



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Identificación de los puntos críticos para las pérdidas de agua en la red de distribución de agua potable de la vereda el Rosario del municipio de Manizales-Caldas**

**Alexander López Arboleda**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Ingeniería – Recursos hidráulicos

Manizales, Colombia

2021

# **Identificación de los puntos críticos para las pérdidas de agua en la red de distribución de agua potable de la vereda el Rosario del municipio de Manizales-Caldas**

**Alexander López Arboleda**

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería – Recursos hidráulicos**

Directora:

Ph.D. JEANNETTE DEL CARMEN ZAMBRANO NÁJERA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Ingeniería – Recursos hidráulicos

Manizales, Colombia

2021

## **Resumen**

### **Identificación de los puntos críticos para las pérdidas de agua en la red de distribución de agua potable de la vereda el Rosario del municipio de Manizales-Caldas**

En la zona rural de la ciudad de Manizales las redes de distribución de agua potable atraviesan por zonas boscosas, quebradas y fincas privadas con cultivos específicos, generando una complicidad en las pérdidas de volumen por factores tales como usos irregulares para riego o consumo humano, daños no reportados generados por terceros, fatiga de los materiales y por los cambios abruptos en las presiones debido a la topografía montañosa de la zona. Por tanto, es muy importante identificar y reducir las pérdidas de volumen de agua que se generan en zonas de difícil acceso.

Para este documento se utilizaron equipos de medición como herramientas para sectorizar los tramos de red de acueducto con mayor pérdida de volumen de agua, provocados por diferentes situaciones que se presentan en la zona rural del municipio de Manizales, concretamente en el circuito La Bombonera de la vereda El Rosario. Adicionalmente, se plantea el análisis del comportamiento hidráulico de las redes de acueducto y su efecto en la gestión y operación del sistema. La información obtenida del sistema se modeló hidráulicamente, de manera que con el modelo se puedan detectar posibles problemas futuros en las redes.

Las lecturas tomadas de los macromedidores y micromedidores del circuito seleccionado fueron utilizadas para identificar el agua suministrada y facturada, donde la diferencia de los 2 se convierten en las pérdidas de volumen, la cual es analizada para sectorizar los tramos de red con mayores pérdidas y así buscar las soluciones por medio de recorridos a la red, toma de presiones y optimizaciones. De igual manera, se utilizó el modelo hidráulico para analizar la red que se está estudiando y así mejorar las presiones mediante la instalación de válvulas que regulan el flujo del agua. Finalmente, se plantearon soluciones para reducir las pérdidas de volumen de agua y optimizar la red de acueducto, por medio de la aplicación de la función objetivo de "maximizar la cobertura de presiones adecuadas".

**Palabras clave:** Pérdidas hidráulicas, Modelación hidráulica, Optimización de redes de acueducto, gestión.

## **Abstract**

### **Critical points identification for the water losses in the drinking water distribution network for the “El Rosario” village in the municipality of Manizales, department of Caldas.**

In the rural area of the city of Manizales, drinking water distribution networks cross wooded areas, streams and private farms with specific crops, generating a complicity in volume losses due to factors such as irregular uses for irrigation or human consumption, unreported third-party damage, material fatigue and abrupt changes in pressure due to the mountainous topography of the area. Therefore, it is very important to identify and reduce water volume losses generated in hard access areas.

For this document measurement equipment's were used as a tool to identified the aqueduct network with more volume water losses, caused by different situation presented in the Manizales rural zone, in concrete in the circuit “La Bombonera” belonging to the village “El Rosario”. In addition, the analysis of the hydraulic behavior of the aqueduct networks and its effect in the management and system operation is proposed.

The measurements taken with the macrometers and micrometers, in the circuit selected, were used to identify the invoiced and delivered water, where the difference between both data become into the volume losses, which is analyzed to identified the areas of the network with higher losses and thus search solutions through networks tours, pressure measurements and optimization. In the same way, a hydraulic model were used in order to analyze the network being studied and thus improve the pressure through the valves installation that regulate the water flow.

Last but not least, solutions to reduce the water volume losses and optimize the aqueduct network applying the objective function “maximize the adequate pressure coverage”.

**Keywords:** Hydraulic losses, Hydraulic modeling, Aqueduct network optimization, management

## Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción.....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2. Descripción del problema .....</b>  | <b>15</b> |
| <b>3. Objetivos .....</b>   | <b>18</b> |
| 2.1. Objetivo general .....   | 18        |
| 2.2. Objetivos específicos.....   | 19        |
| <b>3. Marco Teórico.....</b>  | <b>20</b> |
| 3.1. Pérdidas del Sistema.....  | 20        |
| 3.1.1. Pérdidas comerciales .....   | 20        |
| 3.1.2. Pérdidas técnicas .....  | 20        |
| 3.1.3. Pérdidas no determinantes.....   | 20        |
| 3.1.4. Índice de agua no contabilizada (IANC).....                              | 21        |
| 3.1.5. Índice de pérdidas por suscriptor facturado (IPUF) .....                 | 22        |
| 3.1.6. Programas de control de pérdidas .....                                   | 23        |
| 3.2. Equipos para la identificación de caudales y presiones en las redes .....  | 24        |
| 3.2.1. Medidores de volumen .....   | 24        |
| 3.2.2. Estaciones reguladoras de presión.....                                   | 27        |
| 3.2.3. Equipos de medición de caudal y presión .....                            | 29        |
| 3.2.4. Manómetros digitales .....   | 30        |
| 3.2.5. Medidor ultrasónico .....  | 31        |
| 3.3. Sectorización hidráulica .....   | 32        |
| 3.4. Modelación hidráulica.....   | 33        |
| 3.4.1. Antecedentes de la modelación .....                                      | 38        |
| <b>4. Metodología.....</b>  | <b>39</b> |
| 4.1. Selección de la zona de estudio.....                                       | 40        |
| 4.2. Recopilación de la información.....  | 44        |
| 4.2.1 Recopilación de información existente .....                               | 44        |
| 4.2.2 Recopilación de información faltante.....                                 | 45        |
| 4.3. Selección de los puntos de medición de volumen .....                       | 46        |
| 4.3.1 Instalación de macromedidores .....                                       | 46        |
| 4.3.2 Recolección de datos de campo .....                                       | 47        |
| 4.3.3 Cambio de micromedidores .....  | 47        |
| 4.3.4 Proceso de validación de datos de campo .....                             | 47        |
| 4.4. Selección de puntos de medición de presión y caudal .....                  | 47        |
| 4.4.1 Validación, control y seguimiento de los datos.....                       | 47        |
| 4.4.2 Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo.....          | 48        |
| 4.4.3 Estimación del índice de Agua no contabilizada (IANC) para cada zona..... | 48        |
| 4.5. Modelo computacional, calibración y validación hidráulica.....             | 49        |
| 4.5.1. Análisis de sensibilidad de las variables .....                          | 50        |
| 4.5.2. Calibración del modelo .....   | 50        |
| <b>5. Resultados .....</b>  | <b>53</b> |
| 5.1. Actualización del catastro de la zona de estudio.....                      | 53        |
| 5.1.1 Información inicial del Sistema de Información Geográfico .....           | 53        |
| 5.1.2 Información de consumo del sector .....                                   | 55        |
| 5.1.3. Catastro actualizado de usuarios y válvulas del sector La Bombonera..... | 55        |
| 5.2. Determinación de los volúmenes servidos y de las pérdidas .....            | 56        |

---

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 5.2.1     | Instalación de macromedidores .....  | 57        |
| 5.2.2     | Micromedición y búsqueda de pérdidas técnicas del sector hidráulico La Bombonera de la vereda El Rosario ..... | 58        |
| 5.3.      | Análisis de Índice De Agua No Contabilizada del circuito de la vereda El Rosario.....                          | 59        |
| 5.4.      | Determinación de los patrones de presión y caudales .....  | 61        |
| 5.5.      | Validación, control y seguimiento de los datos.....  | 62        |
| 5.5.1     | Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo.....   | 65        |
| 5.6.      | Modelación hidráulica, calibración y validación.....   | 67        |
| 5.6.1     | Calibración del modelo .....   | 67        |
| 5.7.      | Análisis de resultados del comportamiento actual de las redes.....   | 74        |
| 5.8.      | Propuesta de optimización del funcionamiento de las redes .....  | 79        |
| 5.8.1     | Parámetros de optimización .....   | 80        |
| 5.8.2     | Definición y resultados de la optimización hidráulica .....  | 81        |
| <b>6.</b> | <b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>  | <b>86</b> |
| 6.1.      | Conclusiones .....   | 86        |
| 6.2.      | Recomendaciones.....   | 89        |
|           | <b>Bibliografía .....</b>  | <b>91</b> |

# Lista de Ilustraciones

|   |    |
|---|----|
| <i>Ilustración 1: Fuga de en la red de acueducto de la zona rural (Elaboración propia, 2020) .....</i>  | 15 |
| <i>Ilustración 2: Árbol de problemas (Elaboración propia, 2019) .....</i>   | 18 |
| <i>Ilustración 3: Árbol de objetivos (Elaboración propia, 2019).....</i>  | 19 |
| <i>Ilustración 4: Desagregado IANC (International Water Association, 2017) .....</i>  | 22 |
| <i>Ilustración 5: Curva Típica de análisis de error de un contador (Kantauriar &amp; Bulegoa, s.f.) .....</i>   | 25 |
| <i>Ilustración 6 :Principios de medición para equipos por ultrasonido. (Yamatho Supply, 2017) .....</i>   | 27 |
| <i>Ilustración 7: Montaje típico de estación de regulación (APOLO, 2019) .....</i>  | 28 |
| <i>Ilustración 8: Estación de regulación Cuchilla del Salado (Elaboración propia, 2020).....</i>  | 29 |
| <i>Ilustración 9: Manómetro digital para la medición de presiones (KELLER AG, 2016) .....</i>   | 31 |
| <i>Ilustración 10: Medidor de caudal y procedimiento para la instalación del equipo (Generalidades Tecnológicas Ltd, 2016).....</i>   | 32 |
| <i>Ilustración 11: Justificación económica y operativa de la implementación de la sectorización (Saldarriaga, 2016) .....</i>   | 33 |
| <i>Ilustración 12: Elementos de la modelación (Refsgaard y Henriksen, 2004) .....</i>   | 34 |
| <i>Ilustración 13. Ubicación de la zona de estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>  | 41 |
| <i>Ilustración 14: Circuito de El Rosario con sus sectores hidráulicos .....</i>  | 42 |
| <i>Ilustración 15: Mapa del sector hidráulico La Bombonera con suscriptores de la vereda el Rosario (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>                     | 43 |
| <i>Ilustración 16: Sistema de información comercial “SOFTWARE AMERIKA” (Aguas de Manizales, 2020) .....</i>   | 45 |
| <i>Ilustración 17: Visor del software “SEGOVIA” (Aguas de Manizales, 2020) .....</i>  | 46 |
| <i>Ilustración 18: Criterios de calibración Bentley (BENTLEY SYSTEMS INC, 2006) .....</i>   | 51 |
| <i>Ilustración 19: Metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA) (Saldarriaga, 2008) .....</i>   | 52 |
| <i>Ilustración 20: Información de las válvulas del sector La bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>  | 54 |
| <i>Ilustración 21: Macromedidores instalados en la vereda el Rosario .....</i>  | 56 |
| <i>Ilustración 22: Instalación de macromedidor y filtros en el tanque Lomas (Elaboración propia, 2020) .....</i>  | 57 |
| <i>Ilustración 23: Localización punto para medición de caudal y punto de tomas de presión en el sector de la Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020) .....</i> | 62 |
| <i>Ilustración 24 Tomas de presión en periodos de lectura de 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>   | 63 |
| <i>Ilustración 25. Curvas de caudal de la zona de estudio durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>  | 65 |
| <i>Ilustración 26. Patrón de consumo de la zona de estudio durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>   | 66 |
| <i>Ilustración 27. Representación gráfica del modelo hidráulico del sector La Bombonera en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>                    | 67 |
| <i>Ilustración 28. Presión y gradiente hidráulico en el elemento de entrada al circuito La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....</i>                    | 68 |

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Ilustración 29</b> Estructura de simulaciones para obtener el modelo unificado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....  | 70 |
| <b>Ilustración 30</b> Resultados de la conservación de la masa entre lo modelado y observado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....                                 | 73 |
| <b>Ilustración 31</b> Resultados de la conservación de la energía entre lo modelado y observado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....                              | 74 |
| <b>Ilustración 32</b> Diámetros del sector hidráulico modelado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 75 |
| <b>Ilustración 33</b> Demandas en diferentes puntos del sector hidráulico modelado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 76 |
| <b>Ilustración 34</b> Velocidades del sector hidráulico modelado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 77 |
| <b>Ilustración 35</b> Polígonos de presiones de la zona de estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 78 |
| <b>Ilustración 36</b> Presiones en diferentes puntos de la red del circuito hidráulico modelado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....                              | 79 |
| <b>Ilustración 37</b> Nuevo alineamiento de las redes a optimizar en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....                                  | 81 |
| <b>Ilustración 38</b> Red nueva y red eliminada del sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....  | 82 |
| <b>Ilustración 39</b> Representación gráfica del modelo hidráulico de la optimización en el sector La Bombonera en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)..... | 83 |
| <b>Ilustración 40</b> Velocidades de la red optimizada en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 84 |
| <b>Ilustración 41</b> Caudales de las redes optimizadas en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....  | 84 |
| <b>Ilustración 42</b> Presiones de las redes optimizadas en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 85 |

# Lista de Tablas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1</b> Coeficientes de rugosidad definidos para cada material (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 50 |
| <b>Tabla 2</b> Actualización catastro de estado de operación de válvulas del sistema del sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020) .....       | 54 |
| <b>Tabla 3</b> Consumos promedio mensual de un periodo de seis meses del sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....                        | 55 |
| <b>Tabla 4</b> Actualización de catastro de redes y usuarios en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020) .....                             | 56 |
| <b>Tabla 5</b> Información de los macromedidores instalados en la salida del tanque Lomas y sector de La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....  | 58 |
| <b>Tabla 6</b> Resultados de los recorridos y búsqueda de fugas en el sistema (Aguas de Manizales, 2020) .....  | 59 |
| <b>Tabla 7</b> Optimización de micromedidores en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....   | 59 |
| <b>Tabla 8</b> Lecturas del macromedidor y la micromedición del circuito El Rosario (Elaboración propia, 2020).....   | 60 |
| <b>Tabla 9</b> Lecturas del macromedidor y la micromedición del sector La Bombonera (Elaboración propia, 2020).....   | 60 |
| <b>Tabla 10</b> Resultados obtenidos en la medición en campo de presiones para los máximos, mínimos y el medio por cada elemento del sector La Bombonera (Elaboración propia) 2020) ..... | 63 |
| <b>Tabla 11</b> Factores de consumo de la zona de estudio (Elaboración propia).....   | 66 |
| <b>Tabla 12</b> Porcentaje de pérdidas para cada macromedidor instalado en la zona de estudio (Elaboración propia, 2020) .....  | 69 |
| <b>Tabla 13</b> Coeficientes emisores para la creación de escenarios de simulaciones de la modelación (Elaboración propia, 2020) .....  | 69 |
| <b>Tabla 14</b> Coeficientes emisores para la creación de escenarios de modelación (Elaboración propia, 2020).....  | 70 |
| <b>Tabla 15</b> Resultados obtenidos del cálculo del error medio cuadrático (Elaboración propia, 2020) .....  | 72 |
| <b>Tabla 16</b> Validación del error medio cuadrático entre el modelo unificado y el modelo calibrado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020).....               | 73 |

---

## Lista de Ecuaciones

|   |    |
|---|----|
| <i>Ecuación 1</i> Cálculo del Índice de agua no contabilizada (IANC) .....            | 21 |
| <i>Ecuación 2</i> Cálculo del Índice de pérdidas por suscriptor facturado (IPUF)..... | 23 |
| <i>Ecuación 3.</i> Conservación de la masa o continuidad en el circuito .....         | 36 |
| <i>Ecuación 4.</i> Conservación de la masa en los nodos .....                         | 36 |
| <i>Ecuación 5.</i> Conservación de la energía entre dos nodos de la red.....          | 37 |
| <i>Ecuación 6.</i> Cálculos de pérdidas por fricción por Darcy-Weisbach .....         | 37 |
| <i>Ecuación 7.</i> Cálculo de factor de fricción por Colebrook-White .....            | 38 |
| <i>Ecuación 8.</i> Cálculo de pérdidas menores .....                                  | 38 |

## **1. Introducción**

Debido al crecimiento desmedido en los últimos años de la población se ha venido presentando una disminución significativa en la calidad del agua a nivel mundial, ya que, según el ciclo hidrológico el agua recircula en el planeta (Galvez, 2011) la cual es fundamental para el desarrollo económico y social. Específicamente, es esencial para mantener la salud, cultivar alimentos, generar energía, proteger el medio ambiente y crear empleos.

En el nuevo milenio millones de familias han logrado acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento, cumpliendo las normativas a nivel mundial al declarar al agua y el saneamiento como un derecho humano (Naciones Unidas, 2010). Sin embargo, datos recientes referencian que 3 de cada 10 personas en todo el mundo no pueden acceder de manera segura y fácil al agua en su hogar, según el informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF).

Para Latinoamérica el panorama no ha sido diferente con el acceso al agua potable y sus sistemas de distribución, encontrando que la población más afectada con esta situación es la infantil y femenina (Declaración Centroamericana del Agua, 1998). En Colombia sucede algo similar ya que, muchas familias no tienen acceso a agua potable más aun en las zonas rurales, donde la carencia de redes de distribución vuelve poco probable el panorama de un servicio de calidad a corto plazo.

Sin embargo, las zonas rurales que se ven beneficiadas con cobertura de agua potable evidencian un porcentaje de pérdidas bastante alto comparado con la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA, 2013), quien expresa que el valor aceptable de las pérdidas es del 30 % y es reconocido por el sistema tarifario. Adicionalmente, El Banco Mundial (2013) estimó que el 45 % del agua producida en América Latina es agua no facturada.

Una empresa proveedora de agua en zona urbanas y rurales, debe tener en cuenta que cada gota captada, transportada hacia la planta de tratamiento, potabilizada y transportada en las redes de distribución para finalmente ser entregada a los usuarios y que no es medida, es suministrada por la entidad de forma gratuita (IMTA, 2007). “En tales casos, no se recibe ninguna compensación económica por el servicio prestado, lo cual puede generar un impacto importante sobre el equilibrio económico de la compañía (Arregui et al., 2006) y en especial sobre el valor del Índice del Agua No Contabilizada (IANC)” (Cardona, 2014).

Por consiguiente, para el caso que se va a tratar de la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P. como empresa prestadora de los servicios de acueducto y alcantarillado en la ciudad de Manizales y algunas veredas de la zona rural del mismo municipio, se propone el análisis y control de pérdidas para el circuito de la vereda el Rosario, la cual se abastece de un tanque de almacenamiento ubicado en el mismo sector. Dicho análisis partirá de la información obtenida en campo de macro y micro medición y el montaje y calibración de modelos hidráulicos, como insumo primordial para la gestión de la infraestructura de distribución de agua potable.

## 2. Descripción del problema

Las redes de distribución de agua potable en Manizales funcionan por gravedad, en consideración a su relieve que hace que se tenga alta presencia de montaña. La ciudad se encuentra ubicada a una altura media de 2.150 msnm y la altura en la zona urbana y rural varía entre 1.600 y 2.400 msnm, lo cual genera altas pendientes que pueden ir desde valores inferiores al uno por ciento y superiores al cien por ciento, así como fuertes cambios de estas por los sistemas montañosos.

El acueducto de la ciudad de Manizales es operado por la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P., empresa que cuenta con 109.253 suscriptores en la zona urbana y 5.246 en la zona rural (Aguas de Manizales, 2020), con una densidad poblacional de 4,5 habitantes por suscriptor. El sistema para cumplir de forma eficiente la demanda generada, dada la población, está constituido de 3 plantas de tratamiento, 42 circuitos hidráulicos, 68 tanques de almacenamiento de los cuales 26 se encuentran fuera de servicio, 1.011 kilómetros de redes de distribución de agua y 433 kilómetros de redes domiciliarias.

Para la empresa Aguas de Manizales S.A E.S.P. la zona rural ha sido muy vulnerable con respecto a las pérdidas de agua debido a daños que no se pueden identificar y los usos irregulares que se presentan a lo largo de un circuito hidráulico para usos industriales o riego. En la Ilustración 1, se observa un daño sobre la red de acueducto en zona boscosa la cual fue identificada 4 días después de recibir reportes de bajas presiones y predios sin agua.



*Ilustración 1: Fuga de en la red de acueducto de la zona rural (Elaboración propia, 2020)*

Generalmente en periodos vacacionales y de festivos las zonas rurales del municipio de Manizales suelen incrementar su población, ya que las fincas están acondicionadas como centros de vacaciones para recibir habitantes que puedan descansar de la urbe, es por esto que se generan picos de demandas de volumen por suscriptores legalizados y no legalizados provocando desabastecimientos en las veredas, lo que conlleva a que se realicen constantes cierres en los tanques y esto afecta la continuidad del servicio de acueducto.

Por tanto, en la zona rural del municipio Manizales se presentan muchas deficiencias en la operación de las redes de acueducto, debido a que no se ha implementado un control y manejo de las redes, de igual manera en el territorio colombiano aún existen muchas deficiencias en la prestación del servicio. En el caso particular de la vereda El Rosario del municipio de Manizales, las tuberías presentan continuos daños y pérdidas de volumen, como se tiene registrado en la empresa de acueducto ya que desde el 2014 se han reportado 241 daños sobre las redes de distribución y redes domiciliarias y un porcentaje de pérdidas de volumen del 73 % desde el 2019 hasta la actualidad (Aguas de Manizales, 2020).

Todas las afectaciones que se presentan sobre las redes han sido causadas por los siguientes factores:

- Conexiones fraudulentas a las redes de acueducto en zonas que no son concurridas por los fontaneros de la zona, provocando pérdidas de volumen de agua y pérdidas económicas en el proceso de potabilización del agua, debido a que esta agua es captada, tratada y transportada sin cobro alguno.
- Altas presiones en las redes de distribución de agua que generan daños debido a que la zona rural del municipio de Manizales presenta un relieve montañoso, lo que provoca que en los puntos bajos se generen sobrepresiones sobre el material, provocando daños difíciles de ubicar.

Uno de los factores más importantes que ha vuelto deficiente la prestación del servicio de acueducto es el catastro de redes ya que actualmente es poco confiable en la zona rural, es decir, la cartografía y características de los elementos y redes instaladas espacialmente en los

sistemas de información geográfico del municipio. Dentro del catastro se debe encontrar la información de las válvulas, hidrantes, tanques, plantas de tratamiento, accesorios, medidores, daños, entre otros elementos necesarios para contener la mayor información disponible del sistema. Según lo expresado por el Acueducto de Bogotá (2002) los objetivos de los catastros de redes son:

- Conocer la ubicación de cada uno de los elementos que conforman el sistema de acueducto.
- Aportar información para evaluar el funcionamiento de las redes y demás componentes que integran los sistemas de acueducto y alcantarillado existente de la ciudad.
- Conocer las necesidades de orden técnico del sistema de acueducto y alcantarillado.
- Validar operativamente la información existente de redes.

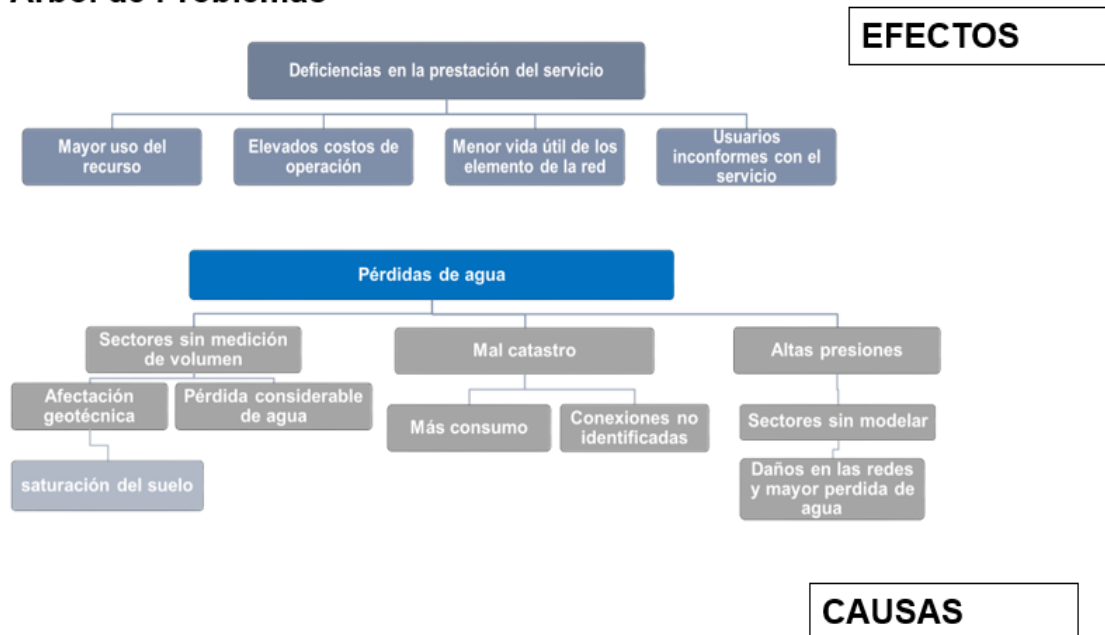
Por lo anterior, toda variación u optimización de las redes debe actualizar el catastro y alimentar los sistemas de información geográficos para que todo el personal operativo de la empresa prestadora conozca la ubicación y confíe en que la información plasmada de las redes sea veraz. En el catastro de redes del municipio de Manizales se encuentra información importante relacionada con los elementos del sistema de distribución de agua (Aguas de Manizales, 2020) dentro del cual se presentan deficiencias en la ubicación de accesorios y diámetros de redes, por lo que se han implementado planes para la actualización de los catastros de los elementos de las redes y así tener una información confiable al momento de consultar.

Los catastros que no son confiables llevan a lo siguiente:

- Disminución en la continuidad del servicio
- Mayor uso del recurso hídrico
- Elevados costos de operación
- Menor vida útil de los elementos de las redes

Los problemas de este trabajo se resumen en la Ilustración 2 elaborada por la metodología de marco lógico, permitiendo la construcción del árbol de problemas.

## Árbol de Problemas



*Ilustración 2: Árbol de problemas (Elaboración propia, 2019)*

### 3. Objetivos

Para la construcción de los objetivos de este trabajo se utilizó la metodología de marco lógico, por medio de la cual se construyó el árbol de objetivos que se muestra en la Ilustración 3. Con esta base se presenta el objetivo general y específicos del trabajo.

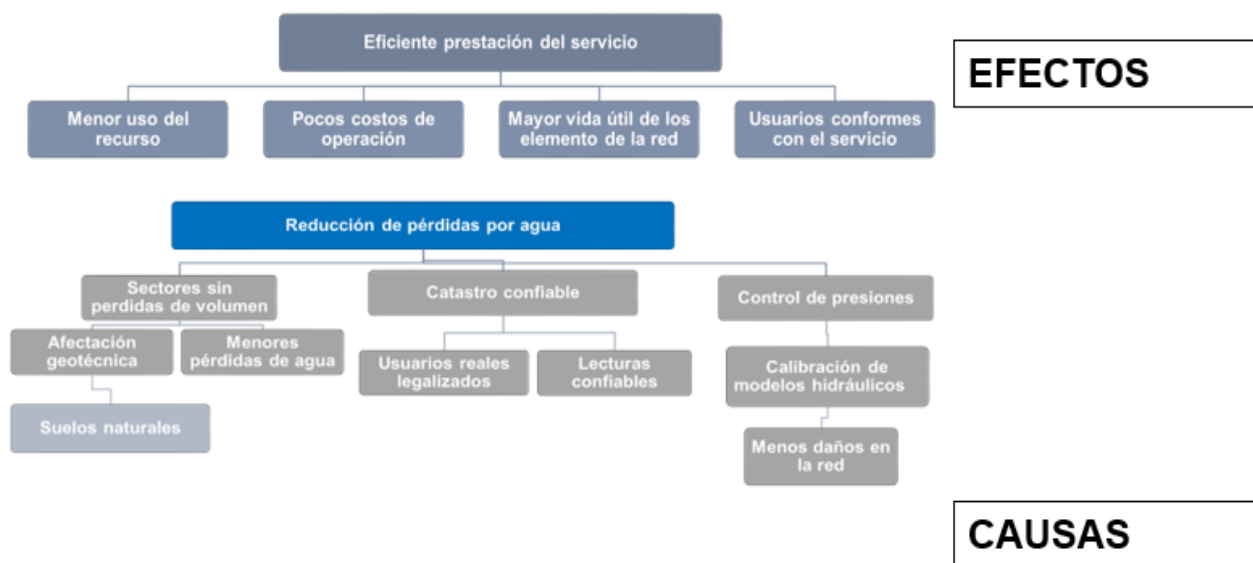
#### 2.1. Objetivo general

Identificar y plantear alternativas para disminuir las pérdidas de agua en la vereda el Rosario municipio de Manizales-Caldas.

## 2.2.Objetivos específicos

- Mejorar el catastro de redes y usuarios de la zona de estudio (vereda El Rosario).
- Medir el volumen suministrado a los usuarios del sector seleccionado (vereda El Rosario).
- Sectorizar la medición de volumen, para proponer alternativas en los lugares que presentan mayor porcentaje de pérdidas de agua no contabilizada.
- Modelar hidráulicamente las redes de acueducto de las zonas de estudio, calibrando y validando el modelo hidráulico.

## Árbol de Objetivos



*Ilustración 3: Árbol de objetivos (Elaboración propia, 2019)*

### **3. Marco Teórico**

Todos los sistemas de acueducto se enfrentan a factores propios que afectan el funcionamiento de la infraestructura, los cuales son inherentes a la operación de los sistemas. Es por lo que las empresas prestadoras del servicio enfocan sus recursos a la reducción y control de estas falencias, haciendo seguimiento a un indicador que agrupa la eficiencia de los sistemas y que se conoce como el Índice de Agua No Contabilizada (IANC), el que a su vez se compone de dos grandes ítems: las pérdidas de agua Comerciales y las pérdidas de agua Técnicas, las que se explican en detalle a continuación.

#### **3.1. Pérdidas del Sistema**

##### **3.1.1. Pérdidas comerciales**

Las pérdidas comerciales corresponden al volumen de agua que se estima deja de facturarse por el efecto del error en la medición que presentan los equipos, el cual varía según la referencia, antigüedad, marca, tipo de medición, lectura acumulada y diámetro. En este mismo campo se registra y proyecta el volumen de agua que no es medido y por tanto no puede ser facturado producto de conexiones fraudulentas a la red de distribución.

##### **3.1.2. Pérdidas técnicas**

Las pérdidas técnicas están definidas por fugas de agua en el sistema de acueducto que resultan de daños en las tuberías y accesorios, producto del desgaste físico del sistema o en ocasiones de malas prácticas de instalación. También incluye el volumen de agua perdida por el rebose en los tanques de compensación por fallas en las válvulas que controlan el nivel. Las pérdidas de agua por efecto de daños, así como el desgaste en las redes de acueducto están directamente relacionadas con el régimen de presiones al que opera la red.

##### **3.1.3. Pérdidas no determinantes**

Las pérdidas no determinadas están dadas por esas diferencias en volumen que se presentan, después de calcular las pérdidas técnicas y de estimar las pérdidas comerciales y relacionarlas

con el volumen teórico no facturado. El restante de estas, del cual no se conoce con exactitud su procedencia y que pueden corresponder a malas lecturas por parte del personal en campo, subestimación de la precisión en la medición de los equipos, fugas en el sistema que aún no son localizadas, presencia de conexiones directas al sistema que no han sido detectadas y pequeñas fugas en accesorios que al replicarse en todo el sistema generan una pérdida de agua considerable que puede estar influyendo significativamente el indicador.

#### **3.1.4. Índice de agua no contabilizada (IANC)**

Este valor es importante para una empresa prestadora del servicio de acueducto, la cual tiene como ingreso económico el volumen de agua que se factura. Es un indicador que describe indirectamente la eficiencia de su servicio y operación, lo cual se debe ver reflejado en el costo que este representa para los suscriptores, de ahí la importancia que tiene tanto para prestadores como usuarios.

La fórmula dada por la Comisión Reguladora de Agua Potable, CRA, para el cálculo del índice de agua no contabilizada (IANC), está compuesta por la diferencia entre el volumen suministrado durante doce meses y el volumen facturado durante el mismo periodo. Dicha diferencia es normalizada dividiendo el resultado por el volumen de agua suministrada en el periodo correspondiente (Llano, 2016). Para resumir lo anterior, a continuación, se presenta la fórmula para el cálculo del IANC:

***Ecuación 1*** Cálculo del Índice de agua no contabilizada (IANC)

$$\begin{aligned} \text{Volumen Suministrado} &= \sum \text{Volumen Suministrado 12 meses} \\ \text{Volumen Facturado} &= \sum \text{Volumen Facturado 12 meses} \\ \text{IANC [\%]} &= \frac{\text{Volumen Suministrado} - \text{Volumen Facturado}}{\text{Volumen Suministrado}} \end{aligned}$$

Con el fin de elaborar un análisis exhaustivo del IANC y su subdivisión en pérdidas técnicas y pérdidas comerciales, se hace un recuento de todos los componentes o causas que interfieren en su magnitud respecto al volumen de pérdidas resultante, el cual es calculado

con una frecuencia mensual de manera que coincida con los ciclos y periodos de lecturas en los micromedidores y la posterior facturación como es usual en las empresas de servicios públicos. Estos ciclos permiten tener un control en ventanas de tiempo mensual favoreciendo el análisis continuo de los indicadores y permitiendo la toma de decisiones oportunamente. En la Ilustración 4, se muestra un modelo de balance hídrico que fue desarrollado por la International Water Association (IWA) para categorizar y cuantificar los diferentes tipos de pérdidas de agua.



*Ilustración 4: Desagregado IANC (International Water Association, 2017)*

### 3.1.5. Índice de pérdidas por suscriptor facturado (IPUF)

El índice de pérdidas por suscriptor facturado es un nuevo indicador definido por la CRA y que establece los parámetros sobre los cuales se definirá la eficiencia de los prestadores de servicios públicos y su nivel de pérdidas. Este indicador a diferencia del IANC incluye directamente en su cálculo el número de suscriptores, lo que refleja una idea de la dimensión y alcance de las empresas prestadoras del servicio de acueducto.

Este indicador expresado en (m<sup>3</sup>/Suscriptor/mes) determina el volumen de pérdidas promedio que representa cada uno de los suscriptores del sistema y es calculado con los datos mensuales, teniendo en cuenta el año anterior para los cálculos. (Resolución CRA 688, 2014)

La fórmula matemática que determina el valor del indicador está dada por (Resolución CRA 688, 2014):

**Ecuación 2** Cálculo del Índice de pérdidas por suscriptor facturado (IPUF)

$$IPUF = \frac{AS - AF}{N * 12}$$

Donde:

*AF*

=  $\sum$  Consumo de agua facturada para acueducto (Acumulado 12 meses)[m<sup>3</sup>]

*AS* =  $\sum$  Agua potable suministrada (Acumulado 12 meses)[m<sup>3</sup>]

*N* = Número de suscriptores facturados promedio de los 12 meses

El IPUF y el IANC tienen la misma finalidad para el cálculo de pérdidas de agua que se componen de pérdidas técnicas, comerciales y no determinadas, sin embargo, el cálculo del IANC se relaciona con el volumen de agua suministrada y el IPUF con el número de suscriptores del sistema.

### **3.1.6. Programas de control de pérdidas**

Las pérdidas de agua presentes en los sistemas de acueducto de las ciudades resultan prácticamente imposibles de evitar, es por esto que los planes van encaminados hacia el control y la reducción de estos volúmenes. Las acciones de dichos planes buscan optimizar las redes del sistema de acueducto, mejorar la disponibilidad del recurso ante el aumento en la demanda debido a la densificación de las ciudades y el crecimiento territorial hacia zonas de expansión, y disminuir los volúmenes de captación en las fuentes altamente afectadas por

el cambio climático y la falta de protección sobre las cuencas abastecedoras. Los planes buscan una constante actualización de los suscriptores y un control sobre las zonas con características topográficas, sociales y demográficas especiales que propicien las pérdidas de agua en el sistema de acueducto. Por lo tanto, las metas a mediano plazo van encaminadas a disminuir los usos irregulares tales como los empalmes directos a las redes de acueducto sin medición, lo que se traduce en un ahorro significativo de recursos económicos de las empresas, permitiendo ampliar la cobertura, disminuir los costos de potabilización, operación y administración del agua.

### **3.2. Equipos para la identificación de caudales y presiones en las redes**

Los equipos que se instalan en las redes de acueducto para el registro de presiones y caudales a lo largo del tiempo permiten obtener datos de demandas y ofertas que se presentan en los sectores hidráulicos, así como identificar consumos o pérdidas de energía relacionados con daños y/o usos irregulares.

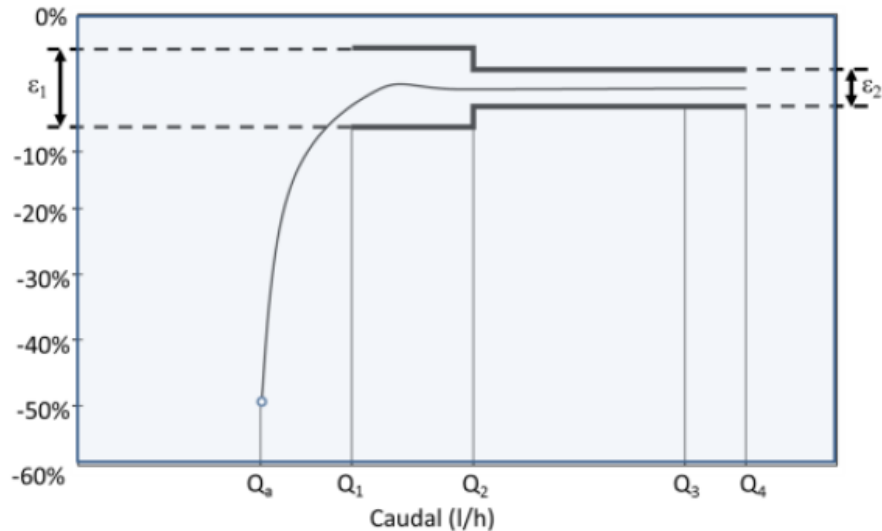
#### **3.2.1. Medidores de volumen**

Los medidores son equipos que contabilizan el volumen de agua que pasa a través de ellos, existe en el mercado una gran oferta y variedad de medidores, los cuales se diferencian entre sí en términos técnicos lo que ha demostrado ser determinante en su buen funcionamiento, como son su marca y el tipo de método de medición.

Los conceptos básicos que se deben tener en cuenta según (Kantauriar & Bulegoa, s.f.) al momento de la medición son:

1. Perfil de velocidades en la sección transversal de la tubería, que evidencia la distribución y variación de esta entre el centro de la tubería y las paredes.
2. Parámetros metrológicos: son los parámetros que están relacionados directamente con el agua que ha circulado por el contador.
  - Volumen medido: diferencia entre la lectura final y la lectura inicial del contador.

- Error de medición: puede ser absoluto, como la diferencia entre el volumen real y el volumen medido o relativo que resulta de dividir el error absoluto entre el volumen real.
- Curva de error del contador: es la representación gráfica de la relación entre el caudal circulante y el error de medición relativo (véase Ilustración 5)



**Ilustración 5:** Curva Típica de análisis de error de un contador (Kantauriar & Bulegoa, s.f.)

Sobre la curva típica de un contador se analiza su comportamiento para diferentes niveles de operación y caudal que fluye a través de él, en el cual se pone a prueba e identifican los siguientes parámetros:

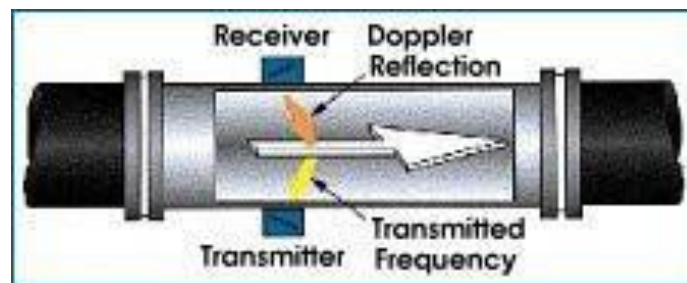
- $Q_a$  el caudal de arranque, valor del caudal para el cual el contador comienza a moverse y/o el caudal mínimo que mantiene el contador en marcha.
- $Q_1$ , caudal mínimo, es el valor mínimo a partir del cual el contador funciona dentro del error máximo permitido ( $\epsilon_1$ ).
- $Q_2$ , caudal de transición, es el valor situado entre el caudal permanente o nominal y el caudal mínimo.
- $Q_3$ , caudal permanente o nominal, es el valor máximo de caudal dentro de las condiciones nominales de funcionamiento, para el que se requiere que el contador funcione de una manera satisfactoria dentro del error máximo

- 
- permitido. A este caudal, generalmente, el fabricante garantiza que el contador puede trabajar ininterrumpidamente.
- Q4, caudal de sobrecarga o máximo, es el caudal al cual el contador debe poder funcionar sin deterioro durante periodos de tiempo limitados. Es decir, es el valor para el cual puede funcionar de forma excepcional manteniendo el error de medición dentro de los errores máximos permitidos y recuperando su funcionalidad cuando posteriormente retorna a las condiciones normales de operación.
  - $\epsilon_1$ , error máximo permitido 1: la normativa en materia de metrología divide el rango de caudales en dos bandas. Cada una de ellas tiene un error máximo permitido diferente. La zona de la curva de error dividida entre el Q mínimo y el Q de transición tendría un error máximo permitido igual a  $\pm 5\%$  ( $\epsilon_1$ )
  - $\epsilon_2$ , error máximo permitido 2: la segunda zona de la curva de error, entre el Q de transición y el Q máximo, tendría un error máximo permitido igual a  $\pm 2\%$  ( $\epsilon_2$ ).
3. Clase metrológica: viene definida por los parámetros metrológicos. Por ejemplo, la Norma ISO 4064:1993 divide los contadores en cuatro clases metrológicas, A, B, C y D. A todas estas clases se les requiere el mismo error de medición. La diferencia está en los valores de caudal a los que se les requiere dicho error. Es decir, a un contador de la clase D se le requiere el mismo error que a un contador de la clase (A) pero para caudales más bajos.
4. Totalizador: dispositivo del contador que muestra el resultado de la medición.

#### Medidores no mecánicos

- Medidor de caudal por ultrasonido (véase Ilustración 6): los medidores de flujo ultrasónicos de tiempo de tránsito utilizan una señal de sonido que viaja desde un sensor emisor a otro que recibe la señal y la envía de vuelta. El

tiempo de tránsito entre la señal enviada es comparada con el tiempo de tránsito de la señal recibida. Los medidores utilizan dos transductores, uno actúa como emisor y el otro como receptor. El medidor de caudal por ultrasonido se usa para mediciones de control o para detectar de forma rápida el caudal en una tubería, por lo que se trata de un sistema de medición transportable y de fácil instalación. Si aumenta el caudal más tiempo se necesita para medir cuando la medición es contra la corriente, y menos tiempo si la medición es en dirección de esta. La diferencia entre los tiempos de flujo en dirección de la corriente, o en contra de ella, depende de forma directa de la velocidad del flujo. El medidor de caudal usa este efecto para determinar la velocidad del flujo y del caudal. Los transductores electro-acústicos reciben y emiten breves impulsos ultrasónicos a través del medio que fluye en la tubería.



*Ilustración 6* :Principios de medición para equipos por ultrasonido.  
(Yamatho Supply, 2017)

### 3.2.2. Estaciones reguladoras de presión

Las estaciones reguladoras de presión consisten en un conjunto de accesorios hidráulicos acoplados entre sí para conformar un sistema, el cual es instalado sobre las redes de acueducto y se compone básicamente de válvulas de cierre, válvulas ventosas, filtros y la válvula principal que permite el quiebre de presiones (RES 0330, 2017). Según la configuración e importancia de la red sobre la cual se pretende reducir la presión en el sistema, normativamente estos deberán estar conformados por una segunda línea que operará bajo condiciones extraordinarias de limpieza, daño o mantenimiento de la válvula principal, sin tener afectación sobre la prestación del servicio (RES 0330, 2017). El juego de estos

accesorios permite un funcionamiento independiente de las dos líneas como se observa en la Ilustración 7.



*Ilustración 7: Montaje típico de estación de regulación (APOLO, 2019)*

La instalación de las válvulas reguladoras de presión en los sistemas de acueducto permite tener el control de las presiones en los sectores hidráulicos y generar las terrazas de presión adecuadas para el correcto funcionamiento de todos los accesorios, la prestación del servicio y el cumplimiento de las normativas que establecen un rango de 15 a 50 m.c.a. (RES 0330, 2017). En la Ilustración 8 se observa un montaje real en la vereda Cuchilla del alado sobre la conducción de agua potable de la vereda Lisboa.



*Ilustración 8: Estación de regulación Cuchilla del Salado (Elaboración propia, 2020)*

### **3.2.3. Equipos de medición de caudal y presión**

Los sistemas de acueducto se caracterizan principalmente por la lectura de dos variables: caudal y presión; cuya medición refleja las condiciones físicas e hidráulicas del funcionamiento de los conductos y las estructuras de control del sistema, así como determina la capacidad hidráulica para la prestación del servicio. Por esta razón, la instrumentación de los sectores para la medición de estas variables que describen la funcionalidad de las redes resulta fundamental en el sentido de conocer el comportamiento del sistema de acueducto. Esta información se utiliza en el escenario idealizado del *software* de la modelación hidráulica con el fin de plantear cálculos ajustados a las condiciones reales.

Todos los equipos cuentan con una interfaz que permite conocer en tiempo real el valor de la variable medida, un sistema de almacenamiento de los datos registrados durante un tiempo y la frecuencia definida previamente, así mismo una conexión que permite la descarga de la información en formato de texto. Estos componentes presentan un margen de incertidumbre que se determina por el porcentaje de error el cual es verificado y calibrado periódicamente.

Actualmente en el mercado existe gran variedad de equipos y marcas que ofrecen estos servicios, los equipos disponibles utilizados para realizar las mediciones y que cumplen con los estándares para ejecutar estas funciones, varían según la variable a medir; para la toma

---

de presión son los manómetros digitales de marca “Keller” y referencia “Leo Record (Ei)”, y para las mediciones de caudal se utilizó el medidor ultrasónico construido por la marca “Fuji Electric” y cuya referencia es “Portaflow-C”. Los equipos se describen a continuación con sus respectivas especificaciones técnicas.

#### **3.2.4. Manómetros digitales**

De acuerdo con las especificaciones suministradas por el proveedor de los manómetros digitales LEO Record (versión Ei) (véase Ilustración 9), estos equipos permiten de manera autónoma almacenar los datos de presión y temperatura durante periodos muy largos de tiempo a una frecuencia determinada. Ofrecen los siguientes aditamentos (KELLER AG, 2016):

- Registro de la presión y la temperatura los que son registrados una vez por segundo (mínimo intervalo posible). La pantalla superior indica la presión actual y la inferior el estado del registro. Todos los manómetros de esta marca tienen dos botones. El botón izquierdo se emplea para encender el manómetro, para seleccionar las diferentes funciones y para cambiar de unidades (bar, mbar, hPa, kPa, MPa, PSI,  $\text{kp/cm}^2$ , (m)  $\text{H}_2\text{O}$ ). El botón derecho se utiliza para ejecutar la función o unidad seleccionada.
- El rango de precisión es de  $\pm 0,1 \%$  y con protección IP65, clasificación dada una vez que es hermético al polvo y a chorros de agua dirigidos al equipo.
- Muy alta precisión en la medida.
- Alta seguridad en los datos registrados gracias al uso de memorias no volátiles.
- Indicación de la presión actual y del estado del registro.
- Configuración sencilla y bien estructurada (software logger 4.x) con PC o PDA
- Combinación del registro del control de eventos y del intervalo que permite registrar solo los datos necesarios (por ej. sólo registrar los cambios de presión, etc.)
- La configuración del registro se realiza vía interfaz/software.



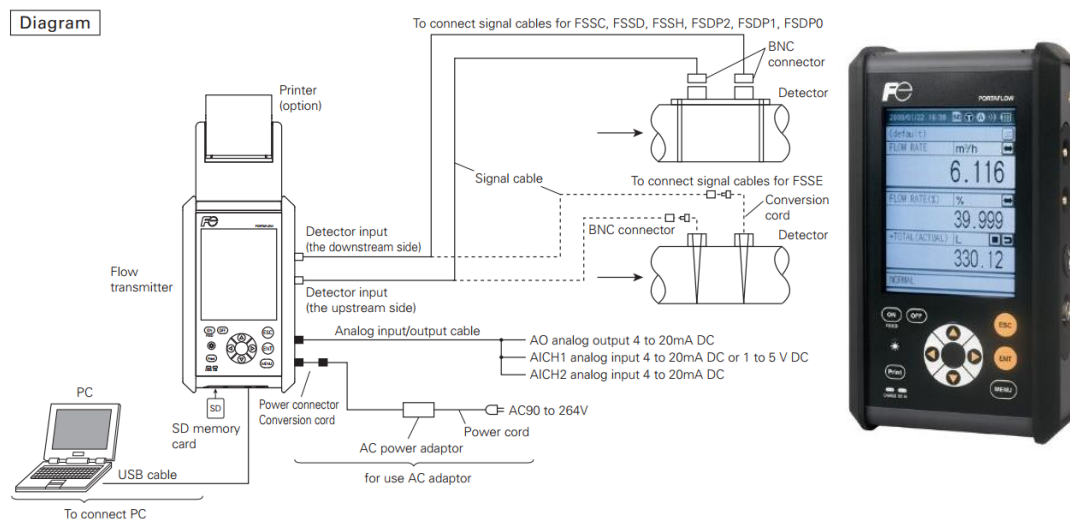
*Ilustración 9: Manómetro digital para la medición de presiones (KELLER AG, 2016)*

### **3.2.5. Medidor ultrasónico**

Las especificaciones del proveedor de los medidores ultrasónicos Portaflow-C (véase Ilustración 10) indican que permiten de manera autónoma el almacenamiento de los datos de caudal, velocidad y totalizar el volumen de agua suministrada durante un largo periodo de tiempo que dependerá de la capacidad de almacenamiento de la memoria externa y la disponibilidad de alimentación eléctrica, y ofrecen los siguientes complementos. (Fuji Electric, 2019).

Según los proveedores de los equipos de medición de flujo ultrasónicos de tiempo de tránsito están bien adaptados para fluidos relativamente limpios con baja a moderada aireación, es así que a continuación se presentan los complementos que se ofrecen para estos equipos.

El rango de diámetros de tuberías para la instalación es desde 13 a 6.000 mm, según los sensores, con un rango de precisión es de  $\pm 1\%$ . Una tarjeta de memoria SD permite almacenar los datos totales de flujo y velocidad. Un puerto universal USB permite la comunicación entre el equipo y un PC facilita la configuración del Portaflow-C, y la lectura de los archivos de datos. Puede medir velocidades de flujo bidireccionales de -32 a +32 m/s. Herramienta potente y fácil de usar que es muy apreciada por cualquiera que desee realizar una medición puntual del flujo en el campo: una gran pantalla gráfica LCD a color, un conjunto de menús desplegable y un número reducido de teclas hacen de esta unidad una unidad simple. (Fuji Electric, 2019)



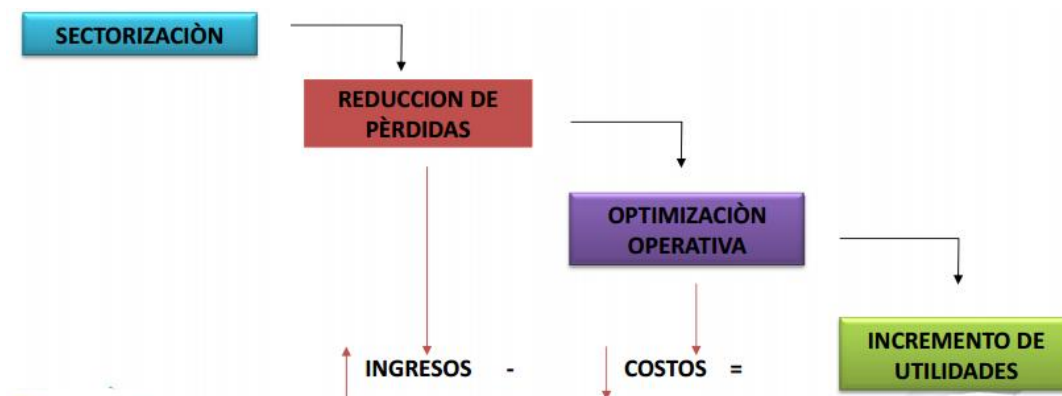
**Ilustración 10:** Medidor de caudal y procedimiento para la instalación del equipo (Generalidades Tecnológicas Ltd, 2016)

### 3.3. Sectorización hidráulica

Sectorizar una red consiste en fragmentarla en sectores aislados para poder analizarlos por separado y de este modo, facilitar la identificación de problemas, mejorando la rapidez en la aplicación de las medidas correctoras pertinentes (Aguas de Valencia, 2020). El autor (Campbell, 2013) establece que el objetivo principal para la creación de sectores es obtener la información necesaria distribuida y manejablemente escalada para llevar acciones claves en cada sector, tales como:

- Realizar auditorías para conocer el rendimiento hidráulico o el Agua No Contabilizada (ANC).
- Caracterizar la curva de demanda, especialmente el caudal nocturno.
- Detectar de la manera más rápida posibles fugas mediante el análisis de la evolución de los caudales mínimos nocturnos.
- Comprobar rápidamente los resultados de campañas rápidas de detección y reparación de fugas.
- Detectar el fraude, sub-registro, y diversos errores de medición
- Disminuir los costes de mantenimiento.
- Establecer plan de inversiones para abastecer sectores con mayor índice de ANC.

La sectorización de la zona de estudio permitirá tener un enfoque particular sobre cada uno de los ramales que conforman la red de distribución del sector, permitiendo un análisis discriminado, haciendo más eficiente la destinación y el tipo de recursos que se deben disponer con el fin de contrarrestar los altos IANC, todo esto teniendo en cuenta las características disímiles en su topografía, densidad, nivel económico, tipo de uso del agua, etc. de cada uno de los ramales (véase Ilustración 11).



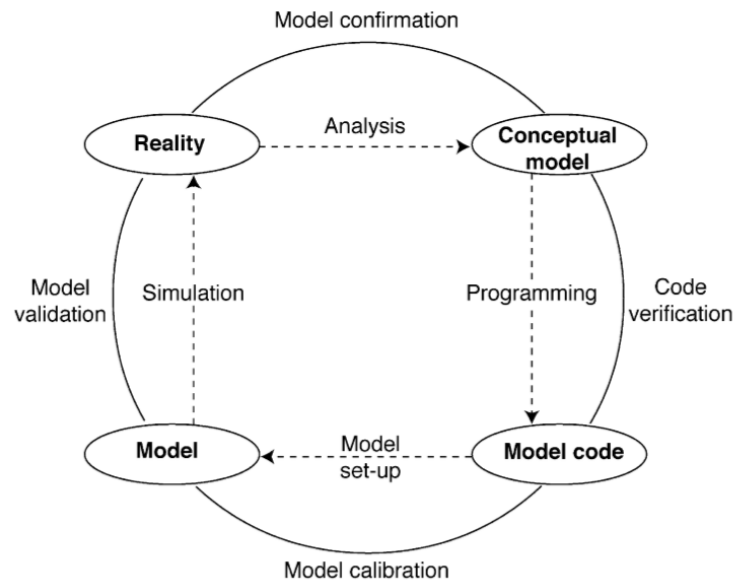
*Ilustración 11: Justificación económica y operativa de la implementación de la sectorización (Saldarriaga, 2016)*

La sectorización hidráulica debe cumplir con sus objetivos, permitiendo un mejor manejo de los sub-sectores, tanto en su medición y en gestión de pérdidas, como en el control de las presiones en los diferentes puntos de la red cumpliendo las condiciones de funcionamiento.

### 3.4. Modelación hidráulica

El proceso de modelación consiste en la representación de la realidad mediante un modelo conceptual que simboliza la red de distribución, en el cual se introduce por medio de elementos geométricos a un código computacional el sistema de acueducto con el fin de representar los procesos físicos que ocurren en la realidad, lo que implica una serie de simplificaciones de hipótesis que permiten describir de forma aceptable el sistema hidráulico a representar.

De acuerdo con (Refsgaard y Henriksen, 2004), el proceso de modelación puede entenderse como la interacción de cuatro elementos básicos: realidad, modelo conceptual, código y modelo. Dichos elementos, los cuales se relacionan en la Ilustración 12, están vinculados entre sí a través de los procesos de análisis, programación, preparación del modelo y simulación, que a su vez comprenden procedimientos que evalúan la fiabilidad de dichos procesos (confirmación, verificación, calibración y validación).



**Ilustración 12:** Elementos de la modelación (Refsgaard y Henriksen, 2004)

Es necesario conocer con la mayor confiabilidad posible los componentes físicos que conforman el sistema de acueducto, toda vez que, son claves a la hora de ejecutar el análisis. Estos definen el comportamiento de las variables hidráulicas dentro del entramado de las redes de distribución, algunos de estos son: las válvulas, uniones, accesorios, tanques e hidrantes. Adicional a esto y para complementar la información que es cargada en el modelo, resulta necesario identificar el patrón de consumo del sector que se determina de acuerdo con la variación diaria de demanda que conforma la curva típica de consumo y el porcentaje de pérdidas.

El trazado de la red debe cumplir con la conformación física de la población y por tanto, no existe una forma predeterminada de hacerlo. Hidráulicamente se pueden establecer redes abiertas, cerradas o redes mixtas, dependiendo de las situaciones como es indicado por (Barriga, Plazas & Rivera, 2006). Tal como lo expresan los autores, debido a las condiciones topográficas y demográficas del sector, las redes de distribución de agua potable se extienden con una línea principal de la cual se derivan ramales conformando un sistema de redes abiertas. Para el cálculo de las redes de acueducto se tendrá que resolver el conjunto de ecuaciones de continuidad y energía, para cuya solución se cuenta con el *software* hidráulico WaterGems, los cuales se resuelven mediante el método del Gradiente Hidráulico.

En el mercado actual existen diferentes softwares para el cálculo de los sistemas de redes de distribución, entre los cuales los más utilizados son WaterGEMS/WaterCAD desarrollado por la firma Bentley, el uso de este programa se restringe a la obtención de una licencia que debe ser paga. Por otro lado, está Epanet, el cual fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, el cual es de dominio público y gratuito. Existe una tercera herramienta que se conoce como REDES, es un software el cual ha sido desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

El Método del Gradiente es un eficiente método de cálculo hidráulico que implementa un modelo para la resolución de sistemas de tuberías a presión, representado por un sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial, y tiene como principal ventaja que evita el ensamblado de las matrices por lo que disminuye la cantidad de procesos a realizar en comparación con otros métodos. Aspecto muy importante durante los procedimientos de optimización (Hechavarría, 2017).

Las características que son cargadas al *software* de modelación se presentan bajo condiciones estimadas e ideales con base en la información disponible en el sistema de información geográfico (SIG) de la empresa. Por consiguiente, es necesario realizar un ajuste de calibración y validación, con el fin de asemejar el comportamiento del modelo a las características reales del sistema. Para esto se toma como margen de modelación y por tanto

obtención de datos un ciclo de 24 horas. Las variables medidas en campo que serán los patrones de calibración son el caudal y la presión. Se debe comparar la información obtenida en campo con los resultados del modelo hidráulico en búsqueda de obtener un ajuste en cada punto de las curvas de presión y caudal durante el periodo de análisis, para lograr una representación acertada del comportamiento real del sistema de distribución de agua potable.

Como representación de la infraestructura real que permite la distribución del agua, son introducidos los elementos que simplifican la estructura de funcionamiento y los cuales cuentan con características propias que se denominan atributos, los cuales se presentan como parámetros y variables que directa o indirectamente interactúan para dar solución a las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento del agua en un sistema de distribución a presión.

Se aplican dos principios fundamentales que definen el análisis de estos sistemas: el principio de conservación de la masa y conservación de la energía. El primero resulta del balance de los caudales que confluyen en un punto (nodo) y se expresa mediante la Ecuación 3 y el segundo es el balance de las presiones entre dos puntos de la red interconectados con sus respectivas pérdidas de energía definido por la ecuación de Bernulli (Véase Ecuación 4).

El método del gradiente para el cálculo de redes de distribución de aguas está basado en el hecho de que al tenerse un flujo permanente se garantiza que se cumplan las ecuaciones de conservación de la masa en cada uno de los nodos de la red y la ecuación de conservación de la energía en cada uno de los circuitos de ésta (Saldarriaga, 2007)

**Ecuación 3.** Conservación de la masa o continuidad en el circuito

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{Nu} Q_D$$

**Ecuación 4.** Conservación de la masa en los nodos

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} = 0$$

Donde,  $NT_i$  es el número de tubos que llegan al nodo  $i$ ,  $Q_{ij}$  representa el caudal que pasa por la tubería  $ij$  hacia el nodo  $i$  desde el nodo  $j$  y  $Q_{Di}$  es el caudal demandado en el nodo  $i$ . La conservación de la masa puede ser positiva o negativa dependiendo si va desde  $i$  hacia  $j$  o viceversa

**Ecuación 5.** Conservación de la energía entre dos nodos de la red

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left( \sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)$$

Donde,  $H_i$  y  $H_j$  son las alturas piezométricas de los nodos  $i$  y  $j$ ,  $g$  es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s),  $Q_{ij}$  representa el caudal que pasa por la tubería  $ij$  hacia el nodo  $i$  desde el nodo  $j$ ,  $A_{ij}$  es el área del conducto que comunica el nodo  $i$  y  $j$ ,  $k_{mij}$  es el coeficiente de pérdidas menores,  $l_{ij}$ , es la longitud de la tubería,  $f_{ij}$  es el factor de fricción y  $d_{ij}$  es el diámetro de la tubería.

El desarrollo de la teoría anterior nos permitirá acercar las simulaciones hidráulicas a representar el comportamiento del sistema de acueducto, que posteriormente seguirá un proceso de calibración basado en estos principios de continuidad, en los que se incluirán todos los componentes que influyen en las demandas y que son desconocidas como pérdidas por daños o conexiones fraudulentas y que directamente afectan el comportamiento de las presiones como las rugosidades de las tuberías, el diámetro y los accesorios.

Se definen las ecuaciones hidráulicas para la determinación de las pérdidas por fricción y capacidad hidráulica del sistema. Las ecuaciones utilizadas son la de Darcy-Weisbach (Ecuación 6) para el cálculo de las pérdidas y Colebrook-White (Ecuación 7) para la determinación del factor de fricción (RES 0330, 2017).

**Ecuación 6.** Cálculos de pérdidas por fricción por Darcy-Weisbach

$$h_f = f x \frac{L}{D} x \frac{v^2}{2g}$$

**Ecuación 7.** Cálculo de factor de fricción por Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{K_s}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

D = Diámetro interno real de la tubería (m)

f = Coeficiente de fricción de Darcy (adimensional).

$h_f$  = Pérdida de altura debida a la fricción (m).

$K_s$  = Rugosidad absoluta de la tubería (m).

L = Longitud total de la tubería (m).

Re = Número de Reynolds (adimensional).

v = Velocidad media del flujo (m/s).

g = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

Es necesario incluir las pérdidas de energía que se presentan por el paso del agua por los accesorios codos, reducciones o cualquier elemento que interfiera en las líneas de flujo o cambio de dirección. Para el cálculo de estas pérdidas se utiliza la Ecuación 8 (RES 0330, 2017).

**Ecuación 8.** Cálculo de pérdidas menores

$$h_m = K_m x \frac{v^2}{2g}$$

g = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

$h_m$  = Altura de pérdidas menores (m).

v = Velocidad media del flujo (m/s).

$K_m$  = Coeficiente de pérdida menor (adimensional).

### 3.4.1. Antecedentes de la modelación

A nivel local se tienen tesis de maestrías realizadas por estudiantes de ingeniería civil de la Universidad de nacional sede Manizales, las cuales son:

- Llano, J. (2017). *Análisis de la incidencia de los cambios fuerte de pendiente en el comportamiento hidráulico de las redes de acueducto. Casos de estudio: Comunas Tesorito, Palogrande, Ecoturístico Cerro de oro y la Florida (Villamaría)* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- Jaramillo. M. (2017). *Análisis de la incidencia de fuertes pendientes en el comportamiento hidráulico de las redes de acueducto. Caso de estudio: sectores norte y sur Avenida Santander* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- Sierra Largo, J. A. (2001). *Simulacion hidraulica de unos circuitos de acueducto de la ciudad de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- Giraldo Diaz, M. A. (2004). *Diagnostico de agua no contabilizada y simulacion hidraulica del acueducto urbano del municipio de Neira Caldas*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- Castro Castrillon, N. (2004). *Diagnóstico de agua no contabilizada y simulacion hidraulica del acueducto urbano del municipio de San Jose, el corregimiento de Aracua (Palestina)y la vereda Km 41 (Manizales)*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
- Aristizábal Valencia, J. A. (2000). *Simulación hidráulica de los circuitos: Tanque las colinas, tanque Belén, Enea parte alta, Ondas del Otún, fundadores y salida tanque 1 del acueducto de la Ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Arcila Bonilla, L. Y. (2000). *Simulación hidráulica de las conducciones principales del acueducto de la ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia

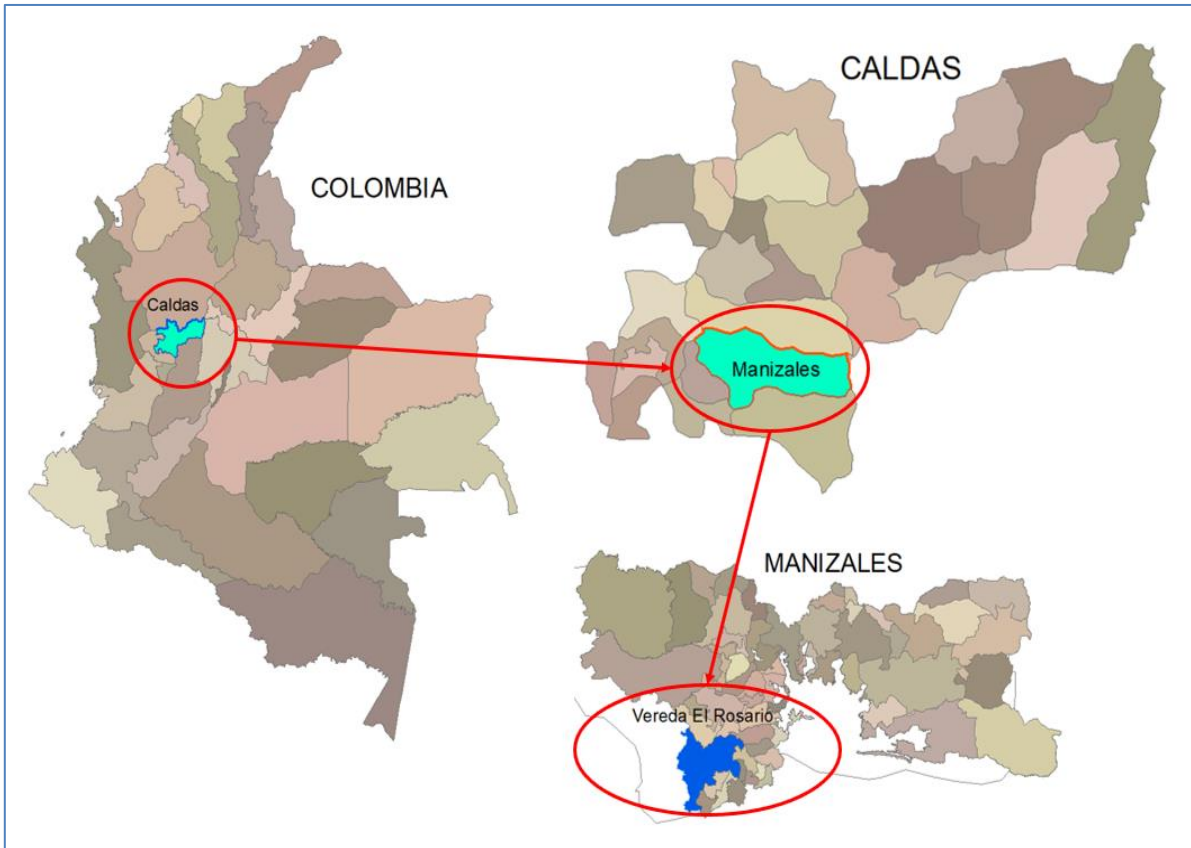
#### **4. Metodología**

En el desarrollo de este trabajo se siguió la siguiente metodología.

#### 4.1. Selección de la zona de estudio

Manizales es la capital del departamento de Caldas, la cual tiene una población de 434.403 habitantes en su área urbana y rural (DANE, 2018) y se localiza sobre la cordillera central de los Andes (véase Ilustración 13. ). El municipio tiene en la zona rural 7 corregimientos subdivididos en 114 veredas de la siguiente forma:

- Corregimiento uno (km 41); se denomina Corregimiento Colombia: Vereda Colombia. Vecindarios: Villa Victoria, Rumazón, Tebaida, entre otros.
- Corregimiento dos, denominado Corregimiento La Cristalina, comprende: Vereda El Guineo, La Garrucha, Tarro Liso Lisboa. Vecindarios: Fonditos, Mina Rica, La Arabia, San Gabriel.
- Corregimiento tres: El Remanso, Veredas: La Cuchilla del Salado, La Linda, La Palma, Cueva Santa, Patio Bonito, Malpaso, El Chuzo, La Cabaña. Vecindarios: Morro-gordo, El Bosque, Cuchilla de los Santos, La Pava, Morro-caliente.
- El Corregimiento cuatro: Panorama, Veredas: La Aurora, Morrogacho (parte), La Francia, (parte), La Argelia, El Arenillo, La Quiebra del Billar, San Peregrino, La China, El Rosario. Vecindarios: La Manuela, Las Pavas, Playa Rica.
- Corregimiento Cinco: Corredor Agroturístico del Tablazo, Veredas: Alto y Bajo Tablazo, Las Guacas, El Aventino, La Pola, Agua Bonita, Java, La Siria, Alto del Naranjo, La Violeta, Hoyo Frío, Alto de Zarzo. Vecindarios: Caselata, San Mateo.
- Corregimiento seis; Manantial, con las Veredas: Alto y Bajo Corinto, Alto Bonito, Sierra Morena, Olivares, Guacaica, Santa Rita, Pueblo Hondo, Hoyo Frío, Sinaí, Alto del Guamo, El Porvenir (parte), Río Blanco. Vecindarios: Mata de Guadua y Maracas.
- Y Corregimiento siete, Corregimiento Río Blanco, Veredas: Río Blanco, Belmira, San Juan, Chupaderos, El Paraíso, El Desquite, Minitas, Buena Vista, La Esperanza, La Enea (parte). Vecindarios: La Favorita y Las Palomas.



**Ilustración 13.** Ubicación de la zona de estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

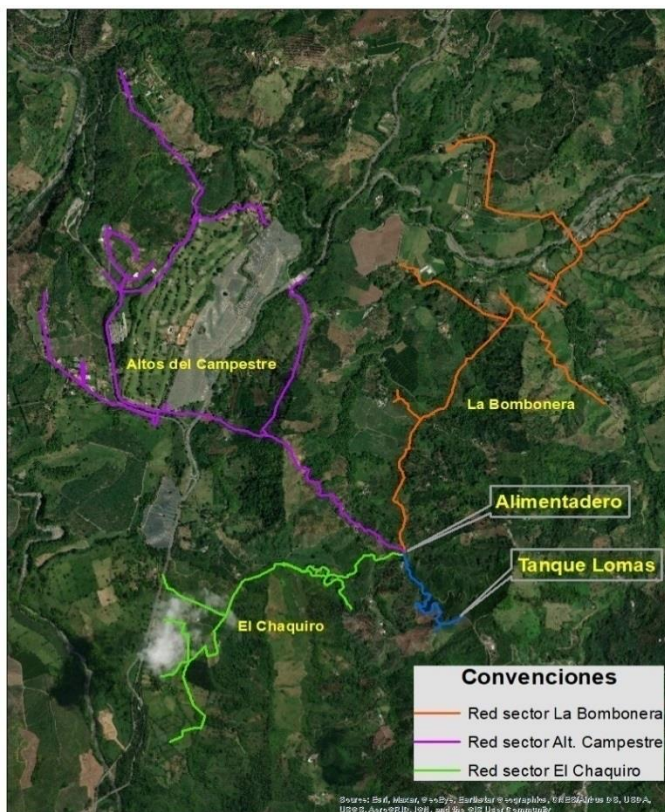
Las principales generalidades de la vereda El Rosario son las siguientes:

- Población aproximada de 486 habitantes (Aguas de Manizales, 2020).
- Presenta cambios fuertes de pendiente por su topografía y tiene un Índice de Agua No Contabilizada (IANC) del 76,53 % aproximadamente (Aguas de Manizales, 2020).
- La mayor parte de terreno por donde atraviesan las redes es zona boscosa y fincas privadas lo que dificulta encontrar fugas y usos irregulares.
- Se han registrado 241 daños en las tuberías del sistema de distribución de agua en este circuito desde el año 2014 hasta la actualidad (Aguas de Manizales, 2020).

En este estudio se verificará el balance hidráulico de las redes de acueducto del circuito de la vereda El Rosario ubicada en la zona rural del municipio de Manizales. El circuito de El Rosario (véase Ilustración 14), se abastece a partir de un tanque de compensación de 217 m<sup>3</sup>

de capacidad de almacenamiento y tiene 21.272 metros de redes de distribución en diferentes materiales y diámetros. Este circuito comienza desde el tanque llamado Lomas, con una red de 4" PVC hasta llegar al punto conocido como el Alimentadero, donde se divide en 3 redes que abastecen 3 sectores de la siguiente manera:

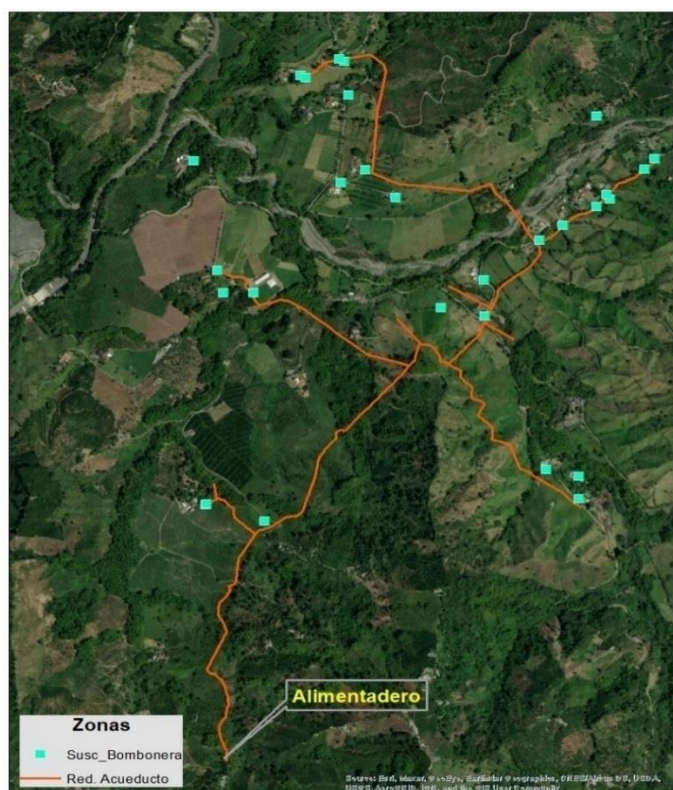
1. Sector La bombonera, con una longitud de 6.703 metros de red de distribución en Polietileno, PVC y Hierro galvanizado y diámetros de 90 mm, 63 mm, 32 mm, 16 mm y abastece a 28 suscriptores.
2. Sector Altos del campestre, con una longitud de 9.225 metros de red de distribución en Polietileno, PVC y Hierro galvanizado y diámetros 110 mm, 90 mm, 63 mm, 32 mm, 16 mm y abastece a 65 suscriptores.
3. Sector el Chaquiro concentración Once Caldas el que tiene una longitud de 4.384 metros de red de distribución en Polietileno, PVC y Hierro galvanizado y diámetros 110 mm, 90 mm, 63 mm, 32 mm, 16 mm y abastece a 11 suscriptores.



**Ilustración 14:** Circuito de El Rosario con sus sectores hidráulicos (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

Debido a la complejidad de todo el circuito El Rosario, por la topografía y longitud total de redes, se tomó como punto partida la salida de un tanque desde el cual se puede medir el caudal para todo el circuito y así determinar las pérdidas generales. Adicionalmente, se buscó un punto que tenga cámaras construidas para instalar los equipos necesarios para la recolección de datos campo.

A partir del análisis hidráulico realizado durante 4 meses, se pudo establecer el sector hidráulico de La Bombonera como la zona más crítica en cuanto a pérdidas. De manera que posterior a dicho análisis, se realizó la modelación del sector La Bombonera (véase Ilustración 15) ya que este representa el común denominador de la zona rural con redes difíciles de verificar, toda vez que atraviesan por predios privados y zonas boscosas, redes que suministran agua potable a pocos suscriptores y una longitud considerable de redes de distribución y pérdidas de agua altas. Con lo anterior, se dará cumplimiento a los objetivos específicos 3 y 4, con el planteamiento de soluciones para reducir las pérdidas en el sector más crítico.



**Ilustración 15:** Mapa del sector hidráulico La Bombonera con suscriptores de la vereda el Rosario (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

Debido a que los equipos y personal de la empresa son limitados, la modelación hidráulica se realizó en el sector La Bombonera. Una vez se finalizó con dicho sector y con los resultados de este trabajo, se procederá a aplicar los conocimientos en los 2 sectores restantes.

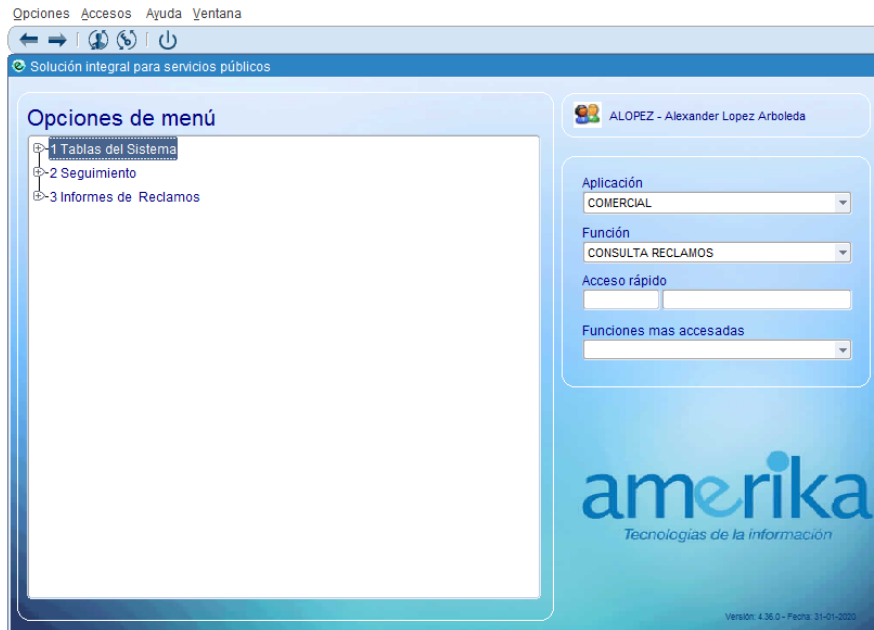
## **4.2. Recopilación de la información**

La recopilación de toda la información de la zona de estudio inicialmente fue llevada a cabo a nivel interno de la empresa con el fin de tener datos confiables que complementarían la información general con la que se cuenta en el sistema de información geográfica, posteriormente se consultó a nivel externo, con el fin de realizar trazabilidad de los datos obtenidos y así tener toda la información disponible.

### **4.2.1 Recopilación de información existente**

La información existente fue tomada de los planos que reposan en el municipio y entidades externas que al final son introducidas al sistema de información geográfico de la empresa y alimentan los aspectos técnicos y comerciales relacionados al sector de estudio.

La empresa Aguas de Manizales desde el año 1997 cuenta con un software llamado AMERIKA que contiene la información de usuarios como nombre, dirección, zona, comuna, ciclo de lectura, estrato, consumos e información relevante de los servicios prestados a cada suscriptor. Adicionalmente, existen unas pestañas para las observaciones donde se plasma lo relacionado con cobros, usos irregulares y todo el tema de la micromedición con números de serial del medidor, marca y fecha de instalación. En la Ilustración 16, se presenta el componente visual del programa “Amerika”.



*Ilustración 16: Sistema de información comercial “SOFTWARE AMERIKA” (Aguas de Manizales, 2020)*

#### 4.2.2 Recopilación de información faltante

Para el catastro de usuarios del circuito hidráulico se verificó la siguiente información:

- Localización y número de medidor, así como el estado y operación de las válvulas de cierre del circuito para tener certeza de la información existente. Finalmente, con la información obtenida en campo será actualizada la información del sistema de información geográfica.
- Información de daños de acuerdo con el registro de órdenes de trabajo realizadas por la empresa prestadora del servicio para conocer dónde se deben instalar macromedidores y tener datos de las pérdidas que se presentan por tramos de red y poder definir los puntos a intervenir. La búsqueda de daños de toda la red de distribución, acometidas y medidores se realizó por medio de recorridos y cierres de válvulas entre tramos de la red para verificar los consumos ya que por tratarse de zonas boscosas de difícil acceso no fue posible utilizar el geófono.

Para dicho análisis se verificó mes a mes en el sistema de información y en la base de datos que se registra de cada daño en el software “SEGOVIA” el cual tienen un visor como se muestra en la Ilustración 17.

| No OT        | Servicio                                | Solicitud | Motivo | Finali | Estado | Fecha OT       | Inmueble | Dirección            | Zona      | Cido    | Contrato  |
|--------------|---|-----------|--------|--------|--------|----------------|----------|----------------------|-----------|---------|-----------|
| 2020,OT,7645 | ACUEDUCTOTRAS LA REALIZAR OBRAS CIVILES |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs02-04-202 |          | BAJO TABLAZO CONTI   | ZONA RUR/ |         | REHABILIT |
| 2020,OT,7644 | ACUEDUCTOTRAS LA REALIZAR OBRAS CIVILES |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs02-04-202 |          | BAJO TABLAZO CASA    | ZONA RUR/ |         | REHABILIT |
| 2020,OT,7638 | ACUEDUCTTANQUES VERIFICAR NIVEL         |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs02-04-202 |          | TANQUE ALTO TABLAZ   | ZONA RUR/ |         | AGUAS PI  |
| 2020,OT,7642 | ACUEDUCTTANQUES VERIFICAR NIVEL         |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs02-04-202 |          | TANQUE ALTO DEL NA   | ZONA RUR/ |         | AGUAS PI  |
| 2020,OT,7641 | ACUEDUCTTANQUES VERIFICAR NIVEL         |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs02-04-202 |          | TANQUE LOMAS         | ZONA RUR/ |         | AGUAS PI  |
| 2020,OT,7640 | ACUEDUCTTANQUES VERIFICAR NIVEL         |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs02-04-202 |          | TANQUE BAJO TABLAZ   | ZONA RUR/ |         | AGUAS PI  |
| 2020,OT,7566 | ACUEDUCTREDES REVISAR RED PRINCIPAL     |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs01-04-202 |          | ALTO TABLAZO         | ZONA RUR/ |         | AGUAS     |
| 2020,OT,7548 | RESIDUAL CAMARAS DESTAPAR / LIMPIAR     |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs31-03-202 |          | CR. 9B NORTE 12A OE  | ZONA RUR/ |         | REHABILIT |
| 2020,OT,7543 | RESIDUAL SUMIDERI DESTAPAR / LIMPIAR    |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs31-03-202 |          | CL. 14 OCC 8E 15 NOR | ZONA RUR/ |         | REHABILIT |
| 2020,OT,7318 | ACUEDUCTREDES DETECTAR FUGA             |           |        | (0)    | F(0)   | PorAs27-03-202 | 63589    | LA ISABELA BAJO TAB  | ZONA RUR/ | Cido 12 | AGUAS     |

*Ilustración 17: Visor del software “SEGOVIA” (Aguas de Manizales, 2020)*

### 4.3. Selección de los puntos de medición de volumen

Para la búsqueda de pérdidas de volumen de agua se instaló primeramente un macromedidor en la salida del tanque o derivación del sector El Rosario, posteriormente con la base de datos de daños y puntos vulnerables en la red, se seleccionaron los puntos intermedios de instalación de macromedidores del sector de estudio para verificar consumos y así tener por tramos de red las pérdidas de agua. Se tuvo en cuenta el cálculo de pérdidas desde el primer macromedidor para definir el diámetro de los medidores que se instalaron aguas abajo.

#### 4.3.1 Instalación de macromedidores

Después de tener definidos los puntos para los macromedidores, se llevaron a cabo las instalaciones; para esta labor se programó una suspensión del servicio y se verificaron todos los materiales y personal para su ejecución en el menor tiempo posible. De igual manera se comenzó con la labor desde el punto más alto, es decir, la salida del tanque y luego se realizaron 2 lecturas más para seguir con la siguiente instalación aguas abajo. Es de resaltar que la red sobre la cual se instalaron los medidores es un circuito abierto, por tanto, al

momento de la instalación de los equipos se realizaron cierres generales sin opción de inyectar agua por otro circuito a los suscriptores que se quedaron sin el servicio.

#### **4.3.2 Recolección de datos de campo**

Una vez se tuvo el primer medidor instalado se coordinó con el área de lecturas de la micromedición la toma de lecturas en macro y micromedidores el mismo día para así, tener datos confiables en el cálculo de porcentaje real de pérdidas de volumen.

#### **4.3.3 Cambio de micromedidores**

Con el fin de disminuir las pérdidas que se identificaron en el sector hidráulico, se redujeron las pérdidas comerciales; encontrando todos los suscriptores de dicho circuito, realizando un análisis de funcionamiento para iniciar con el proceso del cambio de los mismos y así documentar las acciones tomadas y la reducción de pérdidas con el control de la micromedición. Era recomendable que todos los medidores fueran optimizados el mismo día de toma de lecturas para tener datos confiables en cada ciclo de lecturas.

#### **4.3.4 Proceso de validación de datos de campo**

Una vez los macromedidores fueron instalados, se implementó una base de datos de cada medidor, sitio de instalación y suscriptores que dependen de estas lecturas, toda vez que mes a mes se debía calcular la diferencia entre la macromedición con la micromedición, sumando las pérdidas de agua por daños dependiendo el sitio y la influencia de cada macromedidor.

### **4.4. Selección de puntos de medición de presión y caudal**

#### **4.4.1 Validación, control y seguimiento de los datos**

Con la instrumentación de las redes de acueducto de la zona de estudio se establecen los valores regulares de caudal y presión que definen el comportamiento por un tiempo de 24 horas con el fin de establecer el ciclo típico de consumo y presión. Los datos obtenidos representan registros de más de una semana de datos que son medidos y guardados cada 10 minutos. Se analizaron los datos identificando las tendencias, descartando los errores de

medición de los equipos utilizando para esto registros anteriores o se reinstalaron los equipos cuando se requirió mayor confiabilidad.

#### **4.4.2 Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo**

Para la construcción de curvas y patrones se analizó la información medida en campo sobre caudal y presión para el periodo de tiempo seleccionado. Para la elaboración del patrón de consumo se compilaron los valores de caudal registrados por el medidor para un día tipo, sobre el cual se definió el caudal medio y se estableció para cada hora un factor que es el resultado de la relación entre el caudal real de lectura y el caudal medio, describiendo así el comportamiento diario de los caudales en función del caudal medio. Eso permite simplificar el análisis ya que se puede utilizar el mismo patrón a todos los nodos de consumo del sector.

Los patrones de presión se establecieron con los valores reales de las lecturas tomadas en campo sobre un mismo punto, que luego fueron compiladas en una curva tipo para un periodo de un día con intervalos horarios. Estas curvas permiten conocer las fluctuaciones de la energía en determinados puntos de la red que resultan de la variación en la demanda, el control de válvulas reguladoras y cualquier otro fenómeno que genere cambios en la presión del sector.

#### **4.4.3 Estimación del índice de Agua no contabilizada (IANC) para cada zona**

De acuerdo con las lecturas realizadas y siguiendo los ciclos de facturación, se determinó el volumen mensual facturado por cada uno de los suscriptores adscritos al sistema de acueducto en esta zona. Esta información fue comparada con las lecturas mensuales tomadas de los macromedidores, tanto a la entrada del sector, como en los subsectores donde se realizó una medición discriminada y de los cuales previamente se conocen los suscriptores alimentados. Esta subdivisión permitió obtener porcentajes de pérdidas diferenciados por subsectores que permitieron un análisis a mayor detalle para tener un mejor conocimiento de las zonas donde se presentan pérdidas e identificar sus características, así, como un mejor ajuste del modelo hidráulico.

#### **4.5. Modelo computacional, calibración y validación hidráulica**

La simulación de la red de distribución del sector la Bombonera, será mediante el programa WaterGEMS el cual es un software de la empresa Bentley que permite simular, tanto en régimen estático como en régimen dinámico sistemas de distribución de agua. Adicionalmente permite el análisis de la calidad de agua, costos energéticos y la calibración del modelo. El programa aplica un algoritmo de análisis hidráulico basado en el método del Gradiente Conjugado, el cual permite resolver las ecuaciones lineales mediante matrices simétricas de una manera eficiente, ya que reduce el manejo de datos, memoria del equipo y optimiza el número de iteraciones (Villegas, 2017). El modelo de cálculo computacional se realizó siguiendo las ecuaciones de conservación de masa y energía resueltas mediante el método del gradiente hidráulico.

La información de entrada al modelo se realiza teniendo como base el Sistema de Información Geográfico (SIG) con el que cuenta la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P., el cual contiene los atributos de todos los elementos del sistema como son los conductos (tuberías) con su diámetro, material y longitud, los accesorios que están clasificados en uniones con su cota de elevación, las válvulas de cierre/apertura del sistema cota, estado de operación y diámetro, las válvulas reguladoras de presión (VRP) con cota, diámetro y presión de salida.

En el ingreso de los coeficientes de rugosidades de las tuberías se requiere cambiar el método de fricción al de Darcy-Weisbach, considerando que de acuerdo con (Flechas, 2012) “*la formulación es de base física y se puede utilizar para cualquier fluido, rango de velocidades, diámetros y longitudes de tubería*”. Adicionalmente, de acuerdo con el material se debe ingresar el valor más acorde, por lo anterior, en la Tabla 1 se presentan los coeficientes de rugosidad definidos para cada material.

**Tabla 1** Coeficientes de rugosidad definidos para cada material (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

| Material | Rugosidad (mm) |
|----------|----------------|
| PE       | 0.0015         |
| PVC      | 0.0015         |
| AC       | 0.025          |
| HD       | 0.25           |
| HF       | 0.25           |
| HG       | 0.24           |

#### 4.5.1. Análisis de sensibilidad de las variables

Siempre en todos los modelos existe un margen de incertidumbre aplicable a las condiciones físicas reales de los sistemas en campo, esto debido a factores externos que van afectando sus propiedades y que difícilmente pueden ser medidos y analizados de manera individual. Por este motivo al considerar que su comportamiento es sensible ante pequeños cambios que se presenten en las condiciones físicas de los componentes del sistema los resultados del análisis van a fluctuar. Los factores indeterminados que afectan las condiciones hidráulicas del sistema de distribución se pueden clasificar en: consumos, enmarca los caudales que se tienen por demandas de agua desconocidas, las pérdidas por fugas o emisores; propiedades físicas de los conductos, determina cambios en los diámetros, en la rugosidad y pérdidas menores. Dada su complejidad los valores de estas variables deben ser ajustados para encontrar su valor real considerando el desgaste de la red a lo largo del tiempo y que permita representar el estado adecuado del sistema de distribución de agua.

#### 4.5.2. Calibración del modelo

La calibración consiste en ajustar los valores simulados y obtenidos mediante modelación con los valores observados. Esta se realizó para La Bombonera teniendo en cuenta los valores registrados y que fueron descritos en los ítems anteriores. La calibración se puede realizar por medio de inspección visual de los resultados de las curvas de caudales y presiones, y también se puede realizar por medio de ajustes matemáticos.

A continuación, en la Ilustración 18 se observan los criterios usados por (BENTLEY SYSTEMS INC, 2006) para definir si los modelos se encuentran correctamente calibrados según su funcionalidad y necesidad.

### Niveles aceptables de Calibración

#### Criterios de Caudal

- Para Líneas Primarias (Caudal  $>10\%$  de la Demanda Total del Sistema o Sector) el valor simulado debe tener una diferencia de  $\pm 5\%$  con los valores de caudal medidos
- Para Líneas Secundarias (Caudal  $\leq 10\%$  de la Demanda Total del Sistema o Sector) el valor simulado debe tener una diferencia de  $\pm 10\%$  con los valores de caudal medidos

#### Criterios de Presión

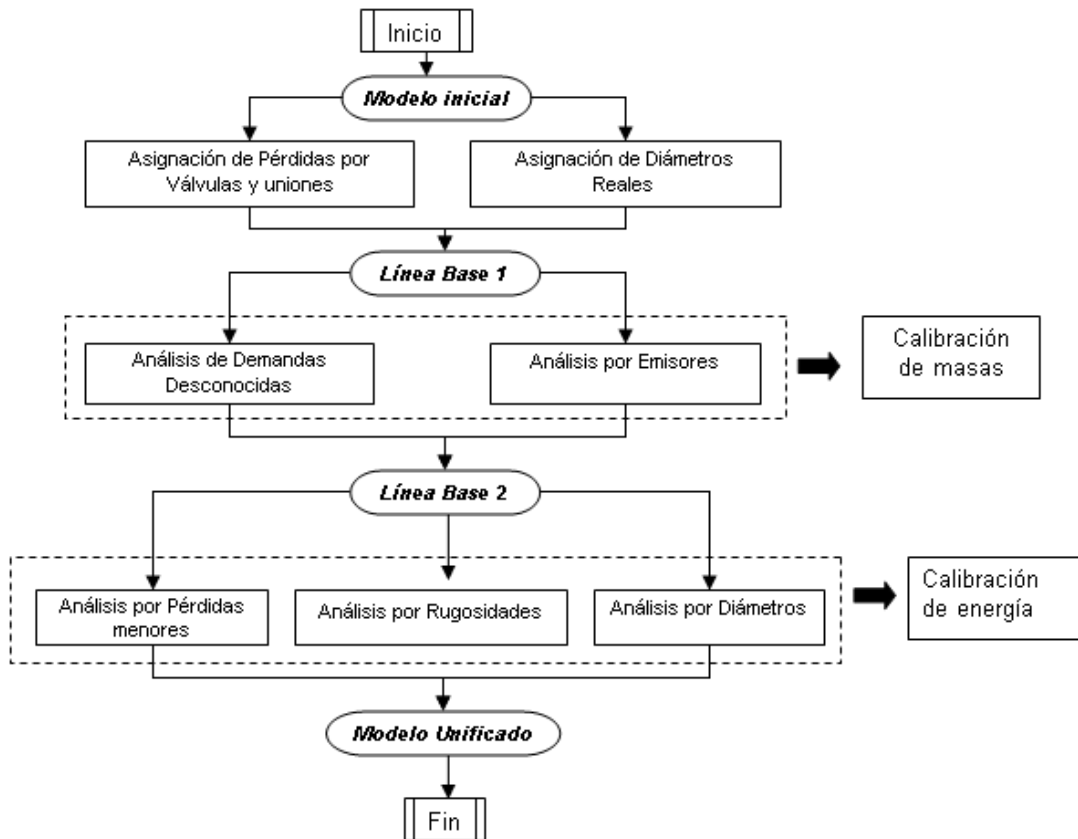
- **85%** de las medidas de campo deben estar entre  $\pm 0.5\text{m}$  o  $\pm 5\%$  de la máxima pérdida de carga a través del sistema (el criterio que sea mas grande).
- **95%** de las medidas de campo deben estar entre  $\pm 0.75\text{m}$  o  $\pm 7.5\%$  de la máxima pérdida de carga a través del sistema (el criterio que sea mas grande).
- **100%** de las medidas de campo deben estar entre  $\pm 2.0\text{m}$  o  $\pm 15.0\%$  de la máxima pérdida de carga a través del sistema (la que sea mas grande).



*Ilustración 18: Criterios de calibración Bentley (BENTLEY SYSTEMS INC, 2006)*

De acuerdo a los criterios de calibración expuestos, se considera necesario el cumplir unos rangos entre las mediciones de caudal y presión con los valores obtenidos en la modelación dados por el ajuste de los parámetros calibrables, es decir que un modelo hidráulico debe ser analizado desde el punto de vista de su posibilidad de generar confianza en la toma de decisiones y gestión de operación de las redes (Llano, 2016).

En el proceso de calibración se utilizó la metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) por el ingeniero Juan Saldarriaga presentada en la Ilustración 19.



**Ilustración 19:** Metodología desarrollada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA) (Saldarriaga, 2008)

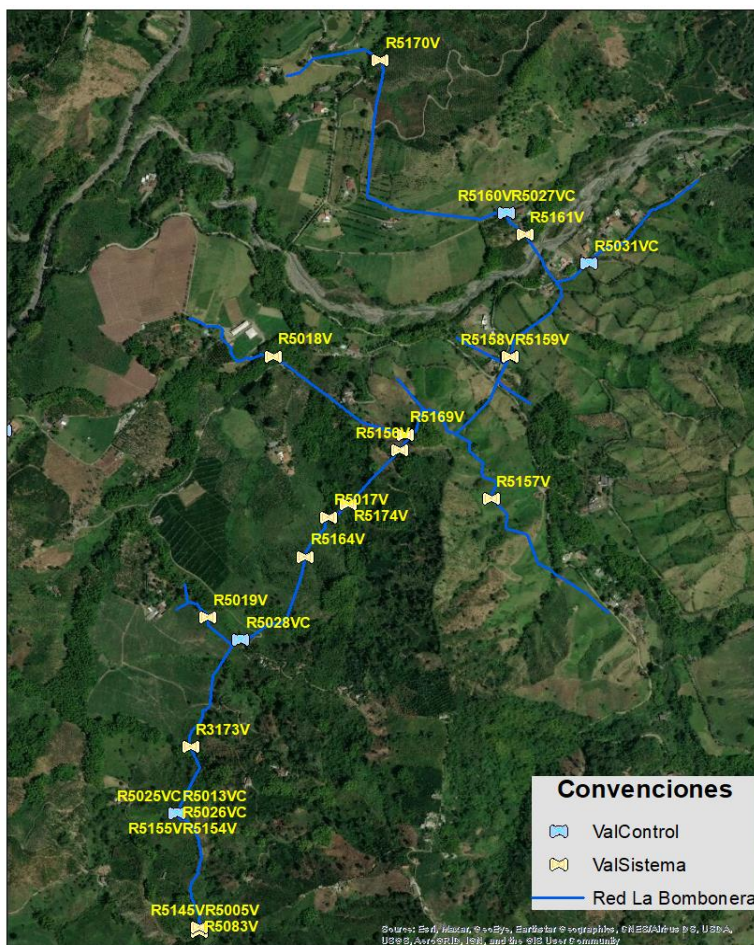
## **5. Resultados**

### **5.1. Actualización del catastro de la zona de estudio**

#### **5.1.1 Información inicial del Sistema de Información Geográfico**

Inicialmente se actualizó el catastro de las redes hidráulicas del sector La Bombonera, el cual fue seleccionado para la ejecución de este trabajo como se explica en el ítem 4.1. Selección de la zona de estudio; estas redes se encuentran digitalizadas en el sistema de información geográfico de la empresa de acueducto Aguas de Manizales S.A E.S.P.

En la Ilustración 20, se presenta la ubicación de las válvulas de cierre – apertura y en la Tabla 2 se presentan los nombres y estado de operación de dichas válvulas. Los límites espaciales y de operación se verificaron en campo, ya que, la información contenida en el sistema de información geográfico presentaba falencias, debido a que el personal manipula estos elementos para realizar reparaciones u optimizaciones y muchas veces no se dejan como estaban, provocando información errónea.



*Ilustración 20: Información de las válvulas del sector La bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)*

**Tabla 2** Actualización catastro de estado de operación de válvulas del sistema del sector La Bombonera (*Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020*)

| <b>ID Elemento</b> | <b>Estado SIG</b> | <b>Estado Real</b> |
|--------------------|-------------------|--------------------|
| R5155V             | Abierta           | Abierta            |
| R5154V             | Abierta           | Abierta            |
| R5157V             | Abierta           | Abierta            |
| R5156V             | Abierta           | Abierta            |
| R5161V             | Abierta           | Abierta            |
| R5164V             | Abierta           | Abierta            |
| R5169V             | Abierta           | Abierta            |
| R5170V             | Abierta           | Abierta            |
| R5174V             | Abierta           | Abierta            |
| R5017V             | Abierta           | Abierta            |
| R5018V             | Abierta           | Abierta            |

|        |         |         |
|--------|---------|---------|
| R5019V | Abierta | Abierta |
| R3173V | Abierta | Abierta |
| R5005V | Abierta | Abierta |
| R5160V | Abierta | Abierta |
| R5158V | Abierta | Abierta |
| R5159V | Abierta | Abierta |

### 5.1.2 Información de consumo del sector

Del software AMERIKA se extrajo la información de los consumos históricos de los usuarios, para un periodo de análisis de 6 meses. De esa manera, se obtuvieron los suscriptores del sector La Bombonera y así se conoció el volumen de agua requerido cada mes. En la Tabla 3, se presenta el volumen promedio demandado por los usuarios de La Bombonera según constaba en AMERIKA.

**Tabla 3** *Consumos promedio mensual de un periodo de seis meses del sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)*

| <b>Sector La Bombonera</b>                              |     |
|---|-----|
| Volumen Promedio Mensual<br>“Amerika” (m <sup>3</sup> ) | 673 |

### 5.1.3. Catastro actualizado de usuarios y válvulas del sector La Bombonera

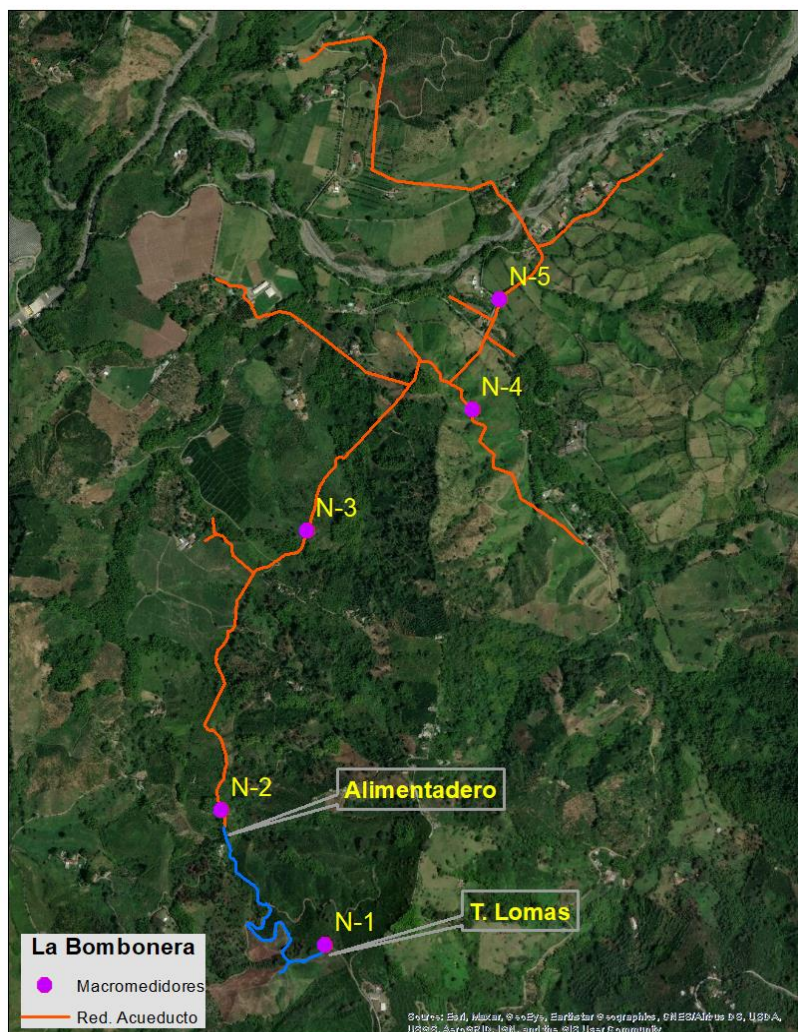
Una vez culminados los recorridos y verificados los accesorios y suscriptores del circuito de estudio se encontró que 2 suscriptores de este circuito no tenían agua y se desconocía el alineamiento de la red, razón por la cual se decidió conectar estos 2 suscriptores a otro circuito hidráulico y eliminar esta red y nodos del sistema. Esta labor fue ejecutada el día 15 de marzo de 2019 donde se anularon 225 metros de red en ¾” PVC y 2 suscriptores del sector La Bombonera. Posteriormente, se actualizó el catastro y se reportó al sistema de información geográfico de la empresa; en la Tabla 4 se presenta la longitud de redes y suscriptores antes y después de la actualización del catastro.

**Tabla 4** Actualización de catastro de redes y usuarios en el sector La Bombonera  
(Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

|                | Antes | Después |
|----------------|-------|---------|
| Longitud Redes | 6.928 | 6.703   |
| Suscriptores   | 32    | 30      |

## 5.2. Determinación de los volúmenes servidos y de las pérdidas

Teniendo en cuenta lo establecido en la metodología en el ítem 4.3 de selección de los puntos de medición de volúmenes, se instalaron en total 5 macromedidores, como se observa en la Ilustración 21, para la definición de los volúmenes de agua que entran al circuito El Rosario y al sector La Bombonera y que son consumidos por los usuarios.



**Ilustración 21:** Macromedidores instalados en la vereda el Rosario  
(Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

### 5.2.1 Instalación de macromedidores

El primer macromedidor N-1 fue instalado en el mes de febrero del año 2019 en la red de salida del tanque Lomas (véase Ilustración 22), ya que era necesario tener como punto de partida el volumen suministrado a los 108 usuarios que hacen parte del circuito de la vereda el Rosario. Este punto de análisis es el ideal ya que al ser el inicio de la red no existen pérdidas de volumen. Este punto fue seleccionado, además, porque se contaba con una cámara donde estaba expuesta la red al igual que válvulas de cierre para la instalación de los elementos.



*Ilustración 22: Instalación de macromedidor y filtros en el tanque Lomas (Elaboración propia, 2020)*

En el mes de julio del año 2019 se instaló el macromedidor N°2 de 2” en la derivación de la red de acueducto en 90 mm en material polietileno sector el Alimentadero, que abastece el sector La Bombonera en la vereda El Rosario, este macromedidor proporcionó información sobre el sector La Bombonera ya que abastece a todos los suscritores de este ramal.

En el mes de octubre de 2019 se instalaron los macromedidores N° 3, 4 y 5 en los puntos mostrados en la Ilustración 21 que se seleccionaron por ser los puntos más idóneos ya que allí existen válvulas de cierre que facilitaron su instalación, y se definieron sectores donde se tenían reportes de daños según el sistema de información geográfico de la empresa. En la Tabla 5 se muestran datos generales de los 5 macromedidores instalados.

**Tabla 5** Información de los macromedidores instalados en la salida del tanque Lomas y sector de La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

| Medidor | Fecha de Instalación | Diámetro | Suscriptores | Ubicación                    |
|---------|----------------------|----------|--------------|------------------------------|
| N-1     | feb-19               | 4"       | 104          | Salida Tanque Lomas          |
| N-2     | jul-19               | 2"       | 28           | Inicio circuito La Bombonera |
| N-3     | oct-19               | 2"       | 25           | En la válvula R5017V         |
| N-4     | oct-19               | ½"       | 3            | En la válvula R5157V         |
| N-5     | oct-19               | 1"       | 17           | Finca La Bombonera           |

### 5.2.2 Micromedición y búsqueda de pérdidas técnicas del sector hidráulico La Bombonera de la vereda El Rosario

Se realizaron cierres desde las válvulas conocidas del circuito para verificar si existían pérdidas de volumen en esos tramos, monitoreando la lectura de los medidores, aprovechando que este sector hidráulico no tiene conectividad con otros circuitos ya que son ramales que terminan en puntos ciegos con la particularidad de que los linderos están muy alejados entre sí. Con estos cierres se descartó que existiera otra conectividad y daños que estuvieran generando pérdidas de agua y energía.

El 6 de diciembre del año 2019 se encontró una fuga en zona boscosa después de haber buscado 5 días seguidos con varias cuadrillas, la cual estaba en 2" PVC y fue reparada el mismo día; adicionalmente ese día se tomaron lecturas de los macromedidores, por lo que se pudo realizar el cálculo aproximado de la pérdida de agua que dicho daño generaba, el cual era de 1,4 l/s equivalentes a 3.700 m<sup>3</sup> de agua en el mes. En la Tabla 6 se muestran los datos registrados desde que se comenzó la búsqueda de pérdidas de volumen en esta vereda.

**Tabla 6 Resultados de los recorridos y búsqueda de fugas en el sistema (Aguas de Manizales, 2020)**

| <b>CIRCUITO</b>                         | <b>Sector La Bombonera</b> |
|---|----------------------------|
| Longitud de red principal (m)           | 6.703                      |
| Longitud de acometidas (m)              | 756                        |
| Nº fugas en red principal identificadas | 1                          |
| Nº fugas identificadas en acometidas    | 0                          |

Adicionalmente, en el sector La Bombonera se realizó un análisis de los 29 suscriptores para verificar cuál de los medidores se debía cambiar, ya fuera por estar detenidos y no dar lectura o por cumplir el tiempo de uso que da el fabricante para que el medidor no tenga errores de lectura muy altos. Se encontraron 4 medidores detenidos los cuales fueron reemplazados siguiendo el proceso estipulado por Aguas de Manizales S.A E.S.P. En la Tabla 7 se relacionan los medidores reemplazados con los datos de cada suscriptor, la dirección y la fecha de reemplazo.

**Tabla 7 Optimización de micromedidores en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)**

| <b>Suscriptor</b> | <b>Dirección</b>                          | <b>Uso</b> | <b>Estrato</b>    | <b>Fecha de cambio de medidor</b> | <b>Diámetro medidor</b> |
|-------------------|---|------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 79890             | V EL ROSARIO FCA STA CRUZ DE LA SIER      | Rural      | Rural – Estrato 4 | 12/12/2019                        | ¾”                      |
| 82169             | V EL ROSAR FC LA TRIBUNITA CASA PPAL      | Rural      | Rural - Estrato 5 | 13/12/2019                        | ½”                      |
| 79919             | V EL ROSARIO STA HELENA TEMPERADERO       | Rural      | Rural - Estrato 4 | 14/12/2019                        | ½”                      |
| 99935             | VEREDA El Rosario LOTE 4 FINCA LA NAVARRA | Rural      | Rural - Estrato 5 | 15/12/2019                        | ½”                      |

### **5.3. Análisis de Índice De Agua No Contabilizada del circuito de la vereda El Rosario**

Posterior a la instalación de los 5 macromedidores en la red de salida del tanque Lomas y el sector La Bombonera, se coordinó con el área de facturación para que los lectores de la micromedición tomaran las 108 lecturas de los suscriptores el mismo día que se realizó la lectura de los macromedidores instalados, con el fin de tener un porcentaje de pérdidas más

preciso y confiable. En la Tabla 8 se presentan las lecturas de los últimos 4 meses del macromedidor de la salida del tanque Lomas y la lectura total de la micromedición con lo que se obtuvieron las pérdidas de volumen de agua del circuito de la vereda El Rosario; es de resaltar, que este es el dato base de todo el circuito el cual se debe comparar al final, una vez se ejecute la metodología propuesta en el sector de La Bombonera. En la Tabla 9 se presentan las lecturas del macromedidor N-2 ubicado en el sitio del Alimentadero, el cual abastece el sector de La Bombonera en general.

**Tabla 8** Lecturas del macromedidor y la micromedición del circuito El Rosario  
(Elaboración propia, 2020)

| <b>SUMINISTRADO</b> | oct-19 | nov-19 | dic-19 | ene-20 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| Lomas               | 15.446 | 16.097 | 15.760 | 14.151 |
| Acumulado           | 15.446 | 31.543 | 47.303 | 61.454 |
| <b>FACTURADO</b>    | oct-19 | nov-19 | dic-19 | ene-20 |
| Lomas               | 3.644  | 3.727  | 3.707  | 5.109  |
| Acumulado           | 3.644  | 7.371  | 11.078 | 16.187 |
| <b>IANC [%]</b>     | oct-19 | nov-19 | dic-19 | ene-20 |
| Lomas               | 77,62% | 77,56% | 77,48% | 76,53% |

**Tabla 9** Lecturas del macromedidor y la micromedición del sector La Bombonera  
(Elaboración propia, 2020)

| <b>SUMINISTRADO</b>         | sep-19 | oct-19 | nov-19 | dic-19 | ene-20 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| La Bombonera m <sup>3</sup> | 11.498 | 8.761  | 8.816  | 6.343  | 5.794  |
| Acumulado m <sup>3</sup>    | 11.498 | 20.259 | 29.075 | 35.418 | 41.212 |
| <b>FACTURADO</b>            | sep-19 | oct-19 | nov-19 | dic-19 | ene-20 |
| La Bombonera m <sup>3</sup> | 788    | 623    | 623    | 494    | 706    |
| Acumulado m <sup>3</sup>    | 788    | 1.411  | 2.034  | 2.528  | 3.234  |
| <b>IANC [%]</b>             | sep-19 | oct-19 | nov-19 | dic-19 | ene-20 |
| La Bombonera                | 93,10% | 93,00% | 93,00% | 92,90% | 92,40% |

Como se puede observar, el IANC para la vereda El Rosario es alto, ya que está alrededor del 77 % para los 4 meses analizados y para La Bombonera es aún mayor ya que, estuvo en promedio alrededor del 93 % para el mismo periodo. Esto indica que el IANC para el sector La Bombonera está supremamente alto, demostrando que de cada litro suministrado a este sector solo se factura el 7 %, lo que genera pérdidas económicas en el proceso de

potabilización del agua, tendencia que se observa mes a mes desde que se comenzaron a obtener las lecturas. Adicionalmente, en las lecturas de los macromedidores y micromedición posterior a la reparación de los daños encontrados en la red de distribución y a la optimización de los micromedidores parados en el sector La Bombonera en el mes de diciembre, se presentó una disminución del IANC para el mes de enero de 2020.

Después de cambiar la micromedición se observó una reducción del IANC de 0,1 % de pérdidas comerciales, el cual es un valor muy bajo para el porcentaje de pérdidas tan alto de la zona. Para el mes de diciembre al reparar una fuga que se encontró, se pudo reducir el IANC en 0,6 % de pérdidas técnicas, de igual manera un valor pequeño comparado con el porcentaje general de la zona. Por lo tanto, las pérdidas de la zona estudio se clasifican como pérdidas no determinantes, las cuales son atribuidas a daños no identificados y a conexiones fraudulentas del servicio.

Para tener como referencia el IPUF se calcula para la salida del tanque Lomas el cual da en promedio 132,3 y para el sector de la bombonera está en 225,4, valores extremadamente altos una vez que el IPUF de la empresa Aguas de Manizales S.A E.S.P es de 4,3 y el valor aceptable en empresas de servicios de abastecimiento es menor a 6.

#### **5.4. Determinación de los patrones de presión y caudales**

Para la obtención de la curva de consumo del circuito La Bombonera, se instaló un medidor de ultrasonido por 7 días en la salida del tanque Lomas (véase Ilustración 23), es decir en el mismo punto donde se instaló el macromedidor N-1. Una vez se retiró el medidor de ultrasonido, los datos registrados fueron procesados para obtener la curva de consumo que define las variaciones de los caudales demandados por el sector.

Para la medición de presión se instalaron manómetros digitales en los puntos de toma de presión ubicados en las válvulas de cierre y reguladoras del sector la Bombonera, los cuales se referencia en la Ilustración 23. De acuerdo con lo anterior, se considera que la cantidad de muestras es representativa de las características de la zona dada la ubicación de los puntos de medición.

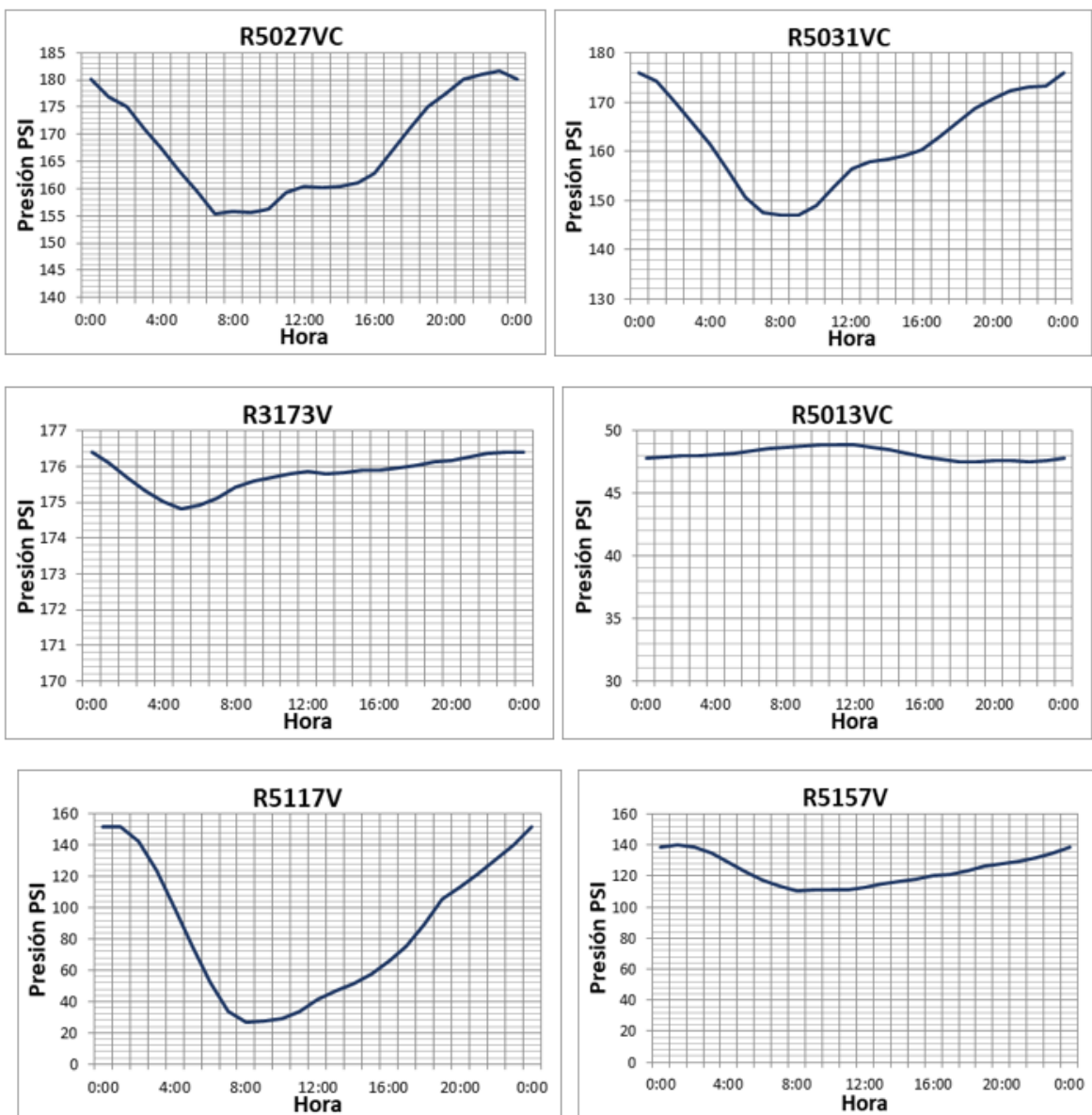


*Ilustración 23: Localización punto para medición de caudal y punto de tomas de presión en el sector de la Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)*

### 5.5. Validación, control y seguimiento de los datos

En el proceso de revisión de la información obtenida se puede apreciar el comportamiento de las curvas de presión registradas en campo (véase Ilustración 24), de acuerdo con los puntos donde fueron instalados los manómetros digitales, y en la

*Tabla 10* se relacionan las presiones máximas y mínimas en cada punto.



*Ilustración 24* Tomas de presión en periodos de lectura de 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

*Tabla 10* Resultados obtenidos en la medición en campo de presiones para los máximos, mínimos y el medio por cada elemento del sector La Bombonera (Elaboración propia) 2020)

| Elemento      | R5013VC<br>(psi) | R3173V<br>(psi) | R5117VC<br>(psi) | R5031VC<br>(psi) | R5027VC<br>(psi) | R5157V<br>(psi) |
|---------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| <b>Máxima</b> | 48,92            | 176,55          | 155,17           | 176,75           | 181,56           | 147,11          |
| <b>Medio</b>  | 48,16            | 175,79          | 84,32            | 161,88           | 167,25           | 123,91          |
| <b>Mínima</b> | 47,39            | 174,66          | 18,60            | 139,60           | 146,62           | 106,65          |

---

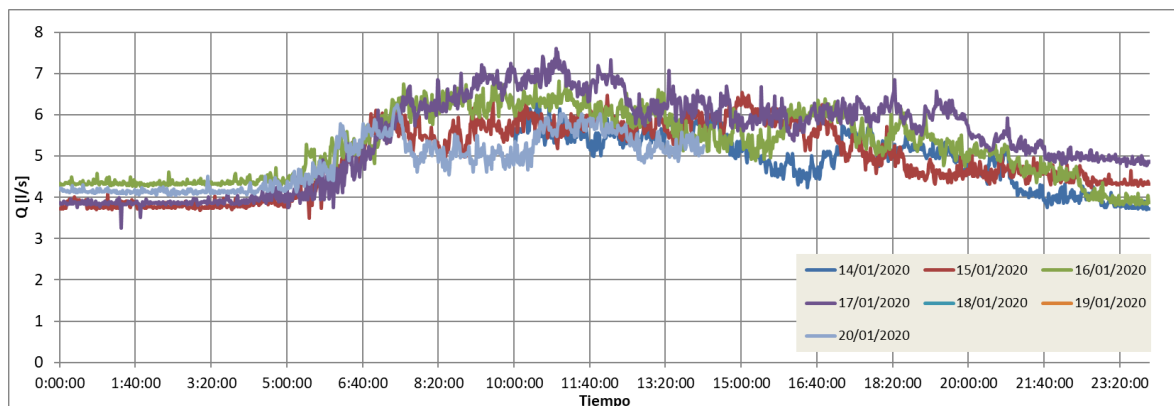
Los datos de presiones fueron validados por inspección visual, verificando que las presiones bajas se presentaran en las horas de máxima demanda y las presiones altas se presentaran en horas de mínima demanda debido a que las pérdidas de energía en las redes de acueducto se dan en función de los caudales demandados. Así mismo, se realizó un seguimiento a los datos obtenidos en campo una vez que se monitorearon las redes para tener certeza de que no existieran adulteraciones en los datos, como daños o cortes del servicio de acueducto.

Como se puede observar en la Ilustración 24, a la entrada del circuito se encuentra la válvula R5013VC, donde casi no se presentan variaciones de presión debido a que está regulada aguas abajo por una válvula, con valores que oscilan alrededor de los 48 psi. Aguas abajo se encuentra el elemento R3173V, donde tampoco se observan grandes variaciones en las presiones debido a que se encuentra sobre la red principal y no existen demandas aguas atrás por lo que la línea de energía se mantiene, adicionalmente la tubería en dicho punto es de 90 mm de diámetro. En esta válvula las presiones se encuentran alrededor de los 175 psi ya que es dicho elemento se encuentra en el cruce de una quebrada a 86 metros de diferencia de altura con la válvula anterior, en todo caso muy superior a las presentadas en el punto R5013V. Hacia las 4 de la mañana se presenta una pequeña caída en las presiones. Siguiendo aguas abajo, en uno de los ramales del circuito se encuentra el elemento R5117V, el que presenta una caída fuerte después de las 4:00 con un pico a las 8:00 (llegando a ser casi de 20 psi) y se vuelve a incrementar hacia 16:00. Este comportamiento en la presión se da ya que la red de distribución en el sector es de  $\frac{3}{4}$ " y la demanda promedio está en 0,08 l/s sin embargo la mayor demanda que se presenta a las 8:00, genera que se iguale a la capacidad máxima de caudal de la red. En general se observa una tendencia de demanda entre las 05:00 y las 19:00 horas las cuales no afectan la prestación de servicio ni generan pérdidas de energía significativas.

Luego están las válvulas R5031V, R5157V y R5027VC, que se encuentran en puntas del circuito con tubería de 63 mm con pocos suscriptores, por lo que la variación de las presiones es poca y se da la mínima entre las 7:00 y las 9:00, horas donde hay más consumo debido a las costumbres de la población del sector, en general en estos 3 ramales las presiones conservan la misma tendencia.

### 5.5.1 Construcción de las curvas de presión y patrones de consumo

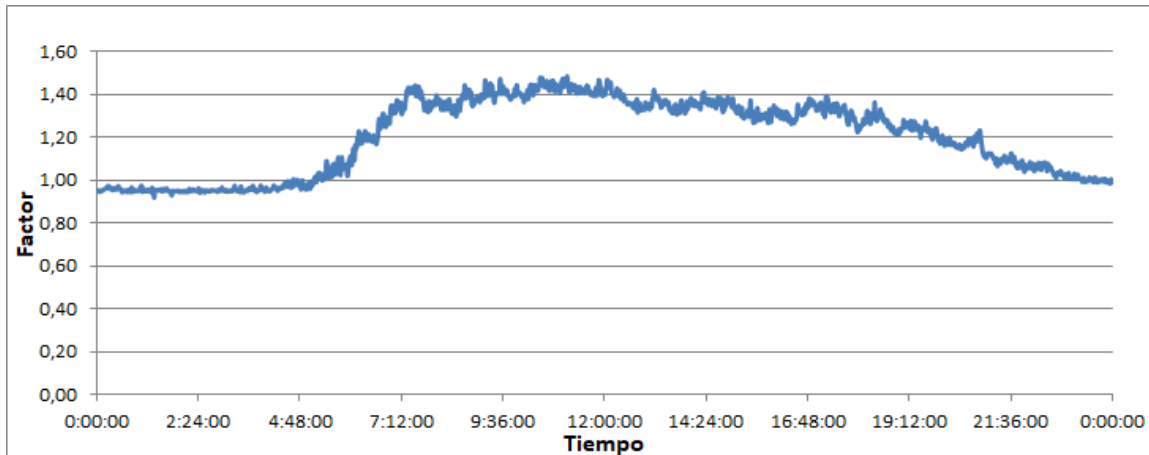
La medición de los caudales se realizó en un periodo de una semana con lecturas cada 10 minutos, posteriormente se clasificó cada día y los resultados obtenidos se presentan en la Ilustración 25.



*Ilustración 25. Curvas de caudal de la zona de estudio durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)*

Estas curvas describen las tendencias de consumo del sector, de las cuales se puede resaltar un comportamiento típico con valores máximos de 7,5 l/s a partir de las 07:00 hasta pasadas las 15:00 cuando se observa un leve descenso. Los caudales presentados en el rango de las 22:00 horas hasta las 05:00 horas de todos los días medidos, se mantienen estables conservando una tendencia alrededor de los 4 l/s. Es de anotar que todas las curvas de los 7 días de la semana conservan una tendencia marcada de demanda, lo que demuestra que las costumbres de consumos de los usuarios son constantes día a día.

El caudal medio medido desde el tanque lomas es 5,1 l/s y el caudal medio del circuito de estudio La Bombonera es de 1,52 l/s (este último dato fue tomado del medidor de volumen y convertido en caudal una vez que las lecturas fueron tomadas cada 30 días). Posteriormente, a este caudal medio se le aplicaron los factores de la curva patrón, la cual se obtuvo al sacar el caudal medio de cada hora de cada día de dicha semana, los que a su vez se promediaron para todas las horas. Luego se obtuvo el caudal medio y se dividió por el caudal de cada hora, obteniendo de esta manera la curva patrón con factores, como se muestra en la Ilustración 26 y en la Tabla 11 se observan los factores década hora de un día.



*Ilustración 26. Patrón de consumo de la zona de estudio durante 24 horas (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)*

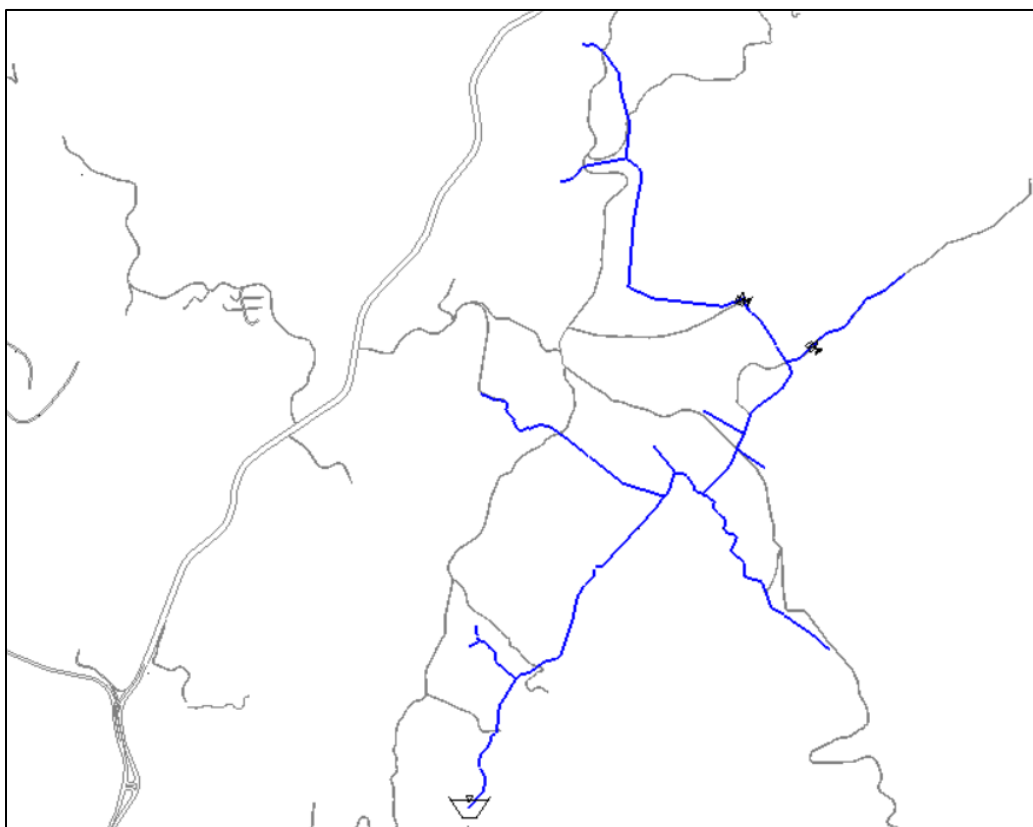
*Tabla 11 Factores de consumo de la zona de estudio (Elaboración propia)*

| <b>HORA</b> | <b>FACTOR</b> |
|-------------|---------------|
| 0:00:00     | 0,95          |
| 1:00:00     | 0,95          |
| 2:00:00     | 0,95          |
| 3:00:00     | 0,95          |
| 4:00:00     | 0,97          |
| 5:00:00     | 0,98          |
| 6:00:00     | 1,11          |
| 7:00:00     | 1,34          |
| 8:00:00     | 1,35          |
| 9:00:00     | 1,37          |
| 10:00:00    | 1,39          |
| 11:00:00    | 1,47          |
| 12:00:00    | 1,40          |
| 13:00:00    | 1,35          |
| 14:00:00    | 1,35          |
| 15:00:00    | 1,34          |
| 16:00:00    | 1,31          |
| 17:00:00    | 1,32          |
| 18:00:00    | 1,24          |
| 19:00:00    | 1,24          |
| 20:00:00    | 1,18          |
| 21:00:00    | 1,10          |
| 22:00:00    | 1,07          |
| 23:00:00    | 1,01          |

## 5.6. Modelación hidráulica, calibración y validación

En la ejecución del proceso de modelación del sector La Bombonera se realizó la simulación hidráulica en su etapa base sin ajustar las condiciones o parámetros que lo afectan, para así tener un primer escenario computacional del funcionamiento del sistema existente en campo.

El modelo de La Bombonera se encuentra compuesto por 200 tuberías, 198 nodos, 17 válvulas de cierre/apertura y 2 válvulas reguladoras, 5 series de presión y una medición de caudal. En la Ilustración 27 se presenta el esquema del modelo hidráulico base del sector La Bombonera.



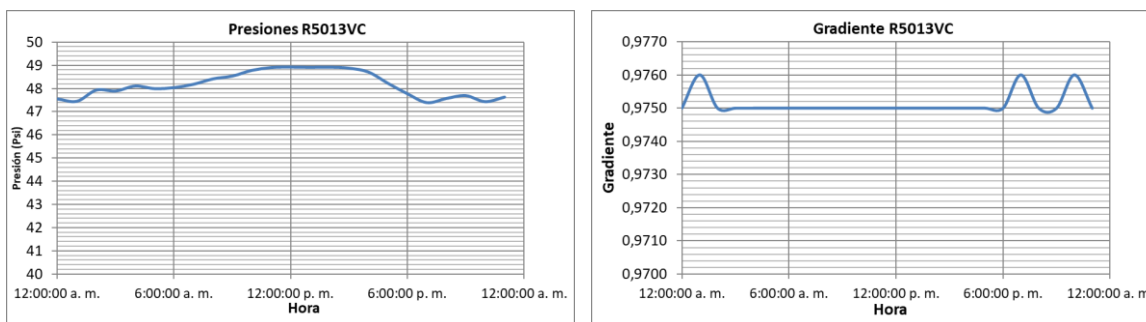
*Ilustración 27. Representación gráfica del modelo hidráulico del sector La Bombonera en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)*

### 5.6.1 Calibración del modelo

Como se explicó en el capítulo 4.5.2 de la metodología se siguió el procedimiento definido del centro de investigación de la universidad de Los Andes CIACUA para la calibración del modelo. Se importó el esqueleto desde el sistema de información geográfico al programa de

modelación WaterGems. Partiendo secuencialmente del análisis de masas y el análisis energético se estructuró un modelo unificado, que posteriormente fue afectado por las variables de calibración con el fin de tener un modelo ajustado y calibrado. A continuación, se explicación los pasos seguidos.

1. Como primer paso y con los archivos ya cargados sobre el programa de modelación, se verificaron y ajustaron los diámetros internos de la red, la rugosidad de los materiales y las pérdidas menores. El sector modelado se conecta directamente desde las redes mayores de acueducto, por tanto, su presión de entrada está determinada por las fluctuaciones de presión que se encuentran en el punto de la válvula reguladora R5013VC como se mostró en la Ilustración 28, y fue explicado en el numeral 5.5 (ver Ilustración 28).



**Ilustración 28.** Presión y gradiente hidráulico en el elemento de entrada al circuito La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

Aunque teóricamente las válvulas reguladoras de presión presentan un comportamiento casi lineal en su presión aguas abajo, siguiendo los datos tomados en campo se puede observar que este presenta algunas variaciones con las cuales se realizó el ajuste del gradiente hidráulico en la entrada al circuito del modelo.

2. Siguiendo con el paso dos del procedimiento definido en el CIACUA, y luego de tener el modelo base el cual se creó en el paso anterior, se inició con la creación de los escenarios de simulación para realizar el análisis y ajuste de masas, realizando una variación de los coeficientes emisores para obtener un ajuste más cercano a la

curva de demanda del sector como se explica más adelante en el tercer paso. Es de resaltar que en este punto ya se ha comenzado con la calibración del modelo comenzando con los caudales demandados. Adicionalmente, con los equipos de medición de volumen que fueron instalados en todo el circuito fue posible determinar el porcentaje de pérdidas por cada subdivisión de medición, para finalmente ser asignado al modelo discriminadamente. En la Tabla 12 se presentan las pérdidas por cada medidor instalado los cuales se mostraron en la Ilustración 21.

**Tabla 12** Porcentaje de pérdidas para cada macromedidor instalado en la zona de estudio (Elaboración propia, 2020)

| Macromedidor | IANC [%]                     | oct-19 | nov-19 | dic-19 | ene-20 |
|--------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| N-2          | Inicio circuito La Bombonera | 93,00% | 93,00% | 92,90% | 92,40% |
| N-3          | Válvula R5017V               | 65,30% | 20,30% | 50,80% | 62,50% |
| N-4          | Válvula R5157V               | 91,40% | 93,70% | 93,00% | 92,00% |
| N-5          | Finca La Bombonera           | 30,70% | 56,40% | 68,60% | 70,70% |

3. Para el tercer paso se ingresaron los caudales y demandas conocidas y se realizaron los cambios en los parámetros del modelo asignando un coeficiente emisor para cada uno de los nodos, con el fin de buscar un mejor ajuste de la curva de masas calculada, respecto a los valores medidos en campo de la curva de demanda. Estos coeficientes se varían según la experiencia del ingeniero diseñador buscando la mejor aproximación a los valores observados, este procedimiento se llevó acabo con los datos de la Tabla 13.

**Tabla 13** Coeficientes emisores para la creación de escenarios de simulaciones de la modelación (Elaboración propia, 2020)

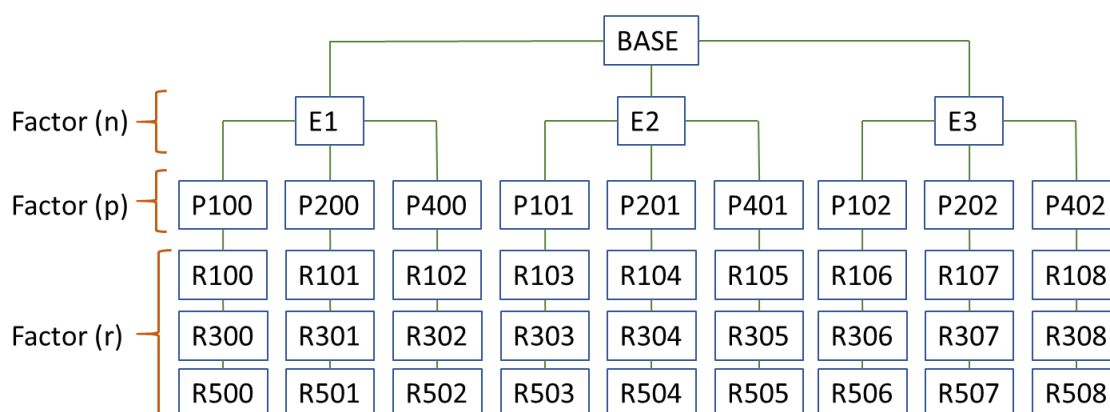
| Escenario | Coeficiente |
|-----------|-------------|
| Base 1    | Demandas    |
| Demandas  | E0,0002     |
|           | E0,0003     |
|           | E0,00035    |
|           | E0,0004     |
|           | E0,0005     |

Se realizó la comparación de los caudales simulados y los medidos en campo para cada iteración con la variación de los coeficientes emisores para encontrar el error volumétrico en forma porcentual y de acuerdo con los resultados obtenidos se eligieron las simulaciones que presentaran un error menor. Estos valores se muestran en la Tabla 14 a partir de lo cual se seleccionaron los 3 escenarios simulados que presentaran el mejor ajuste a la curva observada. Por lo tanto, se seleccionaron los escenarios E0.00035, E0,0003 y E0,0002.

**Tabla 14** Coeficientes emisores para la creación de escenarios de modelación  
(Elaboración propia, 2020)

| Coeficiente Emisor                 | E0.00035 | E0.0004 | E0.0003 | E0.0005 | E0.0002 |
|------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Error volumétrico La Bombonera (%) | 18,30    | 22,30   | 14,00   | 29,70   | 14,00   |

4. Para el cuarto paso se tomó como base el resultado del análisis anterior y se crearon nuevos escenarios de simulación derivados de los 3 emisores. Los cuales se estructuraron y diferenciaron al aplicar un factor multiplicador a los coeficientes de pérdidas menores y los coeficientes de rugosidad de las tuberías que se asignaron en el primer paso. Estas variaciones se combinan y se generan las simulaciones siguiendo la jerarquía que se representa en la Ilustración 29.



**Ilustración 29** Estructura de simulaciones para obtener el modelo unificado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

5. En el quinto paso con los emisores finalmente seleccionados se realizaron las simulaciones para cada escenario según la combinación de las variables del paso

cuarto, el resultado de cada simulación se presenta en la Tabla 15 con la sumatoria de los errores dados en cada escenario expresado en valor. También se tiene la simulación base la cual solo tiene las demandas y a adicionalmente esta se crea la n DxP (Demanda por perdidas) la cual es la simulación base incluyendo las pérdidas calculadas por los macromedidores instalados en diferentes sub-sectores como se explicó en el punto 5.2.

*Tabla 15 Resultados obtenidos del cálculo del error medio cuadrático (Elaboración propia, 2020)*

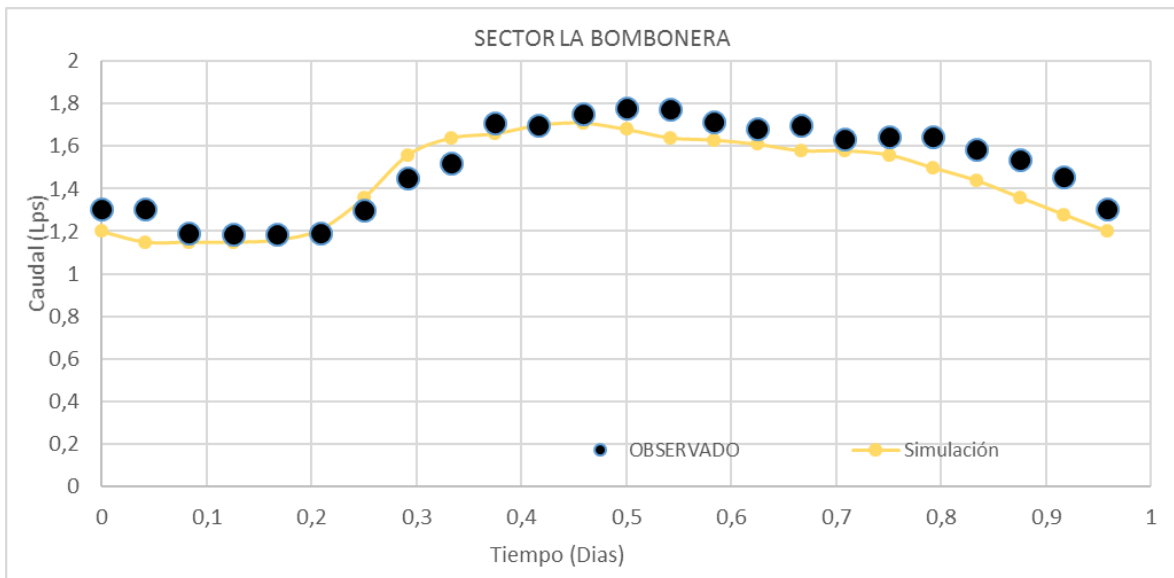
|                  | <b>Base</b> | <b>DxP</b>  | <b>E0.00035</b> | <b>P100</b> | <b>R100</b> | <b>R300</b> | <b>R500</b> | <b>P200</b> | <b>R101</b> | <b>R301</b>    | <b>R501</b> | <b>P400</b>    | <b>R102</b> | <b>R502</b> |
|------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| <b>CAUDAL</b>    | 5,78        | 8,59        | 0,00            | 0,00        | 0,00        | 1,87        | 4,23        | 0,00        | 0,00        | 1,89           | 4,26        | 0,00           | 0,00        | 4,34        |
| <b>PRESIONES</b> | 56,54       | 21,63       | 417,57          | 417,57      | 417,38      | 1.159,68    | 1.630,91    | 429,41      | 429,41      | 1.168,48       | 1.637,42    | 408,75         | 452,74      | 1.650,29    |
| <b>TOTAL</b>     | 62,32       | 30,21       | 417,57          | 417,57      | 417,38      | 1.161,55    | 1.635,14    | 429,41      | 429,41      | 1.170,38       | 1.641,68    | 408,75         | 452,75      | 1.654,64    |
|                  | <b>P101</b> | <b>R103</b> | <b>R303</b>     | <b>R503</b> | <b>P201</b> | <b>R104</b> | <b>R304</b> | <b>R504</b> | <b>P401</b> | <b>R105</b>    | <b>R305</b> | <b>R505</b>    | <b>P102</b> | <b>R106</b> |
| <b>CAUDAL</b>    | 2,88        | 0,00        | 3,26            | 5,72        | 0,00        | 0,00        | 3,27        | 5,75        | 3,31        | 0,00           | 3,31        | 5,81           | 0,00        | 0,00        |
| <b>PRESIONES</b> | 798,93      | 205,60      | 928,20          | 1.553,13    | 213,81      | 213,81      | 939,30      | 1.563,17    | 960,03      | 230,63         | 960,03      | 1.579,99       | 343,48      | 343,48      |
| <b>TOTAL</b>     | 801,81      | 205,60      | 931,47          | 1.558,85    | 213,81      | 213,81      | 942,57      | 1.568,92    | 963,34      | 230,63         | 963,34      | 1.585,79       | 343,48      | 343,48      |
|                  | <b>R506</b> | <b>P202</b> | <b>R107</b>     | <b>R307</b> | <b>R507</b> | <b>P402</b> | <b>R108</b> | <b>R308</b> | <b>R508</b> | <b>E0.0002</b> | <b>R306</b> | <b>E0.0003</b> | <b>R302</b> |             |
| <b>CAUDAL</b>    | 4,67        | 0,00        | 0,00            | 2,21        | 4,73        | 0,00        | 0,00        | 2,29        | 4,80        | 0,00           | 2,19        | 0,00           | 1,86        |             |
| <b>PRESIONES</b> | 1.608,47    | 354,14      | 354,14          | 1.101,06    | 1.616,02    | 375,71      | 375,71      | 1.119,91    | 1.631,32    | 205,60         | 1.091,05    | 343,48         | 1.152,81    |             |
| <b>TOTAL</b>     | 1.613,14    | 354,14      | 354,14          | 1.103,27    | 1.620,76    | 375,71      | 375,71      | 1.122,20    | 1.636,12    | 205,60         | 1.093,24    | 343,48         | 1.154,67    |             |

6. El sexto y último paso al tener el modelo unificado consistió en realizar un último ajuste también manual haciendo énfasis en las variables y puntos que presentan mayor dispersión del modelo respecto a lo observado, este ajuste se lleva a cabo por la pericia del ingeniero o diseñador. En Tabla 16 se observa el modelo unificado con valores del error medio cuadrático (EMC) y el modelo calibrado con valores más reducidos encontrando que en la calibración se ajustó en un 85,6 % más de los valores unificados.

**Tabla 16** Validación del error medio cuadrático entre el modelo unificado y el modelo calibrado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

| ESCENARIO<br>DxP | MODELO<br>UNIFICADO | MODELO<br>CALIBRADO | REDUCCIÓN<br>EMC |
|------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| EMC CAUDAL       | 8,59                | 0,25                |                  |
| EMC PRESIÓN      | 21,63               | 3,07                | 0,856            |
| EMC TOTAL        | 30,21               | 3,32                |                  |

En la Ilustración 30 se presenta la comparación entre el caudal observado y el simulado para todo el circuito y en la Ilustración 31, se presenta la comparación entre la presión observada y la simulada para cada punto de toma de datos en campo como se determinó en el numeral 5.4. En las siguientes figuras se evidencia un muy buen nivel de ajuste entre lo observado y lo simulado, tanto para caudal como para presión, con algunas variaciones puntuales que se salen de las líneas de tendencia.



**Ilustración 30** Resultados de la conservación de la masa entre lo modelado y observado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

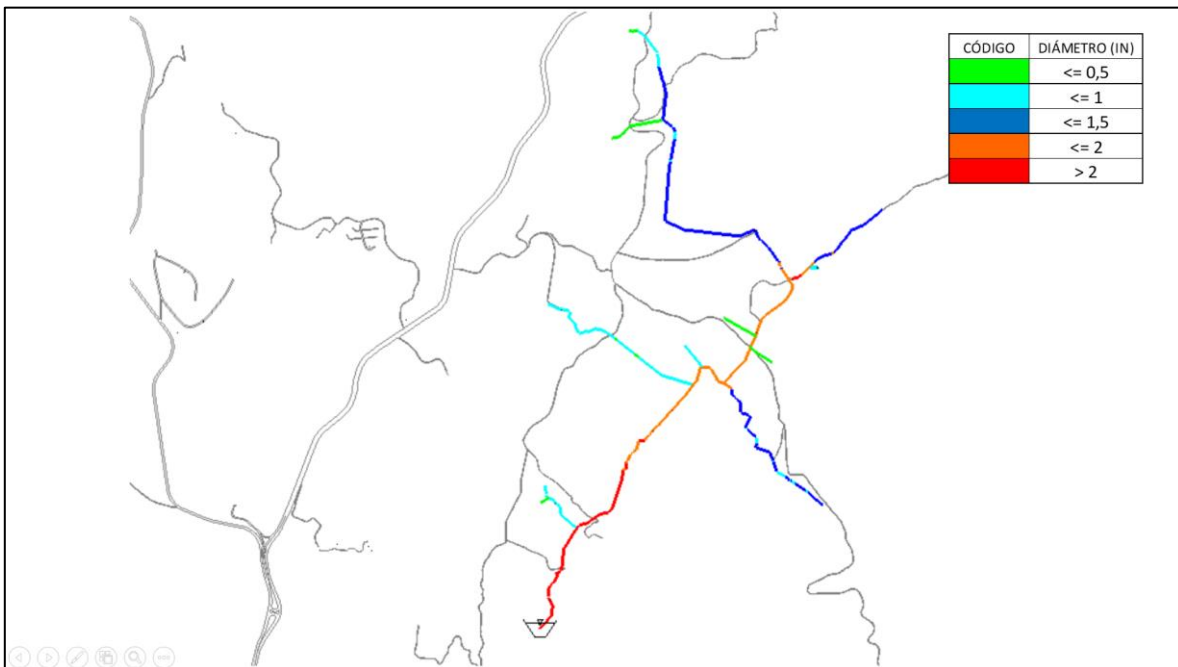


**Ilustración 31** Resultados de la conservación de la energía entre lo modelado y observado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

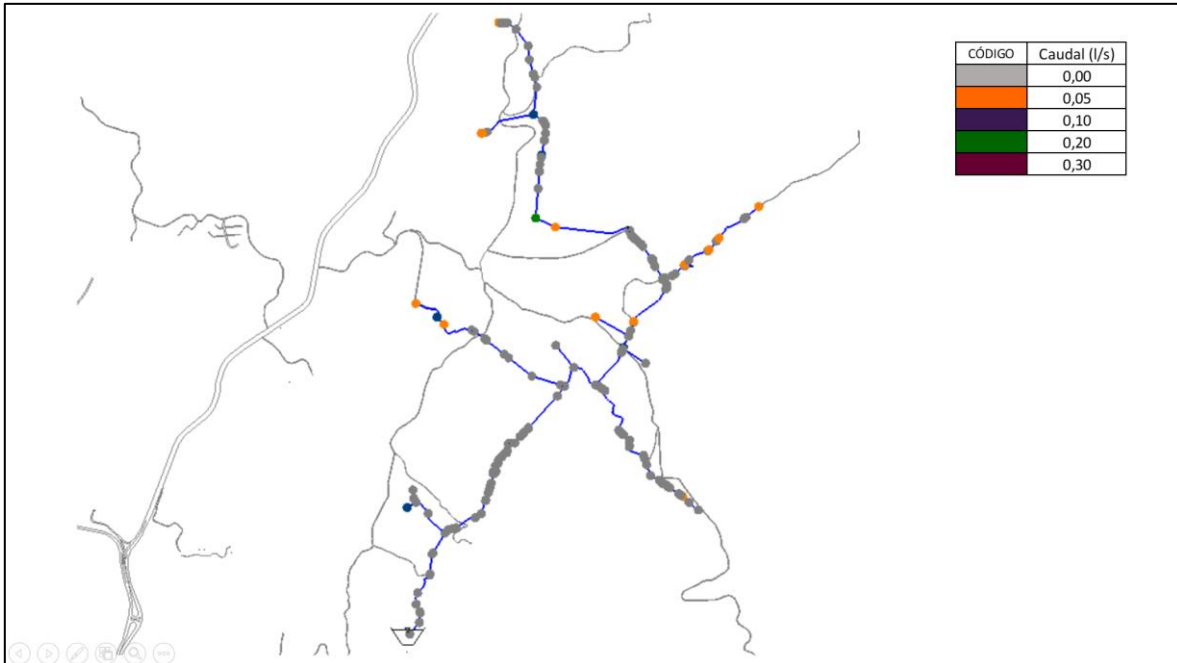
### 5.7. Análisis de resultados del comportamiento actual de las redes

Para el análisis de los resultados primeramente se presenta la distribución de diámetros en la red (véase Ilustración 32), donde se puede observar que la entrada al circuito está en 3" (90

mm) y posteriormente se reduce a 2", con derivaciones en el camino a conductos más pequeñas de distribución que se encuentran entre ½" y 1 ½" de diferentes materiales, estos últimos diámetros no cumplen el mínimo establecido por la normatividad vigente. Adicionalmente, en estos puntos que son las puntas del circuito donde los diámetros son menores a 2", en horas de máxima demanda, generan aumento de velocidades y variaciones considerables en la línea de energía. En la Ilustración 33, se presentan los caudales demandados en el circuito, los que promedian 0,04 l/s. En dicha figura se observa que en las puntas donde están ubicados los suscriptores el rango de caudal esta entre 0,01 l/s y 0,05 l/seg sin tener variaciones significativas.

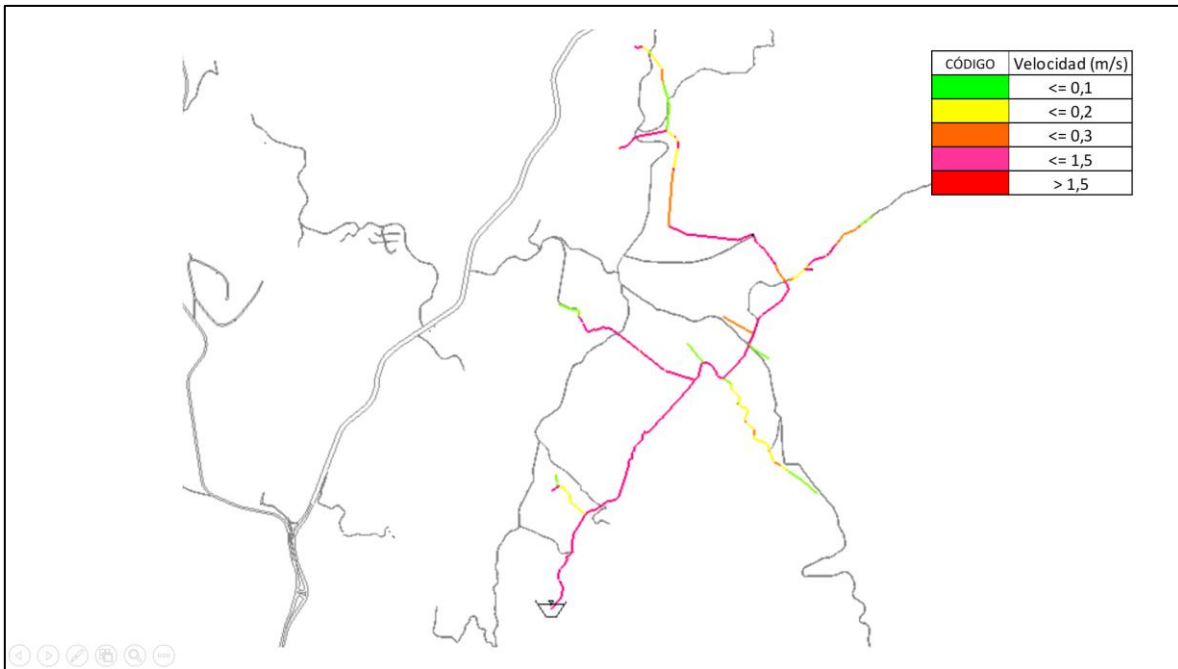


**Ilustración 32** Diámetros del sector hidráulico modelado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)



**Ilustración 33** Demandas en diferentes puntos del sector hidráulico modelado  
(Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

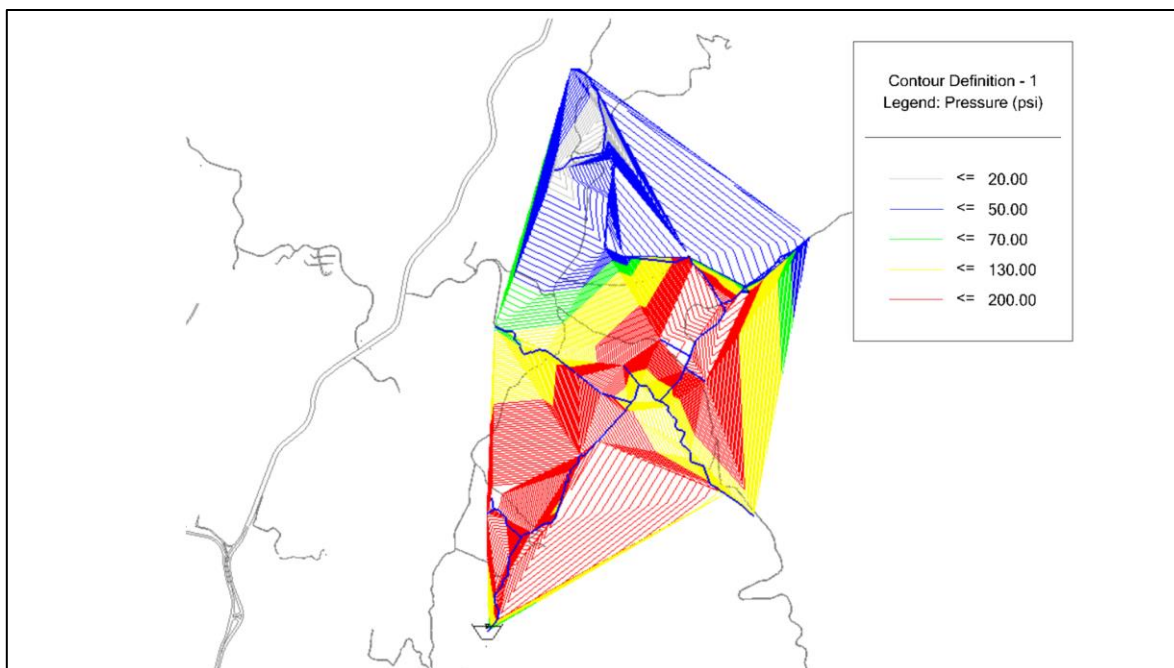
En la Ilustración 34 se muestran las diferentes velocidades distribuidas por colores en todos los puntos de la red; la velocidad promedio se encuentra en 0,39 m/s. se observa que en la tubería principal donde los diámetros son mayores de 2" no existen variaciones de velocidad respecto a la entrada al circuito y conserva un rango entre 0,3 m/s y 1,5 m/s, sin embargo, de nuevo en las puntas donde existen cambios en el diámetro y en los caudales se observa que las velocidades son menores a la velocidad promedio (coloreados en amarillo) y se reducen a medida que llegan al final de la red, debido a la reducción de consumos y suscriptores.



**Ilustración 34** Velocidades del sector hidráulico modelado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

En la Ilustración 35 se presentan los campos de presiones obtenidos para la zona de estudio, en la que es posible observar un comportamiento muy variado según la subzona; se observa que al principio de las red se presenta una zona muy pequeña con presiones menores a 70 psi, pero están se incrementa rápidamente a color rojo que corresponde a presiones entre 130 – 200 psi, este color se mantiene en casi toda la red principal. A los extremos en la zona central se presentan zonas en color amarillo que representan presiones entre 70 -130 psi y a medida que se recorre la red hasta su fin en los ramales más al norte y sobre todo al occidente se presentan en color verde (muy poco) y azul representando presiones desde los 70 psi hasta 50 psi. Las pendientes de la zona de estudio son en promedio de 8,2 %, con diferencias de altura de 194 metros lo que genera cambios en las presiones entre 20 PSI y 200 PSI, sin embargo, por estar los predios tan separados entre sí y en cotas diferentes, las presiones no se encuentran dentro de los rangos de presión establecidos en el reglamento de agua potable para la prestación del servicio de acueducto.

Es de tener en cuenta que según la resolución 0330 de 2017, la presión mínima para poblaciones de más 12.500 habitantes es de 15 m.c.a. (metros columna de agua) equivalente a 21,3 PSI y la presión máxima es de 50 m.c.a. equivalente a 71 PSI, por lo que se concluye que las presiones actuales en el circuito de estudio no están cumpliendo la normatividad vigente en cuanto a la presión máxima permitida.

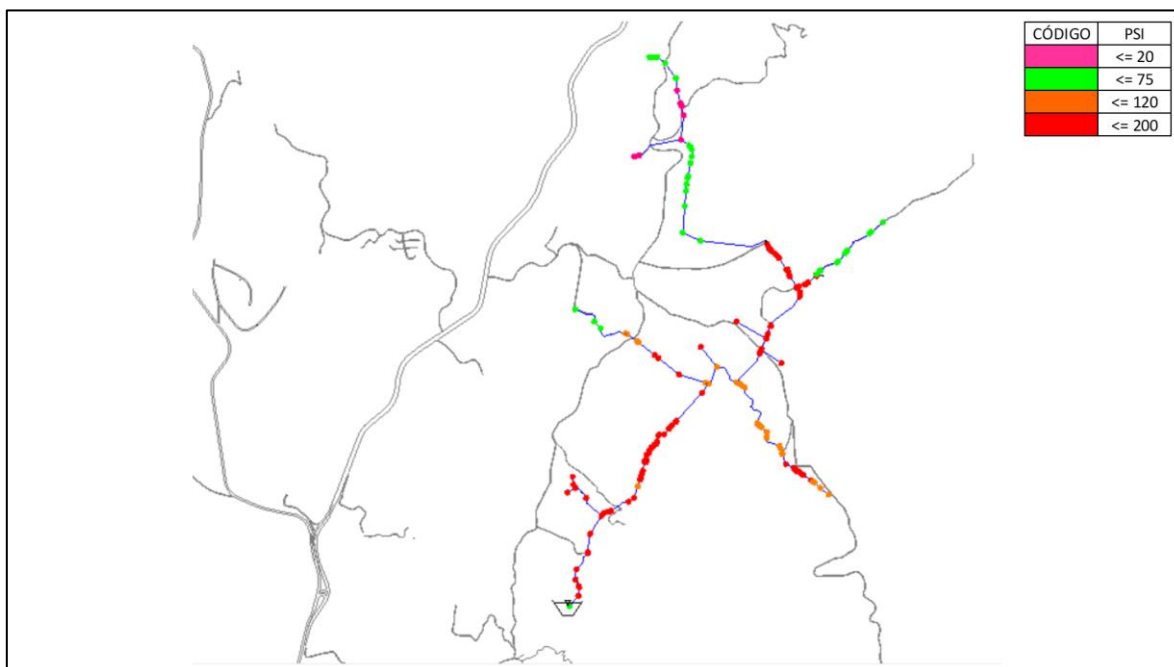


**Ilustración 35** Polígonos de presiones de la zona de estudio (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

En la Ilustración 36 se puede contemplar las presiones en puntos específicos de la red, donde el circuito no se regula las presiones están por encima de 75 PSI, y en los puntos donde actualmente están las válvulas reguladoras se encuentran en el rango de presiones según la norma, sin embargo existen puntos donde la topografía es muy cambiante generando que después de regular algunos predios estén por debajo de 20 PSI.

Es de resaltar que los puntos donde se presentan presiones entre 120 y 200 PSI no son nodos con consumo una vez que estas zonas de color rojo y naranja son parte de la red que no tienen suscriptores, pero existen puntas donde hay suscriptores con presiones entre 75 y 120 PSI

que no se han regulado aún. En general las presiones del circuito actualmente están por fuera de la norma.



*Ilustración 36 Presiones en diferentes puntos de la red del circuito hidráulico modelado (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)*

### 5.8. Propuesta de optimización del funcionamiento de las redes

Después de tener los resultados del IANC con un valor tan alto en la zona de estudio por cuestiones de daños sin identificar, predios que no permiten el ingreso para un mantenimiento preventivo de las redes y tuberías enterradas en grandes longitudes de bosques y zonas de cultivos, se hace necesario un planteamiento más efectivo que permita la optimización del servicio de agua y mejore la operación del sistema.

Adicionalmente, por las condiciones de las redes de distribución y su configuración abierta, lograr que la regulación de las presiones se comporte en un rango regular de acuerdo con la normativa requiere de un cambio estructural general que establezca conexiones por anillos de funcionamiento y variaciones paralelas no reguladas. Teniendo en cuenta estas condiciones de la zona y su variación topográfica, puede tenerse un margen en el que la

presión de la red pueda verse superada por encima de los valores máximos permitidos por la norma, siempre y cuando la infraestructura, el material y la presión de trabajo de los materiales instalados permitan este margen de presión.

De acuerdo con el planteamiento de optimización se deberá modelar la red con el nuevo trazado ya que es necesario replantear la cantidad y sitios de válvulas reguladoras.

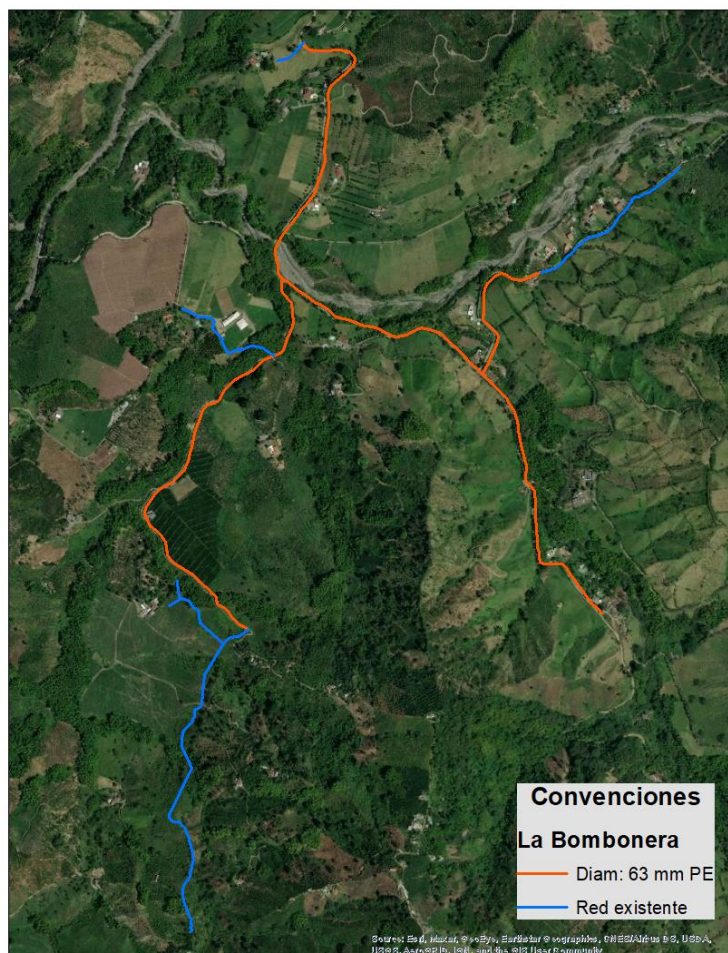
### **5.8.1 Parámetros de optimización**

Después de los resultados expuestos se plantea la modificación y optimización de varias tuberías teniendo en cuenta las siguientes limitaciones:

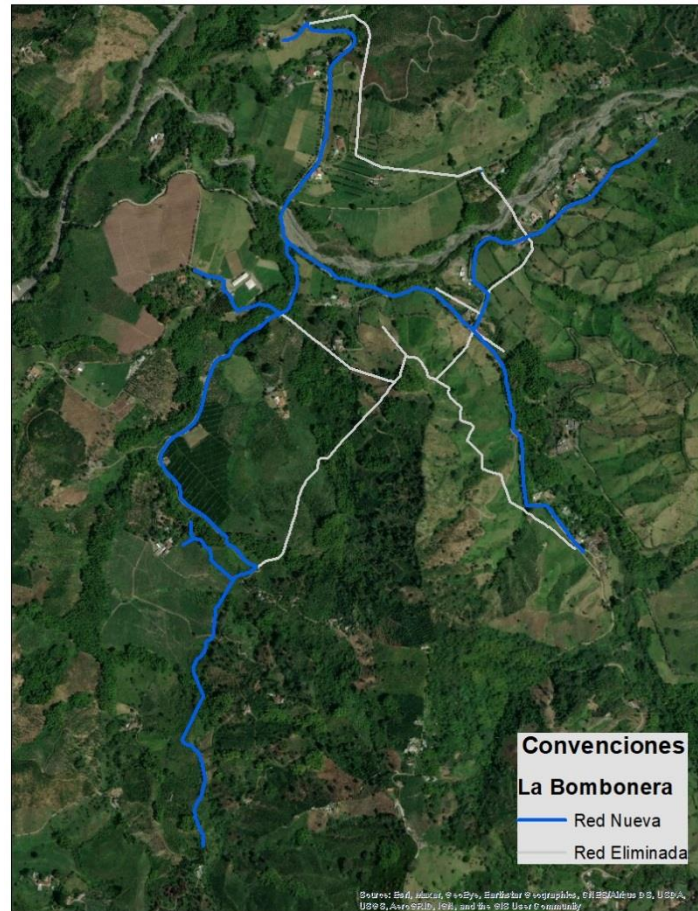
- Es necesario que las redes se instalen en vías de fácil acceso ya que el personal anda en moto o carro, por tanto, se debe realizar un nuevo alineamiento de la red.
- Las redes deben quedar expuestas a la intemperie por lo que se debe encontrar una tubería que soporte esta característica con el fin de realizar un control, operación y seguimiento al funcionamiento. Para esto se propone utilizar polietileno ya que es un material que soporta la intemperie y las grades presiones ya que la especificación PN 16 resiste hasta 16 bares, 227 PSI.
- Adicionalmente, se debe garantizar que los ramales de tubería nuevos tengan diámetros mayores a 2" (63 mm), lo que mejoraría la operación y la prestación del servicio en términos hidráulicos.
- Por último y teniendo en cuenta los requerimientos establecidos por la normativa vigente, en la que las presiones deben mantenerse en el rango entre 21 y 71 psi, es necesario definir y reubicar las válvulas reguladoras del circuito una vez que solo las puntas del circuito tienen suscriptores, por lo tanto, se regularán los puntos donde existe demanda.
- El IANC de la zona que actualmente se encuentra en un 93 % debe tener un descenso brusco hasta nivelarse con el IANC general de la empresa definido en un 25 % aproximadamente, es de resaltar que este porcentaje solo se verá reflejado en aproximadamente 1 año el cual es el acumulado para el cálculo del IANC

### 5.8.2 Definición y resultados de la optimización hidráulica

Se realiza el proceso de variación y optimización de las redes de acueducto estableciendo sus nuevos diámetros y materiales, como se muestra en la Ilustración 37 y en la Ilustración 38 se relacionan las redes que saldrán de servicio comparado con el nuevo alineamiento.

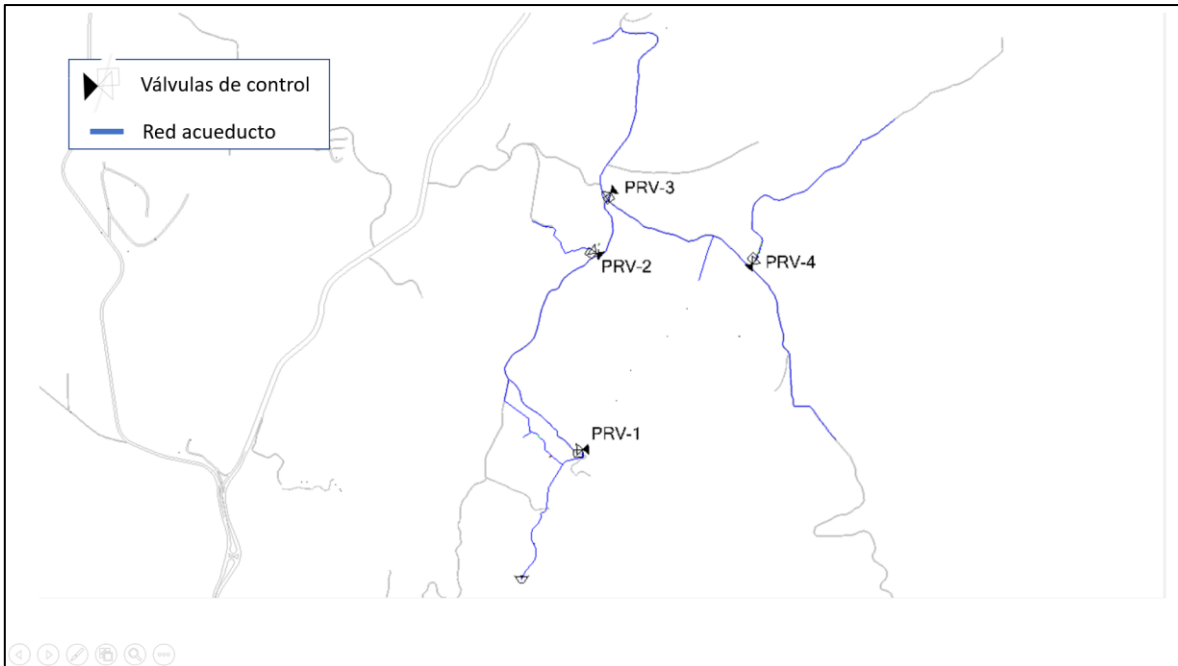


*Ilustración 37* Nuevo alineamiento de las redes a optimizar en el sector La Bombonera  
(Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)



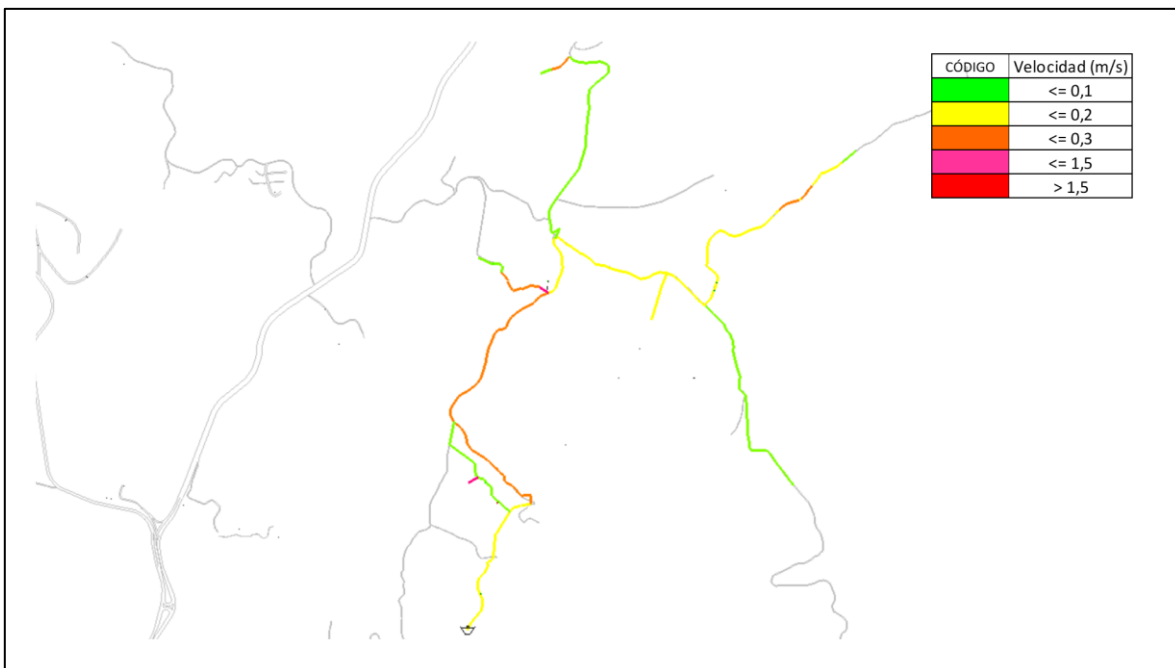
**Ilustración 38** Red nueva y red eliminada del sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

En la Ilustración 39 se muestra el trazado anterior en el programa de modelación al igual que la ubicación de las válvulas reguladoras que se plantean en el circuito para la sectorización de presiones según las zonas donde existen suscriptores, con el fin de cumplir la normatividad del rango de presiones.



**Ilustración 39** Representación gráfica del modelo hidráulico de la optimización en el sector La Bombonera en WaterGEMS (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

En la nueva red se presenta una disminución significativa en las velocidades según la Ilustración 40 con un promedio 0,17 m/s y un caudal promedio de 0,028 litros por segundo como se evidencia en la Ilustración 41 , cabe anotar que las pérdidas de volumen en toda red optimizada se reducirían en un 73 %, sin embargo se sigue asumiendo la base de IANC de la empresa que es 25 % aproximadamente.

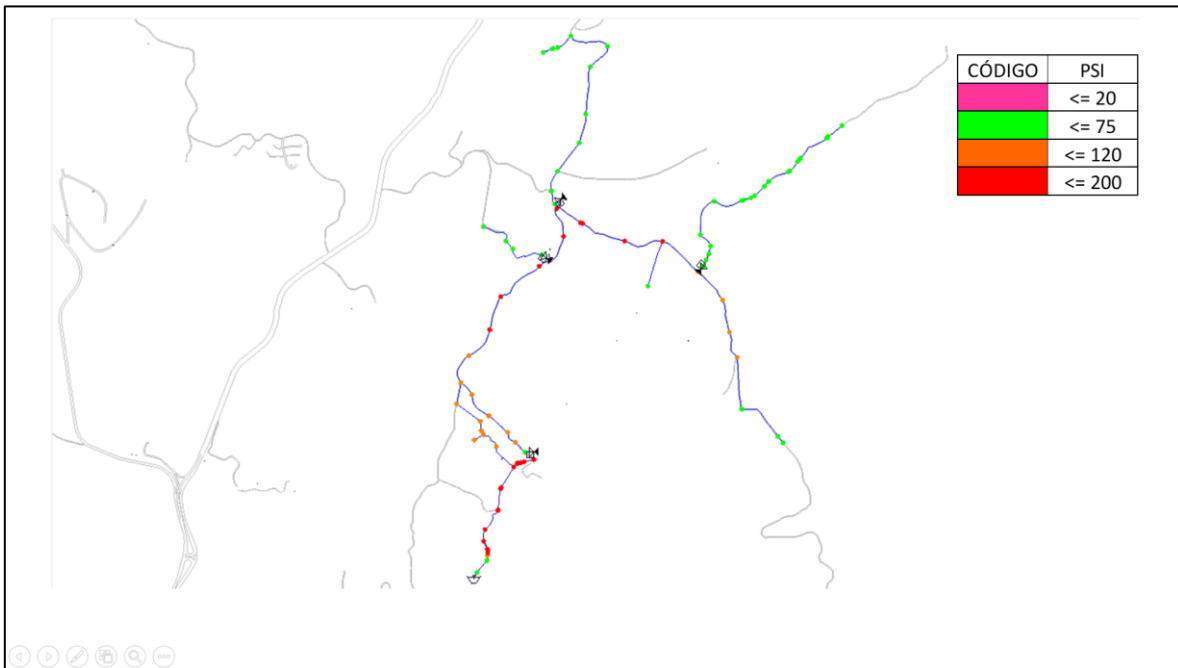


**Ilustración 40** Velocidades de la red optimizada en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)



**Ilustración 41** Caudales de las redes optimizadas en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

En la Ilustración 42 se observan las presiones en diferentes puntos de la red optimizada, quedando para las 4 puntas de red donde existen suscriptores, presiones entre 21 PSI y 71 PSI color verde, cumpliendo la normatividad vigente para la prestación del servicio de acueducto; la presión máxima del circuito es de 165 PSI en algunos puntos de la red local las cuales están en color rojo, es de aclarar que en estos puntos de altas presiones no existen demandas por lo que esos puntos de presiones solo son de referencia.



**Ilustración 42** Presiones de las redes optimizadas en el sector La Bombonera (Elaboración propia con información de Aguas de Manizales, 2020)

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1. Conclusiones**

Las redes de acueducto de la zona rural se encuentran por zonas boscosas y terrenos de altas pendientes, dificultando su monitoreo e intervención una vez que el terreno sufre cambios por la acción de la intemperie, lo que finalmente cambia la ubicación y referencia de la infraestructura.

Posterior al recorrido de las redes de acueducto y verificar cada suscriptor, se pudo tener certeza de la ubicación y existencia de la infraestructura plasmada en el sistema de información geográfico (SIG) de la empresa. Se encontraron 2 suscriptores sin servicio de acueducto y 225 metros de red de distribución por lo que se actualizó el catastro de redes y se dejó consignada en el SIG la información real en campo.

En las lecturas mes a mes de los macromedidores realizadas para el sector La Bombonera de la Vereda El Rosario se calculó un IANC de 93 % el cual está muy por encima del IANC general de la empresa Aguas de Manizales S.A E.S.P. que es 24,5 %. Como se puede observar el IANC general de la empresa se encuentra por debajo del 30 % establecido como el nivel de pérdidas aceptables para empresas prestadoras de servicios de abastecimiento, por lo que se dejó de suministrar 7430 m<sup>3</sup> al mes aproximadamente los cuales equivalen a 3 meses de facturación para recuperar la inversión de la tubería optimizada.

En los consumos recolectados de los medidores mes a mes se observa una tendencia constante de consumo, lo que significa que la mayor parte de las pérdidas de volumen en este sector rural se dan por daños no identificados en las redes, ya que si éstos se debieran a fraudes realizados para la agricultura o ganadería, se tendrían fluctuaciones en las lecturas en algunos meses que no exista cosecha o en los que se saque la producción animal y claramente esta tendencia no se observa en las lecturas tomadas.

Sectores hidráulicos con pocos suscriptores y con diámetros de tuberías de distribución de  $\frac{1}{2}$ " y  $\frac{3}{4}$ " (estos diámetros son pequeños y no cumplen la normatividad) pueden presentar caídas de presión debido a variaciones de consumo. Por tanto, se debe tener un registro histórico amplio de datos, mínimo de una semana, que permita conocer un comportamiento regular para suavizar los picos de consumo que dificultan la calibración.

La curva de consumos para el sector de La Bombonera encontrada de las mediciones de caudal y su posterior transformación como una curva de patrones, presenta considerables diferencias en su comportamiento si se compara con la curva típica establecida para la zona urbana de la ciudad de Manizales, estas diferencias obedecen a la heterogeneidad del área de prestación de servicio y pueden estar relacionadas, por una lado con factores como el uso del suelo si se refiere a una zona residencial, comercial o industrial; la altura sobre el nivel del mar y su relación directa con el clima de la zona, la población flotante que fluctúa con diferencias entre los días hábiles y fines de semana.

La zona fue modelada por medio del software WATER GEMS, para el que se obtuvo un nivel de ajuste apropiado, ya que se obtuvieron valores de error medio cuadrático de 0,25 y 3,07 de proximidad del modelo a los datos de campo. Según los resultados del modelo la zona modelada presenta presiones entre los 20 y 200 PSI que se explican debido a las condiciones topográficas de la zona. Por lo tanto, entre más datos se puedan recolectar en campo de diferentes puntos de la red tales como presiones, caudales y pérdidas de volumen, se puede ajustar mucho mejor los modelos hidráulicos llegando a una reducción bastante significativa del error cuadrático medio.

En la red de acueducto de la zona de estudio se encontraron varios cambios bruscos de diámetros y materiales en 3 tramos los cuales pasaban de 3" a 1" y de material PVC a Polietileno. También existían tramos pequeños de 1 metro aproximadamente de red con hierro galvanizado, adicionalmente todos los ramales que se desprendían de la red principal para distribuir a los suscriptores siempre estaban por debajo de 2" lo que generaba cambios bruscos en la línea de energía.

---

Teniendo en cuenta los resultados de la modelación se propuso una optimización haciendo la variación de las redes, actualizando los materiales y el alineamiento de las tuberías. Con estos cambios se logró descartar del sistema los daños no identificados, el cual se estimó como el principal foco de pérdidas para esta zona.

Para mejorar la operación del sistema en el mes de diciembre de 2020 se modificaron 4500 metros de tubería en material polietileno de 63 mm, con el fin de reducir el IANC y el IPUF de manera que lleguen a ser iguales o menores a los porcentajes generales de la empresa Aguas de Manizales S.A E.S.P. Los valores del IANC e IPUF generales de la empresa están en 24,5 % y 4,3 % respectivamente. Adicionalmente, con la modificación propuesta a la red de la zona de estudio, que consiste en la organización del alineamiento, la instalación de 2 nuevas válvulas reguladoras de 2" y 1" y la reubicación de 2 válvulas existentes de 2", se lograrían tener presiones de servicio entre 21 PSI y 71 PSI. Es notable el cambio que presentarían las redes luego de las variaciones realizadas, ya que el 100 % de las presiones estarían dentro del rango establecido, mejorando con esto las condiciones en la prestación del servicio de acueducto del sector de estudio.

Con la optimización planteada se espera reducir el IANC un 73,1 % del valor actual el cual se verá reflejado en 1 año debido a que es un valor acumulado de 12 meses. Las redes de distribución se dejaron expuestas facilitando su operación, la detección y reparación de daños que puedan generar pérdidas no identificadas, por lo que al final del año se espera que el IANC tenga un valor menor o igual a 25 %. Adicionalmente, en la modelación el caudal promedio demandado se reduce en un 30 % y las velocidades un 56,4 % con respecto al modelo inicial.

Al seleccionar el mejor material para la optimización se escogió el polietileno ya que, por las características flexibles del plástico y por soportar altas temperaturas se convierte en la mejor opción según las condiciones del terreno, la intemperie y la operación del sistema. Adicionalmente son tuberías que no se corroen y ofrecen un alto grado de protección contra la degradación causada por los rayos ultravioleta ya que dentro del compuesto, este mezclado uniformemente un porcentaje ya normalizado de negro humo, el cual repele los rayos UV.

## **6.2. Recomendaciones**

Los macromedidores deben instalarse con un rango de tiempo mínimo de 2 lecturas, toda vez que, se debe comenzar instalando en la entrada al circuito para continuar con las siguientes aguas abajo y en cada ramal, con el fin de identificar las pérdidas por sector. Adicionalmente, se deben instalar aguas abajo válvulas de cierre, para evitar un corte general del servicio por cada instalación.

Se debe tener certeza de que los equipos instalados en campo para la toma de caudales, volúmenes y presiones estén calibrados, toda vez que, estos datos obtenidos son la base del funcionamiento actual del sistema.

Es necesario tener una coordinación eficaz entre áreas involucradas y personal operativo, teniendo en cuenta que la transmisión de información es vital para una buena recolección de datos en campo.

Es sumamente importante para la instalación del equipo ultrasonido, gestionar el punto electrónico para el equipo, toda vez que, lo ideal es dejar grabando como mínimo, los 7 días de la semana ya que con la batería solo se alcanza a tomar un solo día de datos.

Para tener certeza de los datos que se tienen en los sistemas de información geográfica, es recomendable realizar catastros programados periódicos de verificación de la infraestructura, con el fin de tener información confiable y actualizada en el sistema.

Es importante a la hora de realizar las modificaciones sobre el modelo unificado, tener especial cuidado realizando pequeños cambios a los parámetros hasta conseguir un valor cercano a los valores observados, debido a que, un cambio de parámetro significativo podría desajustar el modelo general.

Para las zonas rurales donde las tuberías pasan por predios privados, se deben instalar redes en materiales que no sea fácil de adquirir en el mercado como lo es el PVC que es muy comercial, para estas zonas se deben utilizar tuberías de material polietileno de diámetros mayores a 63mm o 2” una vez que los accesorios son de difícil adquisición y su instalación es por termofusión con equipos especializados.

## Bibliografía

1. Aguas de Manizales S.A. E.S.P. (2020). Manizales, Caldas. Página web de Aguas de Manizales. <https://www.aguasdemanizales.com.co/>
2. Alhimiary, A., & Alsuhaily, S. (2007). Minimizing Leakage Rates In Water Distribution Networks Through Optimal Valves Settings. *World Environmental and Water Resources Congress*, 1-13.
3. Arcila Bonilla, L. Y. (2000). *Simulación hidráulica de las conducciones principales del acueducto de la ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia
4. Arena, Fortunato, & Mazzola. (2009). Simulation versus optimization in the assessment of the resource opportunity cost in complex water resources systems – the case of Agri-Sinni in southern Italy. *18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia*, 3237.
5. Aristizábal Valencia, J. A. (2000). *Simulación hidráulica de los circuitos: Tanque las colinas, tanque Belén, Enea parte alta, Ondas del Otún, fundadores y salida tanque 1 del acueducto de la Ciudad de Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
6. Arregui de la Cruz, F., García-Serra García, J., López Patiño, G., & Martínez Solano, J. (1998). Metodología para la evaluación del error de medición de un parque de contadores. *Ingeniería del Agua. Volumen (Vol. 5)*, pg 55-56
7. Arregui, F., Cabrera, E., Cobacho, R., García, J. (2006). *Reducing apparent losses caused by meters inaccuracies*.
8. Barriga Plazas & Rivera. (2006). *Diseño de acantarillado sanitario, red de distribución de agua potable, programación y presupuesto de obra para el barrio Vill Carol, ubicado en el municipio de Garzón, Huila* (tesis de pregrado). Universidad de La Salle. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil)
9. Bentley Systems INC. (2006). *Presentaciones Corporativas Bentley*. Manizales, Caldas: Bentley Systems INC - Latin America.

- 
10. Bermad. (s.f.). *Válvulas Reductoras de Presión*. Recuperado de: <http://www.bfschile.com/category/soluciones/control-de-fluido/valvulas-reductoras-de-presion>
  11. Berzal, F. (2016). *Algoritmos Genéticos*. Granda, España: Universidad de Granada.
  12. Castro Castrillon, N. (2004). *Diagnostico de agua no contabilizada y simulacion hidraulica del acueducto urbano del municipio de San Jose, el corregimiento de Aracua (Palestina) y la vereda Km 41 (Manizales)*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
  13. CLA-VAL. (2017). *Control activo de presiones*. Recuperado de: <http://www.cla-val-latinamerica.com>
  14. DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. Recuperado el 7 de noviembre, 2020, de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>.
  15. Duque, G. (2014). *Elementos para la construcción de una visión estructurada del desarrollo de Caldas*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
  16. Flechas, R. A. (2012). Efecto del uso de la ecuación de darcy-weisbach vs la ecuación de hazen-williams en el diseño de redes matrices. *XX Seminario Nacional De Hidráulica E Hidrología*. Seminario llevado a cabo en Barranquilla, Colombia.
  17. Galvez, J. J. (2011). *Ciclo Hidrologico*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima
  18. Giraldo Diaz, M. A. (2004). *Diagnostico de agua no contabilizada y simulacion hidraulica del acueducto urbano del municipio de Neira Caldas*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
  19. Haestad, M., Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2002). *Advanced Water Distribution Modeling And Management*. Waterbury, CT USA: Haestad Press.
  20. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2007). *Conceptos de reducción y control de pérdidas, y de sectorización de redes de distribución*.
  21. Jaramillo. M. (2017). *Análisis de la incidencia de fuertes pendientes en el comportamiento hidráulico de las redes de acueducto. Caso de estudio: sectores norte y sur Avenida Santander* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.

22. Jimenez Aldana, M. (2002). *La Sectorización hidráulica como Estrategia de Control de Perdidas en Sistemas de Acueducto*. Bogotá: Acueducto de Bogotá.
23. Kantauriar, E., & Bulegoa, A. (n.d.). *Hoja Informativa Sobre Tipos De Contadores*. Recuperado de: [https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/sistemas\\_control\\_tipos/es\\_def/adjuntos/hoja\\_informativa\\_Medidores\\_caudal.pdf](https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/sistemas_control_tipos/es_def/adjuntos/hoja_informativa_Medidores_caudal.pdf).
24. Keller AG. (2016). *Manómetros digitales Leo-Record-Ei*. Recuperado de: <https://keller-druck.com/en/products/digital-pressure-gauges/intrinsically-safe-digital-pressure-gauges/leo-record-ei>
25. Khalafallah, A. (2014). Assessing the Performance of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm in Optimizing Construction Site Planning. *Computing In Civil And Building Engineering*, 1254-1261.
26. Lansey, K., L. N., & Tung, e.-K. (1989). *Water Distribution System Design Under Uncertainties*. ASCE, 630-645.
27. Llano, J. (2017). *Análisis de la incidencia de los cambios fuerte de pendiente en el comportamiento hidráulico de las redes de acueducto. Casos de estudio: Comunas Tesorito, Palogrande, Ecoturístico Cerro de oro y la Florida (Villamaría)* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
28. Mahdavi, M., & Hosseini, K. (2010). *Leakage Control In Water Distribution Networks By Using Optimal Pressure Management: A Case Study*. *Water Distribution Systems Analysis*, 1110-1123.
29. Management Science Consulting. (2012). *MSC Management Science Consulting*. Recuperado de: [www.managementscience.c](http://www.managementscience.c)
30. Ministerio De Vivienda, Ciudad Y Territorio. (2013). *Resolución CRA 665, Por la cual se establecen las condiciones generales para regular la opción de pago anticipado en losservicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado*. Recuperado de: [https://cra.gov.co/documents/Resolucion\\_CRA\\_No.\\_665\\_de\\_2013\\_EDICION\\_Y\\_COP IA.pdf](https://cra.gov.co/documents/Resolucion_CRA_No._665_de_2013_EDICION_Y_COP IA.pdf)
31. Ministerio De Vivienda, Ciudad Y Territorio. (2014). *Resolución CRA 688, Por la cual se establece la metodología tarifaria para las personas prestadoras de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado con más de 5.000 suscriptores en*

- 
- el área urbana.* Recuperado de:  
[https://www.cra.gov.co/documents/Resolucion\\_CRA\\_688\\_de\\_2014\\_Firmada.pdf](https://www.cra.gov.co/documents/Resolucion_CRA_688_de_2014_Firmada.pdf)
32. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Manual de divulgación, Resolución 0330, por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS*. Bogotá: Soluciones S.A
33. Muraca, A., & Magalini, E. (2015). *The case study of Vilanculos (Mozambique) water network: criticalities and solutions*. Advances in Environmental and Geological Science and Engineering, 434.
34. Naciones Unidas. (2010). *Resolución 64/292, El derecho humano al agua y el saneamiento*. Recuperado de:  
[https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water\\_and\\_sustainable\\_development.shtml%0Ahtt](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water_and_sustainable_development.shtml%0Ahtt)
35. Nicolini, M., & Zovatto, L. (2009). *Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks*. Journal Of Water Resources Planning And Management, 178-187.
36. Quintero, J. (2013). *Diagnóstico De La Gestión Integral Del Riesgo Por Inundaciones Y Avenidas Torrenciales En Ríos Urbanos Del Departamento De Caldas* (Tesis de especialización). Universidad Católica de Manizales, Manizales, Caldas.
37. Salcedo Ballesteros, C. A. (2014). *Localización y ajustes óptimos de válvulas reductoras de presión (VRP) en RDAP para minimizar el índice de agua no contabilizada (IANC)* (Tesis de maestría). Universidad de los Andes, Bogotá, Cundinamarca.
38. Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías - Abastecimiento de agua, redes, riegos*. Bogotá, D.C.: Alfaomega.
39. Saldarriaga, J. (2008). Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable. *XVIII Seminario Nacional de hidráulica e hidrología*. Seminario llevado a cabo en Bogotá, Colombia.
40. Saldarriaga, J., & Jurado, C. M. (2008). Metodología de calibración de las redes de distribución de agua potable. *XVIII Seminario nacional de hidraulica e hidrologia*. Seminario llevado a cabo en Bogotá, Colombia.

41. Saldarriaga, J., & Salcedo, C. A. (2015). *Determination of optimal location and settings of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Networks for minimizing water losses*. *Procedia Engineering*, 973-983.
42. Saldarriaga, J., Ochoa, S., Moreno, M., Romero, N., & Cortés, O. (2010). *Prioritised rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water*. *Urban Water Journal*, 121-140.
43. Sánchez M., W. (2014). *Sistemas Comerciales Inteligentes: Decisión efectiva para gestionar agua no contabilizada*. Lima, Peru: Perusmart.
44. Sierra Largo, J. A. (2001). *Simulación hidráulica de unos circuitos de acueducto de la ciudad de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas.
45. Simpson, A. R., Dandy, G. C., & Murphy, L. J. (1994). *Genetic Algorithms Compared To Other Techniques For Pipe Optimization*. *Asce*, 423.
46. Solano López, C. S. (2012). *Recopilación, Análisis y Evaluación de las metodologías de calibración de modelos de RDAP empleadas en algunas ciudades de Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes.
47. Todini, E. (2000). *Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach*. *Urban Water*, 115-122.
48. Tribunal Latinoamericano del agua. (1998). *Declaración Centroamericana del Agua*. Recuperado de: <http://tragua.com/quienes-somos/declaracion-latinoamericana-del-agua/>
49. UNICEF. (2014). *Progress on sanitation and drinking-water - 2014 update*. Switzerland: World Health Organization.
50. Villegas, G. (2017). *Metodología computarizada de dimensionamiento de redes de agua potable (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil)*. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
51. Yamatho. (2017). *Fundamentos de Medicion de Flujo con Ultrasonido*. Recuperado 28 mayo, 2020, de <https://www.yamathosupply.com/blogs/news/fundamentos-de-medicion-de-flujo-con-ultrasonido>