

EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA RED DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DEL CASTILLO –
DEPARTAMENTO DEL META



JUAN STEVAN DELGADO PALOMA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2022

EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA RED DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DEL CASTILLO –
DEPARTAMENTO DEL META

JUAN STEVAN DELGADO PALOMA

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de ingeniero
civil

Asesor

ING. IVAN DARÍO ACOSTA SABOGAL

Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ.

Decano Facultad de Ingeniería Civil

Agradecimiento

Durante mi vida me he esforzado por hacer lo mejor para poder cumplir mis objetivos, sin embargo jamás olvidaré que para llegar a este punto he contado con personas que me impulsan y confían en mí, unos ya no están presentes físicamente, en primer lugar quisiera agradecer a ellos tres personas que me guiaron al hombre que soy ahora y futuro profesional, mi abuela, mi abuelo y mi tío, quisiera agradecer a mi mamá que ha sido mi apoyo incondicional toda la vida, a toda mi familia que siempre han estado en mi proceso de formación académica, a mi pareja que durante la última parte de mi vida académica y la elaboración de este proyecto siempre ha estado apoyándome y alentándome.

Agradezco de sobremanera a mi director de grado el ingeniero Iván Darío Acosta Sabogal, que me ha brindado su tiempo, confianza y tiempo para realizar esta investigación.

A la facultad de ingeniería civil de la universidad Santo Tomas sede Villavicencio y a todos los docentes que me han brindado su tiempo y conocimiento para mi formación como un profesional integro.

A todos los amigos que he conocido durante mi estancia en el pregrado que han hecho parte de mi formación y vida académica.

A todos ellos mi agradecimiento eterno.

Resumen

En este trabajo se encontraran los factores que degradan la calidad del agua y que se encuentran en las redes de distribución de agua potable como lo son los agentes químicos (cloruros, sulfatos nitratos y carbonatos). La cual por varios años los investigadores se han interesado en desarrollar metodologías para mejorar la calidad del agua en la red de abastecimiento mediante la simulación de parámetros de calidad. El objetivo es realizar la evaluación del comportamiento y calidad del agua de un sistema de redes de distribución en el municipio del Castillo departamento del Meta, se trabajó por medio de un software llamado EPANET, el cual registró cloro residual libre en toda la red y se realizó el cálculo de las características hidráulicas del sistema como lo son el caudal, la presión y la velocidad en todos los elementos del sistemas, evaluando de esta forma el comportamiento de cloro residual en cada uno de los componentes de la red, el modelo hidráulico y el modelo de calidad el cual se realizó a través de cálculos manuales y el uso de EPANET lo cual demuestran que este tipo de modelo es una herramienta valiosa para monitorear la calidad del agua en cada punto de la red de distribución.

Palabras clave: Red de distribución, cloro residual, modelo de calidad, EPANET.

Abstract

In this project will be find the factors that degrade water quality are found in drinking water distribution networks like the chemical agents (chlorides, sulfates, nitrates and carbonates). Which for several years researchers have been interested in developing methodologies to improve the quality of water in the supply network by simulating quality parameters. The objective is to carry out the evaluation of the behavior and quality of the water of a network and distribution system taking into account the residual chlorine in the municipality of the target castle, we worked through software called EPANET, this one recorded the free residual chlorine in the entire network. and the calculation of the hydraulic characteristics of the system was carried out, such as the flow, pressure and speed in all the elements of the system, thus evaluating the behavior of residual chlorine in each of the components of the network, the model hydraulic and the quality model which was carried out through manual calculations and the use of EPANET, which shows that this type of model is a valuable tool to monitor the quality of water at each point of the distribution network.

Keywords: Distribution network, residual chlorine, quality model, EPANET.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen	5
Abstract	6
Introducción	12
1. Formulación del problema	13
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo general	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Justificación	15
4. Estado del arte	16
5. Marco de referencia	19
5.1. Marco teórico	19
5.1.1. Red de distribución	19
5.1.2. EPANET	20
5.1.3. Modelos matemáticos	23
5.1.3.1. Modelos hidráulicos	23
5.1.3.1.1. Conservación de la masa	23
5.1.3.1.2. Conservación de la energía	24
5.1.3.2. Método del gradiente hidráulico	26
5.1.3.3. Modelo de calidad	27
5.1.3.3.1. Tasa de concentración de reactivos	27
5.1.3.3.2. Modelación de reacciones químicas	28
5.2. Marco conceptual	30
5.2.1. Agua Potable	30
5.2.2. Cloración	30
5.2.3. Tuberías	30
5.2.4. Tanque de almacenamiento	31
5.2.5. Bombas	32

5.2.6. Válvulas	32
6. Metodología	33
6.1. Recopilación de información	34
6.2. Curva horaria y caudal medio diario.	37
6.3. Modelación de la red	40
6.5. Modelo de calidad	50
7. Conclusiones	55
8. Recomendaciones	56
9. Bibliografía	57
10. Anexos	59

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Fórmulas de pérdida de carga en una tubería llena.....	25
Tabla 2 Coeficientes de rugosidad para tuberías nuevas (García, 2006).....	25
Tabla 3 Coeficientes de pérdidas menores para diferentes accesorios de una red de agua potable	26
Tabla 4 Transformaciones lineales de las ecuaciones de velocidad para los diferentes ordenes .	28
Tabla 5 Metodología.....	33
Tabla 6 Resultados obtenidos en los puntos de muestreo.....	37
Tabla 7 Ejemplo tabla de registro diario de alturas en el tanque	37
Tabla 8 Promedio de resultados obtenidos y resultados de coeficientes horarios	38
Tabla 9 Calculo de dotación y caudal diario.....	39
Tabla 10 Tabla de nodos	42
Tabla 11 Diámetros de tuberías.	42
Tabla 12 Ejemplo de caracterización de un nodo para obtener su caudal de demanda.	43
Tabla 13 Muestra de resultados de nodos en la simulación.....	48
Tabla 14 Muestra de resultados de tuberías en la simulación.....	49
Tabla 15 Resultados de la simulación de calidad en nodos a las 24 horas.	53
Tabla 16 Resultados de la simulación de calidad en tuberías a las 24 horas	54

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Ejemplo de red ramificada.....	19
Figura 2. Ejemplo de red mallada.....	20
Figura 3 Ejemplo de red mixta.....	20
Figura 4 Ejemplo uso del software en una red.....	21
Figura 5 Tendencia de concentración vs tiempo en los tres órdenes	29
Figura 6 Instalaciones del acueducto del Castillo Meta.....	34
Figura 7 Ejemplo de planilla de seguimiento horaria del acueducto.	35
Figura 8 Equipo de cloración del municipio el Castillo	35
Figura 9 Puntos de estudio de cloro residual.	36
Figura 10 Equipo utilizado para la toma de muestras.....	36
Figura 11 Curva de variación horaria.	38
Figura 12 Plano de redes suministrado por la empresa de agua del Castillo	40
Figura 13 Imagen satelital del municipio obtenida por Google Earth	41
Figura 14 Imagen del sistema de redes elaborado en EPANET	41
Figura 15 Propiedades con las que el proyecto va a ser simulado.....	44
Figura 16 Ejemplo de elevación del municipio en Google Earth	45
Figura 17 Ejemplo de datos suministrados a los nodos en EPANET.....	45
Figura 18 Ejemplo de datos suministrados a las tuberías en EPANET	46
Figura 19 Ejemplo de datos suministrados al tanque en EPANET.	46
Figura 20 Curva de variación horaria en EPANET.	47
Figura 21 Simulación exitosa de la red en EPANET.....	47
Figura 22 Datos de entrada para el sistema de calidad.	50
Figura 23 Cuadro de reacciones para el análisis de calidad.....	50
Figura 24 Valor a ingresar en el tanque para el modelo de calidad.....	51
Figura 25 Modelo de calidad en la hora 00:00.	51
Figura 26 Modelo de calidad a las 24:00 horas.	52
Figura 27 Modelo de calidad simulado en 2, 12 y 24 horas.	52

Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1 Conservación de masa en un sistema de redes.....	23
Ecuación 2 Conservación de energía en un sistema de redes	24
Ecuación 3 Pérdida de carga entre nodos	24
Ecuación 4 Pérdidas menores	25
Ecuación 5 Ecuación de conservación de masa y energía en tuberías.....	26
Ecuación 6 Ecuación de conservación de masa y energía en tuberías en caso de tener pérdidas menores	27
Ecuación 7 <i>Reacción de Bulk</i>	28
Ecuación 8 Decaimiento de la concentración en el tiempo	29
Ecuación 9 Reacción de Wall	29
Ecuación 10 cálculo de caudales con diferencia de alturas en el tanque	37
Ecuación 11 Coeficiente horario.....	38

Introducción

En el municipio del Castillo en el departamento del Meta, se utiliza cloro como agente desinfectante en la planta para la potabilización del agua, por esto mismo el conocer la concentración de cloro residual en el sistema de distribución ayudara a asegurar la satisfacción y seguridad de los usuarios, por esta razón el presente trabajo tiene como objetivo el evaluar el cloro residual en toda la red de distribución.

Los sistemas de tratamiento de agua han sido un avance significativo en la calidad de vida de la humanidad previniendo perjuicios a la salud de la cual se estiman que estas enfermedades han causado alrededor de 45.000 muertes por año. El tratamiento adecuado del agua es de suma importancia para la eliminación y reducción de bacterias y virus que causan enfermedades entre las cuales están infecciones respiratorias agudas, enfermedades diarreicas. En todos los lugares donde se ha realizado esta labor de forma adecuada se ha logrado beneficiar a los consumidores salvaguardado su salud. El desinfectante usando por excelencia es el cloro debido a sus propiedades antisépticas, sin embargo, un gran problema es que siendo usado de forma incorrecta puede generar sabores y olores que no cumplen con los parámetros establecidos por la norma, debido a un exceso en la dosificación y si por el contrario existe muy poco agente en el sistema este no garantiza la inocuidad del agua (Ahn, 2012).

Actualmente se presenta una gran variedad de softwares capaces de simular modelos hidráulicos y de calidad en redes de distribución, lo cual permite predecir el comportamiento físico y químico que se genera en todo el sistema lo cual ayuda a generar estrategias para su correcta gestión. EPANET es el programa usado por excelencia con el fin de simular redes hidráulicas y es el que se usara para el desarrollo de este proyecto ya que sus resultados son muy precisos.

Con los resultados de la simulación del modelo de calidad, se determinará el comportamiento que presenta el cloro residual respecto al tiempo y la distancia, lo que permitirá tener un control en lo que respecta a la desinfección, a de mas con estos datos se podrá identificar los sectores en los que la red presenta bajos niveles de desinfección por lo que se podrá realizar estrategias para garantizar la correcta desinfección en todo el sistema.

1. Formulación del problema

Para cualquier estructura urbana el suministro de agua potable es uno de los fines más importantes. Debido a esto los municipios deben ofrecer un sistema de redes vanguardistas que garanticen el suministro de agua a perpetuidad. La calidad en estos sistemas es sin duda factor muy importante, por esto mismo se tiene que velar y asegurar que durante toda su trayectoria no presente una decaída en lo que respecta a ofrecer un servicio de agua que asegure a los beneficiarios un producto de calidad, para esto se pueden analizar distintos problemas como lo son el cloro residual que puede estar presente en la red de distribución, ya que esta afecta de forma directa la calidad del servicio pudiendo generar un impacto negativo a la salud de los consumidores.

La empresa de aguas del castillo usa cloro como agente desinfectante para mantener la calidad del agua pero esto puede presentar efectos nocivos para la salud ya que cuando la materia orgánica y esta sustancia reaccionan forma trihalometanos que dependiendo de las concentraciones llegan a ser tóxicos, aparte de esto los niveles altos de cloro residual es uno de los principales factores que causa la corrosión en las tuberías, por lo mismo es importante establecer una correcta dosificación de agente desinfectante en la red.

La empresa de aguas realiza un monitoreo periódico en la planta y sus puntos de muestreo siendo uno de los principales parámetros el cloro libre, pero esto puede llegar a ser un problema ya que pueden presentarse problemas de salubridad entre la población, en el medio ambiente y de concentración en sectores del municipio que no sean aledaños a los puntos estudiados.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar la red de distribución de agua potable del Municipio del Castillo – Departamento del Meta teniendo en cuenta el comportamiento del cloro a través de todas las redes hidráulicas.

2.2. Objetivos específicos

- Recopilar la información topológica, planos de redes existentes y elaboración de un levantamiento para el desarrollo de un modelo.
- Identificar la alternativa de diseño más apropiada y eficiente que supla las necesidades locales mediante el uso de software EPANET.
- Elaborar un estudio de calidad de agua y conforme los resultados de sus contaminantes (el cloro) brindar diferentes soluciones.

3. Justificación

La modelación del comportamiento de calidad del agua en las redes de distribución ha tomado una gran importancia para este tipo de proyectos ya que permite la comprensión de lo que sucede con el agua desde que sale de la planta hasta llegar a los usuarios quienes son los que la consumen.

Uno de los principales objetivos de mantener la calidad del sistema es mantener el cloro residual acorde la resolución número 2115-(22 junio 2007) el cual estipula que “El valor aceptable del cloro residual libre en cualquier punto de red de distribución del agua para consumo humano no deberá estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L”, para esto es indispensable el uso de un dosificador de calidad en lo que respecta al cloro en el agua para de esta forma lograr evaluar el comportamiento de la concentración permitiendo analizar el cloro residual durante un periodo amplio de tiempo. (Fisher, 2012) El modelo de calidad nos permite analizar el comportamiento del cloro en toda la red, de esta manera reduciendo el número de puntos de muestreo permitiendo optimizar recursos y tiempo de la empresa necesarios para evaluar la concentración de cloro en puntos de la red.

Este tipo de modelos facilita la toma de decisiones en lo que respecta a la gestión del agua, ya que permite determinar lugares y frecuencias de muestreo, optimizando la dosificación optimizando de esta forma la dosificación con la finalidad de asegurar un suministro de calidad (Rossman L. G., 1997).

Saber la concentración de cloro residual en toda la red de distribución y en todo el periodo de tiempo es de suma importancia, para cumplir con la normativa de calidad además con este conocimiento se puede identificar puntos problemáticos ya sea por exceso o falta de concentración.

4. Estado del arte

En este trabajo pretende mostrar la aplicación y beneficios que tiene un modelo de calidad de agua óptimo en un municipio de Colombia, por esto mismo es importante el enseñar los antecedentes y avances que se han tenido de este tema, así como la información relevante que se requerirá para el desarrollo de este proyecto.

Un sistema de redes es una estructura indispensable para cualquier centro urbano y su buen diseño de este es de suma importancia para los intereses de la población por esto mismo se requiere de herramientas que garanticen el correcto diseño de este tipo de obras, para el desarrollo de estos hay una gran cantidad de softwares que ayudan a los ingenieros con los cálculos y diseños que se requieren pero el más destacable y popular es EPANET el cual es una herramienta que funciona como simulador de comportamiento hidráulico que también nos ayuda a evaluar la calidad del agua servida en las redes. Es una herramienta de fácil uso desarrollado por la “U.S. Environmental Protection Agency” con el propósito de ser una herramienta que ayude a mejorar el diseño de las redes por medio de su comportamiento y como esta se distribuye, a esto también le podemos sumar que esta herramienta es de gran ayuda para la elaboración de nuevas alternativas en sistemas ya existente, lo cual nos ayuda a entender que es un sistema ideal para el trabajo integral para este tipo de proyectos (GUTIÉRREZ, 2018).

En el año 2017 en la Universidad Católica de Colombia se llevó a cabo un proyecto de optimización en el servicio de redes de distribución de agua en el municipio de Madrid, ubicado en el departamento de Cundinamarca en el cual se detectaron los diferentes problemas que tenía la red vigente como lo puede ser la presión en ciertos tramos. Todo este trabajo se enfoca en el desarrollo de estas mejoras cumpliendo con la normativa vigente en el (RAS 2000) y usando como herramienta de diseño EPANET 2.0 de esta forma garantizando la optimización del servicio (MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ABASTO DE AGUA POTABLE SANTA MARTA VARADERO EMPLEANDO EL SOFTWARE EPANET 2.0vE., 2017).

Este tipo de trabajos se desarrollan a nivel internacional por ejemplo entre los años 2016 – 2017 en la universidad central “marta abreu” de las villas ubicada en cuba se desarrolló la modelación de un sistema de redes de agua potable con el uso de EPANET 2.0, claro esta que esto se desarrolló con la normativa nacional de este país, para esto se tomó en cuenta los problemas que se tienen en el terreno y a su vez aplicando las recomendaciones de diseño nacionales el cual

expresaba que su principal objetivo es “Diseñar una propuesta para la optimización del sistema de acueducto del municipio de Tena (Cundinamarca), para garantizar la adecuada captación, suministro y distribución del agua y disminuir las pérdidas del sistema (PULIDO, 2017).

En el año 2017 en la ciudad de Machala en Ecuador se desarrolló un proyecto que consiste en realizar el diseño hidráulico mediante el análisis de los sistemas ya establecidos usando un programa de simulación, todo esto elaborado en un sector pequeño, esto mediante un trazado de redes y análisis usando el software su principal propósito es Orientar al estudiante con respecto a los procedimientos de análisis de la calidad del agua, determinando las características físicas y químicas que la componen, a partir del uso de técnicas apropiadas y del desarrollando de competencias que les permitan discernir e interpretar resultados para definir la calidad de la fuente, en términos del grado de polución EPANET (CHAQUEA, 2017).

En el año 2019 en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas se elaboró un proyecto en el cual se diseñaba toda la red de agua en un sector específico esto se llevó acabo con la ayuda del software EPANET y manejando las recomendaciones respectivas a este país, lo que lo hace diferente es la elaboración de una serie de algoritmos que ayudaban a determinar la localización de las válvulas reductoras de presión.

En el año 2015 en la Revista Iberoamericana de Ciencias con sede en México realizo un Artículo en el que se detalla cómo se puede llegar a elaborar una red de distribución tan grande como lo puede ser ubicándonos en cualquier ciudad importante del país, mostrando como es toda la metodología que se puede llegar a usar, básicamente lo que se desarrolla es como EPANET es una herramienta prácticamente indispensable para la elaboración de este tipo de obras a gran escala, durante todo el articulo nos muestra con varios ejemplo como es la aplicación de estos métodos en una ciudad.

En este proyecto consta en dos partes una es elaborar la modelación del sistema de redes en este municipio, pero el otro gran pilar de esté es la elaboración de un estudio de calidad de agua en el que se muestre si esta cumple con las características exigidas por la normativa nacional de esta forma brindando un servicio de calidad y salubre a la población.

Como referencia de este tema tenemos la resolución 2115 de 2007 la cual nos muestra todas las temáticas referentes al control de calidad de agua para consumo humano, nos muestra varias definiciones básicas del tema y nos da la metodología necesaria para clasificar estos recursos como lo es el IRCA es cual nos un puntaje de Riesco por cada uno de los tipos de características

“física, química y microbiológica” con los cuales se hace un cómputo que nos da como resultado un porcentaje que nos indica el estado de salubridad de la fuente hídrica.

En el 2016 la universidad Santo Tomas publica el libro Análisis físico y químico de la calidad del agua en el cual se presenta una descripción detallada de los tipos de contaminantes que pueden surgir en el agua, como se puede hacer el análisis de calidad de agua y nos da a conocer diversas herramientas que se pueden usar para la determinación de la calidad y como lograr que esta cumpla con todos los requerimientos necesarios para ser potable, se enseñan diversos trabajos de laboratorio y como es su procedimiento.

En el año 2018 la Universidad Santo Tomas realiza un proyecto en el cual se realiza la evaluación de calidad hídrica en una fuente como lo es el caño Maizaro usando como base sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos el cual usa como base el método ICA que es un sistema internacional para la evaluación de calidad en el agua.

5. Marco de referencia

5.1. Marco teórico

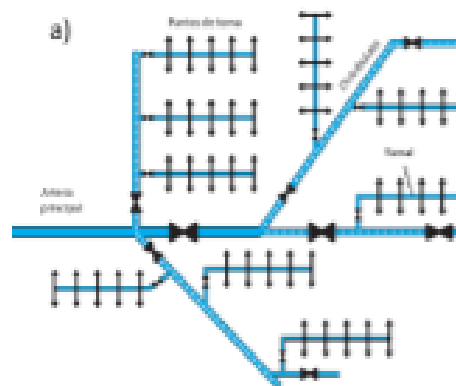
5.1.1. Red de distribución

Una red de distribución básicamente es un conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que se encarga de conducir el agua desde tanques de servicio o distribución hasta llegar a los usuarios, estos sistemas deben velar por mantener condiciones que satisfagan factores como lo son la calidad, caudal, presión y presentar un servicio continuo.

Tipos de redes de distribución:

* Red ramificada: Este tipo de red se basa en la unión de una tubería principal de mayor tamaño con otras de menor diámetro las cuales se conectan a los puntos de consumo.

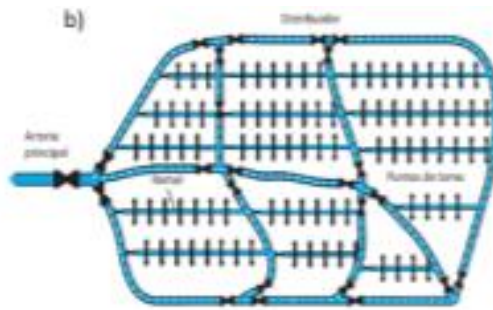
Figura 1 Ejemplo de red ramificada



Nota. Adaptado de (Lewis, 2021)

* Red mallada: Está conformada por cuadrículas que forman un sistema cerrado, consiguiendo que cada punto de consumo tenga mas de un posible flujo.

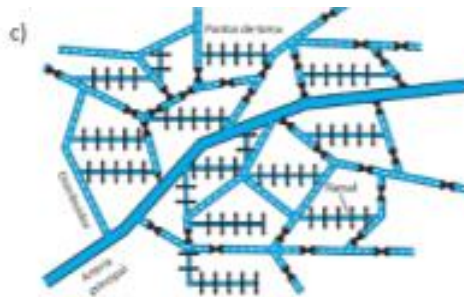
Figura 2. Ejemplo de red mallada



Nota. Adaptado de (Lewis, 2021)

* Red mixta: Consiste en un sistema que junta los sistemas de redes “ramificada y mallada”.

Figura 3 Ejemplo de red mixta

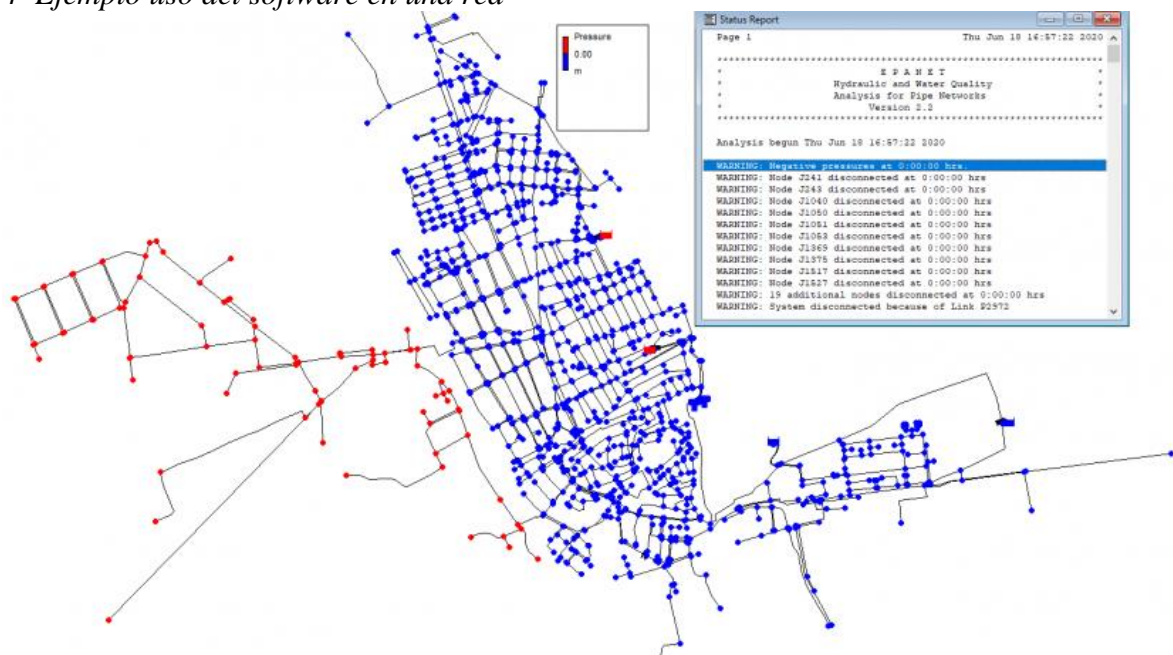


Nota. Adaptado de (Lewis, 2021)

5.1.2. EPANET

La base teórica del proyecto es generar un diseño de redes hidráulicas junto con un análisis de cloro residual en el municipio del Castillo, usando como base el software de acceso libre EPANET para lograr determinar la calidad del agua que está circulando por el sistema de redes hidráulicas.

Figura 4 Ejemplo uso del software en una red



Nota. Adaptado de (Lewis R. A, 2021)

EPANET es un software desarrollado por la Environmental Protection Agency o por sus siglas la EPA. Este nos permite realizar simulaciones del comportamiento hidráulico y de calidad en las redes de distribución, es de gran utilidad para conocer el comportamiento del agua en la red analizada teniendo en cuenta factores como el movimiento y destino del agua. El análisis que realiza este programa es muy completo tomando como datos iniciales las características de la tubería, nodos de esta forma brindándonos las presiones y caudales en cada uno de ellos. De este proceso se tienen que tener en cuenta que el programa presenta las siguientes características:

- Perdidas de fricción en las conducciones en base al trabajo de DarcyWeisbach, Hazen-Williams, Chezy-Manning.
- Perdidas en los accesorios como codos o válvulas.
- Modelo de bombas en función a su velocidad incluyendo factores como retención y regulación.
- Tienen en cuenta numerosos sistemas de demanda en los nodos, de los cuales cada uno presenta una variación en el tiempo

- Tienen en cuenta un modelo de consumo que depende de la presión del sistema tanto en emisores como en aspersores
- Pude llegar a tener en cuenta el sistema teniendo en cuenta el nivel en el tanque y los controles en el tiempo o controles complejos o de regulación temporal

EPANET para el modelo de calidad del agua también presenta un sistema basado en las variaciones espaciales y temporales cumpliendo con:

- Realiza el modelo de comportamiento del reactivo en este caso el cloro teniendo en cuenta su variación en el tiempo, y a su vez haciendo un seguimiento a las sustancias no reactivas.
- Realiza un modelo de edad del agua en el sistema hidráulico.
- Tiene en cuenta el porcentaje del agua que es dado a partir de la red de nodos a lo largo del tiempo
- Tienen en cuenta las reacciones presentes en el fluido y en las paredes de las tuberías
- Utiliza cinética de orden n para modelar reacciones en el fluido.
- Usa coeficientes y ecuaciones de cero o de primer orden para modelar las reacciones en la pared de las tuberías
- Toma en cuenta las limitaciones de la transferencia de masa en la modelación de reacciones con la pared de la tubería
- Permite que las reacciones de crecimiento o decadencia continúen hasta una concentración límite.
- Emplea coeficientes generales de reacción que pueden modificarse de tubería a tubería.
- Permite correlacionar coeficientes de velocidad de reacción de pared con rugosidad de la tubería
- Permite entradas de concentración o masa en cualquier punto de la instalación
- Modela los depósitos de tres maneras como mezcla completa, flujo de pistos o dos compartimentos de mezcla.

Teniendo en cuenta lo anterior podemos hablar que el programa EPANET nos permite realizar un estudio detallado de:

- Edad del agua a lo largo del sistema

- Mezclado de agua de diferentes fuentes
- Crecimiento de los subproductos de desinfección
- Seguimiento de la contaminación en caso de propagación
- Disminución de cloro residual

5.1.3. Modelos matemáticos

5.1.3.1. Modelos hidráulicos. Estos modelos tienen como base el cálculo de caudales y presiones en el sistema de distribución, para estos modelos se tiene que tener datos iniciales de nodos, tuberías, válvulas, tanques y demandas horarias siguiendo un orden de pasos.

- Recolectar datos de los componentes que formaran parte del modelo
- Simplificar la red teniendo en cuenta la información
- Incluir los componentes físicos de la res
- Asignar las demandas en los puntos en base a un análisis
- Calibrar el modelo mediante mediciones de presiones y caudales
- Realizar un ajuste del modelo estudiado

Estos modelos tienen como peculiaridad que si se realiza un cambio en el sistema de redes también se tiene que actualizar el modelo. Todos los elementos del sistema se conectan y tienen relación entre sí, el modelo tiene que cumplir con las leyes de conservación de la masa y energía.

5.1.3.2. Conservación de la masa. Lo que nos dice este principio respecto a los sistemas de distribución es que la masa de agua que entra en una tubería debe ser la misma que sale, para este tipo de sistemas las salidas son agrupadas en nodos:

Ecuación 1 Conservación de masa en un sistema de redes

$$\sum Q_i - U = 0$$

5.1.3.3. Conservación de la energía. Este principio nos dice que la diferencia de energía entre dos puntos debe ser independiente a la ruta que tome, en un sistema de redes esta afirmación se tiene en cuenta de la siguiente forma:

Ecuación 2 Conservación de energía en un sistema de redes

$$Z1 + \frac{P1}{\gamma} + \frac{v1^2}{2g} + \sum hp = Z2 + \frac{P2}{\gamma} + \frac{v2^2}{2g} + \sum hl + \sum hm$$

Dónde: Z= elevación (L), P= presión (M/LT²), γ = peso específico del fluido (M/L²T²), V= velocidad (L/T), g= aceleración de la gravedad (L/T²), hp= cabeza añadida en las bombas (L), hL= pérdida de carga en las tuberías (L) y hm= pérdidas menores (L).

Lo que nos dice es que la energía entre dos puntos de la red es igual a las ganancias de energía en las bombas y las pérdidas de energía de los accesorios y tuberías, que se generan al transportar el agua por el sistema.

Perdida de carga:

La pérdida de carga en tuberías se da debido a la fricción, se puede calcular a partir de tres formulas diferentes:

- Hazen Williams: No puede ser usada en otro líquido que no sea agua y s usada en flujos turbulentos.
- Darcy-Weisbach: Es la más usada ya que aplica a todos los regímenes y todos los fluidos
- Chezy-Manning: Es utilizada para canales y tuberías de gran diámetro

Lo que tienen en común las tres es que emplean la misma ecuación para obtener la pérdida de carga entre el nodo de entrada y salida.

Ecuación 3 Perdida de carga entre nodos

$$hl = Aq^B$$

Donde hL = pérdida de carga, q = caudal, A = coeficiente de resistencia, B = exponente de caudal:

Tabla 1 Fórmulas de pérdida de carga en una tubería llena

Fórmula	Coefficiente de Resistencia (A)	Exponente de Caudal (B)
Hazen-Williams	$10.674 C^{-1.852} d^{-4.871} L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0827 f(\epsilon, d, Q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$10.294 n^2 d^{-5.33} L$	2

donde:
 C: coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams
 ϵ : coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (m)
 f: factor de fricción (depende de ϵ , d y Q)
 n: coeficiente de rugosidad de Manning
 d: diámetro de la tubería (m)
 L: longitud de la tubería (m)
 Q: caudal (m³/s)

Nota. Adaptado de (García, 2006)

El coeficiente de rugosidad también cambia dependiendo de la formula y debe determinarse de forma empírica como muestra la siguiente tabla:

Tabla 2 Coeficientes de rugosidad para tuberías nuevas (García, 2006)

Material	C Hazen-Williams (universal)	ϵ Darcy-Weisbach (mm)	n Manning (universal)
fundición	130 – 140	0.26	0.012 – 0.015
hormigón	120 – 140	0.3 – 3.0	0.012 – 0.017
hierro galvanizado	120	0.15	0.015 – 0.017
plástico	140 – 150	0.0015	0.011 – 0.015
acero	140 – 150	0.045	0.015 – 0.017
cerámica	110	0.3	0.013 – 0.015

Nota. Adaptado de (García, 2006)

Perdidas menores:

Las pérdidas menores se presentan debido al incremento en la turbulencia, como consecuencia de los cambios de dirección en los codos y accesorios. El valor de la pérdida es acumulado al multiplicar el coeficiente de pérdidas menores con la energía cinética de entrada.

Ecuación 4 Pérdidas menores

$$hL = K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Donde K= coeficiente de pérdidas menores, v= velocidad de flujo.

Tabla 3 Coeficientes de pérdidas menores para diferentes accesorios de una red de agua potable

Conectores	Coefficiente de pérdidas
Válvula de Globo, totalmente abierta	10
Válvula de Ángulo, totalmente abierta	5
Válvula de Retención de Clapeta, totalmente abierta	2.5
Válvula de Compuerta, totalmente abierta	0.2
Válvula de Compuerta, ¼ cerrada	0.3
Válvula de Compuerta, ½ cerrada	2.1
Válvula de Compuerta, ¾ cerrada	17
Codo de radio pequeño	0.9
Codo de radio medio	0.8
Codo de radio Grande	0.6
Codo de 45°	0.4
Codo cerrado con inversión de flujo	2.2
Te estándar- dirección de paso	0.6
Te estándar- dirección de desvío	1.8
Entrada Recta	0.5
Salida Brusca	1
Expansión 20°	0.02
Expansión 60°	0.07
Contracción 20° (d/D = 0.2)*	0.3
Contracción 20° (d/D = 0.6)*	0.15

* D = diámetro mayor, d= diámetro menor

Nota. Adaptado de (Rossman L. A., 2000)

5.1.3.4. Método del gradiente hidráulico. El método del gradiente es usado para el cálculo de redes de distribución de aguas, se basa en el hecho de que al tener un fluido permanente este debe cumplir las ecuaciones de conservación de masa en cada uno de sus nodos y la ecuación de conservación de energía en cada uno de los circuitos de la red. Por consiguiente, debe haber una relación no lineal entre las pérdidas por fricción y el caudal para cada una de las tuberías de la red.

Ecuación 5 Ecuación de conservación de masa y energía en tuberías

$$\sum_{i=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{di} + Q_{ei} = 0$$

Donde NT es el número total de tuberías, Q_{di} el caudal que sale, Q_{ei} el caudal que entra y Q_{ij} el caudal que pasa por el nodo i y se dirige a j .

Si se tienen en cuenta pérdidas menores y la existencia de bombas en algunas tuberías, la ecuación toma la siguiente forma general, válida para toda la red.

Ecuación 6 Ecuación de conservación de masa y energía en tuberías en caso de tener pérdidas menores

$$h_i = \alpha Q_i^n + \beta Q + \gamma$$

Donde n es el exponente que depende de la ecuación de fricción utilizada en este caso Darcy – Weisbach, α , β y γ son los parámetros característicos de la tubería, válvula y las bombas.

5.1.3.5. Modelo de calidad. Los modelos de calidad determinan la evolución de los parámetros de calidad de agua desde la planta de tratamiento hasta los hogares de los usuarios donde se debe verificar que cumplan los parámetros establecidos por la normativa. Estos establecen el comportamiento de los parámetros de calidad en toda la red con el fin de verificar los niveles de concentración, presentan una gran variedad de aplicaciones como lo son, un análisis dinámico de los contaminantes y sustancias, modelos de desinfección, optimización de calidad, todo esto gracias a procesos físicos y químicos que trabaja el modelo como lo son, transporte, intensidad de la sustancia, decaimiento e incremento a través del tiempo de la concentración.

La gran ventaja que presentan estos modelos es el poder determinar la concentración y el recorrido de la sustancia modelada, en todos los puntos de la red en cualquier tiempo que se desee, este cálculo para sustancias como flúor o cloro.

5.1.3.5.1. Tasa de concentración de reactivos. *Las reacciones que se presentan en los sistemas se catalogan en tres órdenes cero, primero y segundo en los que se modelan los procesos químicos que ocurren en toda la red, se realizan mediante leyes matemáticas leyes y fundamentos matemáticos con las cuales se obtienen ecuaciones lineales que funcionan como identificadores de orden al que pertenecen los reactivos.*

Tabla 4 Transformaciones lineales de las ecuaciones de velocidad para los diferentes ordenes

Orden de reacción	Orden cero	Primer orden	Segundo orden
Ecuación			
Ecuación de velocidad	$R = k$	$R = k[A]$	$R = k[A]^2$
Integración	$[A]_0 - [A]_t = kt$	$\ln \frac{[A]_t}{[A]_0} = -kt$	$\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0} = kt$
Forma lineal	$[A]_t = -kt + [A]_0$ $y = mx + b$	$\ln[A]_t = -kt + \ln[A]_0$ $y = mx + b$	$\frac{1}{[A]_t} = kt + \frac{1}{[A]_0}$ $y = mx + b$
Datos para la gráfica	$y = [A]$ $x = \text{tiempo}$ $m = -k$	$y = \ln[A]$ $x = \text{tiempo}$ $m = -k$	$y = \frac{1}{[A]}$ $x = \text{tiempo}$ $m = k$

Nota. Adaptado de (Brown, 2015)

5.1.3.5.2. Modelación de reacciones químicas. El agua presente en las redes de distribución durante el transporte es sometida a procesos físicos y químicos, la mayoría de los cuales no se puede modelar sin embargo los procesos químicos más importantes para los procesos de decaimiento de cloro libre son la reacción de Bulk y la reacción de Wall.

A. Reacción de Bulk (Kb)

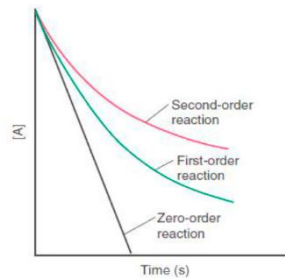
Estas reacciones están presentes en el interior del fluido, teniendo en cuenta su orden se puede identificar su comportamiento, si el resultado de la ecuación es positivo quiere decir que se esta produciendo una reacción y si por el contrario es negativo se está generando una reacción de desintegración.

Ecuación 7 Reacción de Bulk

$$Rc = \pm Kb * c^n$$

Donde Rc= velocidad de reacción, Kb= coeficiente de velocidad de reacción, C=concentración, n= orden.

Figura 5 Tendencia de concentración vs tiempo en los tres órdenes



Nota. Adaptado de (Walski, 2001)

El modelo más común de decaimiento de cloro es el de orden uno con una reacción de desintegración 0.

Ecuación 8 Decaimiento de la concentración en el tiempo

$$C_t = C_0 * e^{-K_b * t}$$

Donde C_t = concentración en un tiempo, C_0 = concentración inicial, K_b = coeficiente de velocidad de reacción.

B. Reacción de Wall (Kw)

Esta reacción está presente en las paredes de la tubería y toma como base la influencia por el contacto del agua con el área de pared, la reacción es directamente proporcional a la concentración del reactivo.

Ecuación 9 Reacción de Wall

$$R_c = \frac{A}{V} * K_w * C^n$$

Dónde: $R(C)$ = velocidad de reacción, A/V = área superficial por unidad de volumen dentro de la tubería, K_w = Coeficiente de la velocidad de reacción de la pared del tubo, C = Concentración, n = orden de reacción.

5.2. Marco conceptual

5.2.1. Agua Potable

Es aquella agua que podemos consumir o beber sin que se vea comprometida la salud del individuo. esta no debe contener ningún tipo de sustancia contaminante o microorganismos patógenos. Para lograr esto se emplea un tratamiento en un sistema potabilizador que garantiza las condiciones adecuadas para la distribución a los consumidores.

5.2.2. Cloración

Es un método de desinfección el cual funciona mediante la introducción de productos clorados como el cloro, hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio en el agua pretratada, de esta forma eliminando patógenos o microorganismos presentes en esta, la mayor ventaja de este sistema es que no solo funciona como desinfectante primario, sino que también se puede usar como desinfectante secundario que seguirá actuando durante un prolongado periodo de tiempo de esta forma garantizando la calidad del agua y previniendo de un futuro crecimiento patógeno, sus principales características son:

- Amplia acción germicida
- No requiere de una alteración en la temperatura para inhabilitar patógenos
- Fácil aplicación y económicamente muy sustentable
- No constituye un riesgo para la salud humana o animal
- Protege el agua durante el proceso de distribución

5.2.3. Tuberías

Son conductos cilíndricos huecos que tienen como finalidad el transporte de una determinada demanda de agua a los usuarios y se pueden clasificar según su propósito y su material.

Según su propósito:

- Alimentador primario: Son tuberías de gran tamaño que se encargan del transporte de agua potable desde la planta a la red de distribución.
- Alimentadores secundarios: Son tuberías de menor tamaño que se conectan al alimentador primario para transportar el agua a lo largo de las calles.
- Red de distribución: Conducen el agua de los alimentadores a calles individuales

Según su material:

- PVC: Están compuestas por cloruro de polivinilo no plastificado, tienen como ventajas que es un material ligero, de fácil instalación y presentan una muy buena resistencia a presiones sin embargo su mayor ventaja es la ausencia de incrustaciones internas.
- Cobre: Es uno de los materiales más usados en conexiones domiciliarias y su principal característica es su gran resistencia a presiones altas, su desventaja es su elevado costo.

5.2.4. Tanque de almacenamiento

Es una estructura destinada al almacenamiento de agua, con el propósito de satisfacer la demanda del sistema en el que se esté trabajando y puede almacenar agua antes o después de su tratamiento. Sus funciones son muchas, pero las principales son el cumplir con el tiempo de residencia de cloro para la desinfección, mantener presión en el sistema, proporcionar un flujo pico y nivelar la demanda de bombeo de manera que no se tengan que usar bombas las 24 horas del día.

5.2.5. Bombas

Son máquinas que transforman energía, aplicándola para mover agua, por lo general el sistema más usado es el de bombas volumétricas.

5.2.6. Válvulas

Es un instrumento que se encarga de la regulación y control del agua dependiendo de su diseño y material estas pueden abrir, cerrar, conectar, desconectar, regular, modular o aislar el fluido que se esté manejando.

5.2.7. Contaminantes

En las aguas residuales se pueden encontrar gran cantidad de agentes contaminantes de los cuales se pueden destacar los siguientes debido a su gran afectación en las redes y en la sociedad:

Petróleo: Este agente contaminante según informes con tan solo una gota puede contaminar 25 litros de agua.

Gasolina: uno de los mayores contaminantes que no solo afecta ríos y mares sino esta sustancia química puede dañar el suelo y subsuelo.

6. Metodología

Este proyecto contará con una metodología mixta ya que en esta se van a plantear resultados y procedimientos numéricos e ingenieriles para la obtención de datos y el posterior tratamiento de los mismos a través de herramientas como Excel y EPANET, pero a su vez va a tener una serie de factores cualitativos como lo son el análisis actual de la red, el estado actual del agua, entre otros.

Tabla 5 Metodología

Objetivo	Actividad	Descripción	Actores
Recopilar información topológica, planos de redes existentes para el desarrollo de un nuevo modelo.	<ul style="list-style-type: none"> ● Obtención de información actual del municipio ● Realizar un levantamiento topográfico en el municipio. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se debe solicitar la información que se tenga del sistema actual como lo son el plano de redes, y análisis que se tengan del agua, y con ayuda de un dispositivo GPS realizar un replanteo del municipio. ● Con el software EPANET elaborar alternativas viables que suplan las falencias actuales ● Con la ayuda de una herramienta GPS realizar un levamiento topográfico general del municipio 	<ul style="list-style-type: none"> ● Empresa de alcantarillado del municipio del Castillo
Elaborar una alternativa de diseño más apropiada y eficiente que supla las necesidades locales mediante el uso de software EPANET.	<ul style="list-style-type: none"> ● Selección de la mejor alternativa de diseño. ● Análisis y mejora de la alternativa seleccionada 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se realizará una evaluación preliminar de las alternativas planteadas y entre estas se verá cual es la que mejores resultados brinda ● Se harán más pruebas y además de esto mejoras pertinentes a la alternativa seleccionada para presentar un diseño de calidad que de solución a los problemas presentados 	
Cumplir con las normas vigentes para el diseño y de esta forma cumplir las especificaciones técnicas.	<ul style="list-style-type: none"> ● Demostrar que todo lo elaborado cumpla las especificaciones dadas por el gobierno 	<ul style="list-style-type: none"> ● Cumplir con todas las recomendaciones brindadas por la RAS 2000 y la resolución 0330 para lo que respecta a la res hidráulica y en lo que respecta a la calidad del agua cumplir la normativa IRCA presente en la resolución 2115 y los parámetros brindados por la resolución 0631 	

Tabla 5 Continuación

Elaborar un estudio de calidad de agua y conforme a los resultados brindar diferentes soluciones	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de un análisis de los estudios de calidad suministrados • Realizar un estudio propio con una muestra • Estudiar los resultados obtenidos y brindar soluciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Con los estudios obtenidos por la empresa municipal se pretende hacer un análisis y ver en qué estado se está brindando el agua a los consumidores • Con una muestra del agua servida realizar un estudio propio con los laboratorios de la Universidad • Comparar los resultados obtenidos con los dados por la compañía, hacer un análisis de resultados y conforme a esto plantear soluciones para los problemas que pueda presentar el agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Empresa de alcantarillado del municipio del Castillo • Universidad Santo Tomas
--	---	---	---

6.1. Recopilación de información

Como primera etapa del proyecto se realizó una recopilación de datos en el municipio donde se realizó una inspección visual el municipio y las instalaciones del acueducto, recabando información de los tanques y el suministro de agua que presenta el municipio.

Figura 6 Instalaciones del acueducto del Castillo Meta.



En estas instalaciones también se obtuvo la información de las planillas de seguimiento las cuales sirvieron para la elaboración de la curva horaria para la distribución de agua.

Figura 7 Ejemplo de planilla de seguimiento horaria del acueducto.

DEL CASTILLO S.A. E.S.P.		EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS COMBUSTIBLES DEL CASTILLO S.A. E.S.P.										Código: FAC-03						
CONTROL DIARIO DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN												Fecha: 07						
Página: 1 de 1																		
FECHA: 24 - Mayo - 2021																		
AGUA CRUDA			AGUA TRATADA (DARLA DE PRISA)					CANTIDAD DE AGUA				DISEÑO DE MEDICIÓN (L/min)				PRESENCIA DE MEDICIÓN (L/min)		MANTENIMIENTO DE PLANTA
Horario	Temperatura	pH	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro	Cloro
07:00	25	7.4					7.2	0.85	230	700	30	3	4	20%	10%	20%		
08:00	20	7.3					7.2	0.71	225	200	30	2	4	20%	10%	20%		7 y c
09:00	20	7.5					7.2	1.04	110	110	30	2	4	20%	15%	20%		
10:00	20	7.5					7.2	1.10	120	110	30	2	4	20%	15%	20%		
11:00	25	7.4					7.2	0.98	160	090	30	2	4	20%	15%	20%		
12:00	25	7.3					7.2	1.12	120	000	30	2	4	20%	15%	20%		3 y c
13:00	10	7.21					7.2	1.07	005	000	30	2	4	20%	15%	20%		
14:00	5	7.4					7.2	1.00	110	030	30	2	4	20%	15%	20%		1-2
15:00	5	7.4					7.2	0.87	150	040	30	2	4	20%	15%	20%		
16:00	10	7.4					7.2	0.90	140	050	30	2	4	20%	15%	20%		
17:00	10	7.4					7.2	0.85	110	110	30	2	4	20%	15%	20%		

Se pudo evidenciar como el equipo de cloración usado en la planta es rudimentario pero efectivo, realizando una adición de cloro a 8ml/min.

Figura 8 Equipo de cloración del municipio el Castillo



Con el colorímetro suministrado por la empresa de aguas del castillo se procedió a realizar una inspección tanto en la planta como en varios puntos de muestreo que tiene el municipio para la evaluación periódica del agua.

Figura 9 Puntos de estudio de cloro residual.



El proceso a realizar fue realizado con ayuda de un clorímetro con pastas de DPD para obtener la correcta medición de cloro que se presencian en los diferentes puntos.

Figura 10 Equipo utilizado para la toma de muestras

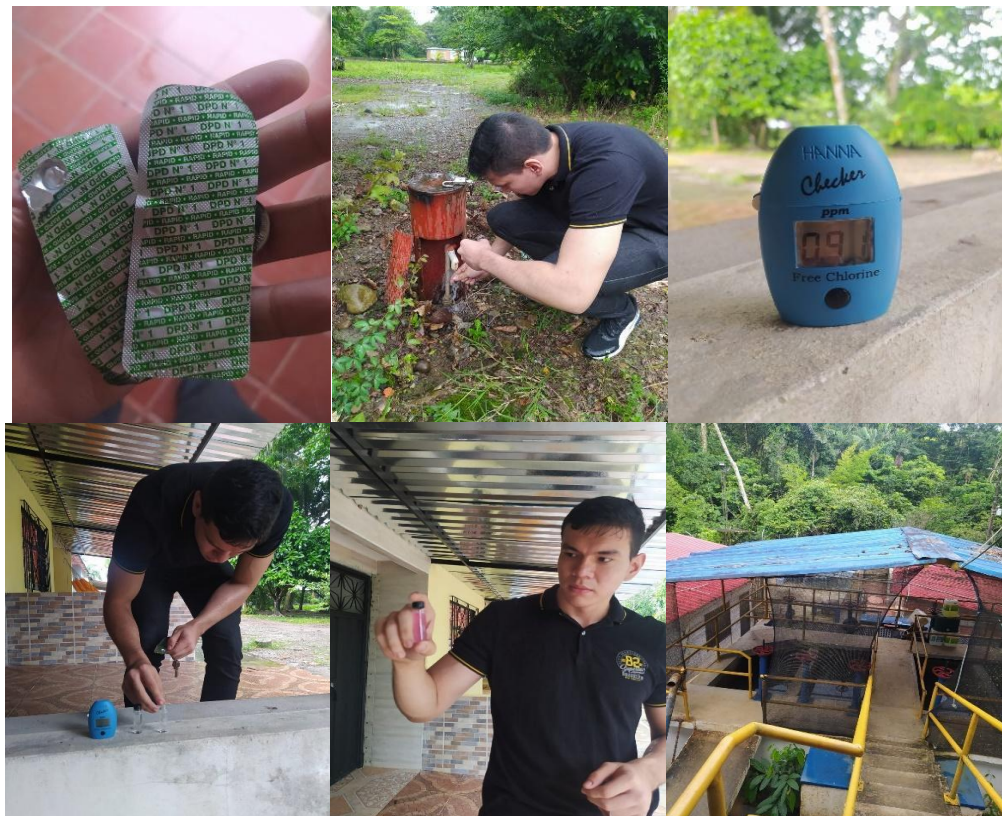


Tabla 6 Resultados obtenidos en los puntos de muestreo

Punto	Resultado obtenido "PPM"
Planta	1,06
P1	0,91
P2	0,85
P3	0,78

6.2. Curva horaria y caudal medio diario.

Con los datos suministrados por las planillas diarias se pudo realizar una serie de tablas con los valores suministrados para hacer una serie de tablas comparando las alturas que se registraron en el tanque en estas fechas, este procedimiento se realizó con 6 días diferentes para de esta forma poder obtener una tabla promedio.

Tabla 7 Ejemplo tabla de registro diario de alturas en el tanque

Día 1			
Hora	Altura 1	Altura 2	Diferencia
2:00	170	160	10
4:00	210	200	10
6:00	200	190	10
8:00	198	180	18
10:00	120	110	10
12:00	80	70	10
14:00	45	40	5
16:00	30	20	10
18:00	45	40	5
20:00	80	75	5
22:00	100	90	10
0:00	110	100	10

Posteriormente teniendo las diferencias promedio por horas se procedió a calcular los caudales usados en estas horas “educación 5”, después calculando los respectivos coeficientes horarios “ecuación 6” para posteriormente tener la gráfica de curva horaria.

Ecuación 10 cálculo de caudales con diferencia de alturas en el tanque

$$Q = \Delta_{promalturas} * Volumen * 0.36$$

Ecuación 11 Coeficiente horario

$$Cf = \frac{Q_{max}}{Q}$$

Tabla 8 Promedio de resultados obtenidos y resultados de coeficientes horarios

PROMEDIO			
Hora	Δ Alturas	Caudal Promedio	Coefficiente
2:00	9,17	397,86	0,59
4:00	10,00	434,03	0,65
6:00	11,17	484,66	0,72
8:00	15,50	672,74	1,00
10:00	10,00	434,03	0,65
12:00	10,83	470,20	0,70
14:00	6,67	289,35	0,43
16:00	10,83	470,20	0,70
18:00	6,67	289,35	0,43
20:00	8,33	361,69	0,54
22:00	10,00	434,03	0,65
0:00	10,00	434,03	0,65

Figura 11 Curva de variación horaria.



Teniendo en cuenta la información básica del municipio como lo es altura sobre el nivel del mar, clima, número de habitantes se pudo llevar a cabo el desarrollo de la dotación necesaria el cálculo del caudal medio diario calculando una dotación residencial de 147368 L/habitante/día.

Tabla 9 Cálculo de dotación y caudal diario.

MUNICIPIO	EL CASTILLO META
ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	135
CLIMA	Cálido
CANTIDAD DE POBLACIÓN	5571
PERDIDAS EN EL SISTEMA (%)	5
¿TURÍSTICO?	NO

TIPO DE INSTALACIÓN	CANTIDAD				DOTACIÓN BRUTA	Qmd [L/s]
Residencial	5571	Habitantes	Área		147,368 [L/habitante/día]	9,5022
Banco	1	Bancos	120	m2	21,053 [L/m2/día]	0,0292
Oficinas	12	Oficinas	12	m2	21,053 [L/m2/día]	0,0351
Locales comerciales	20	locales	20	m2	6,316 [L/m2/día]	0,0292
Mercados	5	locales			105,263 [L/local/día]	0,0061
Lavanderías de autoservicio	0	kilos de ropa seca			42,105 [L/kilo de ropa seca]	0,0000
Clubes deportivos y servicios privados	0	asistentes			157,895 [L/asistente/día]	0,0000
Cines y teatros	0	asistentes			6,316 [L/asistente/día]	0,0000
Industrias donde se manipulen materiales y sustancias que ocasionen desaseo	0	trabajadores	1	# jornadas	105,263 [L/trabajador/jornada]	0,0000
Otras industrias	0	trabajadores	2	# jornadas	31,579 [L/trabajador/jornada]	0,0000
Entretenimiento (teatros públicos)	0	asientos			6,316 [L/asiento/día]	0,0000
Deportes al aire libre, con baño y vestidores	0	asistentes			157,895 [L/asistente/día]	0,0000
Recreación social (Deportivos municipales)	0	asistentes			26,316 [L/asistente/día]	0,0000
Educación elemental	250	alumnos	1	# jornadas	21,053 [L/alumno/jornada]	0,0609
Educación media y superior	450	alumnos	1	# jornadas	26,316 [L/alumno/jornada]	0,1371
Hospitales, clínicas y centros de salud	10	camas			842,105 [L/cama/día]	0,0975
Orfanatos y asilos	0	huéspedes			315,789 [L/huésped/día]	0,0000

Tabla 9. Continuación

Cuarteles	45	personas		157,895	[L/persona/día]	0,0822
Cárceles	0	internos		157,895	[L/interno/día]	0,0000
Hoteles (1 a 3 estrellas)	50	cuartos		421,053	[L/cuarto/día]	0,2437
Hoteles (4 y 5 estrellas)	0	cuartos		789,474	[L/cuarto/día]	0,0000
Hoteles donde hay gran turismo	0	cuartos		1052,63 2	[L/cuarto/día]	0,0000
					Σ Qmd	10,223
					[L/s]	2

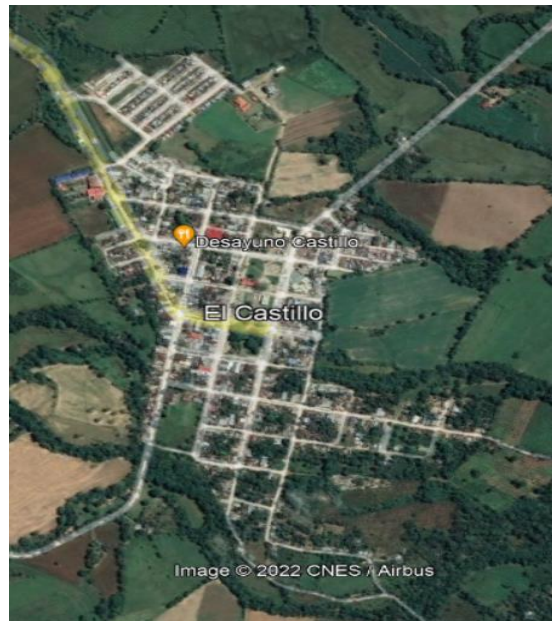
6.3. Modelación de la red

Después de recolectada la información, los datos son ingresados a EPANET. En a continuación, se presentan los siguientes pasos para realizar la primera simulación hidráulica, este proceso se realizó usando un plano de redes suministrado por la empresa de aguas del castillo y la herramienta Google Earth para delimitar las áreas faltantes.

Figura 12 Plano de redes suministrado por la empresa de agua del Castillo



Figura 13 Imagen satelital del municipio obtenida por Google Earth



La red se realizó en EPANET y se graficó las piezas faltantes como: el tanque de almacenamiento. Luego se nombraron las etiquetas de identificación (nodos, tuberías, y tanque) en el orden deseado.

Figura 14 Imagen del sistema de redes elaborado en EPANET

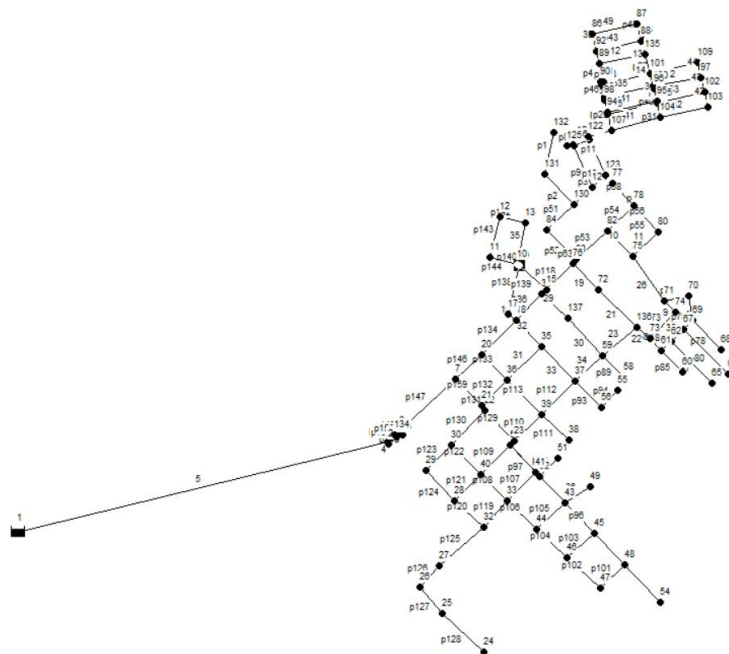


Tabla 10 Tabla de nodos

Network Table - Nodes							
Node ID	Elevation m	Node ID	Elevation m	Node ID	Elevation m	Node ID	Elevation m
Junc 132	349	Junc 91	348	Junc 58	349	Junc 27	350
Junc 131	349	Junc 90	348	Junc 57	350	Junc 26	350
Junc 130	349	Junc 89	350	Junc 56	349	Junc 25	350
Junc 129	348	Junc 88	350	Junc 55	350	Junc 24	349
Junc 128	349	Junc 87	350	Junc 54	349	Junc 23	350
Junc 127	350	Junc 86	349	Junc 53	350	Junc 22	350
Junc 126	350	Junc 84	349	Junc 52	350	Junc 21	350
Junc 125	350	Junc 83	349	Junc 51	349	Junc 20	349
Junc 124	349	Junc 82	349	Junc 49	350	Junc 19	349
Junc 123	349	Junc 81	350	Junc 48	349	Junc 18	349
Junc 122	349	Junc 80	350	Junc 47	350	Junc 17	350
Junc 115	348	Junc 79	350	Junc 46	349	Junc 16	349
Junc 109	348	Junc 78	350	Junc 45	350	Junc 15	350
Junc 108	349	Junc 77	349	Junc 44	350	Junc 14	350
Junc 107	350	Junc 76	349	Junc 43	350	Junc 13	350
Junc 106	349	Junc 75	349	Junc 42	350	Junc 12	350
Junc 105	350	Junc 74	350	Junc 41	350	Junc 11	350
Junc 104	349	Junc 73	350	Junc 40	349	Junc 10	350
Junc 103	350	Junc 72	350	Junc 39	349	Junc 7	350
Junc 102	350	Junc 71	350	Junc 38	349	Junc 6	350
Junc 101	349	Junc 70	350	Junc 37	350	Junc 5	350
Junc 100	350	Junc 69	350	Junc 36	350	Junc 4	350
Junc 99	349	Junc 68	348	Junc 35	350	Junc 3	348
Junc 98	350	Junc 67	348	Junc 34	350	Junc 2	349
Junc 97	350	Junc 66	348	Junc 33	350	Junc 133	349
Junc 96	348	Junc 65	350	Junc 32	350	Junc 134	349
Junc 95	350	Junc 62	349	Junc 31	350	Junc 135	350
Junc 94	349	Junc 61	350	Junc 30	350	Junc 136	350
Junc 93	350	Junc 60	349	Junc 29	349	Junc 137	350
Junc 92	350	Junc 59	350	Junc 28	350	Resvr 1	426

Tabla 11 Diámetros de tuberías.

TUBERIAS							
Link ID	Diametro (mm)	Link ID	Diametro (mm)	Link ID	Diametro (mm)	Link ID	Diametro (mm)
Pipe p1	76.2	Pipe p52	101.6	Pipe p108	101.6	Pipe p146	101.6
Pipe p2	76.2	Pipe p53	101.6	Pipe p109	101.6	Pipe p147	101.6
Pipe p3	76.2	Pipe p54	101.6	Pipe p110	101.6	Pipe p148	101.6
Pipe p4	76.2	Pipe p55	101.6	Pipe p111	76.2	Pipe p149	101.6
Pipe p5	76.2	Pipe p56	101.6	Pipe p112	76.2	Pipe p150	101.6
Pipe p6	76.2	Pipe p57	101.6	Pipe p113	101.6	Pipe p157	101.6
Pipe p7	76.2	Pipe p58	101.6	Pipe p118	101.6	Pipe p158	101.6
Pipe p8	76.2	Pipe p63	101.6	Pipe p119	101.6	Pipe p159	101.6
Pipe p9	76.2	Pipe p73	101.6	Pipe p120	101.6	Pipe 1	76.2

Tabla 11. Continuación

Pipe p10	76.2	Pipe p76	101.6	Pipe p121	101.6	Pipe 2	76.2
Pipe p11	76.2	Pipe p77	101.6	Pipe p122	101.6	Pipe 3	76.2
Pipe p12	76.2	Pipe p78	76.2	Pipe p123	101.6	Pipe 4	101.6
Pipe p27	76.2	Pipe p79	76.2	Pipe p124	101.6	Pipe 5	203
Pipe p28	76.2	Pipe p80	76.2	Pipe p125	101.6	Pipe 9	101.6
Pipe p29	76.2	Pipe p84	76.2	Pipe p126	101.6	Pipe 10	101.6
Pipe p30	76.2	Pipe p85	76.2	Pipe p127	101.6	Pipe 11	101.6
Pipe p31	76.2	Pipe p86	101.6	Pipe p128	101.6	Pipe 12	76.2
Pipe p32	76.2	Pipe p89	76.2	Pipe p129	101.6	Pipe 13	76.2
Pipe p33	76.2	Pipe p93	76.2	Pipe p130	101.6	Pipe 14	76.2
Pipe p35	76.2	Pipe p94	76.2	Pipe p131	101.6	Pipe 15	101.6
Pipe p36	76.2	Pipe p96	101.6	Pipe p132	101.6	Pipe 19	101.6
Pipe p40	76.2	Pipe p97	101.6	Pipe p133	101.6	Pipe 21	101.6
Pipe p41	76.2	Pipe p98	76.2	Pipe p134	101.6	Pipe 22	101.6
Pipe p43	76.2	Pipe p101	101.6	Pipe p136	101.6	Pipe 23	101.6
Pipe p44	76.2	Pipe p102	101.6	Pipe p138	76.2	Pipe 26	101.6
Pipe p45	76.2	Pipe p103	101.6	Pipe p139	76.2	Pipe 29	101.6
Pipe p46	76.2	Pipe p104	101.6	Pipe p140	76.2	Pipe 30	101.6
Pipe p48	76.2	Pipe p105	101.6	Pipe p142	76.2	Pipe 31	101.6
Pipe p49	76.2	Pipe p106	101.6	Pipe p143	76.2	Pipe 32	101.6
Pipe p51	101.6	Pipe p107	101.6	Pipe p144	76.2	Pipe 44	76.2
Pipe 33	101.6	Pipe 36	76.2	Pipe 39	76.2	Pipe 42	76.2
Pipe 34	76.2	Pipe 37	76.2	Pipe 40	101.6	Pipe 43	76.2
Pipe 35	76.2	Pipe 38	76.2	Pipe 41	76.2	Pipe 44	76.2

Tabla 12 Ejemplo de caracterización de un nodo para obtener su caudal de demanda.

	Dotación neta		Canti dad	Área (m ²)	Habita ntes	Loca les	Ca ma	Dotación bruta	Caudal
RESIDENCIAL	130	[L/habitante/ día]	8		9			136,842	9852,63 158
MULTIFAMILIAR	130	[L/habitante/ día]			3			136,842	0
COLEGIO PRIMARIA	20	[L/alumno/fo rnada]			1926			21,053	0
COLEGIO	25	[L/alumno/fo rnada]			1798			26,316	0
OFICINAS	20	[L/m2/día]		12				21,053	0,00
LOCALES COMERCIALES	6	[L/m2/día]		20				6,316	0
MERCADOS	100	[L/local/día]				8		105,263	0
BANCO	6	[L/m2/día]		120				6,316	0
HOSPITAL	800	[L/cama/día]					15	842,105	0
HOTELES 1-3 ESTRELLAS	600	[L/cuarto/día]						631,579	0
HOTELES 4-5 ESTRELLAS	900	[L/cuarto/día]						947,368	0

Tabla 12. Continuación

CUARTELES	150	[L/persona/ día]			45			157,895	0
CALLES	2	[L/m2/día]		156					312
									10164, 6316

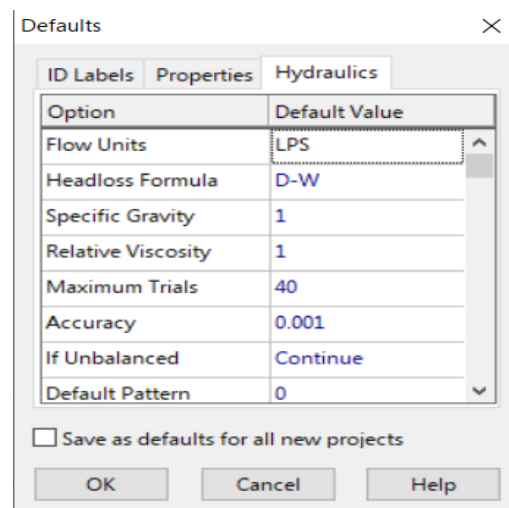
NODO 38

Caudal de demanda	0,1176 462	l/s
----------------------	---------------	-----

6.4. Calibración del modelo de presión

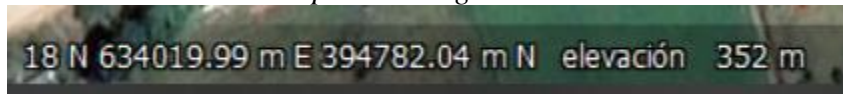
Una vez elaborado todo el sistema se procedió al ingreso de los datos de cada uno de los elementos que la componen, lo primero que se tiene que tener en cuenta es que todo el proyecto se trabajó en sistema internacional de unidades y usando las ecuaciones de Darcy Weisbach.

Figura 15 Propiedades con las que el proyecto va a ser simulado



Lo que respecta a los nodos se les tuvo que ingresar los datos de altura y demanda, para la altura se usó el software Google Earth viendo las elevaciones de cada uno de los puntos, que en la cabecera municipal se mantenían entre 348-352 metros sobre el nivel del mar.

Figura 16 Ejemplo de elevación del municipio en Google Earth



En cuanto a la demanda en cada uno de los nodos se tuvo que realizar un estudio de edificios aledaños usando Google Earth y la información suministrada por la empresa de aguas, de esta forma mediante una caracterización de cada uno de los nodos obtener el caudal de demanda de cada uno de ellos.

Figura 17 Ejemplo de datos suministrados a los nodos en EPANET

Junction 38	
Property	Value
*Junction ID	38
X-Coordinate	1031444.059
Y-Coordinate	885703.876
Description	
Tag	
*Elevation	350
Base Demand	0.117
Demand Pattern	
Demand Categorie	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	

Para las tuberías EPANET ya les asignaba un largo por lo que se les tuvo que adicionar un diámetro expresado en milímetros y una rugosidad respectiva, que en su mayor parte el sistema presenta un diámetro de 4 pulgadas y está compuesta de PVC.

Figura 18 Ejemplo de datos suministrados a las tuberías en EPANET

Pipe p147	
Property	Value
*Pipe ID	p147
*Start Node	7
*End Node	6
Description	
Tag	
*Length	179.7
*Diameter	101.6
*Roughness	0.0015
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	-1
Wall Coeff.	

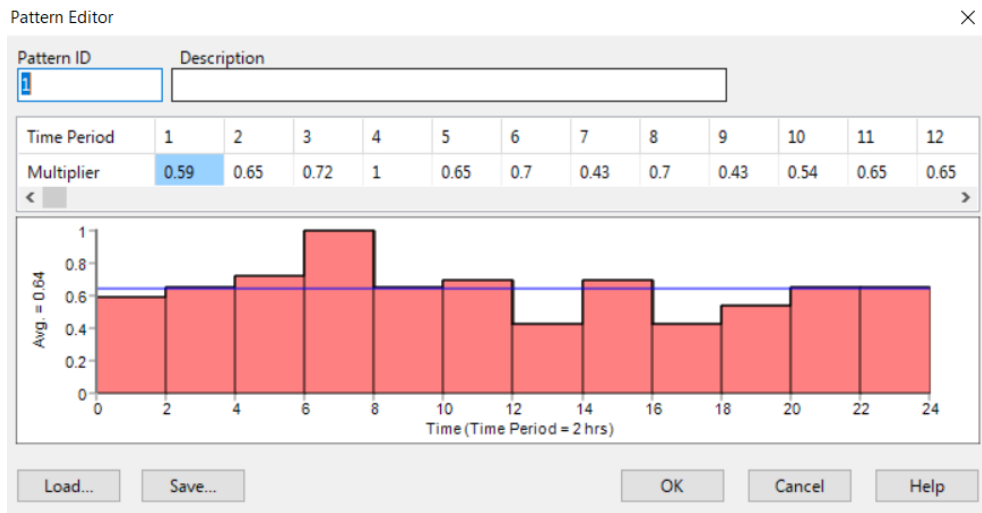
Para el tanque no se tuvo que ingresar mayor información solo su altura a nivel del mar que se tomó gracias a Google Earth, teniendo en cuenta las coordenadas tomadas en las instalaciones.

Figura 19 Ejemplo de datos suministrados al tanque en EPANET.

Reservoir 1	
Property	Value
*Reservoir ID	1
X-Coordinate	1030143.274
Y-Coordinate	885485.124
Description	
Tag	
*Total Head	426
Head Pattern	
Initial Quality	1
Source Quality	
Net Inflow	-11.81
Elevation	426.00
Pressure	0.00

Después de esto y agregar la curva horaria se realizó la simulación del programa.

Figura 20 Curva de variación horaria en EPANET.



Evidenciando que los resultados fueron muy favorables tanto en las presiones en los nodos ya que en ninguna hora se presentó una presión negativa, como en las tuberías que todas las velocidades son aceptables y no hay ningún dato muy inusual.

Figura 21 Simulación exitosa de la red en EPANET.

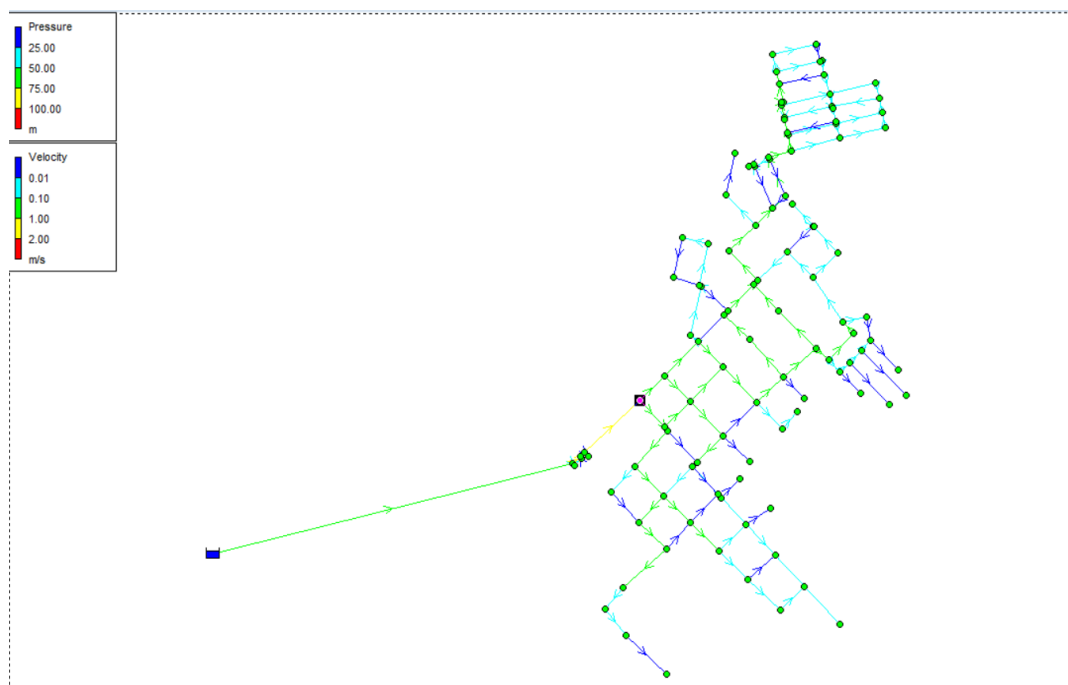


Tabla 13 Muestra de resultados de nodos en la simulación

Nodos							
Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc 132	0.05	402.77	53.77	Junc 80	0.06	403.24	53.24
Junc 131	0.05	402.77	52.77	Junc 79	0.04	403.24	53.24
Junc 130	0.05	402.78	52.78	Junc 78	0.05	403.24	53.24
Junc 129	0.35	402.55	52.55	Junc 77	0.10	403.24	54.24
Junc 128	0.01	402.37	52.37	Junc 76	0.09	403.26	54.26
Junc 127	0.05	402.37	52.37	Junc 75	0.12	403.25	54.25
Junc 126	0.04	402.37	52.37	Junc 74	0.07	403.44	53.44
Junc 125	0.06	402.37	52.37	Junc 73	0.12	403.47	53.47
Junc 124	0.05	402.37	52.37	Junc 72	0.11	403.62	53.62
Junc 123	0.04	402.37	52.37	Junc 71	0.09	403.43	53.43
Junc 122	0.02	402.36	52.36	Junc 70	0.07	403.43	53.43
Junc 115	0.34	400.68	50.68	Junc 69	0.18	403.43	53.43
Junc 109	0.06	400.64	50.64	Junc 68	0.05	403.43	53.43
Junc 108	0.07	400.65	51.65	Junc 67	0.06	403.43	53.43
Junc 107	0.07	400.72	50.72	Junc 66	0.07	403.43	54.43
Junc 106	0.09	400.71	51.71	Junc 65	0.02	403.46	53.46
Junc 105	0.07	400.69	50.69	Junc 62	0.03	403.46	54.46
Junc 104	0.06	400.69	51.69	Junc 61	0.02	403.46	53.46
Junc 103	0.07	400.69	50.69	Junc 60	0.05	403.46	54.46
Junc 102	0.09	400.68	50.68	Junc 59	0.34	405.76	55.76
Junc 101	0.06	400.61	51.61	Junc 58	0.04	405.76	56.76
Junc 100	0.15	400.61	50.61	Junc 57	0.03	411.34	61.34
Junc 99	0.13	400.60	51.60	Junc 56	0.05	411.33	62.33
Junc 98	0.11	400.60	50.60	Junc 55	0.26	411.33	61.33
Junc 97	0.63	400.61	50.61	Junc 54	0.16	419.37	70.37
Junc 96	0.11	400.61	52.61	Junc 53	0.03	419.38	69.38
Junc 95	0.06	400.60	50.60	Junc 52	0.03	419.38	69.38
Junc 94	0.06	400.60	51.60	Junc 51	0.05	419.38	70.38
Junc 93	0.11	400.61	50.61	Junc 49	0.05	419.30	69.30
Junc 92	0.12	400.63	50.63	Junc 48	0.50	419.28	70.28
Junc 91	0.09	400.64	50.64	Junc 47	0.08	419.28	69.28
Junc 90	0.26	400.64	50.64	Junc 46	0.08	419.29	70.29
Junc 89	0.04	400.61	50.61	Junc 45	0.04	419.29	69.29
Junc 88	0.07	400.62	50.62	Junc 44	0.30	419.30	69.30
Junc 87	0.06	400.62	50.62	Junc 43	0.23	419.30	69.30
Junc 86	0.07	400.62	50.62	Junc 42	0.04	419.33	69.33
Junc 84	0.07	402.99	52.99	Junc 41	0.05	419.33	69.33
Junc 83	0.20	403.24	53.24	Junc 40	0.02	419.37	69.37
Junc 82	0.06	403.24	53.24	Junc 39	0.06	419.40	69.40
Junc 81	0.04	403.24	53.24	Junc 38	0.04	419.40	69.40
Junc 37	0.06	419.40	69.40	Junc 17	0.09	419.09	69.09
Junc 36	0.46	419.42	69.42	Junc 16	0.01	419.08	70.08
Junc 35	0.08	417.47	67.47	Junc 15	0.08	419.08	69.08
Junc 34	0.05	403.38	53.38	Junc 14	0.08	419.08	69.08
Junc 33	0.05	419.31	69.31	Junc 13	0.08	419.05	69.05
Junc 32	0.00	419.31	69.31	Junc 12	0.07	419.05	69.05
Junc 31	0.04	419.34	69.34	Junc 11	0.07	419.05	69.05
Junc 30	0.04	419.45	69.45	Junc 10	0.09	419.05	69.05
Junc 29	0.05	419.45	69.45	Junc 7	0.32	419.97	69.97
Junc 28	0.04	419.45	69.45	Junc 6	0.05	423.41	73.41
Junc 27	1.02	419.26	69.26	Junc 5	0.02	423.41	73.41
Junc 26	0.06	419.26	69.26	Junc 4	0.02	423.70	73.70
Junc 25	0.06	419.26	69.26	Junc 3	0.01	424.17	74.17
Junc 24	0.07	419.26	69.26	Junc 2	0.00	424.17	74.17
Junc 23	0.07	419.55	69.55	Junc 133	0.05	424.17	74.17
Junc 22	0.06	419.55	69.55	Junc 134	0.05	424.17	74.17
Junc 21	0.24	419.56	69.56	Junc 135	0.06	400.61	50.61
Junc 20	0.34	419.48	69.48	Junc 136	0.05	404.04	54.04
Junc 19	0.38	419.17	69.17	Junc 137	0.03	404.56	54.56
Junc 18	0.04	403.38	53.38				

Tabla 14 Muestra de resultados de tuberías en la simulación.

Tuberías									
Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor
Pipe p1	-0.05	0.01	0.00	0.116	Pipe p55	-0.12	0.02	0.00	0.043
Pipe p2	-0.10	0.01	0.00	0.051	Pipe p56	0.19	0.02	0.01	0.029
Pipe p3	3.73	0.46	2.26	0.021	Pipe p57	0.15	0.02	0.00	0.000
Pipe p4	3.38	0.42	1.90	0.022	Pipe p58	0.10	0.01	0.00	0.053
Pipe p5	0.16	0.02	0.01	0.034	Pipe p63	-3.72	0.46	2.25	0.021
Pipe p6	0.11	0.01	0.00	0.000	Pipe p73	-1.16	0.14	0.29	0.028
Pipe p7	0.03	0.00	0.00	0.383	Pipe p76	0.10	0.01	0.00	0.051
Pipe p8	-0.03	0.00	0.00	0.383	Pipe p77	0.03	0.00	0.00	0.147
Pipe p9	0.01	0.00	0.00	0.498	Pipe p78	0.05	0.01	0.00	0.102
Pipe p10	-0.04	0.00	0.00	0.167	Pipe p79	-0.19	0.02	0.01	0.029
Pipe p11	-0.07	0.01	0.00	0.070	Pipe p80	0.07	0.01	0.00	0.077
Pipe p12	3.14	0.39	1.66	0.022	Pipe p84	-0.37	0.05	0.04	0.039
Pipe p27	-0.37	0.05	0.04	0.039	Pipe p85	0.05	0.01	0.00	0.110
Pipe p28	-1.79	0.22	0.62	0.025	Pipe p86	-0.44	0.05	0.05	0.037
Pipe p29	0.92	0.11	0.19	0.030	Pipe p89	0.04	0.00	0.00	0.129
Pipe p30	0.83	0.10	0.16	0.031	Pipe p93	0.31	0.04	0.03	0.041
Pipe p31	0.27	0.03	0.02	0.037	Pipe p94	0.26	0.03	0.02	0.036
Pipe p32	0.21	0.03	0.01	0.030	Pipe p96	-0.16	0.02	0.01	0.033
Pipe p33	0.48	0.06	0.06	0.036	Pipe p97	0.08	0.01	0.00	0.068
Pipe p35	0.24	0.03	0.01	0.032	Pipe p98	0.05	0.01	0.00	0.095
Pipe p36	0.11	0.01	0.00	0.000	Pipe p101	-0.50	0.06	0.07	0.036
Pipe p40	0.12	0.01	0.00	0.045	Pipe p102	-0.58	0.07	0.09	0.034
Pipe p41	0.06	0.01	0.00	0.079	Pipe p103	0.04	0.00	0.00	0.136
Pipe p43	-0.67	0.08	0.11	0.033	Pipe p104	-0.69	0.09	0.12	0.032
Pipe p44	-1.00	0.12	0.22	0.029	Pipe p105	0.28	0.03	0.02	0.038
Pipe p45	-1.09	0.13	0.26	0.029	Pipe p106	-1.27	0.16	0.34	0.028
Pipe p46	-1.35	0.17	0.37	0.027	Pipe p107	0.05	0.01	0.00	0.103
Pipe p48	-0.07	0.01	0.00	0.072	Pipe p108	-1.37	0.17	0.38	0.027
Pipe p49	-0.13	0.02	0.01	0.040	Pipe p109	-0.61	0.07	0.09	0.034
Pipe p51	-3.88	0.48	2.42	0.021	Pipe p110	-0.88	0.11	0.18	0.030
Pipe p52	-3.95	0.49	2.50	0.021	Pipe p111	0.04	0.00	0.00	0.139
Pipe p53	-0.42	0.05	0.05	0.038	Pipe p112	-0.06	0.01	0.00	0.096
Pipe p54	-0.08	0.01	0.00	0.059	Pipe p113	-1.04	0.13	0.24	0.029
Pipe 2	-0.21	0.03	0.01	0.030	Pipe 19	-1.32	0.16	0.36	0.027
Pipe 3	0.41	0.05	0.05	0.038	Pipe 21	-1.43	0.18	0.42	0.027
Pipe 4	0.10	0.01	0.00	0.049	Pipe 22	1.72	0.21	0.57	0.026
Pipe 5	12.52	0.39	0.71	0.019	Pipe 23	3.20	0.40	1.72	0.022
Pipe 9	-1.09	0.13	0.26	0.029	Pipe 26	-0.90	0.11	0.19	0.030
Pipe 10	0.41	0.05	0.05	0.038	Pipe 29	2.59	0.32	1.18	0.023
Pipe 11	0.37	0.05	0.04	0.039	Pipe 30	-2.62	0.32	1.20	0.023
Pipe 12	-0.04	0.00	0.00	0.110	Pipe 31	3.44	0.42	1.95	0.022
Pipe 13	0.56	0.07	0.08	0.034	Pipe 32	-3.18	0.39	1.70	0.022
Pipe 14	0.47	0.06	0.06	0.036	Pipe 33	6.54	0.81	6.13	0.019
Pipe 15	0.57	0.07	0.08	0.034	Pipe 34	6.20	0.76	5.57	0.019
Pipe p118	2.49	0.31	1.11	0.023	Pipe p143	0.17	0.02	0.01	0.030
Pipe p119	-0.05	0.01	0.00	0.126	Pipe p144	0.09	0.01	0.00	0.059
Pipe p120	-1.26	0.16	0.33	0.028	Pipe p146	-6.33	0.78	5.79	0.019
Pipe p121	-1.30	0.16	0.35	0.027	Pipe p147	-12.31	1.52	19.11	0.017
Pipe p122	-2.08	0.26	0.80	0.024	Pipe p148	0.02	0.00	0.00	0.000
Pipe p123	0.09	0.01	0.00	0.059	Pipe p149	-12.38	1.53	19.31	0.017
Pipe p124	0.04	0.00	0.00	0.139	Pipe p150	-12.40	1.53	19.37	0.017
Pipe p125	1.21	0.15	0.31	0.028	Pipe p157	0.10	0.01	0.00	0.059
Pipe p126	0.19	0.02	0.01	0.030	Pipe p158	0.05	0.01	0.00	0.000
Pipe p127	0.13	0.02	0.01	0.039	Pipe p159	-5.66	0.70	4.73	0.019
Pipe p128	0.07	0.01	0.00	0.075	Pipe 1	0.23	0.03	0.01	0.031
Pipe p129	-0.07	0.01	0.00	0.079	Pipe 35	-0.31	0.04	0.03	0.041
Pipe p130	2.21	0.27	0.89	0.024	Pipe 36	0.05	0.01	0.00	0.105
Pipe p131	-2.34	0.29	0.98	0.024	Pipe 37	0.02	0.00	0.00	0.268
Pipe p132	3.08	0.38	1.61	0.022	Pipe 38	0.32	0.04	0.03	0.041
Pipe p133	-1.86	0.23	0.66	0.025	Pipe 39	0.20	0.03	0.01	0.029
Pipe p134	4.14	0.51	2.71	0.021	Pipe 40	3.12	0.38	1.64	0.022
Pipe p136	0.04	0.00	0.00	0.147	Pipe 41	0.34	0.04	0.04	0.040
Pipe p138	0.48	0.06	0.06	0.036	Pipe 42	0.14	0.02	0.01	0.038
Pipe p139	0.08	0.01	0.00	0.068	Pipe 43	0.53	0.06	0.07	0.035
Pipe p140	0.39	0.05	0.05	0.040	Pipe 44	-0.31	0.04	0.03	0.041
Pipe p142	0.24	0.03	0.01	0.033					

6.5. Modelo de calidad

Posterior a la elaboración y evaluación del sistema de presiones y velocidades se procedió a la elaboración del modelo de calidad para esto EPANET presenta la herramienta de calidad de agua, se ingresaron los datos dados en las instalaciones de acueducto.

Figura 22 Datos de entrada para el sistema de calidad.

Property	Value
Parameter	Chemical
Mass Units	mg/L
Relative Diffusivity	1.06
Trace Node	
Quality Tolerance	0.01

Lo siguiente es identificar las opciones de reacción que ocurren en el análisis de la calidad del agua.

Figura 23 Cuadro de reacciones para el análisis de calidad.

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

La reacción de flujo es la potencia por la cual se eleva la concentración cuando calculamos la velocidad de la reacción en la corriente. 1 se usa para una reacción de primer orden y 2 para una reacción de segundo orden, estos mismos datos deben ser suministrados a todas las tuberías del sistema.

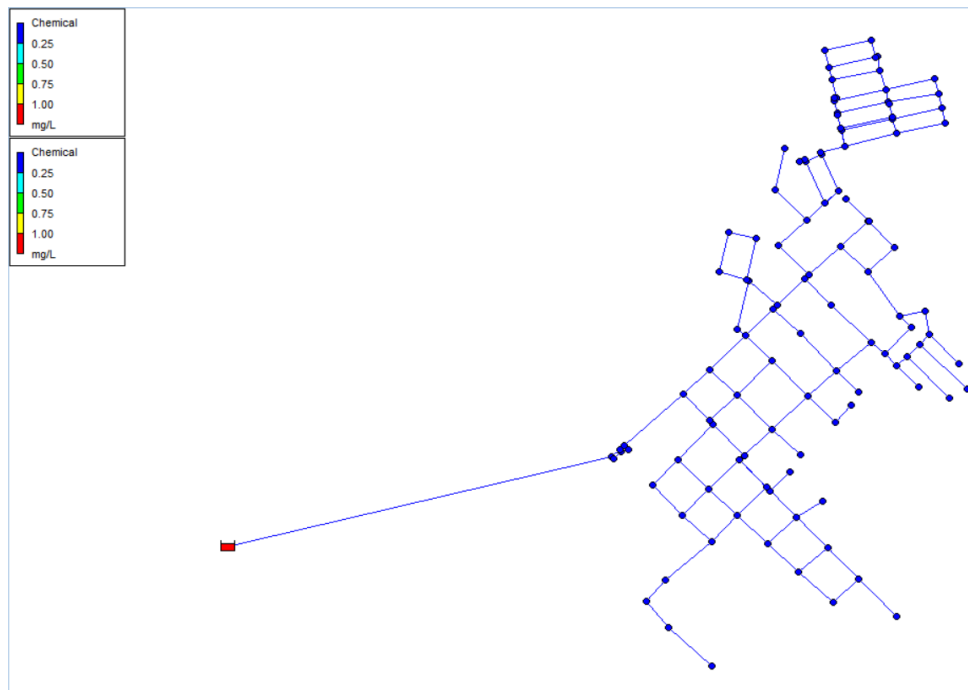
Se tiene que tener en cuenta que los objetos dentro de la red también afectan el agua, por esto mismo también se les tiene que asignar un valor como ya se mencionó en las tuberías este proceso se repite en el tanque.

Figura 24 Valor a ingresar en el tanque para el modelo de calidad.

Initial Quality	1
-----------------	---

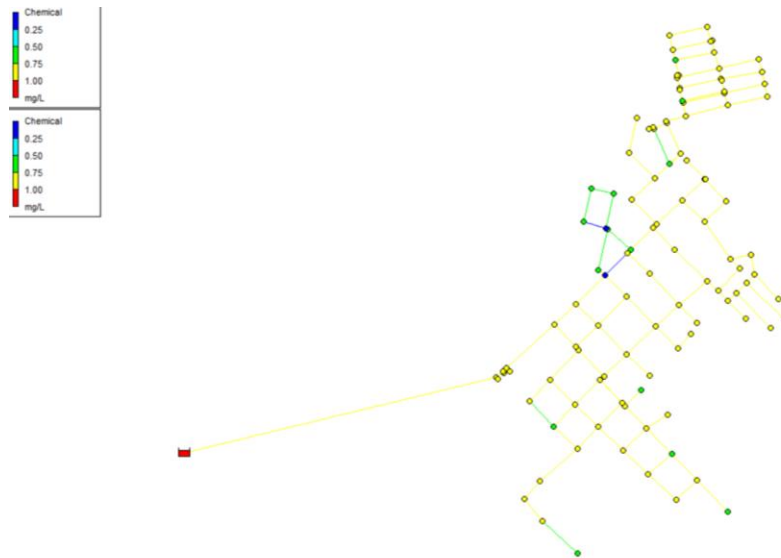
Después de esto se corre la simulación con el modelo de calidad, obteniendo una respuesta muy favorable del sistema presentando niveles de cloro residual que entran dentro de lo establecido en la normativa viendo el recorrido del cloro por el sistema a través del tiempo de ejecución.

Figura 25 Modelo de calidad en la hora 00:00.



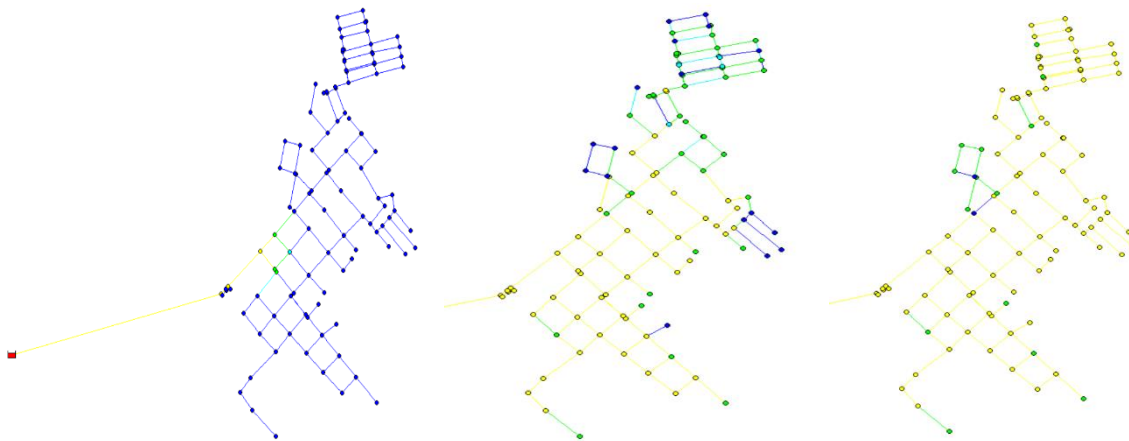
Se puede ver como a las 24 horas el reactivo ya se encuentra en todo el sistema de redes y este empieza a presentar mayores niveles de concentración del mismo, ya muy similares a los obtenidos en las muestras realizadas.

Figura 26 Modelo de calidad a las 24:00 horas.



Presentando de esta forma los resultados finales del modelo de calidad simulado en el que se puede ver como el cloro residual se encuentra parcialmente en todo el sistema teniendo mayor aglomeración en las zonas medias de la cabecera y descendiendo mucho en las lejanas.

Figura 27 Modelo de calidad simulado en 2, 12 y 24 horas.



Se puede ver como al pasar el tiempo los resultados van variando y cambiando, y aumentando al pasar el tiempo, pero en algunos pocos puntos este se mantiene bajo o nulo.

Tabla 15 Resultados de la simulación de calidad en nodos a las 24 horas.

Nodos							
Node ID	Chemical (mg/L)	Node ID	Chemical (mg/L)	Node ID	Chemical (mg/L)	Node ID	Chemical (mg/L)
Junc 132	0.76	Junc 91	0.88	Junc 58	0.84	Junc 27	0.88
Junc 131	0.85	Junc 90	0.88	Junc 57	0.91	Junc 26	0.84
Junc 130	0.89	Junc 89	0.75	Junc 56	0.90	Junc 25	0.81
Junc 129	0.89	Junc 88	0.81	Junc 55	0.89	Junc 24	0.68
Junc 128	0.89	Junc 87	0.84	Junc 54	0.66	Junc 23	0.80
Junc 127	0.87	Junc 86	0.88	Junc 53	0.90	Junc 22	0.92
Junc 126	0.87	Junc 84	0.90	Junc 52	0.80	Junc 21	0.92
Junc 125	0.85	Junc 83	0.90	Junc 51	0.74	Junc 20	0.92
Junc 124	0.73	Junc 82	0.85	Junc 49	0.84	Junc 19	0.92
Junc 123	0.83	Junc 81	0.84	Junc 48	0.84	Junc 18	0.00
Junc 122	0.89	Junc 80	0.87	Junc 47	0.87	Junc 17	0.72
Junc 115	0.88	Junc 79	0.84	Junc 46	0.87	Junc 16	0.71
Junc 109	0.86	Junc 78	0.84	Junc 45	0.69	Junc 15	0.67
Junc 108	0.89	Junc 77	0.78	Junc 44	0.90	Junc 14	0.71
Junc 107	0.89	Junc 76	0.91	Junc 43	0.87	Junc 13	0.71
Junc 106	0.89	Junc 75	0.89	Junc 42	0.90	Junc 12	0.69
Junc 105	0.88	Junc 74	0.91	Junc 41	0.76	Junc 11	0.64
Junc 104	0.88	Junc 73	0.91	Junc 40	0.90	Junc 10	0.00
Junc 103	0.87	Junc 72	0.91	Junc 39	0.90	Junc 7	0.92
Junc 102	0.87	Junc 71	0.90	Junc 38	0.81	Junc 6	0.92
Junc 101	0.85	Junc 70	0.87	Junc 37	0.83	Junc 5	0.85
Junc 100	0.85	Junc 69	0.90	Junc 36	0.92	Junc 4	0.92
Junc 99	0.83	Junc 68	0.82	Junc 35	0.91	Junc 3	0.92
Junc 98	0.83	Junc 67	0.90	Junc 34	0.91	Junc 2	0.88
Junc 97	0.86	Junc 66	0.80	Junc 33	0.76	Junc 133	0.87
Junc 96	0.83	Junc 65	0.78	Junc 32	0.90	Junc 134	0.86
Junc 95	0.82	Junc 62	0.91	Junc 31	0.90	Junc 135	0.86
Junc 94	0.74	Junc 61	0.91	Junc 30	0.91	Junc 136	0.91
Junc 93	0.86	Junc 60	0.85	Junc 29	0.84	Junc 137	0.91
Junc 92	0.88	Junc 59	0.91	Junc 28	0.66	Resvr 1	1.00

Tabla 16 Resultados de la simulación de calidad en tuberías a las 24 horas

Tuberías							
Link ID	Chemical (mg/L)	Link ID	Chemical (mg/L)	Link ID	Chemical (mg/L)	Link ID	Chemical (mg/L)
Pipe p1	0.80	Pipe p55	0.86	Pipe p118	0.91	Pipe 2	0.86
Pipe p2	0.87	Pipe p56	0.86	Pipe p119	0.82	Pipe 3	0.84
Pipe p3	0.89	Pipe p57	0.84	Pipe p120	0.90	Pipe 4	0.90
Pipe p4	0.89	Pipe p58	0.81	Pipe p121	0.90	Pipe 5	0.96
Pipe p5	0.88	Pipe p63	0.91	Pipe p122	0.91	Pipe 9	0.90
Pipe p6	0.87	Pipe p73	0.91	Pipe p123	0.88	Pipe 10	0.88
Pipe p7	0.87	Pipe p76	0.86	Pipe p124	0.74	Pipe 11	0.88
Pipe p8	0.87	Pipe p77	0.89	Pipe p125	0.89	Pipe 12	0.80
Pipe p9	0.65	Pipe p78	0.86	Pipe p126	0.87	Pipe 13	0.86
Pipe p10	0.81	Pipe p79	0.90	Pipe p127	0.83	Pipe 14	0.85
Pipe p11	0.86	Pipe p80	0.85	Pipe p128	0.74	Pipe 15	0.82
Pipe p12	0.89	Pipe p84	0.91	Pipe p129	0.86	Pipe 19	0.91
Pipe p27	0.87	Pipe p85	0.88	Pipe p130	0.91	Pipe 21	0.91
Pipe p28	0.89	Pipe p86	0.91	Pipe p131	0.92	Pipe 22	0.91
Pipe p29	0.89	Pipe p89	0.87	Pipe p132	0.92	Pipe 23	0.91
Pipe p30	0.88	Pipe p93	0.91	Pipe p133	0.92	Pipe 26	0.89
Pipe p31	0.88	Pipe p94	0.90	Pipe p134	0.92	Pipe 29	0.91
Pipe p32	0.87	Pipe p96	0.78	Pipe p136	0.00	Pipe 30	0.91
Pipe p33	0.88	Pipe p97	0.85	Pipe p138	0.72	Pipe 31	0.91
Pipe p35	0.84	Pipe p98	0.77	Pipe p139	0.69	Pipe 32	0.91
Pipe p36	0.83	Pipe p101	0.86	Pipe p140	0.71	Pipe 33	0.91
Pipe p40	0.83	Pipe p102	0.87	Pipe p142	0.69	Pipe 34	0.91
Pipe p41	0.78	Pipe p103	0.79	Pipe p143	0.66	Pipe 35	0.71
Pipe p43	0.87	Pipe p104	0.89	Pipe p144	0.00	Pipe 36	0.85
Pipe p44	0.88	Pipe p105	0.88	Pipe p146	0.92	Pipe 37	0.84
Pipe p45	0.88	Pipe p106	0.90	Pipe p147	0.92	Pipe 38	0.90
Pipe p46	0.88	Pipe p107	0.82	Pipe p148	0.89	Pipe 39	0.88
Pipe p48	0.83	Pipe p108	0.90	Pipe p149	0.92	Pipe 40	0.89
Pipe p49	0.86	Pipe p109	0.89	Pipe p150	0.92	Pipe 41	0.88
Pipe p51	0.89	Pipe p110	0.90	Pipe p157	0.88	Pipe 42	0.87
Pipe p52	0.90	Pipe p111	0.86	Pipe p158	0.86	Pipe 43	0.87
Pipe p53	0.85	Pipe p112	0.87	Pipe p159	0.92	Pipe 44	0.86
Pipe p54	0.82	Pipe p113	0.91	Pipe 1	0.84		

Conclusiones

- Se consiguió realizar el modelo de calidad de la red del municipio del Castillo para su posterior análisis y comprensión del comportamiento del cloro en el sistema dando como resultado un estudio a profundidad de la red de distribución.
- Se obtuvo toda la información necesaria para obtener los datos acertados y reales de las redes hidráulicas por medio del modelo expuesto obteniendo resultados favorables que reflejan un buen comportamiento de la red presentando falencias en unas áreas localizadas, pero es una situación que no afecta la integridad del sistema.
- Por medio del software usado en el proyecto (EPANET) se logró realizar una alternativa de diseño apropiada acorde a las especificaciones presentadas por la red del municipio, de esta forma logrando tener un análisis completo del sistema existente.
- Se realizó estudios de calidad del nivel del cloro que se suministra en el municipio con los cuales se puede concluir que el sistema presente en el municipio es eficiente y abarca la demanda requerida por el municipio, presentando unos niveles de cloro residual en agua acorde a la normativa.

Recomendaciones

- Los operadores de las plantas de tratamiento del castillo deben recibir capacitación periódica en gestión de programas y análisis de resultados.
- Es importante que los modelos propuestos sean utilizables en el tiempo, para esto deberá mantenerlos constantemente actualizados dentro del programa EPANET para asegurar que los datos se adaptan a las realidades del sistema.
- Las mediciones de flujo en la salida del depósito de suministro deben realizarse durante un período mínimo de un año para obtener una tendencia precisa de la curva de variación horario
- Es recomendable tener un sistema de dosificación más actual y no tan rudimentario mostrado en la imagen 14 para evitar posibles problemas con niveles altos de reactivos.

Bibliografía

- Ahn, J., Lee, S.W., Choi, K.Y., & Koo, J. (2012). Application of EPANET for the determination of chlorine dose and prediction of THMs in a water distribution system. https://www.researchgate.net/publication/287622943_Application_of_EPANET_for_the_determination_of_chlorine_dose_and_prediction_of_THMs_in_a_water_distribution_system
- Bravo Quezada, A.L. (2017) Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable de la parroquia el Retiro, Cantón Machala, provincia el Oro. [Trabajo de grado, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio. http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/11582/1/TTUAIC_2017_IC_CD0004.pdf
- Brown, T. L. (2015). Chemistry: the central science. 13^a ed. Pearson.
- Chacón Chaquea, M. Y. (2017). Análisis físico y químico de la calidad del agua. Bogotá: Ediciones USTA. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/11511>
- Fisher, I., Kastl, G., & Sathasivan, A. (2012). A Suitable Model of Combined Effects of Temperature and Initial Condition on Chlorine Bulk Decay in Water Distribution Systems. *Water Research*, 46, 3293-3303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.017>
- García Alcaraz, M. (2006). Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas. [Trabajo de grado] Universidad Politécnica de Cartagena. https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/PFC_MMarGracia_2006.pdf
- Guanuchi Quezada, C. M., & Ordóñez Jara, J. A. (2017). Evaluación del cloro residual en la red de distribución de agua potable del cantón Azogues a través de un modelo experimental. [Trabajo de grado, Universidad de Cuenca]. Repositorio. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28012>
- Lewis, R. A. (2021). EPANET 2 manual de usuario. United States Environmental Protection Agency (EPA). https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/EPANET_Manual_Usuario.pdf
- Lewis, R. A.. (2000). EPANET 2 User Manual. United States Environmental Protection Agency (EPA). <https://bit.ly/3DQ4x2O>
- López Cualla, R. (2003). Elementos De Diseño Para Acueductos Y Alcantarillados. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1892?locale-attribute=en>

- Ministerio de Desarrollo Económico. (1, noviembre de 2000). Resolución No.1096 de 2000. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/adminverblobawa?tabla=T_NORMA_ARCHIVO&p_NORMFIL_ID=221&f_NORMFIL_FILE=X&inputfileext=NORMFIL_FILENAME
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 0330 de 2017. or la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>
- Morelos, R. & Ramírez Hernández, J. (2015). Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad Mexicana EPANET. Revista Iberoamericana de Ciencias , 121-123. <http://www.reibci.org/publicados/2017/abr/2200106.pdf>
- Pérez Gutiérrez, J. (2015). Simulación de una red de distribución de agua a través de una reconstrucción geoespacial. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Repositorio. <http://ciep.ing.uaslp.mx/tesis/tesisPDF/177201817577256856.pdf>
- Pérez Suárez, N. (2017). Modelación del sistema de abasto de agua potable Santa Marta- Varadero empleando el software EPANET 2.0vE. [Trabajo de grado, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas]. Repositorio. <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/8656/Tesis%20Nilien%20Milagro%20P%20c%20a9rez%20Su%20c%20a1rez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pulido, S. B. (2017). Propuesta de optimización del servicio de la red de distribución de agua potable -RDAP- del municipio de Madrid, Cundinamarca. Universidad Católica de Colombia.
- Vasconcelos, J.J., Rossman, L.A., Grayman, W.M., Boulos, P.F. and Clark, R.M. (1997), Kinetics of chlorine decay. Journal - American Water Works Association, 89: 54-65. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x>
- Walski, T; Chase, D; Savic, D; Grayman, W; Beckwith, S. & Koelle, E. (2001). Advanced water distribution modeling and Management. Bentley Institute Press. https://www.academia.edu/646701/Advanced_water_distribution_modeling_and_management

Anexos

Esta es la lista de anexos los cuales contienen información indispensable para la elaboración y comprensión de este proyecto

Anexo 1 RED DE DISTRIBUCIÓN CON MODELO DE CALIDAD DEL MUNICIPIO DEL CASTILLO META

Anexo 2 MEMORIA DE CALCULOS