

**PARTICIPACIÓN EN EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL
CÁLCULO DE CONTINUIDAD DEL SERVICIO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN Y
CÁLCULO DEL DESCUENTO A LOS USUARIOS**

**PRESENTADO POR
DIANA MELISSA HERRERA RODRÍGUEZ
ID: 000244466**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2017**

**PARTICIPACIÓN EN EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL
CÁLCULO DE CONTINUIDAD DEL SERVICIO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN Y
CÁLCULO DEL DESCUENTO A LOS USUARIOS**

DIANA MELISSA HERRERA RODRÍGUEZ

ID: 000244466

DIRECTOR ACADÉMICO

JUAN CARLOS FORERO

Ingeniero Civil

DIRECTOR EMPRESARIAL

WILSON ALMEYDA REMOLINA

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2017

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|--------------------------------------|
| LISTA DE FIGURAS | 2 |
| LISTA DE TABLAS..... | 3 |
| RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO | 5 |
| GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE | ¡Error! Marcador no definido. |
| 1. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 2. OBJETIVOS | 9 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 9 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 9 |
| 3. ESTADO DEL ARTE..... | 10 |
| 4. GLOSARIO..... | 12 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 15 |
| 5.1. Determinación del sector de estudio..... | 16 |
| 5.2. Recopilación de la información | 17 |
| 5.3. Elaboración del Modelo Hidráulico preliminar | 19 |
| 5.3.1. Configuración previa | 19 |
| 5.3.2. Ingreso de la información | 20 |
| 5.3.3. Validación y ejecución del modelo preliminar | 29 |
| 5.3.4. Calibración del modelo hidráulico..... | 30 |
| 5.3.5. Análisis de Criticidad | 31 |
| 5.4. Análisis de Usuarios afectados y Consolidación de la información | 33 |
| 6. RESULTADOS..... | 37 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 38 |
| 8. APORTE AL CONOCIMIENTO..... | 40 |
| 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 42 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Metodología..... | 16 |
| Figura 2. Estructura de la Base de Datos con la Información Operativa del amb S.A. ESP. | 18 |
| Figura 3. Proceso de elaboración del Modelo Hidráulico | 19 |
| Figura 4. Proceso de construcción de los nodos en el modelo hidráulico | 21 |
| Figura 5. Proceso de construcción de las tuberías en el modelo hidráulico | 22 |
| Figura 6. Modelo Hidráulico de las redes de distribución del amb S.A. ESP. | 23 |
| Figura 7. Configuración de las bombas | 25 |
| Figura 8. Usuarios ubicados en un tramo de la red | 26 |
| Figura 9. Datos externos de los usuarios..... | 26 |
| Figura 10. Ejemplo de Patrón de la red. | 27 |
| Figura 11. Patrón creado en WaterGEMS..... | 28 |
| Figura 12. Fin de la ejecución (cálculo) de la red..... | 29 |
| Figura 13. Configuración de las opciones de Criticality..... | 31 |
| Figura 14. Resultados del análisis de criticidad de un daño..... | 32 |
| Figura 15. Representación en la red del análisis de criticidad..... | 33 |
| Figura 16. Formato Discontinuidades mensuales por ruta de lectura según SSPD. .. | 34 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Datos de las tuberías | 24 |
| Tabla 2. Fragmento de Usuarios afectados por la discontinuidad del servicio en el mes de Agosto de 2017 | 35 |
| Tabla 3. Fragmento de lista de continuidad por ruta. | 36 |

LISTA DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1. Ecuación de la continuidad | 12 |
| Ecuación 2. Ecuación de Darcy-Weisbach | 13 |
| Ecuación 3. Ecuación para el cálculo de afectación por ruta. | 36 |
| Ecuación 4. Ecuación para definir el porcentaje de continuidad por ruta. | 36 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: PARTICIPACIÓN EN EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE CONTINUIDAD DEL SERVICIO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN Y CÁLCULO DEL DESCUENTO A LOS USUARIOS

AUTOR(ES): Diana Melissa Herrera Rodríguez

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Juan Carlos Forero

RESUMEN

Este documento presenta una metodología orientada a mejorar la continuidad en la prestación del servicio en las redes de distribución de agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. Para conseguirlo, fue necesario desarrollar un modelo hidráulico en el software WaterGems que representará de manera precisa la topología de la red y los usuarios asignados a los nodos que la conforman. Así, en presencia de daños o cierres específicos en alguna de las tuberías, el modelo en conjunto con la herramienta de análisis de criticidad, permite determinar los segmentos de la red que deben quedar sin agua a través del cierre de las válvulas de aislamiento, e identificar los usuarios que se ven afectados con la interrupción en el sistema de distribución y establecer los suscriptores a quienes se les debe asignar un descuento en la tarifa según la afectación de la continuidad y lo establecido por La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en la Resolución No. SSPD 20171300039945 del 28/03/2017.

PALABRAS CLAVE:

Modelo hidráulico, Daños en redes, Análisis de criticidad, Válvulas aisladoras.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: PARTICIPATION IN THE DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE CALCULATION OF CONTINUITY OF THE SERVICE IN DISTRIBUTION NETWORKS AND CALCULATION OF THE DISCOUNT TO THE USERS

AUTHOR(S): Diana Melissa Herrera Rodríguez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Juan Carlos Forero

ABSTRACT

This document presents a methodology oriented to improve the continuity in the provision of the service in the potable water distribution system of the Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. To achieve it, it was necessary to develop a hydraulic model in the software WaterGems that will represent precisely, the topology of the network and the users assigned to the nodes that conform it. Like this, in presence of damages or specific closings in any of the pipes, the model along with the tool of analysis of criticidad, allows to determine the segments of the network that have to remain without water through the closing of the isolation valves, and identify the users that are affected with the interruption of distribution system and establish the customers to whom a discount on the rate must be assigned according to the affectation of the continuity and as established by The Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios in the Resolution No. SSPD 20171300039945 of 28/03/2017.

KEYWORDS:

Hydraulic model, Damage in system, Criticality Analysis, Isolation Valves.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

En la operación de un sistema de distribución de agua potable, es importante tener en cuenta aspectos relacionados con la afectación en el servicio a los usuarios por la presencia de daños en las tuberías que los abastecen. Estos daños, hacen que sea preciso realizar temporalmente cortes en el servicio debido a las labores de reparación necesarias para cubrir estas situaciones. A pesar de esto, dichas suspensiones son escenarios comúnmente presentados en las redes de distribución de agua, y se deben llevar a cabo, garantizando que los cierres realizados afecten a la menor cantidad de suscriptores posible en el momento de realizar la interrupción.

El amb S.A. ESP. como empresa prestadora de servicio, es consciente de la importancia de contar con herramientas computacionales que suplan esta necesidad, faciliten sus labores y mejoren la prestación del servicio en términos de continuidad y calidad, por lo que ha trabajado en modelos de simulación hidráulica que sean lo más aproximados a la realidad, empleando programas como Epanet 2.0 y WaterGems.

A fin de conseguir esto, y reconociendo que actualmente la modelación hidráulica se ha posicionado como la principal herramienta para diseñar y operar sistemas de distribución de agua potable, ya que permite, entre otras cosas, representar completamente una red de distribución de agua potable y evaluar los diferentes efectos y comportamientos que se presentan en el sistema, proporcionando ventajas en las labores la operación y gestión integral en las redes, se trabajará con programas dedicados a este fin como son WaterGems y Epanet.

Es por ello, que esta práctica empresarial buscaba mediante la construcción de un modelo de simulación hidráulica en el Software WaterGems y con la implementación de las herramientas avanzadas que este ofrece, identificar los usuarios que se ven afectados debido a las interrupciones por daños en el sistema, representada lo mejor posible y que permita su continua y adecuada operación.

Para conseguir esto, es necesario recopilar y analizar la información correspondiente a la red de distribución, ya que esta servirá como fuente de datos en el software de simulación hidráulica, que para objeto de esta práctica será WaterGems. Esta información debe incluir la topología precisa y detallada de las redes, las características individuales de las tuberías, accesorios y conectividad, incluyendo la información concerniente a las válvulas de aislamiento con sus respectivos datos de posición y estado. Además, se debe contar con la ubicación de los usuarios con su respectivo nodo de consumo asociado.

Estos datos vinculados con las nuevas tecnologías de tratamiento de la información y con las actuales herramientas para la construcción de modelos de las redes de distribución, facilitan el objetivo buscado y extienden su uso en la toma de decisiones en las empresas y labores operacionales en las mismas.

Para que un modelo hidráulico pueda ser utilizado debe estar validado, y si se cuenta con las mediciones de campo, es oportuno realizar un proceso de ajuste de algunos de sus parámetros, es decir calibrar el modelo, con el fin de mejorar la fiabilidad de los resultados y garantizar que se representen adecuadamente las condiciones reales en la red.

Cuando se cuenta con modelos hidráulicos validados, en conjunto con herramientas que permiten realizar análisis de criticidad en el sistema, es posible identificar los elementos más críticos durante la simulación de una interrupción debida a daños en la red y determinar los segmentos que deben quedar sin agua a través de la operación de las válvulas de aislamiento. Este análisis, está dado en términos de elemento afectados, número de tuberías sin servicio, los usuarios que se ven afectados por el cierre de dicho segmento, nudos aislados incluyendo las válvulas de corte que deben ser operadas para aislar el segmento. Los resultados generados en esta etapa, permitirán establecer los suscriptores afectados con la interrupción, a quienes se les debe asignar un descuento en la tarifa según la afectación de la continuidad y lo establecido por La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en la Resolución No. SSPD 20171300039945 del 28/03/2017.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Crear una metodología para el cálculo del Índice de Continuidad del Servicio según la resolución No. SSPD 20171300039945 del 28/03/2017, en la cual se establecen descuentos a los usuarios por interrupciones en el servicio.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información disponible por el amb concerniente a los clientes reales y sus rutas de lectura.
- Consolidar la información de suspensiones del servicio, registrados por el amb, creando coberturas en un sistema de información Geográfico usado por el amb.
- Realizar la georreferenciación y espacialización de las suspensiones del servicio.
- Desarrollar un modelo hidráulico en el programa WaterGems, que represente la topología de la red y contenga la información del sistema.
- Establecer una metodología de cierre óptimo con base en los criterios establecidos por el amb y las metodologías existentes desarrolladas por la empresa.
- Estimar los usuarios afectados dentro de la metodología de manera de retornar el dinero a los usuarios vía tarifa.
- Consolidar la información vía Tarifa.

3. ESTADO DEL ARTE

Un gran número de los fenómenos que se presentan en el campo de la hidráulica son tan complejos que no solo pueden ser tratados con métodos matemáticos, sino que requieren el uso de técnicas experimentales como herramienta en la obtención de soluciones prácticas, aplicadas a problemas de ingeniería y obras hidráulicas en general, como es el caso de los modelos hidráulicos. Estos se pueden definir como la representación matemática de un sistema real, es decir, un sistema que simula un objeto real (prototipo), mediante la entrada de cierta información que se procesa y se presenta adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería civil.

En la actualidad la modelación hidráulica es considerada como una excelente herramienta para diseñar y operar sistemas de distribución de agua. Algunos de los programas que permiten desarrollar modelos son Epanet y WaterGEMS.

Es por esto, que el amb S.A. ESP, desde el año 2005 a través de un convenio con la Universidad de Los Andes ha venido trabajando en modelos hidráulicos calibrados para la operación y gestión integral de sus redes, los cuales fueron creados en el programa Epanet 2.0. Asimismo, desarrolló un plan de reducción del Índice de Agua No Contabilizada (IANC) mediante la inclusión de Válvulas Reguladoras de Presión, el control de Nivel en los Tanques y la incorporación del Sistema SCADA. Hoy por hoy, al amb ha empezado un proceso de modernización y actualización de sus modelos hidráulicos mediante la Herramienta WaterGems de la casa Matriz Bentley.

El software WaterGEMS es una aplicación de modelado hidráulico para sistemas de distribución de agua, que aporta información sobre el comportamiento de la red como un sistema, la forma en que reacciona ante las estrategias operativas, cómo debe crecer a medida que aumenta la población y las demandas e incluso, proporciona herramientas para evaluar la capacidad de la red de atender adecuadamente a sus clientes cuando se prevé el crecimiento del sistema. (Bentley Systems Inc, 2010)

Otro software de modelación hidráulica es EPANET, el cual modela sistemas de tuberías de distribución de agua, realizando una simulación de período extendido del movimiento de la mismas y el comportamiento de calidad dentro de las redes de tuberías presurizadas. Además, ofrece un paquete de análisis hidráulico completamente equipado y proporciona un editor de red visual que simplifica el proceso de construcción de modelos de red de tuberías y edición de sus propiedades y datos. (EPA, 2006)

Este software se puede utilizar para diseñar programas de muestreo, realizar evaluaciones de la exposición de los consumidores, evaluar estrategias alternativas para mejorar la calidad del agua, planificar y mejorar el rendimiento hidráulico de un sistema, (EPA, 2006) por lo que ayuda a las empresas de agua a mantener y mejorar la calidad del agua entregada a los consumidores.

Si bien, para las empresas prestadoras del servicio de acueducto puedan mejorar la eficiencia en sus costos administrativos y operativos, disminuir las pérdidas de agua en los sistemas y fortalecer la planeación de inversiones, La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios expone la Resolución No. SSPD 20171300039945 del 28/03/2017, que establece la metodología tarifaria para las entidades prestadoras de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado que tengan más de 5.000 suscriptores. Esta otorga descuentos a los usuarios cuando las empresas incumplan sus metas, los cuales se verán reflejados en la siguiente factura al incumplimiento.

También es importante tener en cuenta el análisis de criticidad, ya que está metodología permite evaluar el sistema de distribución de agua e identificar los elementos más críticos. De este modo, cuando se produce una interrupción del sistema de distribución, se puede suspender la parte del sistema requerida e identificar los usuarios afectados en la presencia de daños, debido a que estos se encuentran vinculados ya sea a las tuberías o a los nodos de la red, y así, establecer un descuento en la tarifa según la afectación de la continuidad, tal como lo dice la Resolución.

En la tesis de doctorado “CONFECCIÓN DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DESDE UN SIG Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES” (Bartolín, 2013) se habla del desarrollo de una aplicación informática que trabaja sobre un sistema de información geográfica, integrando el programa de simulación hidráulica y de calidad del agua EPANET 2 y las herramientas empleadas. Asimismo, aporta información sobre el uso de herramientas de análisis y diagnóstico de modelos y la implementación del Análisis de Criticidad en todas las cerradas que pueden darse en la red, con el fin de simular una avería en todos los tramos de tubería donde existe riesgo potencial de incidencia y clasificándolas en función de lo crítica que sea la cerrada en términos de longitud de la red aislada, número de válvulas a cerrar o número de acometidas sin servicio que provoca la cerrada.

Otra documento donde se muestra la utilidad del análisis de criticidad es en la investigación “EL ANÁLISIS DE CRITICIDAD, UNA METODOLOGÍA PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL”, (Mendoza, 2000) donde se expone la necesidad de definir un alcance y propósito para este tipo de análisis, además de establecer los criterios y métodos de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis, teniendo en cuenta que el mejoramiento de la confiabilidad operacional de cualquier instalación o de sus sistemas y componentes, está asociado con aspectos fundamentales como la confiabilidad humana, del proceso, del diseño y del mantenimiento.

4. GLOSARIO

Archivo *.wtg: Fichero de entrada de WaterGEMS que permite la edición de un modelo.

Calibración del modelo hidráulico: Consiste en la modificación de parámetros del modelo matemático de la red. Esta modificación se realiza con el fin de mejorar la semejanza entre el modelo hidráulico y la red existente en campo. La calibración proporciona las variables óptimas de tal forma que mejoren el modelo tanto como sea posible. (RAS, 2010)

Coefficiente de fricción: Coeficiente que representa el efecto de la fricción entre el flujo y la pared del canal o ducto, que depende de la rugosidad relativa de la tubería o canal y el número de Reynolds. (RAS, 2010)

Coefficiente de rugosidad: Medida de la rugosidad de una superficie, que depende del material y del estado de la superficie interna de una tubería. (RAS, 2010)

Curvas características: Curvas que definen el comportamiento de una bomba mostrando el rango de caudales de operación contra la altura dinámica total, la potencia consumida, la eficiencia y la altura neta de succión positiva. (RAS, 2010)

Ecuación de continuidad: esta ecuación establece que el caudal (Q) de un fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción, es decir, el caudal que entra es igual al que sale.

Dado que el caudal es el producto del área de la sección del tubo (A) por la velocidad con que fluye el fluido (V), entonces en dos puntos de una misma tubería se cumple la ecuación de continuidad así:

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

Ecuación 1. Ecuación de la continuidad

Esta ecuación se cumple cuando el fluido es incompresible (tiene densidad constante), es decir, cuando entre dos secciones de la conducción no se acumula masa (Khan Academy, 2015).

Ecuación de Darcy-Weisbach: es la fórmula fundamental para determinar la pérdida de carga, es decir, determinar la pérdida de presión producida en un fluido debido a la fricción dentro una tubería. Esta ecuación es válida tanto para régimen laminar como turbulento, y se puede aplicar con cualquier sistema consistente de unidades ya que es dimensionalmente correcta, (Mederos, 2012) y se establece como:

$$hf = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Ecuación 2. Ecuación de Darcy-Weisbach

donde:

hf: Pérdida de carga debido al rozamiento

λ : Factor de fricción de Darcy

L: Longitud de la tubería

D: Diámetro interior de la tubería

V: Velocidad media del fluido en la tubería

g: Aceleración de la gravedad

Geodatabase: Es una colección de datasets geográficos de varios tipos contenida en una carpeta de sistema de archivos común o una base de datos relacional. Es una estructura de datos nativa para ArcGIS y funciona como formato de datos principal para la edición y administración de información. (Esri, 2016)

Llave primaria: es el conjunto de uno o más campos de una tabla, que permite identificar un registro como único.

Modelo hidráulico: Formulación idealizada que representa la respuesta de un sistema hidráulico a estímulos externos. (RAS, 2010)

Pérdidas menores: Pérdida de energía causada por accesorios o válvulas en una conducción de agua. (RAS, 2010)

Período extendido: En simulación hidráulica se refiere al cálculo hidráulico y de calidad de agua en una red de distribución de agua potable que se hace para diferentes instantes de tiempo. (RAS, 2010)

Red de Distribución de agua potable: Una red de distribución de agua es una colección interconectada de fuentes, tuberías y elementos de control hidráulico (como bombas, válvulas, tanques) que entregan a los consumidores cantidades de agua prescritas a presiones deseadas. Dichos sistemas a menudo se describen como un gráfico, con los enlaces que representan las tuberías y los nodos que definen las conexiones entre las tuberías, los elementos de control hidráulico, consumidores y fuentes. El comportamiento de una red se rige por las leyes físicas que describen las relaciones de flujo en las tuberías y los elementos de control hidráulico, las demandas del consumidor y el diseño del sistema. (Ostfeld, 2015)

Shapefile: Es un formato de almacenamiento de datos vectoriales de Esri para almacenar la ubicación, la forma y los atributos de las entidades geográficas. Un shapefile se almacena en un conjunto de archivos relacionados y contiene una clase de entidad, que se puede representar por medio de puntos, líneas o polígonos. Los shapefiles suelen contener entidades grandes con muchos datos asociados y tradicionalmente se han utilizado en aplicaciones de escritorio SIG como ArcMap. (Esri, 2016)

Sistema de Información Geográfica (SIG): es un conjunto de herramientas que permiten realizar operaciones de forma eficiente, relacionando diferentes componentes (usuarios, hardware, software, procesos), logrando la organización, integración, almacenamiento, manipulación y análisis de grandes cantidades de datos espaciales y facilitando a los usuarios la creación de consultas interactivas, examinando la información espacial. (IDECA, 2016)

Topología: Es toda aquella información que define el recorrido y la distribución de una red de tuberías. (RAS, 2010)

Usuario: Persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación de un servicio público, bien como propietario del inmueble en donde éste se presta, o como receptor directo del servicio. A este último usuario se le conoce también como consumidor. (Ley 142 de 1994) (RAS, 2010)

Válvulas de aislamiento: También conocidas como válvulas de corte, son usadas para modelar sistemas que se pueden configurar para permitir o no el flujo a través de una tubería. (Bentley Systems Inc, 2010)

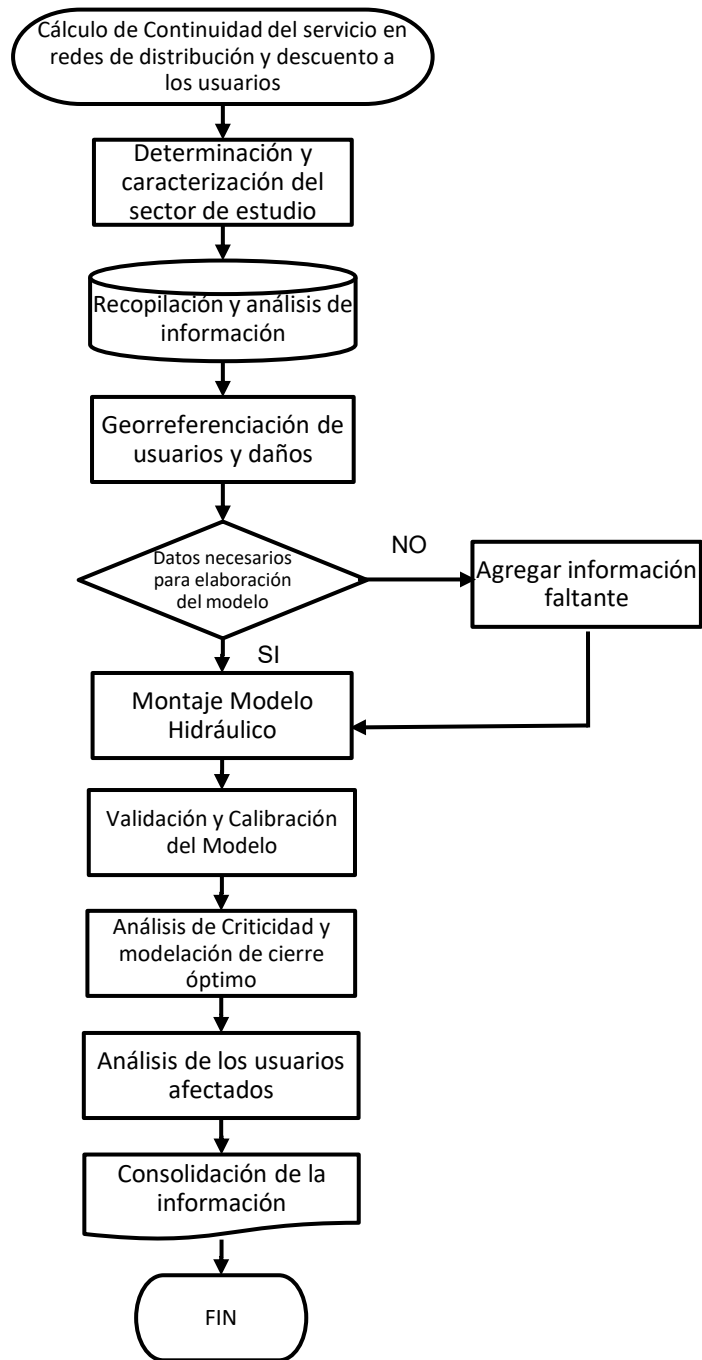
5. METODOLOGÍA

La práctica empresarial se desarrolló en la Dirección de Operaciones del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. Como practicante se realizaron actividades de acompañamiento relacionadas al cálculo de continuidad del servicio en las redes de distribución.

Las actividades llevadas a cabo, se basaron principalmente en el desarrollo y validación de un modelo hidráulico, en donde el distrito Centro sirvió como sector de prueba para la aplicación del software WaterGems en el montaje del modelo preliminar. Dicho modelo representa de manera precisa la topología de la red y de igual manera los usuarios del sistema, donde una vez identificado el daño en la tubería, es posible determinar cuál segmento tendrá suspensión del servicio y cuales usuarios se verán afectados a causa de un cierre específico. Esto con el fin de definir los clientes a quienes les corresponden descuentos por interrupciones en el servicio de acueducto, según lo establecido por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en la Resolución No. 20171300039945.

Para el desarrollo de la metodología empleada para el cálculo de la continuidad del servicio en las redes de distribución de un sector particular, y el cálculo de descuento a los usuarios, es posible identificar diversas etapas, las cuales fueron planteadas en el procedimiento representado en el siguiente diagrama esquemático.

Figura 1. Metodología



Fuente: Elaboración propia

5.1. Determinación del sector de estudio

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. como entidad encargada de la administración de los recursos hídricos de las localidades que integran el Área Metropolitana de Bucaramanga y como prestadora de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y saneamiento básico de esta región, es consciente de

la importante labor que desempeña en la comunidad y por ende, de la necesidad que tiene de estar en continua mejora en la calidad y continuidad del servicio prestado. Es por esto, que ha venido trabajando en modelos hidráulicos calibrados para la operación y gestión integral de sus redes de distribución.

Al área de cobertura del amb S.A. ESP. pertenecen los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón. El desarrollo de la metodología se llevó a cabo con toda la red de distribución de la empresa.

5.2. Recopilación de la información

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. cuenta con la cartografía básica de su área de cobertura. Además, elabora el catastro de los elementos de la red de distribución de agua, realiza el inventario de las características de dichos componentes y un listado de los suscriptores del servicio de acueducto.

“Una base de datos geográfica es un conjunto de datos geográficos organizados de tal manera que permiten la realización de análisis y la gestión del territorio dentro de aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica. Además, se utiliza de soporte para la implantación de servicios geográficos relacionados con las Infraestructuras de Datos Espaciales, y su contenido es la base fundamental en los procesos de producción cartográficos.” (Instituto Geográfico Nacional de España, 2014)

La información digital catastral del amb se encuentra en una Geodatabase de ArcGIS, la cual contiene los elementos de la red de distribución como son tuberías, accesorios, bombas, válvulas, plantas y tanques que abastecen y suministran el agua a los diferentes usuarios, así como también, se encuentran los reportes de los daños en las tuberías con sus respectivas observaciones y georreferenciación.

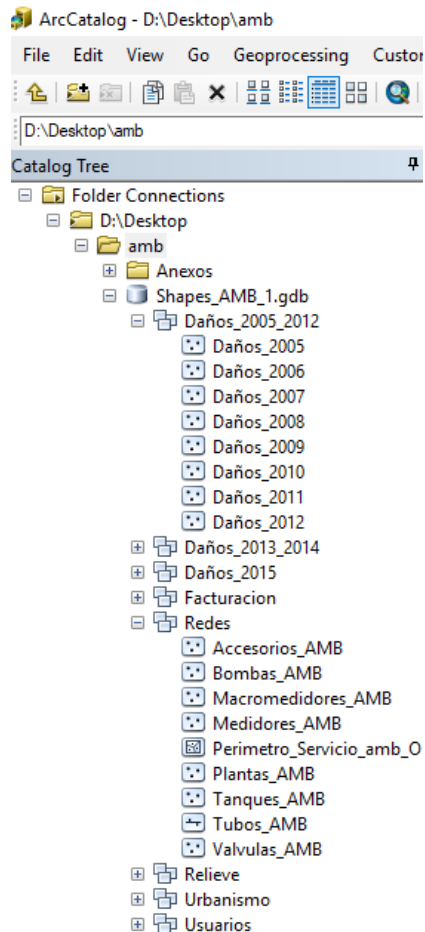
Las coberturas de dichos datos cartográficos digitales son entregadas en formato shapefile (.shp).

Así mismo, cuenta con un inventario de datos alfanuméricos con los datos concernientes a los usuarios y sus rutas de lectura, en donde cada usuario tiene asignado un código único de identificación, dirección predial, sector al que pertenece, coordenadas geográficas, consumos históricos y en general, la información que permite caracterizarlo como consumidor.

También es importante tener en cuenta, que el actual sistema de referencia oficial de Colombia establecido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), es el marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA SIRGAS (sistema de referencia geocéntrico para las Américas), el cual garantiza que las coordenadas del país sean compatibles con los conjuntos internacionales de datos georreferenciados.

La recopilación de la información disponible de las redes relacionada al proyecto, es la primera actividad a desarrollar. Para ello, la Dirección de Operaciones de la empresa, suministró y permitió el uso de los datos cartográficos digitales correspondientes al Área Metropolitana de Bucaramanga.

Figura 2. Estructura de la Base de Datos con la Información Operativa del amb S.A. ESP.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP

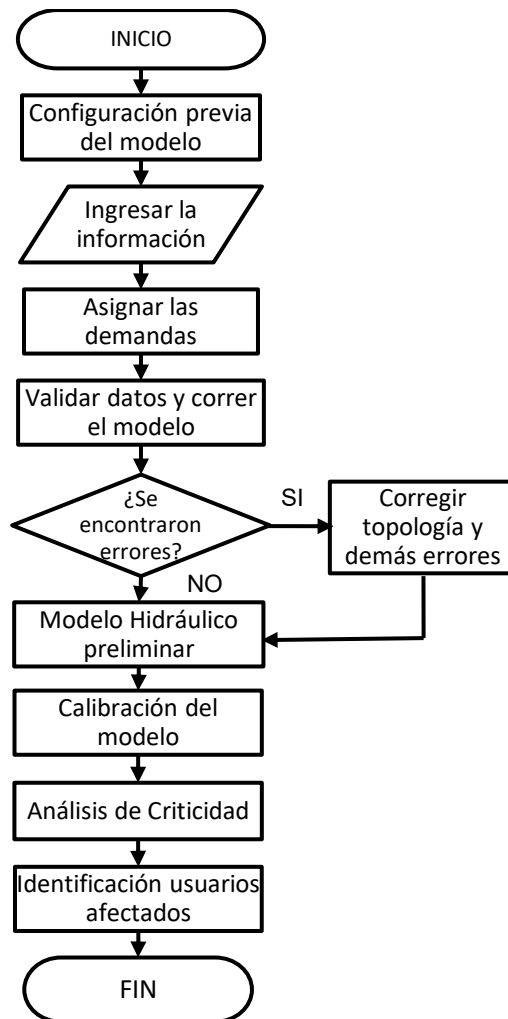
Con el acceso a esta información, se procedió a revisar su contenido y rectificar que estuviera conforme a lo requerido para llevar a cabo las demás etapas de la metodología. Por ello, se verificaron que las tablas de atributos contenían los campos y parámetros necesarios para la elaboración del modelo, y se agregaron las características individuales de las tuberías y accesorios pertinentes, como diámetros internos, materiales, rugosidad absoluta y estado de las válvulas a los shapefiles, ya que estos son la base del modelo en WaterGems.

Igualmente, para facilitar el manejo y el análisis de la información de la red de distribución, se utilizó la función Spatial Join en ArcMap, para unir los atributos de las capas de las tuberías con la de los daños en base a su relación espacial, y proporcionar una asociación permanente, es decir, se creó una nueva capa que contiene ambos conjuntos de atributos.

5.3. Elaboración del Modelo Hidráulico preliminar

El desarrollo del modelo hidráulico se basa en la información anteriormente mencionada y será generado en un archivo *.wtg del software WaterGems, el cual contará con todos los elementos que forman la red de distribución, incluyendo tuberías, nodos, accesorios, válvulas, bombas, plantas y tanques referenciados geográficamente. También la demanda asignada a cada nodo, los usuarios y demás características hidráulicas de la red.

Figura 3. Proceso de elaboración del Modelo Hidráulico



Fuente: Elaboración propia

5.3.1. Configuración previa

Para la elaboración del modelo se empleó el software WaterGems, donde fue preciso en primera instancia, definir y ajustar los parámetros para los respectivos cálculos y análisis que ejecutará el programa.

En estas configuraciones se especifica el sistema de unidades con el que trabajará el modelo, garantizando consistencia con los datos que se suministran.

También se define el modo de dibujo a emplear en el modelo según las condiciones de trabajo a realizar. En este caso, los planos son a escala y serán importados de los shapefiles, por lo que el tipo de fondo de trabajo para el trazado de la red seleccionado es Escalado y no Esquemático (este último es empleado para un gráfico sin escalas ni dimensiones).

Así mismo, es necesario definir el agua como fluido a modelar y determinar la ecuación de pérdidas por fricción que empleará el modelo. En este caso, se definió Darcy-Weisbach como el método de fricción global, debido a que funciona para cualquier flujo en cualquier condición y brinda precisión para modelar las pérdidas por fricción, ya que está desarrollada en fundamentos de la física.

5.3.2. Ingreso de la información

Información física y elementos de la red

Para la elaboración del modelo hidráulico en el software WaterGems, es necesario asignar las características individuales y la conectividad de las tuberías, nodos y demás componentes que conforman la red. Para ello, el programa da la posibilidad de construir la topología de la red manualmente o de importar un archivo tipo Shape. En este caso, como se quería construir la topología de una red existente, se importó la información de la red a través de los archivos shapefiles de ArcMap.

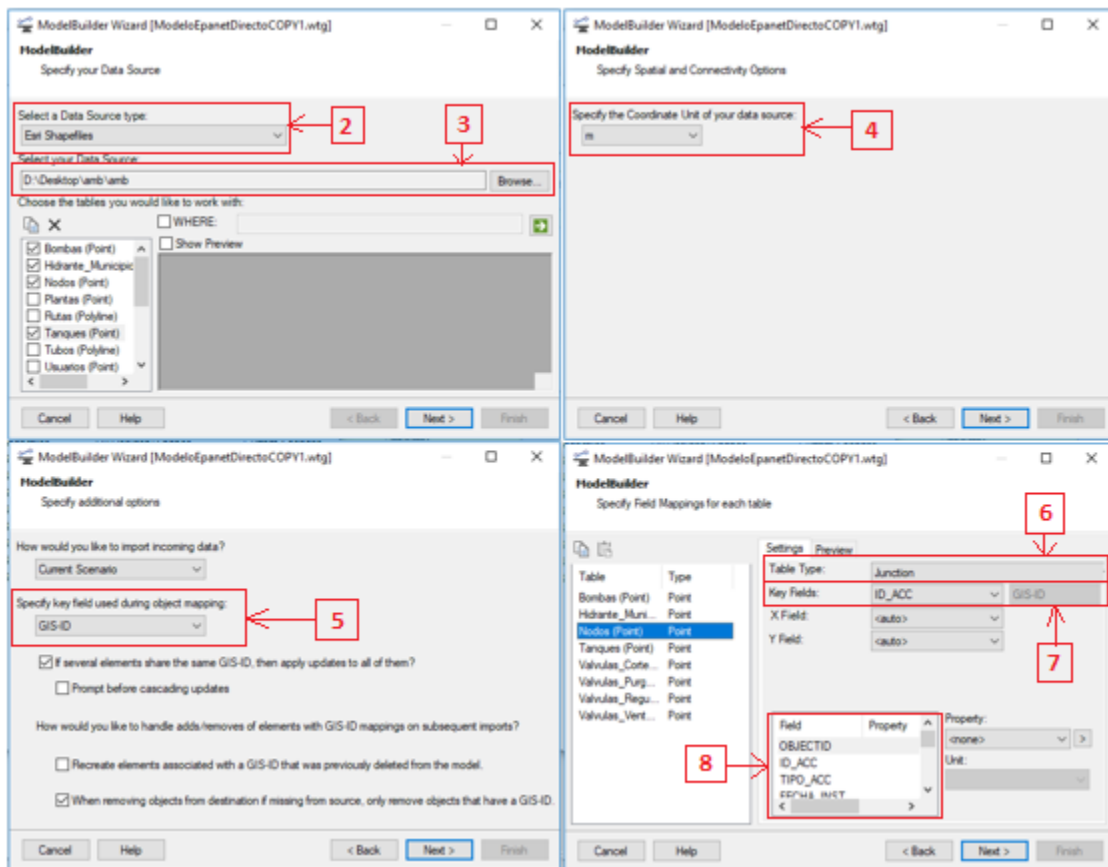
Cada elemento contenido en dichos archivos está relacionado con sus respectivas características; para los nodos, tanques, válvulas, plantas y bombas el archivo contiene sus coordenadas geográficas, elevaciones y niveles de tanques y reservorios; para las tuberías, el archivo incluye diámetros, longitudes, rugosidades y materiales. Para llevar a cabo lo anteriormente enunciado, el programa ofrece una herramienta llamada Modelbuilder que, además, se encarga de localizar las tablas y los campos contenidos en la fuente de datos, y asigna la información correspondiente a los tipos de elementos y atributos en el modelo de WaterGems.

Los pasos para la creación de los nodos en el modelo (uniones, tanques, válvulas, plantas y bombas) son:

1. Abrir la herramienta Modelbuilder.
2. Seleccionar como tipo de fuente de datos "Shapefiles", ya que estos son los formatos que contienen la información.
3. Seleccionar los archivos Shapes que se usarán como fuente.
4. Seleccionar la unidad de medición para las coordenadas (metros) y las opciones para la creación de objetos en el modelo se dejan por defecto.
5. Especificar el campo clave como GIS-ID para la sincronización con la base de datos, y así mantener la codificación asignada en el SIG.
6. Seleccionar el tipo de tabla del modelo a sincronizar, según el tipo de datos que contiene el shape (Junction, Tank, Pump, Hydrant, PRV, Isolation Valves).

7. Seleccionar el campo clave de los datos contenidos en los archivos Shape. (Se utilizó como campo clave el ID del SIG para mantener la codificación establecida por la empresa).
8. Correlacionar los datos de los Shapes con los datos de la tabla y asignar las unidades apropiadas.

Figura 4. Proceso de construcción de los nodos en el modelo hidráulico



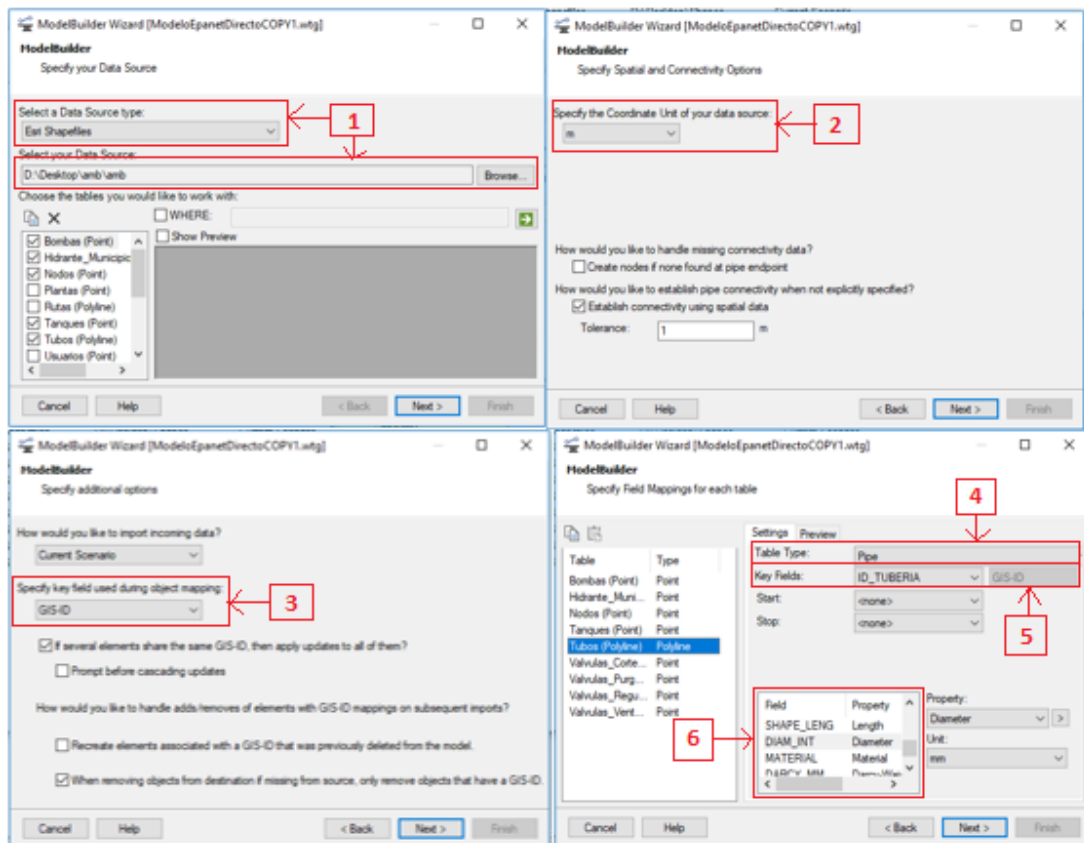
Fuente: Software WaterGEMS

También, es importante tener en cuenta que las válvulas deben ser ingresadas dependiendo de su tipología, por lo que para ser correctamente importadas con esta herramienta, fue necesario previamente crear shapes para cada tipo de válvulas que conformaban el sistema (PVR, Isolation Valves, Hydrants, Air Valves), y así no tener inconvenientes durante su creación. Así mismo, es oportuno resaltar que para las válvulas aisladoras o de corte (isolation valves), se les debe asignar el tubo de referencia a través de la herramienta 'Assign Isolation Valves to Pipes', ya que esta permite encontrar la tubería más cercana a cada válvula y asignar dicho elemento al tubo.

Para la creación de las tuberías, es necesario:

1. Repetir los primeros tres pasos de la metodología para la creación de los nodos.
2. Seleccionar la unidad de medición para las coordenadas (metros) y en las opciones de conectividad de elementos es importante tener en cuenta la relación entre cada tubo y sus nodos inicial y final (se desmarcó la opción de crear nodos en el modelo para evitar que el programa cree nodos adicionales cuando no encuentre alguno en el extremo del tubo, y se señaló la opción “Establecer conectividad usando datos espaciales” definiendo una tolerancia de un metro).
3. Seleccionar el campo clave como GIS-ID, para la sincronización con la base de datos de los Shapes, y así mantener la codificación.
4. Seleccionar el tipo de tabla como “Pipe” (es decir, tubería).
5. Correlacionar los datos del archivo shape con los datos de la tabla (diámetro, coeficiente de rugosidad, longitud y material) y asignar unidades apropiadas a cada uno.
6. Señalar que se quiere construir el modelo de inmediato y oprimir el botón de finalizar.

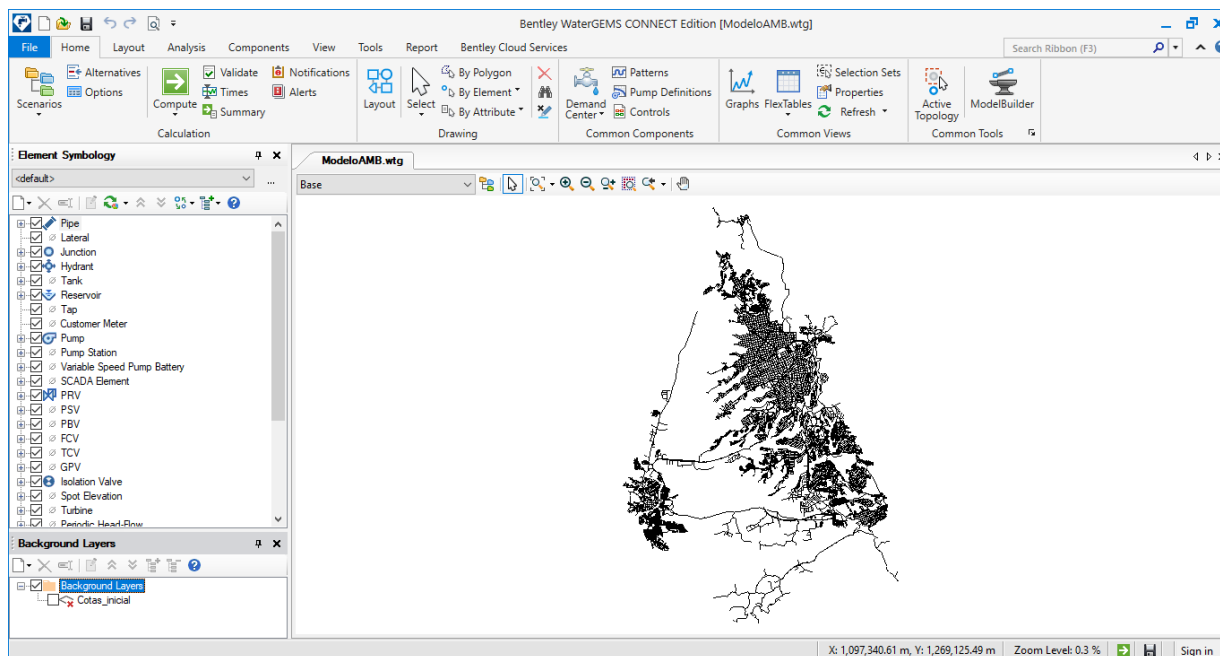
Figura 5. Proceso de construcción de las tuberías en el modelo hidráulico



Fuente: Software WaterGEMS

Al ejecutar ModelBuilder se sincronizaron los archivos para la construcción del modelo, mostrando un cuadro de diálogo con el estado de las tuberías que fueron creadas y la sincronización del dibujo con su respectiva información como se muestra en la figura 5.

Figura 6. Modelo Hidráulico de las redes de distribución del amb S.A. ESP.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Debido a que no fueron asignadas las elevaciones en los nodos cuando se importaron los datos desde el ModelBuilder, se optó por agregarlos con la herramienta TRex, en donde se indicó nuevamente la fuente de datos a emplear y las unidades correspondientes. Tener en cuenta esta información altimétrica durante el proceso de modelación es importante, ya que obtener buenos resultados, radica en la calidad de la información suministrada.

Finalmente, con la topología de la red construida y sus características como nodos, materiales, diámetros, elevaciones y coordenadas definidas, es necesario revisar los datos del modelo para verificar que toda la información fue importada correctamente. En la siguiente tabla se pueden ver que los datos de las tuberías se cargaron adecuadamente.

Tabla 1. Datos de las tuberías

| ID | Label | Elevation (m) | Hydraulic Grade (m) | Pressure (kPa) | Demand Collection | Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) ^m) | X (m) | Y (m) |
|--------------|-------------|---------------|---------------------|----------------|-----------------------|---|--------------|--------------|
| 4460: J-1103 | 4460 J-1103 | 916.00 | 963.22 | 462 | <Collection: 1 item> | 0.003 | 1,105,050.47 | 1,277,790.60 |
| 4462: J-1104 | 4462 J-1104 | 939.00 | 963.63 | 241 | <Collection: 0 items> | 0.000 | 1,105,563.85 | 1,278,469.94 |
| 4463: J-1105 | 4463 J-1105 | 939.00 | 963.64 | 241 | <Collection: 0 items> | 0.004 | 1,105,566.35 | 1,278,475.27 |
| 4480: J-1112 | 4480 J-1112 | 894.00 | 961.11 | 657 | <Collection: 1 item> | 0.003 | 1,103,434.90 | 1,278,141.39 |
| 4482: J-1113 | 4482 J-1113 | 893.00 | 959.14 | 647 | <Collection: 0 items> | 0.000 | 1,103,462.59 | 1,277,150.62 |
| 4484: J-1114 | 4484 J-1114 | 912.00 | 960.02 | 470 | <Collection: 0 items> | 0.000 | 1,104,436.86 | 1,278,068.24 |
| 4486: J-1115 | 4486 J-1115 | 921.00 | 962.56 | 407 | <Collection: 1 item> | 0.003 | 1,104,664.05 | 1,278,298.39 |
| 4487: J-1116 | 4487 J-1116 | 921.00 | 962.56 | 407 | <Collection: 1 item> | 0.003 | 1,104,666.86 | 1,278,293.08 |

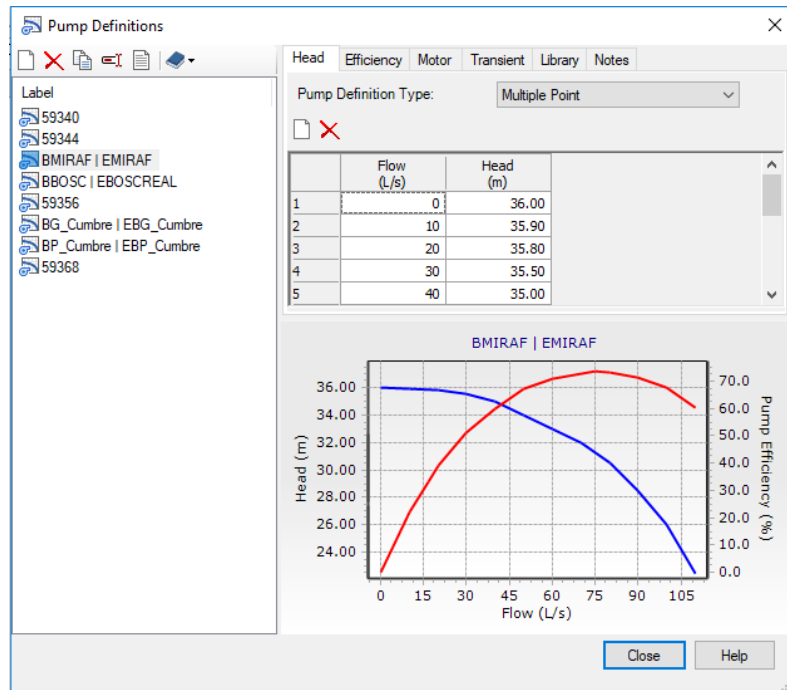
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Configuración de las bombas

Las Curvas Características definen el comportamiento de una bomba mostrando el rango de caudales de operación contra la altura dinámica total, la potencia consumida, la eficiencia y la altura piezométrica neta positiva (RAS, 2010). Estas se caracterizan por graficar caudal versus altura piezométrica total, y son propias de cada bomba, por lo que esta información es suministrada por el fabricante.

Debido a la importancia que reside en la definición del comportamiento hidráulico de las bombas, se especificaron y asignaron en la configuración de estos elementos tanto las curvas características (representada por la curva azul), como la respectiva curva de eficiencia (representada por la curva roja) para cada una de las bombas del sistema como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Configuración de las bombas



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

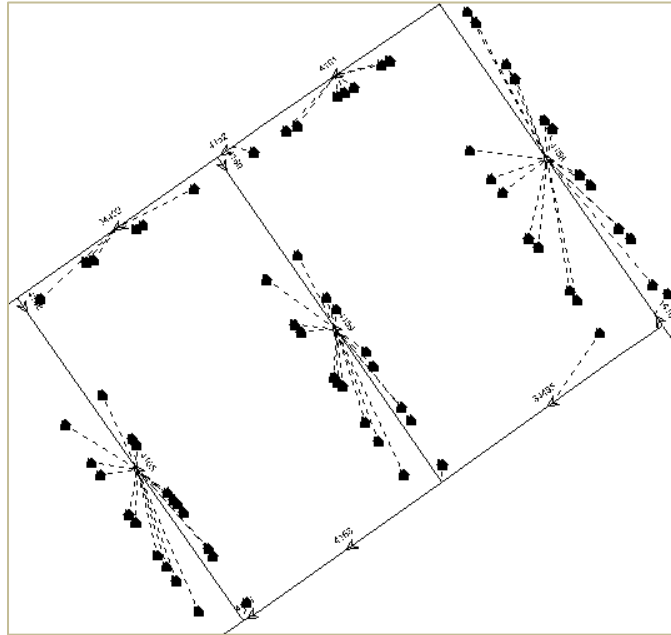
Información de Usuarios

La empresa cuenta con la información de sus usuarios georreferenciados, en donde cada uno tiene asignado un código, dirección, sector, consumo facturado y demás características que lo definen.

Para asignar los usuarios al modelo, la información de su ubicación fue importada a través de la herramienta LoadBuilder, en donde se establecieron los elementos del medidor del cliente a los elementos del modelo hidráulico, utilizando el nodo más cercano como método de asignación de datos, es decir, se hizo dependiendo de la ubicación espacial de los nodos y de los suscriptores. Así mismo, se tuvo en cuenta que la capa seleccionada de los nodos y la capa que contiene la información del usuario, tuvieran la demanda como una propiedad.

En la siguiente figura se pueden ver algunos de los usuarios agregados al modelo (representados por una casa negra), en un pequeño tramo de la red.

Figura 8. Usuarios ubicados en un tramo de la red



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Así mismo, para apreciar los diferentes datos disponibles, se configuró una conexión a la fuente de datos externa de los usuarios (Figura 9), seleccionando “codigo” como llave primaria, ya que esta etiqueta es la que coincide con los datos del modelo y de la fuente, y así seleccionar los campos que se desean mostrar en la tabla.

Figura 9. Datos externos de los usuarios

La imagen muestra la configuración de datos externos de los usuarios en WaterGEMS. Se ve una ventana de diálogo 'External Customer Meter Data Setup' y una ventana de visualización de datos.

Configuración de la ventana 'External Customer Meter Data Setup':

- Data Source: Esri Shapefiles
- Path: D:\Desktop\Shapes
- Table: Usuarios_Centro (Point)
- Key Field: CODIGO
- Fields selected: CODIGO, DIRECCION, NOMBRE_USU, CODIGO_BAR, USO, ESTRATO

Visualización de datos en la ventana 'External Customer Meter Data (MODELOzz...)':

| | CODIGO | DIRECCION | NOMBRE_USU | CODIGO_MUN |
|--------|--------|---------------|----------------|------------|
| 019104 | 019104 | CL 37 # 3A... | ISIDRO SAN... | 68001 |
| 019105 | 019105 | CL 37 # 3A | LUIS E.ACEV... | 68001 |
| 019106 | 019106 | CRA 4 # 37... | JUAN CARLO... | 68001 |

9597 of 9597 elements displayed

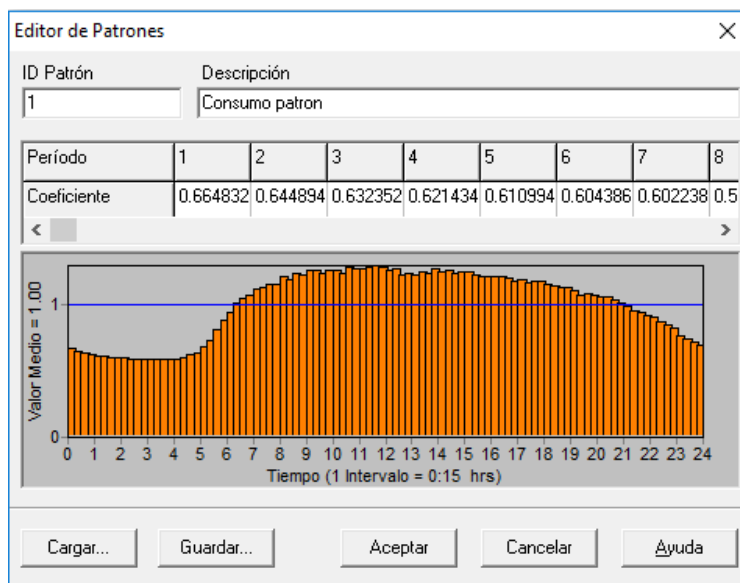
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Curvas de Modulación de la Demanda

Para obtener una simulación en periodo extendido, es preciso caracterizar el patrón de consumo por medio de una curva de modulación, para hacer que las demandas en los nodos varíen de forma periódica a lo largo del día en diferentes intervalos de tiempo (EPA, 2006).

Para ello, se asignan factores multiplicadores del consumo para las distintas horas del día. En este caso, para el sector que se está trabajando, se tomaron los patrones proporcionados por la empresa en un modelo de EPANET, los cuales tienen asignados sus multiplicadores de consumo, para intervalos de 15 minutos durante 24 horas.

Figura 10. Ejemplo de Patrón de la red.



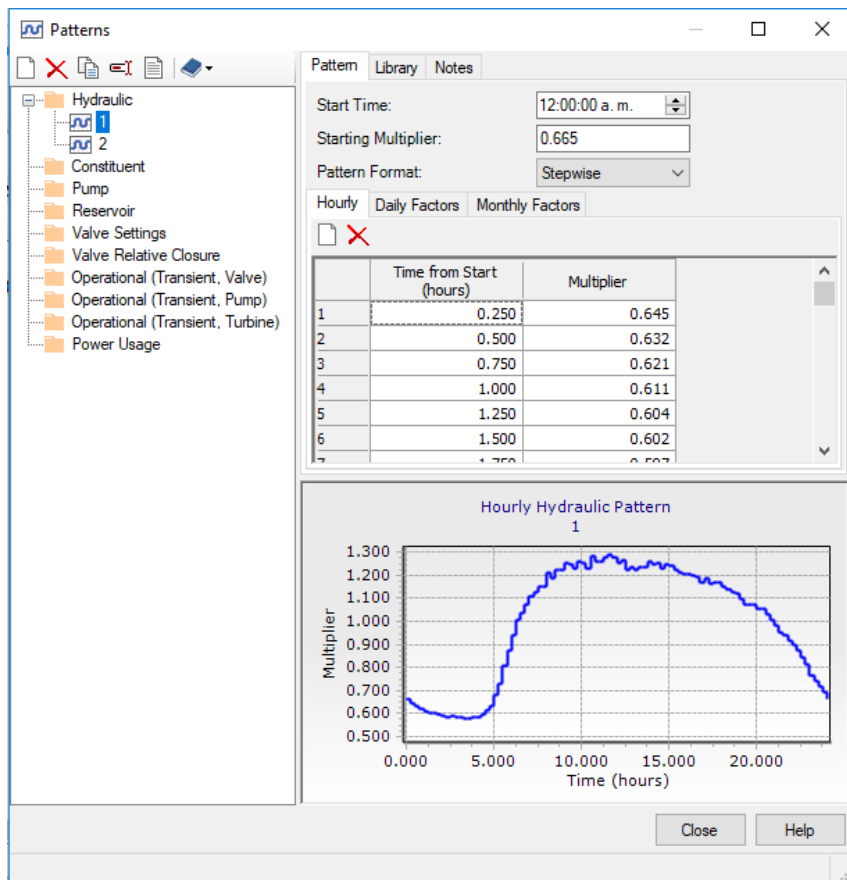
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: EPANET

Estos datos se agregaron al modelo que se está desarrollando en WaterGems, para crear dichos patrones. En este paso se tuvo en cuenta el formato del patrón, en donde se definió como gradual, debido a que este asume un nivel constante de uso durante un período de tiempo, y luego salta instantáneamente a otro nivel donde permanece estable hasta el próximo salto.

Igualmente, para evitar errores al ejecutar el modelo, fue importante tener en cuenta que el último punto en el patrón debía ser el mismo valor que el del multiplicador inicial, con el fin de asegurar que el patrón tuviera repetición infinita.

Con los datos suministrados en el modelo, se puede ver la relación factor de multiplicación versus tiempo, en la curva del patrón hidráulico por hora (Ver Figura 11).

Figura 11. Patrón creado en WaterGEMS



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Asignación de la Demanda

Los consumos de agua para un sistema de distribución son importantes para determinar el comportamiento del sistema. Por esto, el amb cuenta con un listado de suscriptores del servicio de acueducto con sus características y consumos históricos.

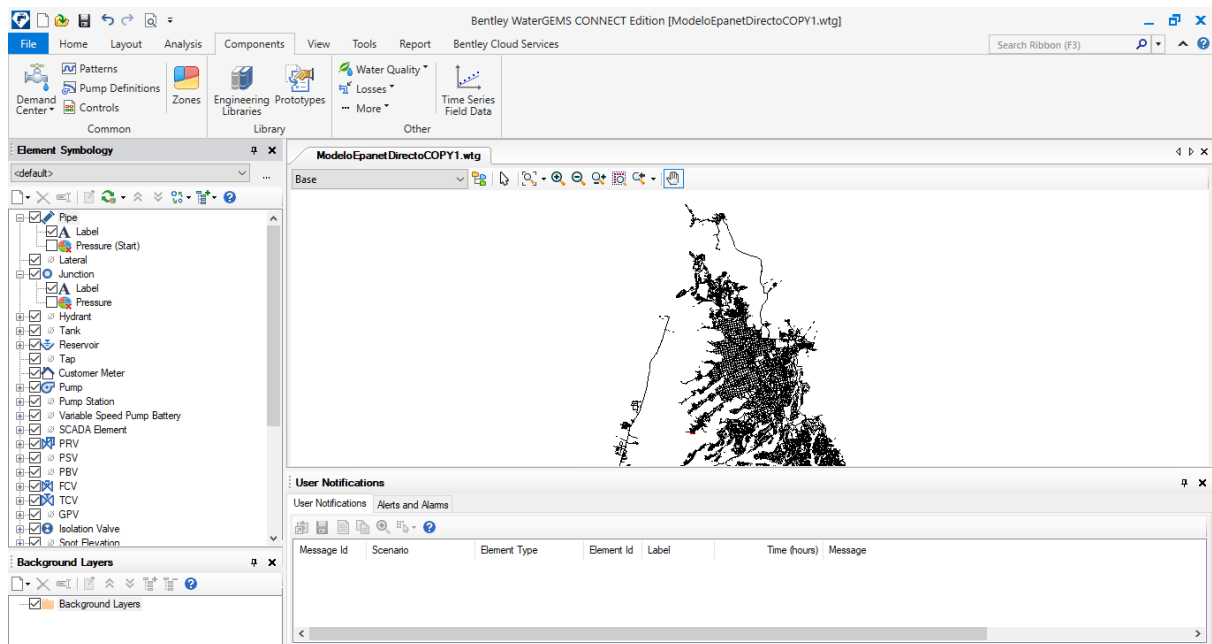
Con estos datos fue posible obtener la demanda asignada a cada nodo de la red, al relacionar la posición del consumo de cada usuario con el nodo más cercano de la red de distribución (para este caso, se tomó como el promedio de los consumos facturados durante los primeros seis meses del año). Esta asignación se realizó de forma automática, a través de la herramienta LoadBuilder, en donde se definieron sus unidades y se le asignó el patrón creado.

5.3.3. Validación y ejecución del modelo preliminar

Con la información agregada al modelo de WaterGEMS, se validaron los datos para verificar que estos fueron ingresados correctamente, y se hicieron las respectivas correcciones (como elementos que se inclinan en la dirección incorrecta, nodos con presiones negativas y tubos aislados) ya que, con estos errores, el software no puede solucionar el modelo.

De igual forma, se corrió el programa para que hiciera los respectivos cálculos, de manera que cuando finalizó su ejecución, se mostraron los flujos demandados y suministrados, y en el recuadro ubicado en la parte inferior del cuadro de diálogo se verificó que no se presentará ningún error (Ver figura 12).

Figura 12. Fin de la ejecución (cálculo) de la red



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Al culminar esta fase, y con la integración de los pasos anteriores, fue posible generar un modelo hidráulico preliminar, que contiene la red de distribución con la información que la caracteriza hidráulicamente, incluyendo el catastro de redes, caudal de demanda georreferenciado para cada usuario asignado a un nodo y la representación de la variación de consumo. También, resulta oportuno aclarar que para que el modelo represente adecuadamente las condiciones reales de la red, se debe hacer un proceso de ajuste en algunos parámetros, es decir, calibrar el modelo.

5.3.4. Calibración del modelo hidráulico

Los modelos hidráulicos digitales encargados de simular el comportamiento de las redes de distribución, no representan con exactitud la conducta real del sistema. Es por esto, que, a través de la modificación de ciertos parámetros, es decir, mediante la calibración, se puede reproducir el funcionamiento de la red existente en campo, y proporcionar un modelo de simulación hidráulica confiable y aproximado a la realidad.

Para llevar a cabo este proceso, además de disponer de un modelo hidráulico que contenga toda la información topológica y consumos, es necesario tener en cuenta que existe un grupo de variables que rigen su comportamiento y que deben ajustarse, por lo que se debe contar con mediciones de campo confiables.

Una metodología adecuada para el proceso de calibración, que analiza y clasifica las variables que influyen en el sistema teniendo en cuenta sus características y efectos sobre el mismo, es presentada por Saldarriaga y Jurado (2008) en su trabajo "Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable". Esta se basa inicialmente en la asignación de pérdidas por válvulas y uniones y una asignación de diámetros reales. Posteriormente se debe realizar una calibración para el análisis de variables que influyen en el transporte de masas del sistema en busca de problemas asociados a pérdidas comerciales (análisis de demandas desconocidas) y pérdidas técnicas (análisis por emisores). También, se hace una calibración de energía (análisis por rugosidades, diámetros y pérdidas menores), en donde se considera el efecto en la red que tienen los cambios en el diámetro y la rugosidad original en las tuberías, y aquellos efectos que provocan la existencia de accesorios o elementos que están en contacto con el flujo y que pueden generar pérdidas de energía, lo que permite presentar una aproximación del comportamiento de las presiones, y así obtener un modelo unificado.

Debido al tamaño y complejidad del espacio de búsqueda que debe ser explorado durante la calibración, a factores como la logística, el tiempo y los recursos que implica la medición de las variables en campo, y a cambios producidos por el tiempo, mantenimientos no reportados o inconsistencias de la red en general, que el conocimiento de la red no es completo, lo que representa dificultades en el momento de calibrar. Es por esto, que para el desarrollo de esta práctica solo se realizó una pre-calibración aproximada del modelo, en donde se asignaron los diámetros internos de todas las tuberías de la red de acuerdo con el material del que están elaboradas y los reportes de los respectivos fabricantes.

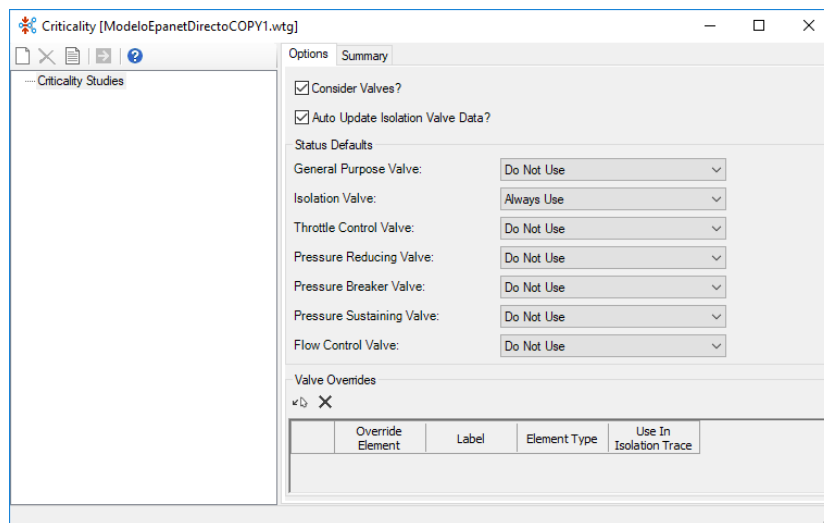
El modelo en cuestión contiene un gran número de elementos asociados y no posee todos los valores medidos en campo de las variables que inciden en la calibración, esto implica que las mediciones de presión o de caudal del mismo no representen completamente las condiciones reales de la red.

5.3.5. Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad permite evaluar el sistema de distribución de agua e identificar los elementos más críticos o aquellos que se ven afectados al simular una interrupción en determinado tramo de tubería. Así, cuando se produce una interrupción del sistema de distribución por un daño, se suspende una parte del sistema denominada segmento de red, que es la parte más pequeña de un sistema de distribución que puede aislarse mediante una válvula. Dicho segmento incluye varios nodos, porciones de tuberías y otros elementos.

A fin de conducir dicho análisis se empleó la herramienta Criticality de WaterGems, para lo que es necesario que el modelo construido cuente con las válvulas de corte (Isolation Valves) con sus respectivos tubos de referencia. En el administrador de esta herramienta se configuran las opciones para el análisis, en donde se define el uso de las válvulas del sistema, verificando que esté seleccionada la casilla de considerar las válvulas y teniendo en cuenta que para el fin que busca este trabajo, las válvulas de corte son el único tipo de válvula que siempre se va a utilizar, por lo que es necesario señalarlo en las opciones como se muestra en la figura 13.

Figura 13. Configuración de las opciones de Criticality



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Otro parámetro a tener en cuenta en el análisis es el alcance de la segmentación, donde no se va a trabajar con la red completa, sino que solo se va a emplear un subconjunto de la misma, siendo este, la tubería reportada con daño. Para esto se debe contar con la relación entre el daño y el tubo, y teniendo en cuenta que la información suministrada correspondiente a los daños no contaba con el tubo asociado, fue necesario emplear la función Spatial Join de ArcMap para unir los atributos de las tuberías con los daños en base a su relación espacial, y así obtener los códigos de los tubos que se analizaron como subconjuntos.

Una vez configuradas las opciones en el administrador de Criticality, se ejecuta la herramienta en el escenario base, la cual simula una suspensión en la tubería señalada previamente y despliega una lista de segmentos de la red que se identificaron en el análisis en términos de elementos afectados, números de tuberías sin servicio, nudos aislados y los usuarios que se ven afectados por el cierre de dicho segmento. Igualmente, en la lista de los nudos aislados se muestran las válvulas de corte que deben ser cerradas para aislar el segmento durante la interrupción.

Figura 14. Resultados del análisis de criticidad de un daño.

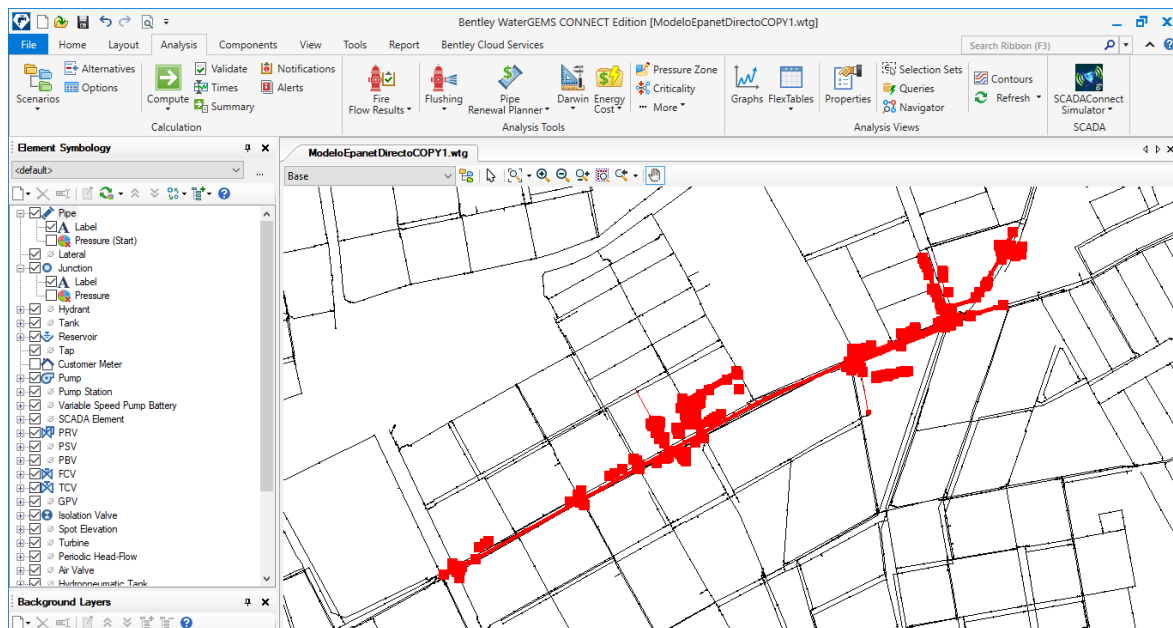
| Segment | Affected Elements <Count> | Isolation Nodes <Count> | Pipes <Count> | Affected Customer Meters <Count> | Segment Length (m) | Fluid Volume of Segment (gal) | Segment Color |
|-------------|------------------------------|----------------------------|------------------|--|-----------------------|-------------------------------------|------------------|
| Segment - 1 | 84 | 29 | 113 | 174 | 1,694 | 13,968.3 | 255,0,0 |

| Segment | Label | Element Type |
|-------------|--------|----------------|
| Segment - 1 | 054650 | Customer Meter |
| Segment - 1 | 054649 | Customer Meter |
| Segment - 1 | 054648 | Customer Meter |
| Segment - 1 | 052923 | Customer Meter |
| Segment - 1 | 052922 | Customer Meter |
| Segment - 1 | 052921 | Customer Meter |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

Este análisis es vital para identificar los usuarios que se ven afectados por la suspensión del servicio que implica un daño en cierta tubería, y en la determinación de las válvulas de corte dentro de la red, con el fin de garantizar la prestación adecuada del servicio. Estos resultados se pueden ver reflejados en el dibujo (ver Figura 15) y resultan ventajosos, ya que se pueden identificar que segmentos requieren el funcionamiento de cierto número de válvulas para conseguir un cierre.

Figura 15. Representación en la red del análisis de criticidad.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP. Software: WaterGEMS

El procedimiento anterior se realizó para cada uno de los daños reportados por el amb en cuatro meses del segundo semestre del año 2017 (julio, agosto, septiembre y octubre) y los datos generados en el análisis fueron extraídos a un archivo plano.

5.4. Análisis de Usuarios afectados y Consolidación de la información

Tras ejecutar el análisis de la herramienta Citality, y con la información generada concerniente a los suscriptores aislados por cada interrupción con su respectivo código identificador, se procedió a consolidar los datos de acuerdo a los requerimientos establecidos por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en la Resolución No. SSPD – 20171300039945 de 2017 para el reporte de la información relacionada con la metodología tarifaria para acueducto y alcantarillado.

La información de continuidad que debe reportar el prestador de servicios públicos domiciliarios, en el marco de la metodología tarifaria vigente, como lo indica la resolución en cuestión está representado en la figura 16.

Figura 16. Formato Discontinuidades mensuales por ruta de lectura según SSPD.

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------|---|-----------------------------------|--|---|--|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| ID Sistema | Código DANE departamento | Código DANE municipio | Código DANE centro poblado | Ruta de lectura | Suscriptores totales de la ruta de lectura afectada | Suscriptores afectados en la ruta | % de suscriptores afectados en la Ruta | Inicio del tiempo de afectación - Fecha | Inicio del tiempo de afectación - Hora | Fin del tiempo de afectación - Fecha | Fin del tiempo de afectación - Hora | Tiempo de afectación | Tiempo total de afectación |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |

Fuente: Superintendencia de Servicios Públicos domiciliarios. Resolución No. SSPD – 20171300039945 de 2017.

Donde cada casilla según la Resolución SSPD-20171300039945, (2017):

- ID sistema: Hace referencia al identificador numérico generado por el Sistema Único de Reporte de Información de Cálculo Tarifario –SURICATA al momento de registrar los sistemas que abastece el prestador de servicios públicos domiciliarios.
- Código DANE departamento/municipio/centro poblado: Hace referencia a las entidades territoriales (departamentos, municipios, centros poblados) donde se presta el servicio público domiciliario. Esta información está disponible en la página web del DANE y es actualizada trimestralmente. Para el área de cobertura del amb, se emplean los siguientes códigos:
 - Santander: 68
 - Bucaramanga: 001
 - Floridablanca: 276
 - Girón: 307
- Ruta de lectura: Corresponde a la ruta identificada por el amb como prestador para la lectura de micromedición y está definida como el conjunto de puntos de consumo asociados a cuentas internas, cuyos medidores son leídos de forma ordenada uniendo dos puntos geográficos extremos a través de calles para tomar la lectura de los medidores y posteriormente determinar los consumos en el proceso de facturación de cada punto.
- Suscriptores totales de la ruta de lectura afectada: indica el número de suscriptores totales de la ruta de lectura afectada en el periodo a reportar. (Está información es suministrada por la empresa).

- Suscriptores afectados en la ruta: indica el número total de suscriptores que presentan afectación en el periodo a reportar para la ruta de lectura indicada. Estos son tomados del análisis de criticidad elaborado anteriormente para cada daño y clasificados según la ruta de lectura a la que pertenecen.
- % de suscriptores afectados en la ruta: Corresponde al porcentaje de suscriptores afectados del total de suscriptores de la ruta de lectura indicada. Este se calcula con la división entre los usuarios totales en la ruta y los usuarios afectados.
- Inicio del tiempo de afectación – fecha: Indica el día de inicio de la afectación en formato DD-MM-AAAA, es decir, el momento a partir del cual empieza la suspensión del servicio debido a la reparación del daño.
- Inicio del tiempo de afectación – hora: Indica la hora en formato de HH:MM en el que HH son horas y MM minutos en que inició la afectación.
- Fin del tiempo de afectación – fecha: Indica la fecha de finalización de la afectación en formato DD-MM-AAAA, es decir, el momento en el que culmina la reparación del daño y por ende la suspensión del servicio.
- Fin del tiempo de afectación – hora: Indica la hora en formato de HH:MM en el que HH son horas y MM minutos en que finalizó la afectación.
- Tiempo de afectación: Corresponde al valor en días que duró la afectación. Se calcula así: fin del tiempo de afectación menos inicio del tiempo de afectación.
- Tiempo total de afectación: Corresponde a la multiplicación de los días del tiempo de afectación por los suscriptores afectados.

Para los cuatro meses que se analizaron, se encontró un total de 1.272 interrupciones en el servicio referentes a los daños reportados. La tabla 2 muestra un fragmento de los suscriptores afectados por la discontinuidad del servicio mensual por ruta de lectura de acuerdo al formato exigido por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

Tabla 2. Fragmento de Usuarios afectados por la discontinuidad del servicio en el mes de Agosto de 2017

| id sistema | Departamento | Municipio | Centros Poblados | Ruta | Usu Ruta | Usu afec Ruta | Porcen afect Ruta | Fecha Ini | Hora Ini | Fecha Fin | Hora Fin | Tiempo (días) | Total afect |
|------------|--------------|-----------|------------------|-------|----------|---------------|-------------------|-----------|----------|-----------|----------|---------------|-------------|
| 57 | 68 | 001 | 000 | 10804 | 424 | 5 | 0.011792453 | 15-08-17 | 14:30 | 15-08-17 | 15:30 | 0.041666667 | 0.208333333 |
| 57 | 68 | 001 | 000 | 10805 | 310 | 1 | 0.003225806 | 02-08-17 | 07:40 | 02-08-17 | 19:40 | 0.5 | 0.5 |
| 57 | 68 | 001 | 000 | 31550 | 661 | 57 | 0.08623298 | 01-08-17 | 07:50 | 01-08-17 | 10:00 | 0.090277778 | 5.145833333 |
| 57 | 68 | 307 | 000 | 31550 | 661 | 2 | 0.003025719 | 01-08-17 | 08:30 | 01-08-17 | 10:30 | 0.083333333 | 0.166666667 |
| 57 | 68 | 307 | 000 | 10411 | 404 | 14 | 0.034653465 | 01-08-17 | 09:20 | 01-08-17 | 11:00 | 0.069444444 | 0.972222222 |
| 57 | 68 | 307 | 000 | 10806 | 242 | 40 | 0.165289256 | 02-08-17 | 11:00 | 02-08-17 | 11:30 | 0.020833333 | 0.833333333 |
| 57 | 68 | 276 | 000 | 10130 | 358 | 15 | 0.041899441 | 01-08-17 | 08:30 | 01-08-17 | 11:00 | 0.104166667 | 1.5625 |
| 57 | 68 | 001 | 000 | 10132 | 109 | 18 | 0.165137615 | 01-08-17 | 10:30 | 01-08-17 | 11:30 | 0.041666667 | 0.75 |
| 57 | 68 | 001 | 000 | 11550 | 101 | 43 | 0.425742574 | 01-08-17 | 08:00 | 01-08-17 | 08:10 | 0.006944444 | 0.298611111 |
| 57 | 68 | 001 | 000 | 10704 | 378 | 98 | 0.259259259 | 02-08-17 | 08:00 | 02-08-17 | 09:00 | 0.041666667 | 4.083333333 |
| 57 | 68 | 001 | 000 | 10805 | 310 | 8 | 0.025806452 | 01-08-17 | 10:10 | 01-08-17 | 12:00 | 0.076388889 | 0.611111111 |
| 57 | 68 | 001 | 000 | 40205 | 946 | 25 | 0.026427061 | 01-08-17 | 11:20 | 01-08-17 | 13:00 | 0.069444444 | 1.736111111 |

Adicionalmente, se generó un archivo con la lista de los suscriptores afectados por ruta con su respectivo código de identificación, con el fin de conocer los usuarios a los cuales se les debe realizar la correspondiente devolución tarifaria según la normativa vigente.

Así mismo, se creó un archivo mostrando el porcentaje de continuidad del servicio en términos de ruta y afectación. Para ello, se calculó el tiempo total de afectación presentado en cada ruta y se dividió en el tiempo total mensual por ruta (ver Ecuación 3.) obteniendo así, la afectación generada en cada ruta.

$$Afectación = \left(\frac{\text{tiempo de afectación} * \text{suscriptores afectados en la ruta}}{\text{tiempo del periodo} * \text{suscriptores en la ruta}} \right)$$

Ecuación 3. Ecuación para el cálculo de afectación por ruta.

Donde:

Tiempo de afectación: tiempo de afectación del servicio introducido en días.

Suscriptores afectados en la ruta: número de suscriptores afectados por ruta.

Tiempo del periodo: duración del periodo evaluado (mensual) introducido en días.

Suscriptores en la ruta: número total de suscriptores por ruta.

Con el valor de la afectación ya calculado, se pudo determinar la continuidad de cada ruta con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Continuidad} = (1 - Afectación) * 100$$

Ecuación 4. Ecuación para definir el porcentaje de continuidad por ruta.

Tabla 3. Fragmento de lista de continuidad por ruta.

| Ruta | Continuidad |
|-------|-------------|
| 12018 | 99.998206 |
| 11703 | 99.980601 |
| 11422 | 99.614852 |
| 30224 | 99.980637 |
| 11810 | 99.911344 |
| 50202 | 99.991892 |

6. RESULTADOS

Algunos de los resultados más destacados encontrados durante el desarrollo de la práctica empresarial se presentan a continuación:

- **Construcción del modelo hidráulico de la red:** Con base en la información recopilada y suministrada por el amb, se construyó un modelo hidráulico detallado de la red de distribución del amb S.A. ESP. en la extensión *.wtg que ha sido validado, y el cual podrá ser empleado como una herramienta operativa en la toma de decisiones.
- **Detección de errores topológicos:** Durante la construcción del modelo hidráulico se encontraron inconsistencias, debido principalmente a la imprecisión en el momento de dibujar la topología de la red que fue importada al modelo, por lo que se impedía su adecuada ejecución en el software trabajado, hasta no ser corregidos dichos errores.
- **Detección de errores en la conectividad:** La información empleada para la construcción del modelo en el software WaterGEMS no contaba con la conectividad pertinente para la importación de los datos, por lo que inicialmente la información no era suministrada completamente en el modelo. A pesar de que la herramienta Modelbuilder permitía al importar los datos, crear nodos si no encontraba alguno en el extremo del tubo y así obtener conectividad en la red, esta opción creaba demasiados nodos adicionales que no se encontraban codificados de acuerdo a la nomenclatura de la empresa, por lo que se generaba una excesiva cantidad de datos difícil de manejar. Para solucionar este inconveniente, se agregaron en los atributos de los archivos shape de ArcMap, casillas que señalaran el nodo inicial y el nodo final de cada tubo, garantizando la relación entre ellos y la conectividad de la red al importar la información al modelo.
- **Identificación de usuarios afectados:** A través de un análisis de criticidad en WaterGems, además de identificar las válvulas de asilamiento que deben ser cerradas para aislar el tramo donde ocurre la interrupción del servicio, se determinaron los suscriptores afectados en la presencia de cada uno de los daños reportados.

7. CONCLUSIONES

En la actualidad la modelación hidráulica se ha posicionado como la principal herramienta para diseñar y operar sistemas de distribución de agua, es por eso que los modelos hidráulicos calibrados en el amb S.A. ESP juegan un papel importante en la operación y gestión integral de sus redes. En este sentido, se desarrolló un modelo hidráulico que funciona como herramienta computacional, que representa de manera precisa la topología de la red de distribución y que está orientado a mejorar los procesos operativos con respecto a las suspensiones de servicio en la red de distribución.

Para un desarrollo eficiente de la metodología se requirió el entendimiento de los diferentes elementos que constituyen una red de distribución de agua, los parámetros y variables que influyen en la misma, y algunos conceptos básicos para la simulación como la ecuación de la continuidad y los efectos de fricción en las tuberías. Esto, teniendo en cuenta las normas de diseño convencionales vigentes y los procedimientos propios de la ingeniería, que se presentan en el Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).

El uso de la información facturada por la empresa como prestadora de servicio tiene gran importancia en el momento de la modelación. Datos como el consumo de los usuarios, permiten caracterizar patrones que proporcionen un medio eficaz para aplicar las demandas del sistema variable en el tiempo al modelo de distribución por medio de una curva de modulación y así, generar una simulación adecuada de la red y obtener una aproximación del funcionamiento hidráulico del sector de estudio. De la misma forma, fue esencial contar con el catastro de redes y el listado de usuarios para el montaje general del modelo.

Realizar un análisis de criticidad permite además de evaluar el sistema de distribución de agua potable e identificar los elementos más críticos de la red, resaltar la importancia de las válvulas de corte (isolation valves) dentro del sistema de distribución de agua en términos de confiabilidad en la prestación del servicio, ya que este procedimiento determina las válvulas que deben ser operadas (cerrar/abrir) para que un tubo identificado como afectado por un daño, quede sin agua. Es por esto, que tiene relevancia la adecuada ubicación de las válvulas de corte del sistema, ya que una acertada manera de minimizar los efectos que genera la suspensión del servicio radica en este parámetro.

Además, mediante el análisis de criticidad se pudieron identificar los suscriptores que se ven afectados por la interrupción del servicio, y a los cuales les corresponde una devolución tarifaria de acuerdo a la normativa vigente. Los datos de las discontinuidades fueron presentados en base a los daños reportados por la empresa prestadora de servicio y fueron consolidados en un archivo plano, cumpliendo con los requerimientos exigidos por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

La aplicación de la metodología para el desarrollo del modelo hidráulico planteado, se puede extender a cualquier red de distribución de agua potable dado las generalidades de la misma, y partiendo de una completa base de datos para su montaje.

8. APOORTE AL CONOCIMIENTO

Con el trabajo desarrollado en el transcurso de la práctica, no solo se ha complementado el conocimiento teórico en el área de hidráulica y acueductos, sino también, se ha aprendido acerca de la modelación hidráulica. Algunos de esos aportes son:

- Los modelos hidráulicos aportan diversos beneficios en la ingeniería, ya que funcionan como herramientas para la obtención de soluciones prácticas a las diversas situaciones que se pueden presentar en el campo de la hidráulica, así como también, en el diseño y operación de los sistemas de distribución de agua. Es por esto, que se emplean programas como WaterGems, que aportan información sobre el comportamiento de una red y sirven para este fin. Pero es labor del ingeniero plantear las estrategias operativas que se deben tomar en el desarrollo del modelo, así como la implementación de los conceptos necesarios para la adecuada interpretación y análisis de resultados.
- Conocer y poner en práctica los procedimientos en el modelamiento es de gran importancia para conseguir el modelo deseado y así alcanzar los objetivos propuestos. El estar en continuo proceso de indagación respecto a la documentación relacionada al modelamiento como manuales y conceptos fundamentales que se deben tener en cuenta durante su desarrollo, así como un adecuado suministro de la información para su análisis hidráulico, va dando la habilidad para interpretar adecuadamente los datos y dar soluciones a dificultades que se puedan presentar durante este proceso, y así aportar confiabilidad en los resultados obtenidos.
- Realizar un continuo análisis en la ejecución de las actividades correspondientes al montaje del modelo, va desarrollando la habilidad de identificar falencias en la información del catastro de las redes, topología o registro de consumos, y contribuye a mejorar la capacidad de buscar alternativas y aplicar métodos que ayuden a encontrar soluciones a las dificultades en base a los conocimientos técnicos, de manera que se afiance el perfil del profesional.
- Valorar la importancia que tiene la georreferenciación como base para la correcta localización de la información (como el catastro de la red, ubicación de los daños y usuarios), permite como ingeniero ejecutar labores de operación con exactitud, en busca de un mejor control en la parte operacional de los sistemas, además de servir de apoyo en otras actividades, como en la detección y localización de daños para su oportuna reparación, y conocer con exactitud cuántos usuarios existen en una zona que se desea intervenir.
- Comprender como los procesos de calibración en los modelos garantizan que estos reflejen adecuadamente el comportamiento del sistema en la realidad, al ingresar datos como lecturas de caudales y presiones obtenidas en campo, y ajustar parámetros de rugosidades, diámetros, demandas y estados,

proporcionan en la modelación resultados afines a la realidad y confiables. Aún así, es importante reconocer que la calibración en las redes de distribución es un proceso complejo, en donde los parámetros involucrados son enormes, por lo que lleva tiempo desarrollarlo y requiere de métodos especiales para lograr una buena aproximación a su respuesta.

- Conocer de cerca un software como WaterGems, y las funciones avanzadas que este ofrece en la creación y análisis de modelos, proporciona una verdadera herramienta de ingeniería y toma de decisiones, siendo de gran aporte al conocimiento profesional.

Como aporte a la empresa, en el cumplimiento de las labores encomendadas, se elaboraron los archivos correspondientes a la información de continuidad del servicio mensual por ruta de lectura en el marco de la metodología tarifaria vigente, según las especificaciones indicadas por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, que debe reportar la empresa como prestadora de servicios públicos domiciliarios de acueducto. Adicionalmente, se generó una base de datos correspondiente a los usuarios de la empresa que se ven afectados por la interrupción del servicio a causa de los daños reportados en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre del año 2017, y asociada a sus respectivas rutas de lectura, para más adelante aplicarle la devolución tarifaria pertinente.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ostfeld, A. (2015). "Water Distribution Networks," in Intelligent Monitoring, Control, and Security of Critical Infrastructure Systems, E. Kyriakides and M. Polycarpou, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

Senn, J. (1988). Análisis y diseño de Sistemas de Información. 2 ed. Argentina: McGraw-Hill, 1988.

WALSKI, T. (2000). Model Calibration Data: The Good, the Bad, and the Useless. Journal: American Water Works Association, 92(1), 94-99. doi:jaw_0050197

Bentley Systems, Inc, (2010). Haestad Methods Solution Center: WaterGems V8i User's Guide. Bentley Watergems V8i edition.

EPA. (2006). Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. EPANET. Recuperado de <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

Resolución SSPD-20171300039945, (2017). Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá D.C., Colombia, 28 de marzo de 2017.

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS (2010). TÍTULO B. Sistemas de acueducto. Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2010.

Mendoza, R. H. (2000). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. Ingeniería Mecánica.

Bartolín, H. (2013). Confección de modelos de redes de distribución de agua desde un SIG y desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital, IDECA. (2016). Sistema de información geográfica. Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de <https://www.ideca.gov.co/es/sistema-de-informacion-geografica>

Saldarriaga, J. G. (2007). Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de agua, redes y riegos. (2da. Ed). Bogotá, D.C., Colombia: Alfaomega-Uniandes

Khan Academy. (2015). Dinámica de fluidos: Ecuación de la continuidad. EE.UU. Khan Academy. Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-volume-flow-rate>

Mederos, G. (2012). Obtención de Modelos Matemáticos para los coeficientes de pérdidas de carga en accesorios hidráulicos. (Tesis de pregrado). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

Instituto Geocéntrico Agustín Codazzi. (2004). Adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia. Recuperado de <http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/4b831c00469f7616afeebf923ecdf8fe/adopcion.pdf?MOD=AJPERES>

Saldarriaga, J., y Jurado, C. (Mayo de 2008). Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable. Sociedad Colombiana de Ingenieros. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá D.C., Colombia.

Gómez Crespo, M., & Verde Rodarte, C. (2007). La detección de fallas y las redes de distribución de agua. Una revisión. Ingeniería Hidráulica Y Ambiental, 28(2), 42-48.

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA. (2014). Boletines y Publicaciones. Bogotá, D.C., Colombia. Recuperado de <http://www.cra.gov.co/es/otras-secciones/item-otras-secciones/20688-items-otras-secciones>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE. (2017). Codificación de la División Político Administrativa de Colombia – DIVIPOLA. Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de <http://www.dane.gov.co/index.php/sistema-estadistico-nacional-sen/normas-y-estandares/nomenclaturas-y-clasificaciones/nomenclaturas/codificacion-de-la-division-politica-administrativa-de-colombia-divipola>