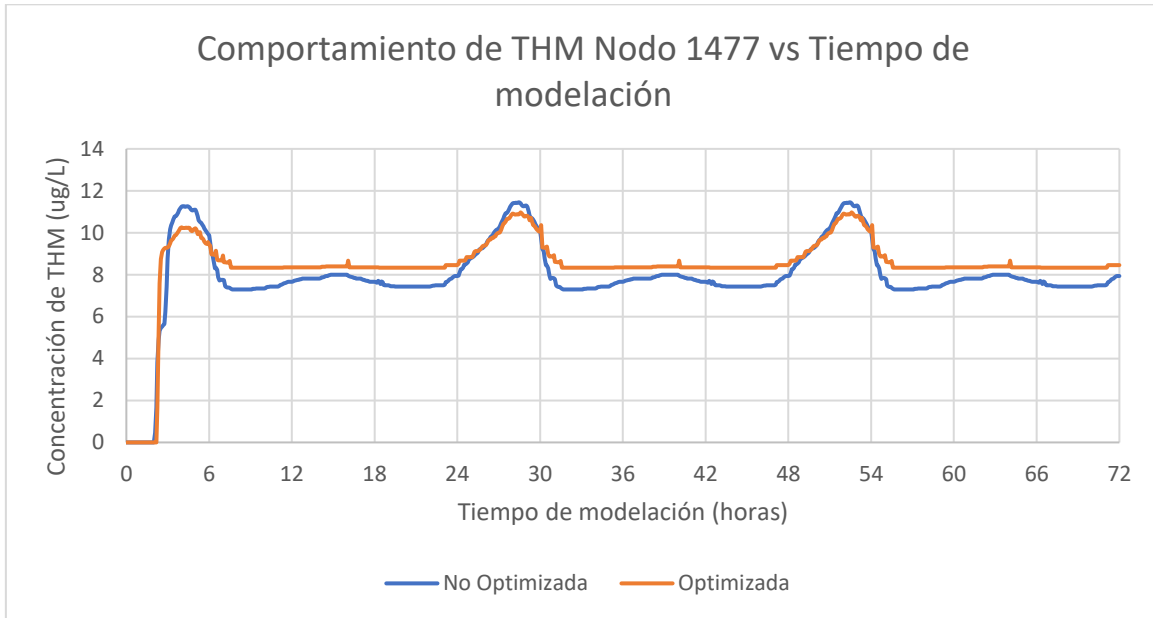


Figura 57. Resultado THM S8-SS3 nodo 1477

Nodo 2281

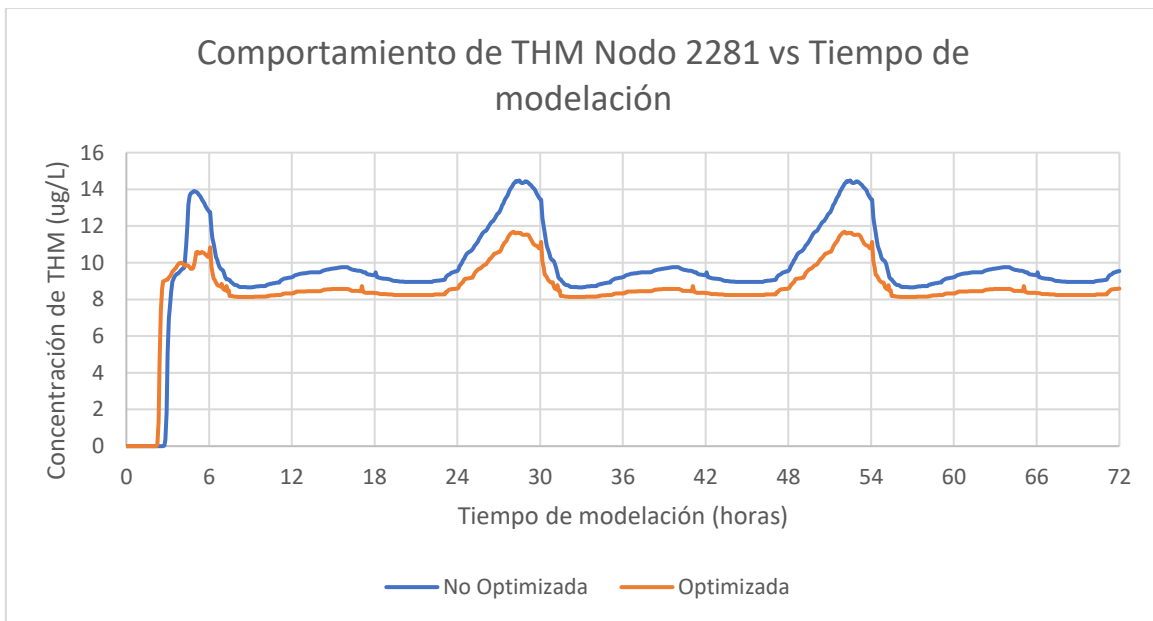


Figura 58. Resultado THM S8-SS3 nodo 2281



## Tiempo de respuesta de la red

### Análisis 1

- 1 hora

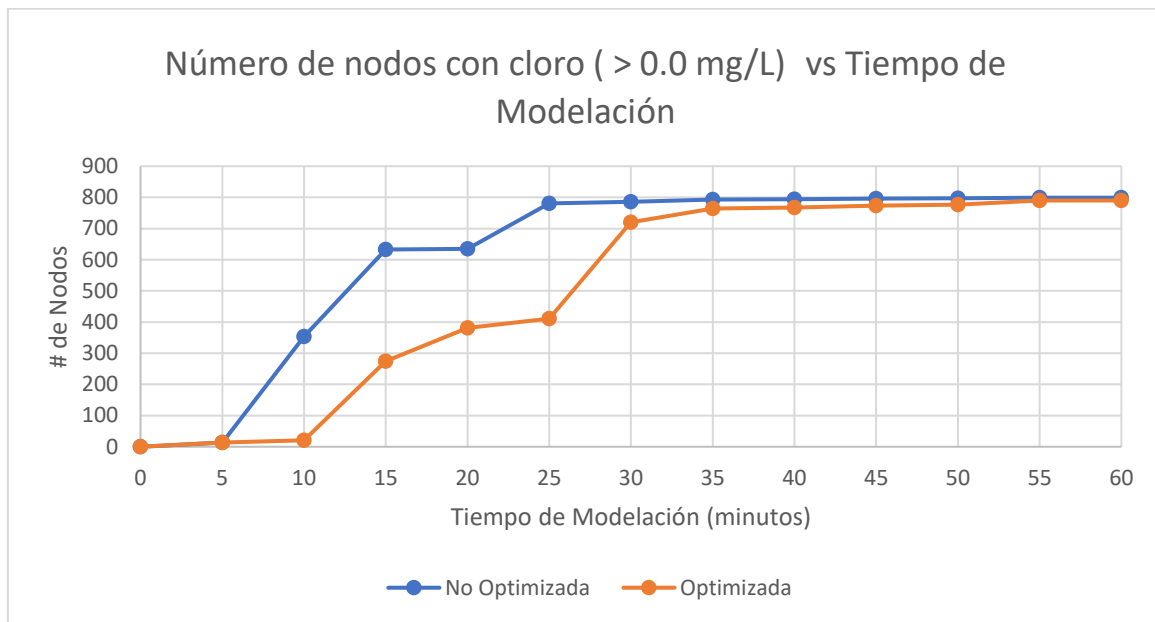


Figura 59. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS3

- 12 horas

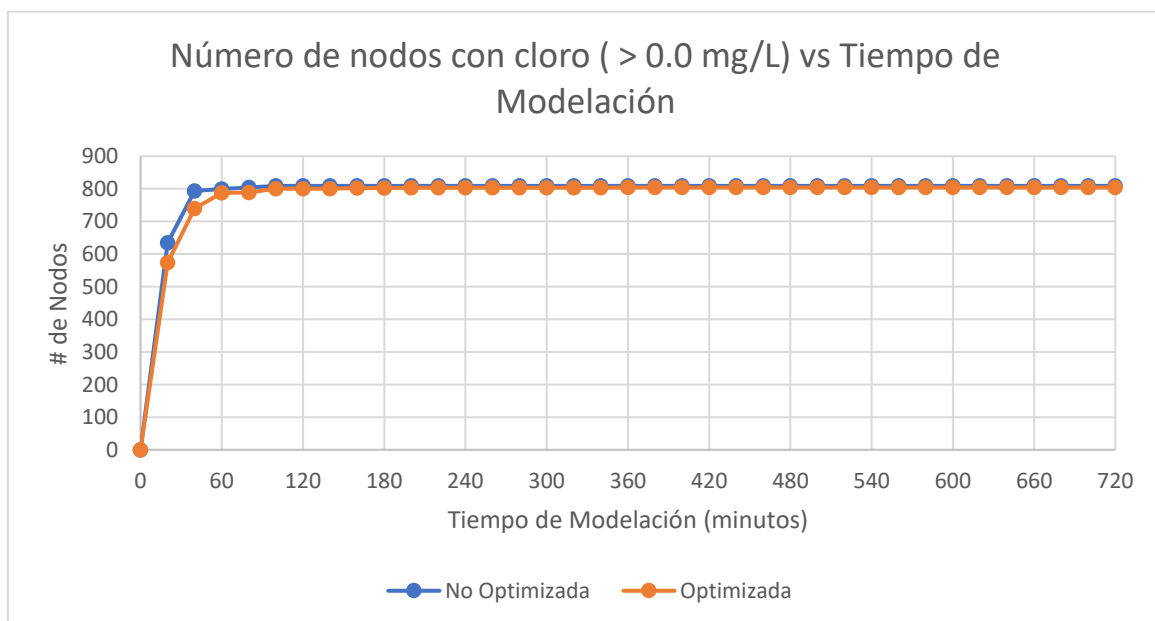


Figura 60. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8\_SS3



## Análisis 2

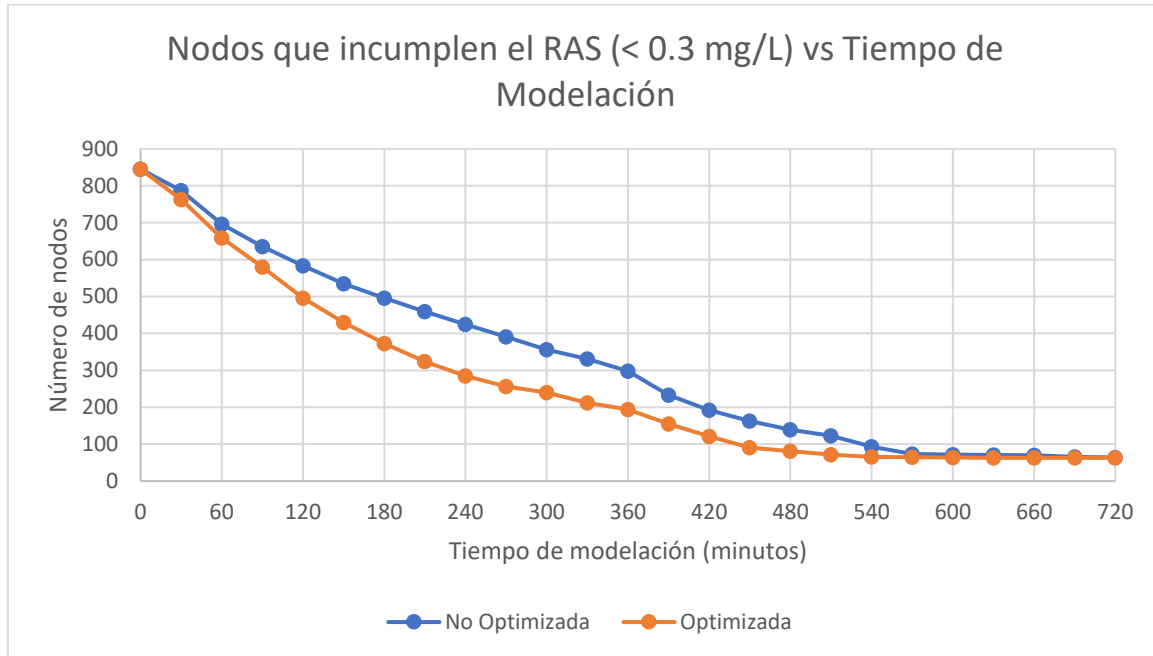


Figura 61. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS3

### 5.4.1 Análisis resultados S8-SS3

#### Cloro

Los resultados de cloro de esta red son bastante buenos. Para el nodo 2281 se puede observar que el cloro llega casi al mismo tiempo en los dos diseños de redes, sin embargo, la red optimizada toma la delantera y durante todo el periodo de modelación muestra concentraciones más altas de cloro que la red no optimizada. Para el nodo 1477 se puede observar un comportamiento muy parecido al nodo anterior donde el cloro llega casi al mismo tiempo en ambos diseños de redes, pero la red optimizada logra mantener concentraciones más altas que la red no optimizada. Para el nodo 265 se puede observar un comportamiento similar al nodo 1477 donde el diseño optimizado mantiene una mejor calidad, sin embargo, existen periodos de tiempo donde las concentraciones son casi iguales como en la hora 6, 30 y 54 para los dos diseños de red. Finalmente, para el nodo 402 se puede observar una llegada del cloro mucho más rápida en el diseño optimizado, y a pesar de tener mejor comportamiento que la red no optimizada existen puntos críticos donde el diseño optimizado presenta concentraciones menores que la red no optimizada, estos se encuentran en las horas 33 y 57. En conclusión, los diseños optimizados presentados aseguran que en la mayoría del tiempo las concentraciones de cloro serán mayores que en las redes no optimizadas, garantizando una mejor calidad en los nodos.



## THM

Los resultados de THM para esta red son relativamente buenos. Para el nodo 2281 se puede observar una formación más rápida de THM en la red optimizada pero que con el tiempo se estabiliza y no sobrepasa las concentraciones de la red no optimizada; sin embargo, existen ciertas horas donde las concentraciones de THM convergen entre los diseños optimizados y no optimizados, específicamente en las horas 6, 30 y 55. Para el nodo 1477 se pueden observar el peor comportamiento de todas las redes ya que en varios periodos de modelación la concentración de THM en la red optimizada supera a la red no optimizada, lo bueno es que con el diseño optimizado no se superan los picos de concentración vistos en la red no optimizada. Para el nodo 265 se puede observar que para los dos diseños se forman THM casi al mismo tiempo, pero la red optimizada logra tener un mejor comportamiento manteniendo una concentración de THM menor durante casi toda la modelación; se puede también apreciar que al principio de la modelación las concentraciones coinciden hasta la hora 7, después se ve como la red optimizada se lleva la delantera. Finalmente, para el nodo 402 se puede apreciar que el diseño optimizado forma THM más rápidamente, pero con el resto de la modelación, estos se estabilizan y no superan las concentraciones encontradas en la red no optimizada. En conclusión, 3 de los 4 nodos presentaron un comportamiento bueno con respecto a la formación de THM. A pesar de que el nodo 1477 muestre el peor comportamiento el desfase es relativamente pequeño y la diferencia de concentraciones no es muy grande, por lo cual se puede seguir afirmando que los diseños optimizados de redes pueden controlar la formación de Trihalometanos.

## Tiempo de viaje

En general, esta red muestra un desempeño aceptable con respecto a los tiempos de respuesta. En el *Análisis 1* de una hora se puede observar que el mejor comportamiento lo tiene la red no optimizada ya que en los primeros 10 minutos de modelación cubre 353 nodos mientras que en el diseño optimizado solo se cubren 21 nodos. Luego, en el *Análisis 1* de doce horas se observa que la red no optimizada converge a un número de nodos mayor que la red optimizada (809 y 804 respectivamente). Finalmente, el *Análisis 2* nos muestra que los comportamientos entre redes son similares sin embargo la red optimizada logra decrecer más rápido. En conclusión, el diseño optimizado de esta red no permite que se distribuya más rápidamente el cloro, pero sí permite cumplir con los requisitos del RAS más rápidamente.



## 5.5 Modelación Sector 8 Sub Sector 4 (S8-SS4)

### Cloro

#### Nodo 379

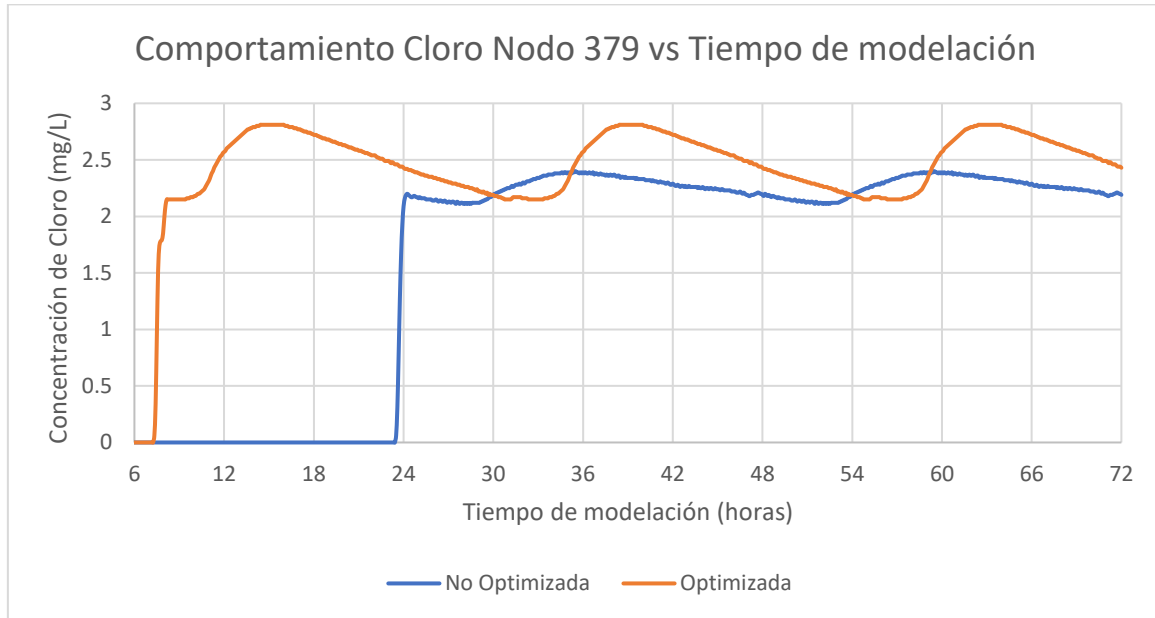


Figura 62. Resultado cloro S8-SS4 nodo 379

#### Nodo 471

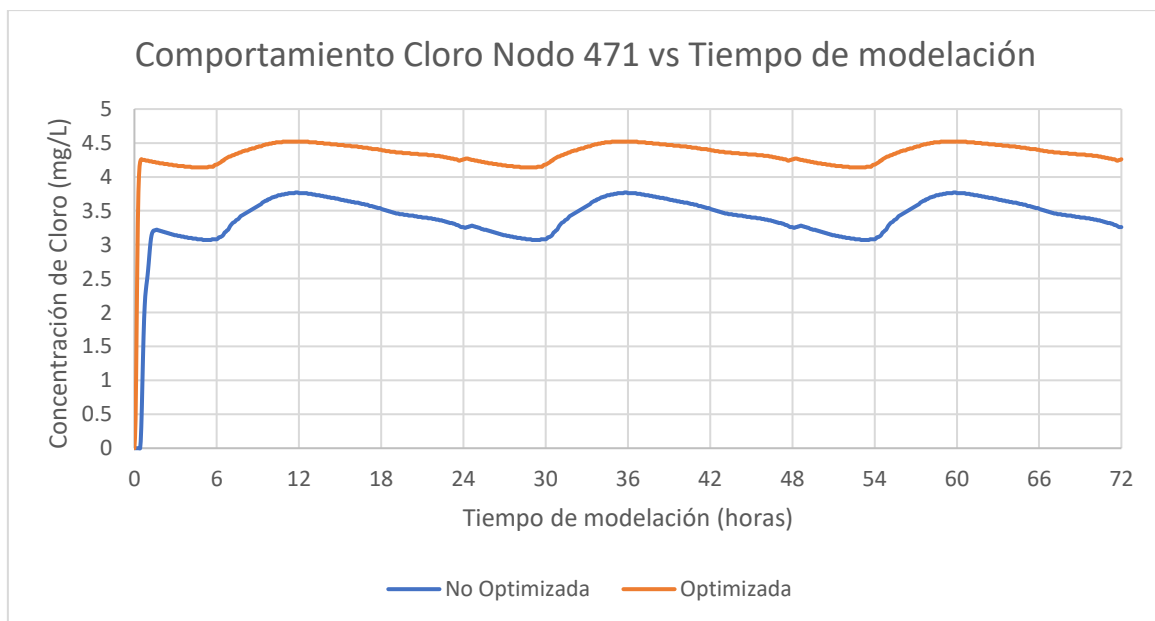


Figura 63. Resultado cloro S8-SS4 nodo 471



### THM

#### Nodo 379

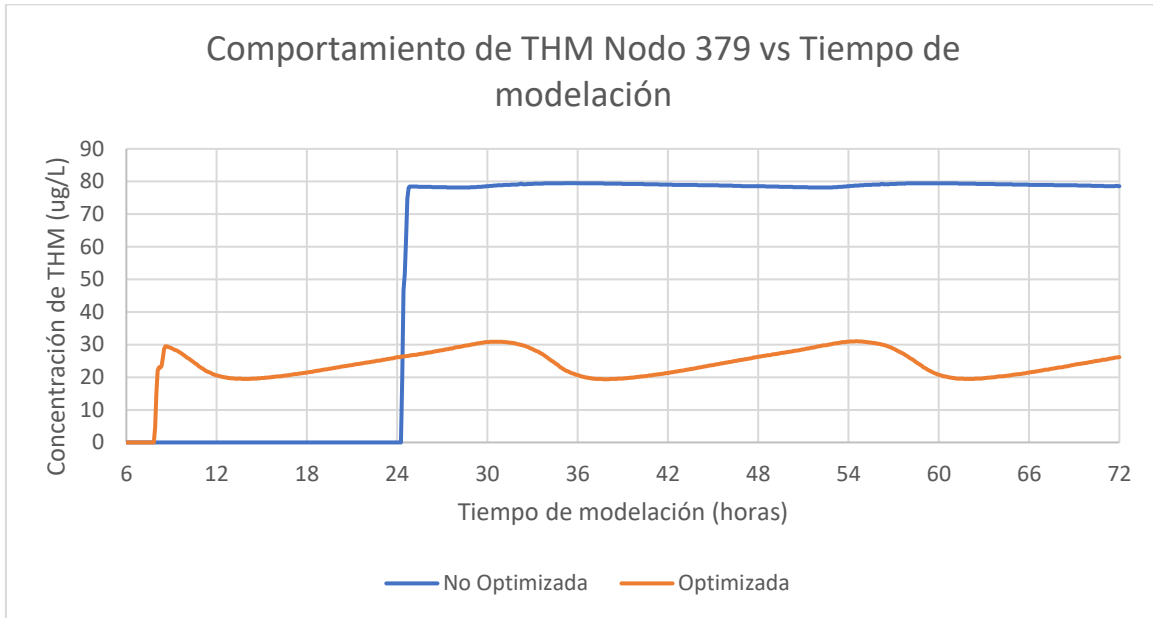


Figura 64. Resultado THM S8-SS4 nodo 379

#### Nodo 471

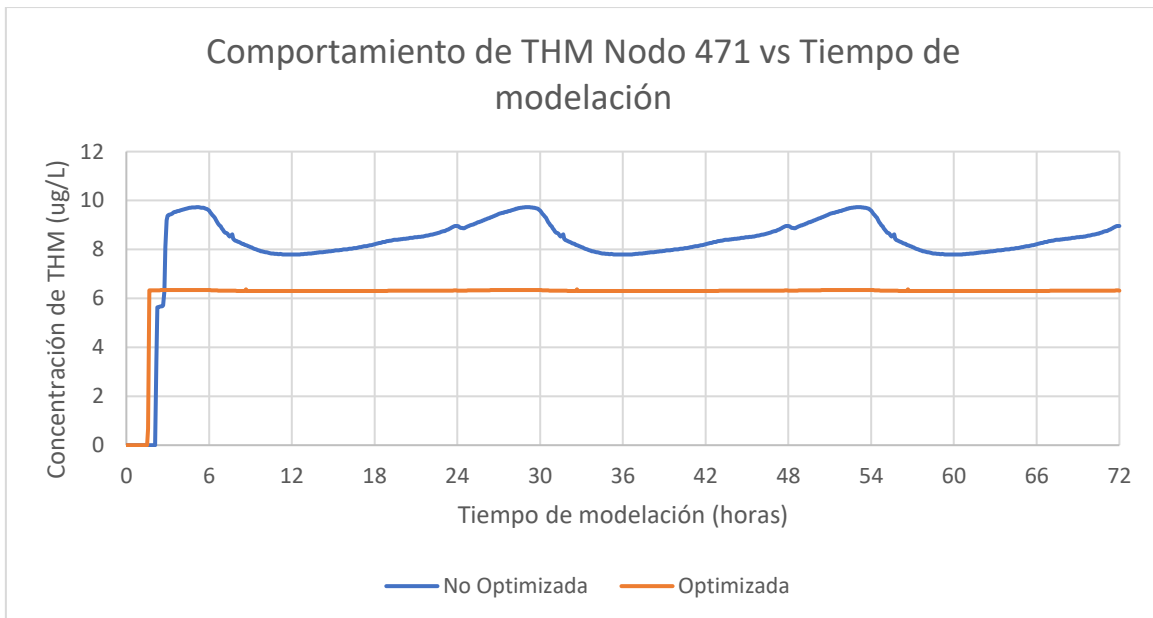


Figura 65. Resultado THM S8-SS4 nodo 471



## Tiempo de respuesta de la red

### Análisis 1

- 1 hora

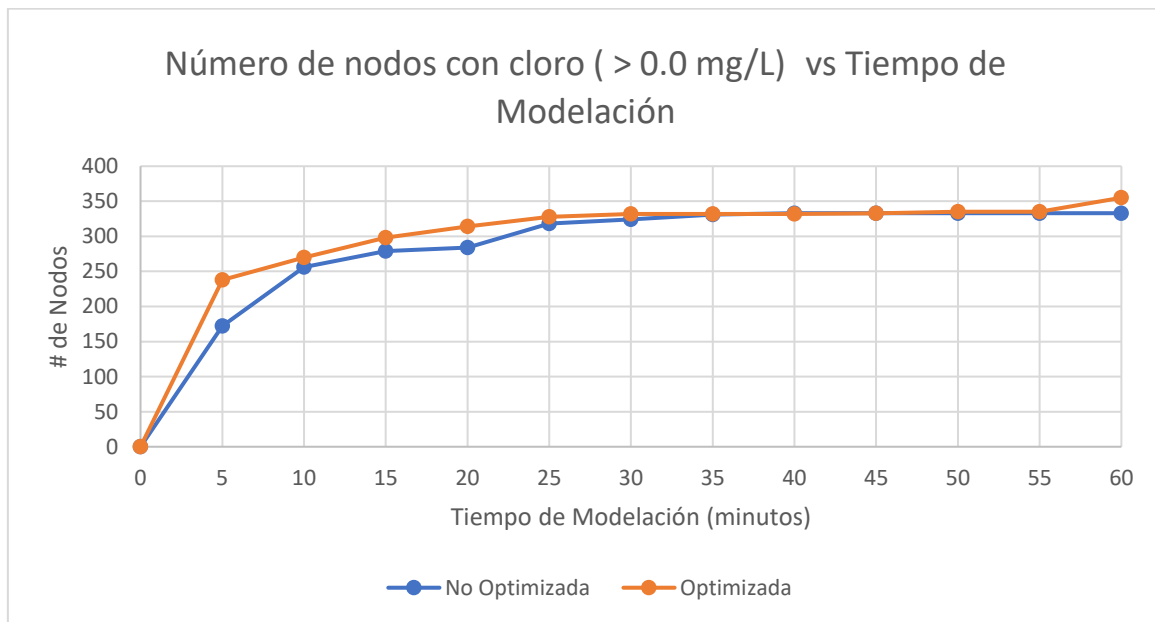


Figura 66. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS4

- 12 horas

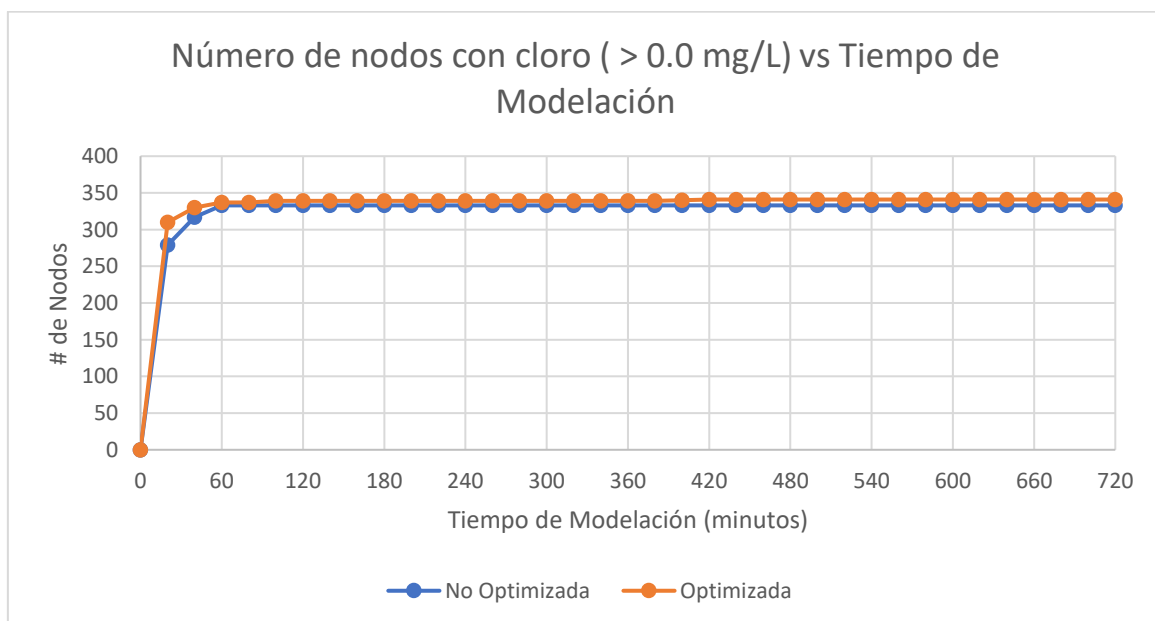


Figura 67. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS4



## Análisis 2

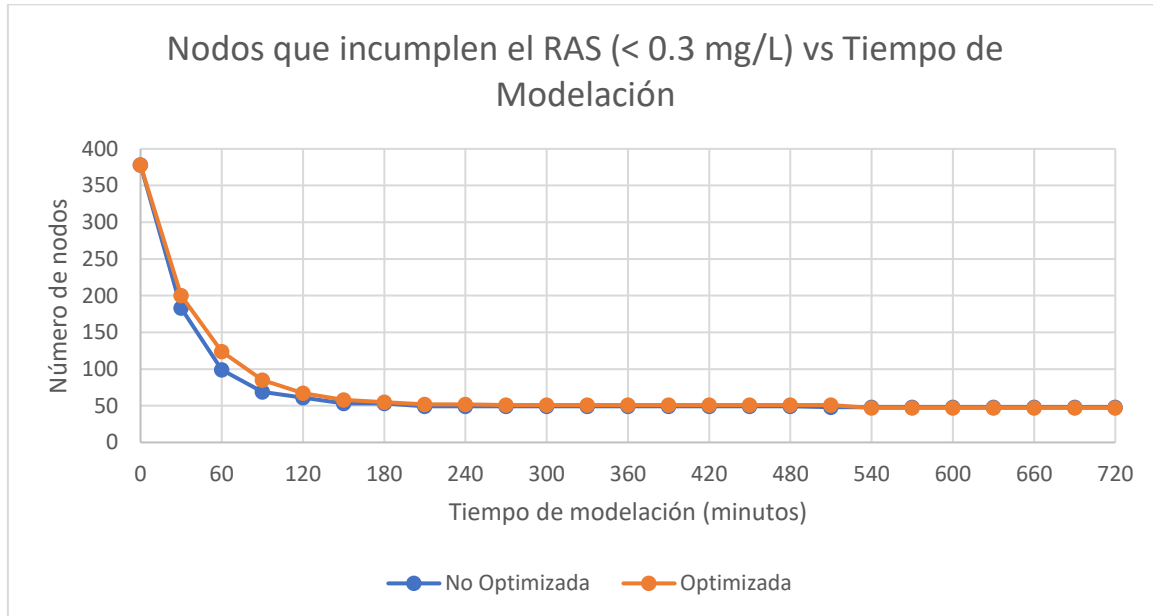


Figura 68. Resultados tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS4

### 5.5.1 Análisis resultados S8-SS4

#### Cloro

En general los resultados de cloro para la red del sub sector 4 son buenos. Para el nodo 379 se puede observar una diferencia contundente con respecto a la llegada de cloro al nodo. En el diseño optimizado se ve como el cloro llega después de la hora 7 mientras que en el diseño no optimizado se ve presencia después de la hora 23. Además, la red optimizada logra mantener una concentración mayor de cloro durante casi todo el periodo de modelación a excepción de dos periodos de tiempo (de 31 a 35 horas y 54 a 58 horas). Para el nodo 471 se puede que para ambos diseños de red el cloro llega casi al mismo tiempo, pero en la red optimizada logra mantener una concentración mayor durante todo el periodo de modelación. En Conclusión, el diseño optimizado de esta red permite mantener una concentración mayor de cloro en los nodos seleccionados mejorando su calidad.

#### THM

En cuanto a THM, los resultados de esta red también son bastante buenos. Para el nodo 379 se puede observar una aparición más lenta de THM en la red no optimizada, pero que con el tiempo crece hasta concentraciones equivalentes a 80 µg/L. Mientras que la red optimizada tiene una aparición de THM más temprana, pero se mantiene estable y por debajo del diseño no optimizado durante todo el periodo de modelación. Para el nodo 471



se puede observar que para ambos diseños la aparición de THM es muy parecida, sin embargo, la red optimizada mantiene una concentración constante y menor a la red no optimizada después de las primeras 2 horas de modelación. En conclusión, el diseño optimizado de esta red permite controlar la formación de THM en los nodos seleccionados asegurando una mejor calidad.

### **Tiempo de respuesta**

En general, esta red muestra un desempeño aceptable con respecto a los tiempos de respuesta. En el *Análisis 1* de una hora se puede observar que en los primeros 5 minutos de modelación la red optimizada logra cubrir 238 nodos mientras que la red no optimizada solo logra cubrir 172 nodos. Luego, en el *Análisis 1* de doce horas se observa que durante este tiempo la red optimizada logra cubrir más nodos que la red no optimizada (341 y 333 respectivamente). Finalmente, el *Análisis 2* nos muestra que los comportamientos entre redes son similares sin embargo la red no optimizada logra decrecer más rápido lo cual indica que el diseño optimizado se demora un poco más en cumplir con el requisito del RAS. En conclusión, el diseño optimizado permite que el cloro se distribuya más rápidamente por la red, pero se demora un poco más en cumplir con el mínimo de 0.3 mg/L.



### 5.6 Modelación Sector 8 Sub Sector 5 (S8-SS5)

#### Cloro

#### Nodo 16

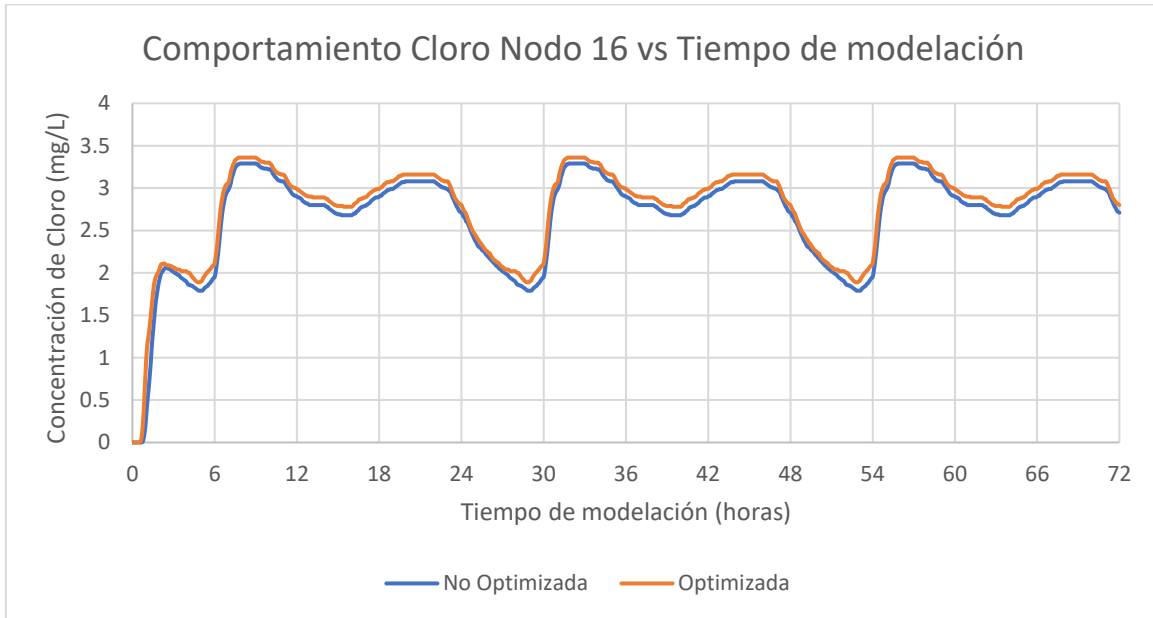


Figura 69. Resultado cloro S8-SS5 nodo 16

#### Nodo 2975

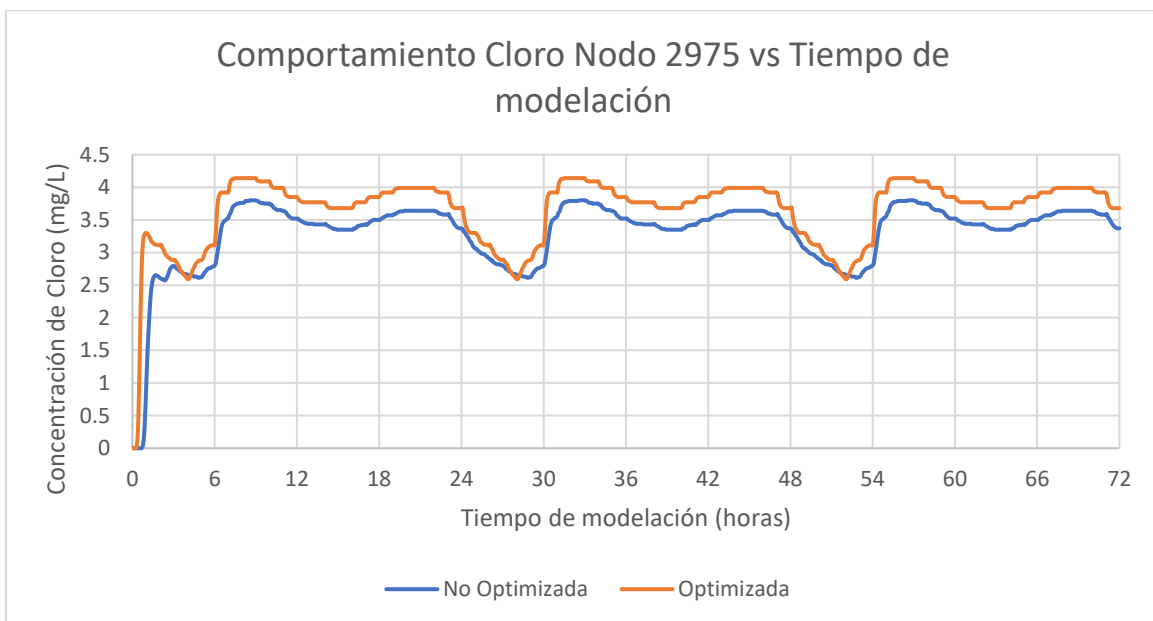


Figura 70. Resultado cloro S8-SS5 nodo 2975



### Nodo 2954

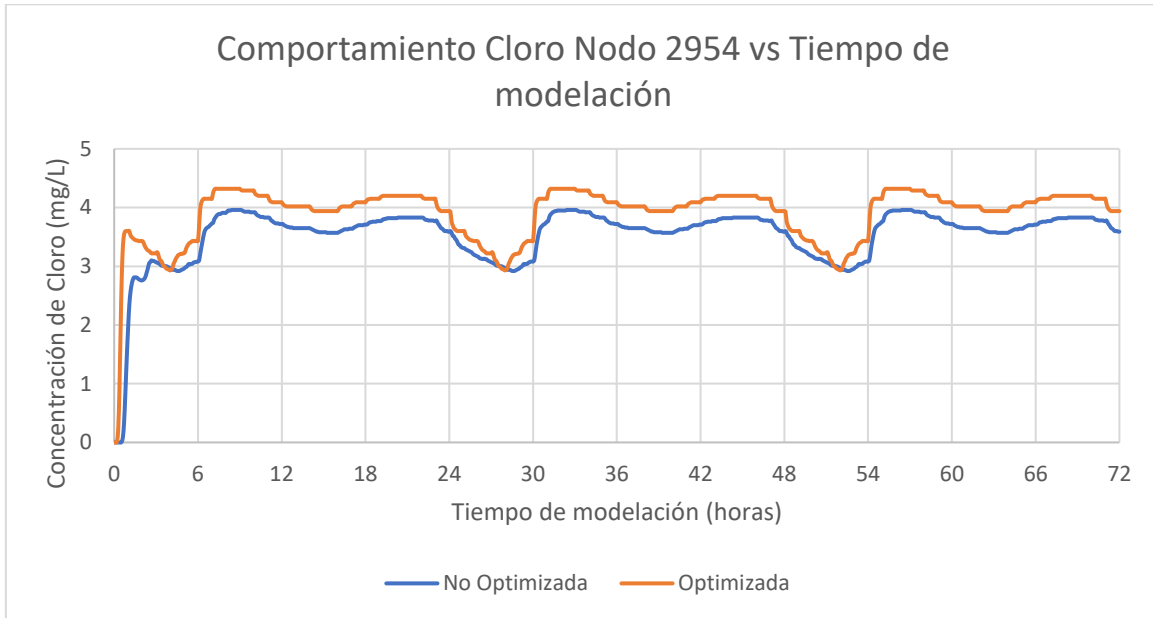


Figura 71. Resultados cloro S8-SS5 nodo 2954

### Nodo 221

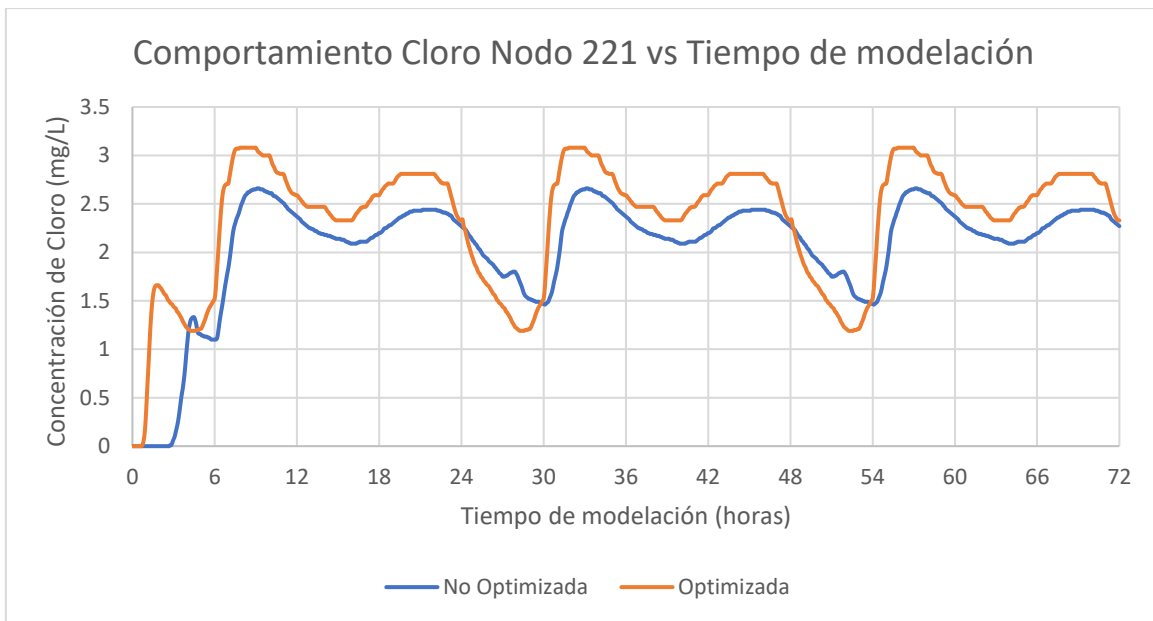


Figura 72. Resultado cloro S8-SS5 nodo 221



## THM

### Nodo 16

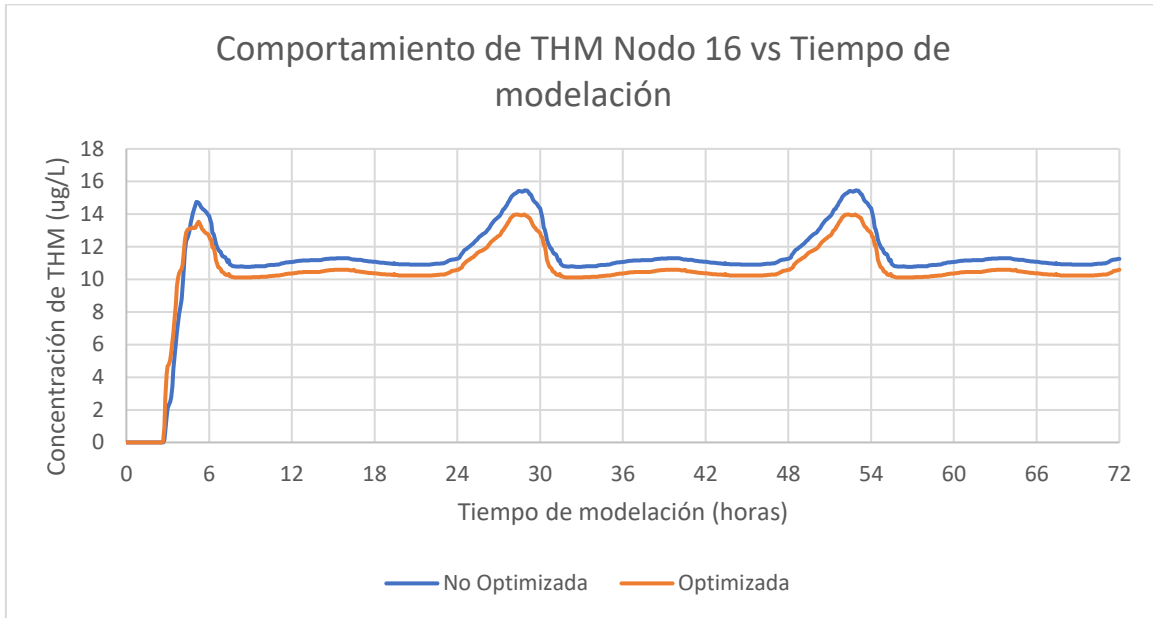


Figura 73. Resultado THM S8-SS5 nodo 16

### Nodo 221

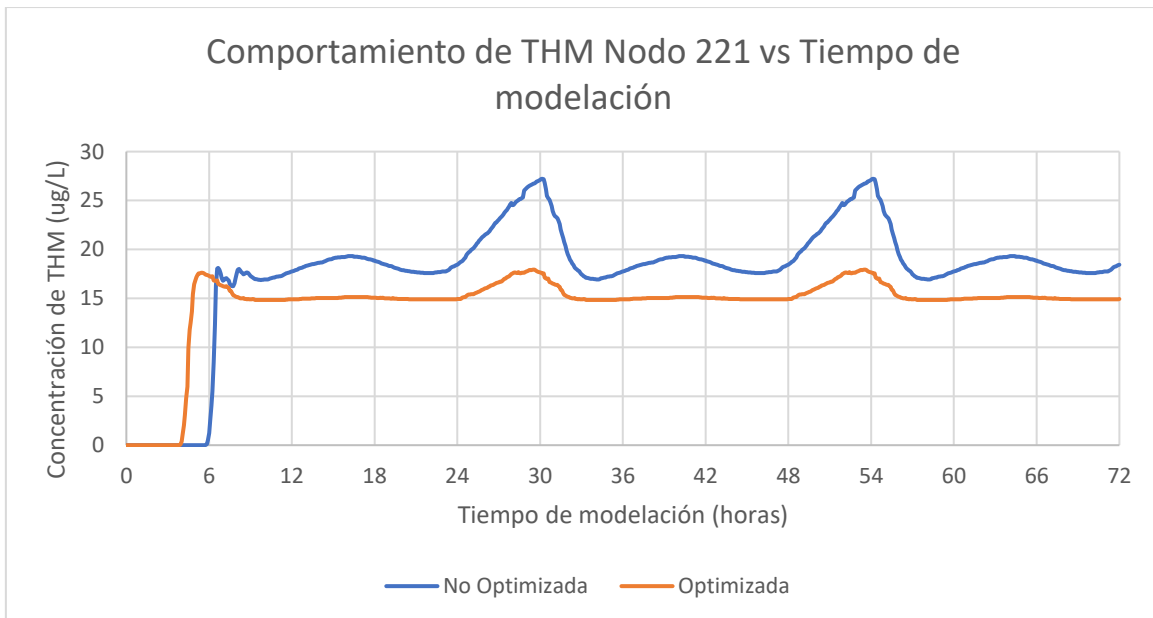


Figura 74. Resultado THM S8-SS5 nodo 221



### Nodo 2954

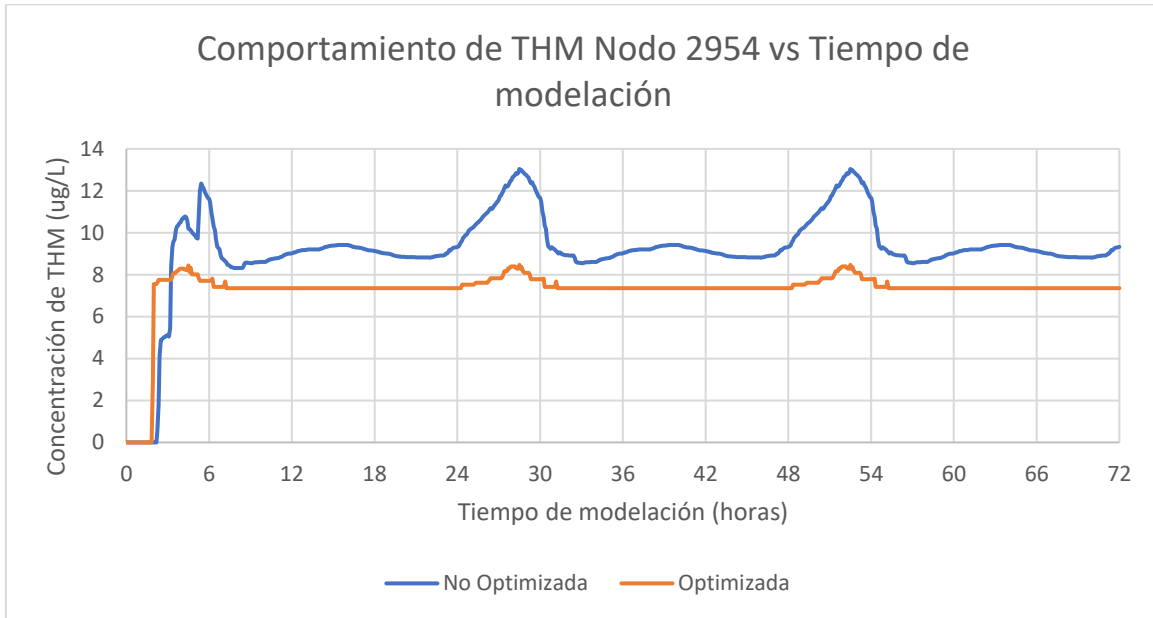


Figura 75. Resultado THM S8-SS5 nodo 2954

### Nodo 2975

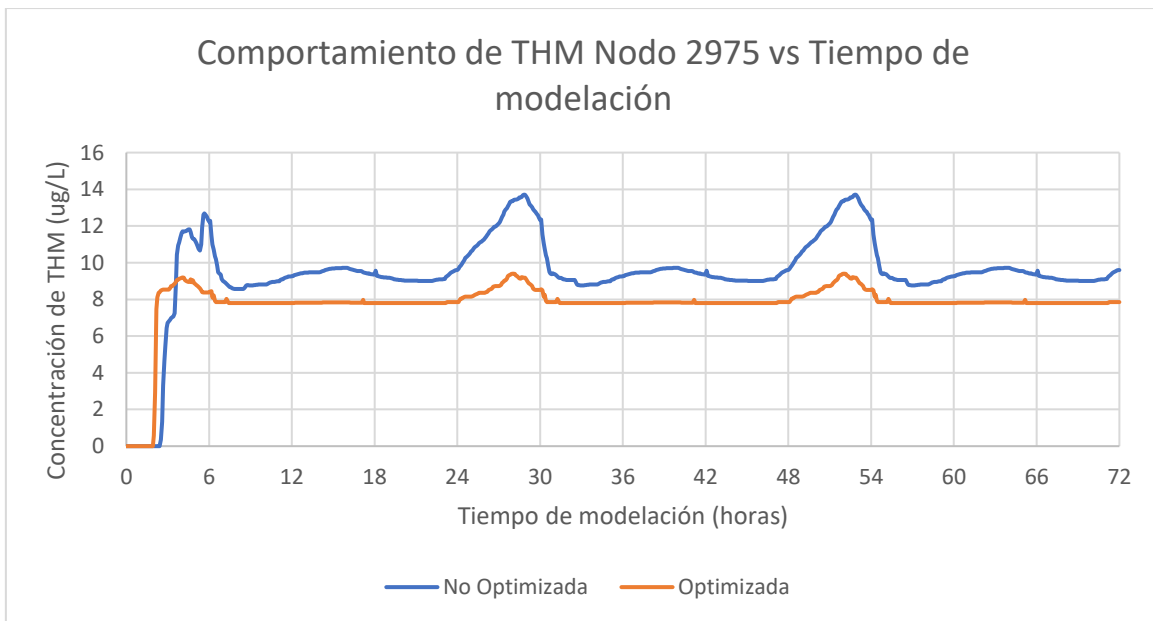


Figura 76. Resultado THM S8-SS5 nodo 2975



## Tiempo de respuesta de la red

### Análisis 1

- 1 hora

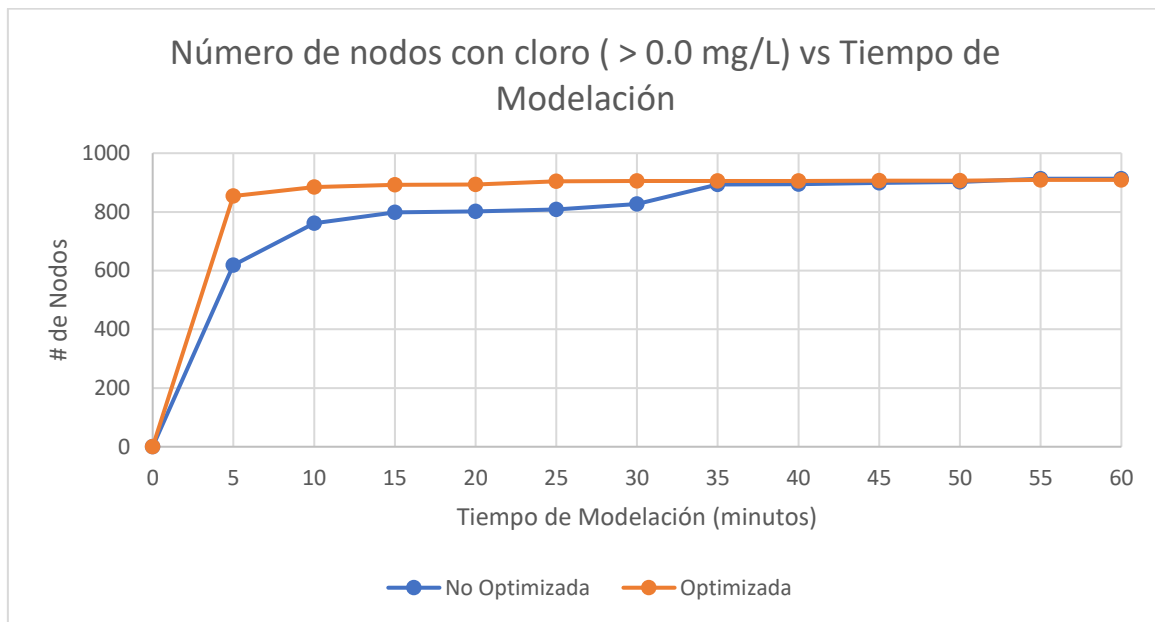


Figura 77. Resultado tiempo de respuesta 1 hora análisis 1 S8-SS5

- 12 horas

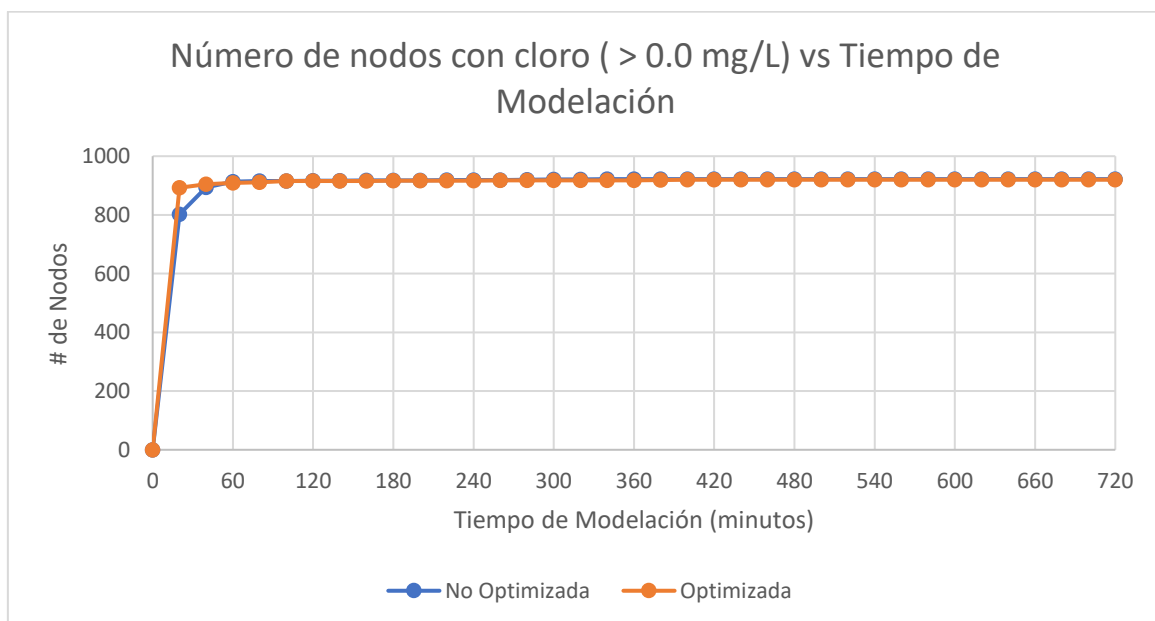


Figura 78. Resultado tiempo de respuesta 12 horas análisis 1 S8-SS5



## Análisis 2

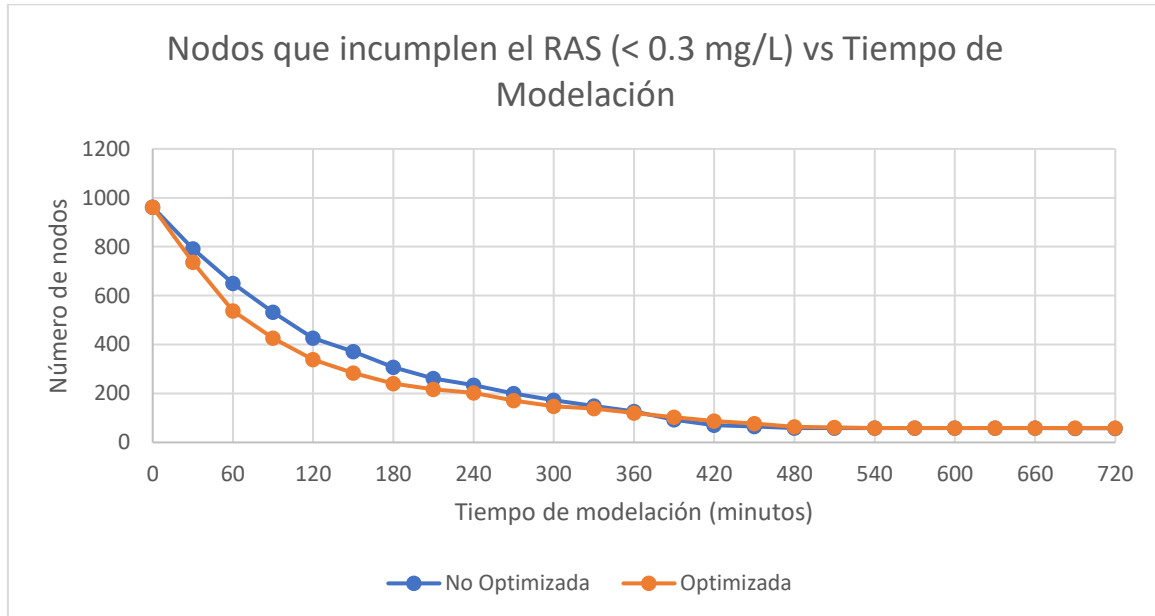


Figura 79. Resultado tiempo de respuesta análisis 2 S8-SS5

### 5.6.1 Análisis resultados S8-SS5

#### Cloro

Los resultados de la red del subsector 5 son buenos. Para el nodo 16 se puede observar un comportamiento muy similar en todas las horas de modelación, desde la aparición de cloro en el nodo hasta en los picos y valles. Sin embargo, la red optimizada muestra comportamiento ligeramente mejor manteniendo una concentración de cloro un poco más alta. Para el nodo 2975 se puede observar que desde las primeras horas de modelación la red optimizada toma la delantera manteniendo una concentración mayor durante casi todo el tiempo de simulación. Hay que resaltar que la concentración de los valles coincide para ambos diseños de red. Estos suceden entre las horas 4 y 5, 28 y 29, y, 52 y 53. Para el nodo 2954 se tiene un comportamiento bastante parecido al nodo anterior, se observa un aumento de concentración más rápido por parte del diseño optimizado que se mantiene superior en casi todo el periodo de modelación. Al igual que el nodo 2975, existen tiempos donde ambos diseños de redes coinciden en los valles de concentración 4, 28 y 52. Finalmente, para el nodo 221 se puede observar que el diseño optimizado presenta una mayor concentración de cloro durante las primeras horas de modelación. Durante gran parte del tiempo, el diseño optimizado logra mantener una concentración mayor de cloro que el diseño no optimizado, sin embargo, a excepción de todos los demás nodos hay valles del diseño optimizado donde la concentración es mucho más baja que el diseño no optimizado. Especialmente en las horas 28 y 52. A pesar de esto la red optimizada muestra



una capacidad de recuperación que no tiene la red no optimizada. En conclusión, se puede decir que el diseño optimizado de esta red permite tener concentraciones de cloro mayores en cada uno de los nodos estudiados, asegurando una mejor calidad del agua.

## **THM**

Los resultados de modelación de THM para esta red son bastante favorables. Para el nodo 16 se puede observar una aparición bastante parecida entre diseños de redes que con el tiempo se estabilizan, pero la red optimizada logra mantener concentraciones más bajas de THM después de las primeras 5 horas de modelación. Para el nodo 2975 se puede observar que en la red optimizada hay una aparición más rápida y más concentrada de THM, pero que con el tiempo se estabiliza y no supera la concentración generada por la red no optimizada. Para el nodo 2954 se tiene un comportamiento muy parecido al nodo anterior, donde en las primeras horas predomina la formación de THM en la red optimizada pero que con el paso del tiempo se estabilizan y no superan a las concentraciones producidas por la red no optimizada. Finalmente se tiene el nodo 221 que al igual que los dos nodos anteriores muestra un comportamiento similar. La principal diferencia es que en este nodo se presentan las concentraciones más altas de THM oscilando entre 15 y 27  $\mu\text{g/L}$  mientras que en las dos anteriores las concentraciones oscilan entre 7 y 14  $\mu\text{g/L}$ . En conclusión, se puede decir que el diseño optimizado de esta red permite reducir la concentración de THM en los nodos seleccionados y por ende mejorar la calidad de estos.

## **Tiempo de viaje**

En general, esta red muestra un desempeño excelente con respecto a los tiempos de respuesta. En el *Análisis 1* de una hora se puede observar que en los primeros 5 minutos de modelación la red optimizada logra cubrir 854 nodos mientras que la red no optimizada solo logra cubrir 618 nodos. Luego, en el *Análisis 1* de doce horas se observa que durante este tiempo la red no optimizada logra cubrir 2 nodos que la red optimizada (922 y 920 respectivamente). Finalmente, el *Análisis 2* nos muestra que los comportamientos entre redes son similares sin embargo la red optimizada logra decrecer más rápido lo cual indica que el diseño optimizado logra cumplir con los requisitos del RAS en un tiempo mucho más corto. En conclusión, el diseño optimizado permite que el cloro se distribuya más rápidamente por la red y, además, cumple más rápidamente con el mínimo de 0.3 mg/L en cada nodo estipulado por el RAS.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Primero que todo, se pudo cumplir con los objetivos planteados al principio del documento. Se terminó con éxito la optimización de las redes por medio del software REDES 2018 y también se pudo correr con éxito las modelaciones de cloro y trihalometanos con EPANET 2.2 y EPANET-MSX respectivamente. También, se culminó con éxito los 3 análisis cuantitativos para cada red sin ningún inconveniente.

Con respecto a las características geométricas, se pudo evidenciar que la optimización de las redes permite reducir de manera contundente los 3 parámetros estudiados. Sin embargo, el más sensible es el volumen de agua que se transporta en la tubería. Al tener un menor volumen se tiene un menor tiempo de residencia por lo cual se corrobora la primera parte de la hipótesis planteada. Además, la optimización realizada por el programa REDES 2018 permite tener diseños que cumplen con los requisitos hidráulicos y que además implican un menor costo por red, tanto de construcción como ambiental.

Con respecto al análisis de cloro se puede concluir que las redes optimizadas mejoran la calidad del agua en los nodos estudiados. Como se pudo observar en el análisis de resultados, todos los casos de los nodos seleccionados fueron exitosos. Hubo nodos donde las concentraciones de cloro se igualaban entre diseños optimizados y no optimizados, pero en general la optimización permitió mantener una concentración mayor. Además, se pudo evidenciar la resiliencia de las redes optimizadas donde en algunas ocasiones las concentraciones de cloro eran mucho menores que la red no optimizada, pero aun así lograban recuperarse rápidamente. Se lograron identificar momentos en la modelación donde los valles de concentración eran críticos, los cuales coinciden con las horas de menor consumo de agua. Por lo cual es pertinente tener especial cuidado en las primeras y últimas horas del día. Hay algo que se debe resaltar y es que en algunos nodos el decaimiento de cloro fue mayor en la red optimizada. Esto se debe a que las reacciones de decaimiento son inversamente proporcionales al diámetro de la tubería, por lo cual es lógico que el cloro decaiga más rápido en diámetros menores (Zheng. M, 2013). Sin embargo, este efecto pudo mitigarse ya que en estas redes se tienen tiempos de viaje menores y una mejor respuesta de la red, en otras palabras, el agua se distribuye más eficientemente.

Con respecto a los resultados de THM se puede concluir que las redes optimizadas mejoran la calidad de los nodos seleccionados. Los resultados de la modelación muestran una amplia variedad de comportamientos, desde muy buenos hasta muy regulares. Por ejemplo, el nodo 1241 del subsector 1 logra reducir las concentraciones de 50  $\mu\text{g/L}$  a 2  $\mu\text{g/L}$ , pero también hay nodos como el 1477 del subsector 3 donde el diseño optimizado presenta concentraciones mayores a la red no optimizada. Sin embargo, este fue el único caso negativo de todos los nodos estudiados. También se logran identificar horas



críticas donde las concentraciones de THM se igualaban entre los dos tipos de redes. Estas horas son más variables y no necesariamente coinciden con los periodos de demanda más bajos del día, hay que recordar que los trihalometanos están en función del consumo de cloro. Por otra parte, es pertinente recordar que los resultados obtenidos son netamente teóricos, ya que se hace el supuesto de que la tubería no influye en la formación de trihalometanos, tal y como lo explica Carrico & Singer en su *paper*. Como lo dice el modelo de primer orden de decaimiento de cloro, este solo tiene en cuenta la liberación de materia orgánica por parte de biopelículas por lo cual es un resultado bastante conservador, pero útil para predecir la presencia de estos subproductos de desinfección. En general, los diseños optimizados logran mejorar en casi todos los nodos (a excepción del 1477) con buenos resultados. Finalmente, es importante aclarar que los resultados obtenidos no tienen en cuenta una adición de materia orgánica o compuestos halogenados en el reservorio, son exclusivos del consumo de cloro en la red.

Con respecto al análisis de tiempo de respuesta en casi todos los casos las redes optimizadas mejoraban en los tiempos de respuesta. Para el primer análisis que consiste en la presencia de cloro ( $> 0.0$  mg/L) 4 de las 5 redes demuestran que el diseño optimizado distribuye el cloro de manera más rápida a través de la red garantizando un mejor tiempo de respuesta. La única red no presento buenos resultados fue el subsector 3; esto se puede deber a que en los extremos cuenta con nodos con elevaciones cercanas al reservorio lo cual puede alterar la hidráulica (Saldarriaga, J, 2023). Con respecto al primer análisis extendido de 12 horas se ven todo tipo de resultados; hay diseños optimizados como el subsector 1 que convergen a un número mayor de nodos que la red no optimizada, hay diseños optimizados como el subsector 2 que convergen a un número igual de nodos que la red no optimizada y hay diseños optimizados como el subsector 3 que convergen a un número menor de nodos que la red no optimizada. Por otra parte, el segundo análisis que consiste en el conteo de nodos que incumplen el RAS a través del tiempo de modelación ( $< 0.3$  mg/L) muestra que en 4 de 5 redes se comporta mejor el diseño optimizado. La única red no presento buenos resultados fue el subsector 4, y esto al igual que el caso anterior, se puede atribuir a condiciones topológicas únicas de la red que pueden afectar la distribución de los nodos (Saldarriaga, J, 2023). En general este comportamiento es variable y depende ciertos factores como la topología de la red, por lo cual se sugiere realizar este tipo de análisis para evaluar la factibilidad de implementar un diseño de red optimizada. Finalmente, se concluye que los diseños optimizados logran mejorar la distribución de cloro en 80% de los casos y mejoran el cumplimiento de los mínimos del RAS en el 80% de los casos.

En general, los resultados de esta modelación muestran que los diseños optimizados sí mejoran la calidad en las RDAP. Muestran además que pueden aumentar la concentración de cloro en los nodos y, por ende, garantizan una menor formación de trihalometanos. Además, estos diseños optimizados permiten a su vez mejorar los tiempos de respuesta,



asegurándose de que el cloro llega a más nodos en un tiempo menor y en algunos casos llegar a nodos donde no se llegaba antes. También se pueden cumplir los requisitos mínimos establecidos por el RAS de 0.3 mg/L de cloro en un menor tiempo. Este trabajo sirve como evidencia contundente de que el diseño optimizado puede mejorar la calidad de las redes haciéndolas más resilientes, asequibles y mucho más adaptativas para el futuro.

Para finalizar este trabajo se proponen las siguientes recomendaciones con el fin realizar estudios posteriores relacionados con el tema y así obtener resultados más acertados.

- ✓ Se sugiere realizar el mismo análisis de esta investigación, pero implementado ecuaciones de segundo orden u otros modelos de formación para compararlos con los resultados obtenidos.
- ✓ Para entender el comportamiento en otras redes, se sugiere hacer los mismos análisis de cloro y THM con redes mucho más grandes como por ejemplo una red matriz donde las demandas que sean considerablemente grandes.
- ✓ Como existen varios materiales para las tuberías, se recomienda hacer ensayo para determinar los coeficientes de cuerpo y de pared específicos de la red en cuestión. Con esto se pueden obtener resultados mucho más apropiados al caso de estudio.
- ✓ Para aumentar la precisión de los resultados, se recomienda incluir un patrón o patrones de demanda específicos de la zona, que sean medidos in situ y estén correctamente calibrados con el fin de datos en únicos del sector 8. Con estos, se pueden realizar calibraciones de otros modelos y así predecir con más exactitud.
- ✓ Con el fin de plantear un escenario más real, se sugiere modelar adicionando una concentración de materia orgánica en el reservorio, que simule una intrusión en la red de algún tipo y pueda crear un escenario pesimista.
- ✓ Como una sugerencia final, si se desea conocer la calidad de la modelación se pueden hacer ensayos con trazadores en la red actual para poder calibrar los resultados obtenidos en EPANET y EPANET-MSX.



## 7. REFERENCIAS

- ATSDR (s.f) *ToxFAQs - Cloro (Chlorine)*.  
[https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts172.html#:~:text=durante%20per%20C3%A2Dodos%20prolongados.-,%20BFC%20B3mo%20puede%20afectar%20mi%20salud%20el%20cloro%20F,y%20da%20C3%B1o%20de%20los%20pulmones.](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts172.html#:~:text=durante%20per%20C3%A2Dodos%20prolongados.-,%20BFC%20B3mo%20puede%20afectar%20mi%20salud%20el%20cloro%20F,y%20da%20C3%B1o%20de%20los%20pulmones.)
- Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., & Summers, R. S. (2003). *A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions*. Water Research. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00067-8)
- Carrico, B & Singer, P (2009) *Impact of Booster Chlorination on Chlorine Decay and THM Production: Simulated Analysis*.  
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282009%29135%3A10%28928%29>
- Enriquez, L (2022) *Comparison of two water quality modeling approaches in the trunk network of Bogota's water distribution system: white-box models versus black-box models using artificial intelligence*.  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/55291>
- EPA (s.f) *Desinfección de agua potable en situaciones de emergencia*.  
<https://espanol.epa.gov/espanol/desinfeccion-de-agua-potable-en-situaciones-de-emergencia#:~:text=Para%20desinfectar%20el%20agua%2C%20agregue,12%20C5%20galones%20de%20agua>
- EPA (s.f) *Manual de usuario EPANET 2.2*.  
[https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/epanet\\_users\\_manual\\_2.2.0-1.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/epanet_users_manual_2.2.0-1.pdf)
- EPA (s.f) *EPANET – MSX manual*. [https://www.epa.gov/water-research/epanet#:~:text=EPANET%20MSX%20\(Multi%20Species%20Extension\)%20enables%20EPANET%20to,and%20at%20the%20pipe%20wall.](https://www.epa.gov/water-research/epanet#:~:text=EPANET%20MSX%20(Multi%20Species%20Extension)%20enables%20EPANET%20to,and%20at%20the%20pipe%20wall.)
- Fisher, I., Kastl, G., & Sathasivan, A. (2011). *Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems*. Water Research, 45(16), 4896–4908.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.032>
- GreenFacts (s.f) *Trihalometanos*.  
<https://www.greenfacts.org/es/glosario/tuv/trihalometanos-THM.htm#:~:text=Los%20trihalometanos%20son%20los%20subproductos,el%20cloro%20a%20C3%B1adido%20como%20desinfectante.>



- Interempresas (2004) *El cloro, el mejor desinfectante para el agua*.  
<https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/9587-El-cloro-el-mejor-desinfectante-para-el-agua.html>
- ITC (s.f) *CLORACIÓN DE AGUA POTABLE*. [https://www.itc.es/wp-content/uploads/article-Cloracion\\_agua\\_potable-ES.pdf](https://www.itc.es/wp-content/uploads/article-Cloracion_agua_potable-ES.pdf)
- Lenntech (s.f) *Desinfectantes: Cloro*.  
<https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-cloro.htm>
- Lenntech (s.f) *Subproductos de desinfección*. <https://www.lenntech.es/desinfeccion-del-agua/desinfectantes-subproductos.htm#:~:text=Los%20subproductos%20de%20la%20desinfecci%C3%B3n%20son%20qu%C3%ADmicas%20sustancias%20org%C3%A1nicas%20e,manera%20natural%20en%20el%20agua.>
- Ministerio de Vivienda (2015) *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS*. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>
- Mora. N (2022) *Evaluación de la minimización en costos de desinfección en redes optimizadas de mínimo costo de distribución de agua potable*.  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/59308>
- Nuckols, J. R., Rossman, L. W., & Singer, P. S. (2001). *Development of exposure assessment methods for THM and HAA in water distribution systems*.
- Obando. A, Sanchez. M, Romero – Esquivel. L (2018) *Modelos de predicción de Trihalometanos en redes de distribución de agua: determinación de tiempos medios de residencia*. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v32n1/0379-3982-tem-32-01-167.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud (s.f) *Manual técnico para la desinfección con cloro*.  
[https://www3.paho.org/pan/dmdocuments/Agua\\_Segura\\_Manual\\_Tecnico.pdf](https://www3.paho.org/pan/dmdocuments/Agua_Segura_Manual_Tecnico.pdf)
- Pancorbo. J (2011) *LA CLORACIÓN DEL AGUA Y LOS TRIHALOMETANOS*.  
<http://javierpancorbo.blogspot.com/2011/12/los-trihalometanos-y-la-cloracion-del.html>
- Robles. A (2018) *Diseño óptimo de redes de distribución de agua mediante algoritmos de búsqueda tabú*. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/82270/TFM-1154-ROBLES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



- 
- Rossman, L., & US EPA. (2020). EPANET 2.2 Online User's Manual. <https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- Salcedo. C (2014) *Localización y ajustes óptimos de válvulas reductoras de presión (VRP) en RDAP para minimizar el índice de agua no contabilizada (IANC)*. [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=B23XYF4AAAAJ&citation\\_for\\_view=B23XYF4AAAAJ:Y0pCki6q\\_DkC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=B23XYF4AAAAJ&citation_for_view=B23XYF4AAAAJ:Y0pCki6q_DkC)
- Saldarriaga. J (2023) Reunión proyecto de grado, Departamento de ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes
- TECPA (2022) *EPANET Todo lo que necesitas saber*. <https://www.tecpa.es/epanet-que-es-para-que-sirve/>
- Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F., & Clark, R. M. (1997). Kinetics of chlorine decay. *Journal / American Water Works Association*, 89(7). <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x>
- Zheng. M (2013) *Factors Contributing to Chlorine Deca and Microbial Presence in Drinking Water Following Stagnation in Premise Plumbing*. [https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2801&context=utk\\_gradtheses](https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2801&context=utk_gradtheses)