

**Formulación de alternativas para optimizar el funcionamiento técnico del sistema de
abastecimiento urbano del municipio de Málaga (Santander), enfatizando en la gestión de
pérdidas en la red de distribución**

César Julián Celis Caicedo

Liceth Carolina Blanco Almeida

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. en Ingeniería, con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2017

Dedicatoria

A Dios por darme la vida, salud y fortaleza para cumplir las metas propuestas y poner en mi camino personas que han guiado e iluminado mi camino. A mi familia por su apoyo, especialmente a mis padres que me han formado y acompañado durante mi vida, que con su amor, confianza, sacrificio, ejemplo y comprensión han sido mi principal motor para lograr mis objetivos y buscar un mejor futuro. A ellos les dedico y dedicaré cada triunfo en mi vida.

César Julián Celis Caicedo

A Dios, primeramente, por todas sus bendiciones, por toda su bondad y su amor, por concederme la fortaleza y sabiduría para culminar esta etapa de mi vida y por poner en mi camino a todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido con su presencia en mi vida.

A mi querida madre Ana del Carmen Almeida quien es mi ejemplo a seguir de fortaleza, de paciencia, de sabiduría, de carácter y de todo aquello que hay que saber en la vida, porque has confiado siempre en mí y me brindas tu apoyo incondicional te agradezco inmensamente.

A mis hermanos quienes han sido mis mejores amigos y me han apoyado en todo lo que me propongo y los que sé que siempre estarán ahí para mí y yo para ellos.

A mi padre que me ha apoyado en mi vida a mi familia y a todos aquellos amigos a quienes he tenido la suerte de conocer y compartir un poco de este regalo que tenemos todos llamado vida, por todos esos momentos compartidos, y todo lo que hemos aprendido juntos. A todos los llevo en el corazón y me siento agradecida por su existencia.

Liceth Carolina Blanco Almeida

Agradecimientos

A Dios por permitirnos desarrollar este proyecto de la mejor manera.

A nuestro Director de Proyecto, el Ingeniero Ricardo Oviedo por su guía y su dedicación durante el transcurso de nuestro proyecto.

A la Empresa de Servicios Público de Málaga ESPM por abrirnos sus puertas y brindarnos la información necesaria para nuestros propósitos.

A los Ingenieros Sergio Anaya y Andrés Almeida, quienes fueron guías en nuestro proceso de aprendizaje y no dudaron en dedicarnos su tiempo y conocimientos para ayudarnos en la realización de nuestros objetivos.

A la Universidad Industrial de Santander y a todos aquellos profesores que contribuyeron en nuestra formación académica y nos brindaron no solo sus conocimientos sino también sus experiencias para llegar a ser profesionales íntegros.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos.....	17
1.1. General.....	17
1.2. Específicos	17
2. Estado del arte.....	18
2.1. Pérdidas en sistemas de distribución de agua	18
2.2. Estándar internacional de la IWA	20
2.3. Indicadores de pérdidas de agua.	22
3. Descripción de la localidad objeto de estudio.....	24
4. Descripción general del sistema.....	25
4.1. Redes de distribución.....	25
4.2. Plantas de tratamiento de Potabilización – PTAP.....	28
4.2.1. Planta de tratamiento “Los Tanques”.	28
4.2.2. Planta de tratamiento “María Auxiliadora”.	32
5. Metodología	32
5.1. Identificación de las características técnicas de la red de distribución y la demanda del sistema de abastecimiento de la cabecera municipal de Málaga (Santander).....	33
5.1.1. Catastro de la red.	33
5.1.2. Demanda en el sistema de distribución.....	34
5.2. Estimación del porcentaje de pérdidas en el sistema de distribución	40
5.2.1. Volumen histórico de entrada al sistema	40

FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO TÉCNICO DEL ACUEDUCTO URBANO DE MÁLAGA (SANTANDER)	8
5.2.2. Consumo histórico autorizado.	41
5.2.3. Pérdidas de agua.	41
5.2.4. Balance hídrico del sistema para el periodo octubre 2016 – marzo 2017.	48
5.3. Formulación de alternativas para optimizar el funcionamiento técnico del sistema. ...	53
5.3.1. Actividades de control y reducción de pérdidas comerciales	53
5.3.2. Actividades de control y reducción de pérdidas técnicas	54
6. Resultados y discusión	63
6.1. Identificación de las características técnicas de la red de distribución y la demanda del sistema de abastecimiento de la cabecera municipal de Málaga (Santander).....	63
6.1.1. Catastro de válvulas y tuberías.	63
6.1.2. Demanda en el sistema de abastecimiento.....	66
6.2. Estimación del porcentaje de pérdidas en el sistema de distribución.	68
6.2.1. Balance hídrico del sistema para el periodo octubre 2.016 – marzo 2.017.	68
6.2.2. Índice de agua no contabilizada IANC.	74
6.3. Formulación de alternativas para optimizar el funcionamiento técnico del sistema	74
6.3.1. Actividades de control y reducción de pérdidas comerciales.	75
6.3.2. Actividades de control y reducción de pérdidas técnicas.	77
7. Conclusiones	86
Referencias Bibliográficas	89

Lista de Tablas

Tabla 1. Adaptación al español del International Water Balance propuesto por la IWA.	20
Tabla 2. Ejemplo direcciones normalizadas	35
Tabla 3. Ejemplos registros con problemas.	36
Tabla 4. Estructura de datos Malla Vial.....	38
Tabla 5. Descripción proceso de geocodificación	40
Tabla 6. Valores críticos A^2	43
Tabla 7. Valores históricos pérdidas de agua.....	43
Tabla 8. Cálculo de la variable S	44
Tabla 9. Porcentaje de pérdidas para el periodo de análisis.	45
Tabla 10. Rangos de la prueba U de Mann-Whitney	47
Tabla 11. Presiones en la red de distribución	56
Tabla 12. Grupos homogéneos para el análisis estadístico lineal.	60
Tabla 13. Resumen de accesorios	64
Tabla 14. Catastro de tuberías en la red de distribución.	65
Tabla 15. Distribución y consumo de suscriptores según su clasificación	66
Tabla 16. Distribución y consumo de suscriptores de tipo residencial.	66
Tabla 17. Distribución de consumo mensual en el área de estudio	67
Tabla 18. Volumen de entrada al sistema.	69
Tabla 19. Distribución consumo facturado medido	69
Tabla 20. Identificación motivos para facturación con consumos promedio	71
Tabla 21. Volúmenes de pérdidas por errores de facturación.....	72
Tabla 22. Balance hídrico para el sistema de distribución (octubre 2016 – marzo 2017).....	73

Lista de Figuras

Figura 1. Localización de Málaga en Santander.....	25
Figura 2. Sectores de la red de distribución de agua del municipio de Málaga.....	26
Figura 3. Cámara de quietamiento	29
Figura 4. Estructura de aireación y desarenador.....	29
Figura 5. Pre filtros	29
Figura 6. Filtros rápidos.....	29
Figura 7. Caseta de cloración.....	30
Figura 8. Tanques de almacenamiento.....	30
Figura 9. Tanques de almacenamiento adicionales.....	31
Figura 10. Macromedidor a la salida PTAP.....	31
Figura 11. Esquema de PTAP los Tanques.....	31
Figura 12. Elementos PTAP Ma. Auxiliadora.....	32
Figura 13. Captación Q. La Magnolia	32
Figura 14. Identificación predios Geoportal IGAC	37
Figura 15. Registros de macromedición y micromedición disponibles en la ESPM.....	41
Figura 16. Aceptación de Ho	45
Figura 17. Aceptación o rechazo de Z calculado.....	48
Figura 18. Curva de demanda de la red	55
Figura 19. Estadística de calibración por presión	56
Figura 20. Comparación de valores medios de presión	57
Figura 21. Cambios de tuberías realizados en 2012	64

FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO TÉCNICO DEL ACUEDUCTO URBANO DE MÁLAGA (SANTANDER)	11
Figura 22. Tuberías y válvulas en la red de distribución	65
Figura 23. Mapa vial municipio de Málaga elaborado en ArcMap.	67
Figura 24. Usuarios georreferenciados del sistema de acueducto	68
Figura 25. Ubicación espacial micromedidores con mal funcionamiento	75
Figura 26. Ubicación espacial de potenciales usuarios fraudulentos.....	76
Figura 27. Modelado de la red de distribución	77
Figura 28. Tuberías con condiciones críticas para renovación	78
Figura 29. Distribución espacial del grupo homogéneo 10	79
Figura 30. Capa de salida de OLS para el Grupo 10	80
Figura 31. Resultados numéricos regresión OLS	80
Figura 32. Plano de distribución de las presiones en la red de distribución	83
Figura 33. Sectorización hidráulica propuesta de la red	85
Figura 34. Plano de presiones luego de la sectorización	86

RESUMEN

TÍTULO: FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO TÉCNICO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO URBANO DEL MUNICIPIO DE MÁLAGA (SANTANDER), ENFATIZANDO EN LA GESTIÓN DE PÉRDIDAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN*

AUTORES: LICETH CAROLINA BLANCO ALMEIDA
CÉSAR JULIÁN CELIS CAICEDO**

PALABRAS CLAVE: Red de distribución de agua, Pérdidas de agua, Balance hídrico, Sistemas de Información Geográfica, Geolocalización, Sectorización de redes de distribución de agua.

DESCRIPCIÓN:

Este documento presenta el estudio realizado en el sistema de distribución del municipio de Málaga (Santander), el cual se ha caracterizado por presentar dificultades en el abastecimiento de la población en épocas de sequía. Generalmente esta situación se aborda desde la perspectiva de ampliar la oferta hídrica, sin embargo, este estudio considera la gestión de pérdidas en la red de distribución como alternativa para mejorar las condiciones del sistema. Inicialmente se caracterizan los principales componentes y se analiza la demanda del sistema, integrando Sistemas de Información Geográfica y geocodificación de usuarios. A partir de datos de macro y micromedición, se realiza el balance hídrico planteado por la Asociación Internacional de Agua (IWA) obteniéndose un 46.53% de pérdidas, de las cuales se estima que el 92% corresponde a fugas en la transmisión, distribución y conexiones de servicio hasta el punto de medición del cliente. Por último, se plantean alternativas para el mejoramiento del sistema, evaluando aspectos técnicos y comerciales, concluyendo que la intervención y control de las pérdidas reales (fugas), es la opción que contribuirá mayormente a la optimización del funcionamiento técnico del sistema, lo cual se logra mediante la sectorización y gestión de la presión, permitiendo alcanzar mejores eficiencias en el manejo sustentable del recurso hídrico.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

ABSTRACT

TITLE: FORMULATION OF ALTERNATIVES TO OPTIMIZE THE TECHNICAL FUNCTIONING OF THE URBAN SUPPLY SYSTEM OF THE MUNICIPALITY OF MÁLAGA (SANTANDER), ENFORCING IN THE MANAGEMENT OF LOSSES IN THE DISTRIBUTION NETWORK*

AUTHORS: LICETH CAROLINA BLANCO ALMEIDA
CÉSAR JULIÁN CELIS CAICEDO**

KEYWORDS: Water distribution network, Water losses, Water balance, Geographical Information Systems, Geocoding, Sectorization of Water networks.

DESCRIPTION:

This paper presents the study carried out in the distribution system of the municipality of Málaga (Santander), which has been characterized by difficulties in supplying the population in times of drought. Generally, this situation is approached from the perspective of expanding the water supply, however, this study considers the management of losses in the distribution network as an alternative to improve the conditions of the system. Initially the main components are characterized and the system's demand is analyzed, integrating Geographic Information Systems (GIS) and user geocoding. Based on macro data and micromediation, the water balance proposed by the International Water Association (IWA) is obtained, obtaining 46.53% of losses, of which it is estimated that 92% correspond to leaks in transmission, distribution, overflow in storage tanks and household connections up to the customer's measurement point. Finally, alternatives are proposed for the improvement of the distribution system, evaluating technical and commercial aspects, concluding that the intervention and control of real losses, represented as leaks in the distribution system, is the option that will contribute mainly to the optimization of the technical operation of the system. This could be achieved through sectorization and pressure management, allowing better efficiencies in the sustainable management of water resources.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Introducción

El agua es un recurso valioso, fundamental para el desarrollo económico (Horne, 2013). Con el incremento de la población, especialmente en las zonas urbanas de países en desarrollo, encontrar nuevos recursos hídricos para suplir la demanda en adecuada cantidad y calidad se vuelve cada vez más difícil (Motiee, McBean, & Motiei, 2007), haciendo de éste un recurso cada vez más crítico que debe ser preservado y administrado con la máxima eficiencia. En este contexto, la reducción de las pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento urbano, que puede alcanzar alrededor de 48 mil millones de metros cúbicos a nivel global (Kingdom, Liemberger, & Marin, 2006) es un factor clave para administrar el recurso hídrico eficientemente. Esto implica la adopción de un enfoque más sostenible, a través del uso de nuevos métodos administrativos y tecnologías que deben ser implementadas por los administradores de los sistemas de abastecimiento, al igual que por los diversos sectores interesados en esta problemática (Sardinha et al., 2017).

Las pérdidas de agua ocurren en todos los sistemas de distribución, aunque el volumen de pérdidas varía dependiendo de las características de la red y otras condiciones locales (Malcolm Farley, 2001). De acuerdo con el estándar de la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés), estas pérdidas corresponden a la diferencia entre el volumen de agua producida y el volumen de agua que es facturada en el sistema, y se divide en dos principales componentes, las pérdidas técnicas o reales y las pérdidas aparentes (M Farley & Trow, 2003).

Las pérdidas técnicas o reales, consisten en todo tipo de fugas en las tuberías, nodos y accesorios. Estas fugas pueden ser causadas por malas conexiones, corrosión interna o externa de

tuberías, daño mecánico causado por cargas excesivas, movimiento del suelo, altas presiones en el sistema, daños debidos a excavaciones, edad de las tuberías y pobre calidad de ejecución de trabajos de instalación de las mismas (Puust, Kapelan, Savic, & Koppel, 2010). La cantidad de agua perdida a través de fugas varía ampliamente entre diferentes países, regiones y sistemas. Se reportan valores del 3 a 7% del volumen de entrada en sistemas bien mantenidos en Holanda (Beuken, R. H. S. ; Lavooij , C. S. W. ; Bosch, A. ; and Schaap, 2006). Igualmente, el porcentaje de fugas en países europeos varía entre el 5 y 50%, por ejemplo, 5% en Alemania, 30% en Francia e Italia, 20% en Inglaterra (Lallana, 2001). En algunos países en desarrollo y sistemas menos mantenidos el porcentaje de fugas es superior al 50% (Mamlook & Al-Jayyousi, 2003). De otro lado, las pérdidas aparentes consisten principalmente en inexactitudes de medición en los usuarios, errores en lecturas de medidores y conexiones ilegales en el sistema. Las pérdidas de agua representan el indicador más relevante de la ineficiencia de los sistemas de distribución (Vilanova, Magalhães Filho, & Balestieri, 2015), por lo cual son el principal desafío al que las entidades prestadoras de servicios públicos, de países en desarrollo, se enfrentan actualmente.

El municipio de Málaga, Santander es afectado por la disponibilidad de agua en periodos prolongados de sequía, en donde las fuentes que abastecen al acueducto municipal reducen sus caudales entre un 60 y 70% (ORION SA, 2014). Tradicionalmente, la opción con que se ha pretendido resolver esta problemática es encontrar nuevas fuentes de suministro, sin embargo, se dejan de lado aspectos como la gestión de pérdidas en el sistema. La recuperación de parte del agua perdida a través de medidas de reducción de pérdidas, disminuiría la demanda en las fuentes hídricas, ya que las pérdidas en el sistema deben ser compensadas con mayores volúmenes captados. La clave del desarrollo de una estrategia de reducción de pérdidas de agua

es obtener un mejor entendimiento de sus causas y los factores que las influyen (Karathanasi & Papageorgakopoulos, 2016), sin embargo, actualmente no se cuenta con información de este tipo para el sistema de acueducto, situación que es frecuente en sistemas de abastecimiento de poblaciones menores en Colombia.

Este documento presenta el estudio realizado al sistema de distribución del municipio de Málaga, Santander en donde en una primera instancia se caracterizan sus componentes con el fin de obtener los recursos necesarios para estimar las pérdidas actuales y sus respectivas causas, aplicando una combinación de observaciones estadísticas, modelos hidráulicos y Sistemas de Información Geográficos (SIG). Con el análisis de la información, se formulan las alternativas para la gestión de pérdidas considerando las características del contexto de estudio.

1. Objetivos

1.1.General

Proponer al menos una alternativa para optimizar el funcionamiento técnico del sistema de abastecimiento de agua potable de la cabecera municipal de Málaga (Santander) enfatizando en la gestión de pérdidas.

1.2.Específicos

- Identificar las características técnicas de la red de distribución y la demanda del sistema de abastecimiento de la cabecera municipal de Málaga (Santander).
- Estimar el porcentaje de pérdidas que se presenta en la red de distribución del sistema.
- Evaluar al menos dos alternativas técnicas que permitan mejorar la funcionalidad de la red de distribución de agua potable en la localidad de estudio, con énfasis en la gestión de las pérdidas técnicas y comerciales.

2. Estado del arte

2.1. Pérdidas en sistemas de distribución de agua

Para estimar la cantidad de agua que se desperdicia en sistemas de distribución de agua, se han desarrollado metodologías que pueden clasificarse principalmente en dos grupos: (a) métodos de evaluación descendentes y (b) métodos de evaluación ascendentes (Puust et al., 2010).

Las metodologías descendentes buscan estimar las pérdidas en un sistema particular al evaluar los diferentes componentes del balance hídrico global, el cual presenta dos enfoques principales, el enfoque IWA (Lambert & Hirner, 2000) y el enfoque utilizado por la Oficina de servicios hídricos del Reino Unido OFWAT. Se han desarrollado algunos trabajos basados en ambos enfoques, como metodologías simples y económicas para cuantificar las pérdidas aparentes y generar un SIG para el análisis de las pérdidas en la red de distribución. En este método se destaca la importancia de mantener un registro actualizado de los usuarios para evitar errores clasificando las pérdidas reales como las de mayor influencia si en realidad existen más usuarios que los registrados (i.e. pérdidas por conexiones ilegales) (Anaya, 2015). Así mismo, en Grecia se aplicó la metodología IWA, como un primer intento de evaluar el rendimiento de las redes de distribución con base en la evaluación de pérdidas (Kanakoudis & Gonelas, 2014), adaptando herramientas y software que permiten evaluar estrategias de intervención acorde a las necesidades de la red (Petroulias, Foufeas, & Bougoulia, 2016). La implementación del software ECONOLEAK, calcula las pérdidas reales utilizando el método del balance hídrico anual, en el que las pérdidas aparentes se consideran como un porcentaje del total del agua no contabilizada (RD; McKenzie & Lambert, 2002), y seguidamente, se utiliza el concepto “Burst and

Background Estimation” BABE (Lambert, 1997), para evaluar los componentes de la fuga (Xin, Li, Tao, Xiang, & Yin, 2015).

Los métodos ascendentes se consideran una segunda parte del proceso, puesto que evalúa las áreas de operación de la empresa como son registros de facturación, sistema de distribución, y registros contables. Este procedimiento se aplica cuando la empresa ha confirmado los datos utilizados en el enfoque descendente. La evaluación real de la pérdida ascendente puede llevarse a cabo de dos maneras diferentes: (a) Medición horaria de la zona durante 24 horas, la cual necesita un área aislada temporalmente de la red de distribución con mediciones de afluencia de 24 horas registradas junto con mediciones de presión o (b) Análisis de Flujo Nocturno Mínimo, que en situaciones urbanas se realiza normalmente durante el período de 02:00 - 04:00 horas de la mañana (Liemberger & Farley, 2004). La estimación del componente de pérdida real se realiza restando los usos nocturnos legítimos del flujo nocturno mínimo. Diversos trabajos han sido planteados con base en este enfoque, una metodología basada en los registros continuos de entrada de algunas zonas urbanas en la región de Apulia (Italia) para evaluar las fugas basadas en la fluctuación estacional de los consumos de agua (Mazzolani et al., 2016). Así mismo, un plan para estimar las fugas de área basadas en modelos hidráulicos junto con la información de activos, permitiendo estimar la fuga dentro de áreas virtuales de una red de distribución de agua (Adachi, Takahashi, Kurisu, & Tadokoro, 2014). Igualmente, evaluar un caudal de fuga utilizando ecuaciones que involucran mediciones de presión en las uniones de tuberías, características de la red y la estimación de las demandas de caudal, cuya solución óptima se estima mediante la formulación de algoritmos genéticos (Fuentes-Mariles, Palma-Nava, & Rodríguez-Vázquez, 2011). Finalmente, un enfoque más riguroso y refinado, aplicable a la distribución de fugas en toda la red, consistiría en utilizar los métodos anteriores: el balance de

agua y flujo nocturno mínimo en combinación con modelos de simulación hidráulica como Epanet, para determinar el volumen estimado de agua que se pierde por esta condición (Tabesh, 2002).

2.2. Estándar internacional de la IWA

La IWA, producto de la revisión de metodologías internacionales para estimación de pérdidas en los sistemas de acueducto, propuso un esquema de balance hídrico para estimar las pérdidas de aguas el cual ha sido adoptado por empresas de acueducto a nivel mundial. Un balance hídrico tiene como objetivo rastrear y contabilizar cada componente de agua que se añade y se deduce de un sistema de abastecimiento de agua dentro de un periodo definido en un formato estandarizado (Thornton, Sturm, & Kunkel, 2008). La Tabla 1 presenta el estándar realizado por la IWA.

Tabla 1. Adaptación al español del International Water Balance propuesto por la IWA.

Volumen De Entrada al Sistema	Consumo Autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo facturado medido	Facturación	Agua facturada
			Consumo facturado no medido		
		Consumo autorizado no facturado	Consumo no facturado medido	Pérdida comercial	
		Consumo no facturado no medido			
	Pérdidas aparentes	Consumo ilegal	Agua no facturada		
		Errores de medición y facturación			
Pérdidas reales	Fugas de transmisión y distribución	Pérdida técnica			
	Fugas y reboses en tanques de almacenamiento				
		Fuga en conexiones de servicio hasta el punto de medición del cliente.			

Nota: Esquema Balance hídrico. **Adaptado de:** CRA Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, “Resolución CRA 688 de 2014 Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio,” 2014.

El significado de los principales componentes del balance hídrico son los siguientes (M Farley & Trow, 2003):

- **Volumen de entrada del sistema:** Corresponde al volumen que ingresa a determinada parte del sistema durante un período definido.
- **Consumo Autorizado:** Es el volumen de agua medida y/o no medida tomado de los clientes registrados, el proveedor de agua y otros que están implícita o explícitamente autorizados para hacerlo, incluye agua exportada, fugas y desbordamientos después del punto de medición del cliente.
- **Agua no facturada:** Equivale a la diferencia entre el volumen de entrada del sistema y el consumo autorizado facturado. El agua no facturada está compuesta por el consumo autorizado no facturado (generalmente un componente menor del balance hídrico) y las pérdidas de agua, equivalentes a la diferencia entre el volumen de entrada al sistema y el consumo autorizado. Estas pérdidas se dividen a la vez en pérdidas aparentes que corresponden a consumos ilegales, errores de medición y facturación y en pérdidas reales, correspondientes al volumen perdido en el sistema a través de todo tipo de fugas, daños y reboses en tuberías, tanques de almacenamiento y conexiones de servicio, hasta el punto de medición del cliente.

Idealmente, todos los componentes del balance hídrico siempre deben calcularse como volúmenes antes de cualquier intento de calcular indicadores de desempeño (M Farley & Trow, 2003).

2.3. Indicadores de pérdidas de agua.

En general, se reconoce la existencia de dos tipos de indicadores de pérdidas de agua: los indicadores financieros y los indicadores operacionales. Los primeros reflejan principalmente los costos en los que incurre la empresa, o aquellos ingresos que deja de percibir por efecto de los volúmenes de agua perdida. Los indicadores operacionales son aquellos cuyo objetivo es medir la gestión operativa de los prestadores en el manejo de las pérdidas, por lo cual los parámetros usados para su construcción buscan cuantificar en volumen y no en costos el nivel de pérdidas de un sistema (CRA Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2013).

El Índice de Agua No Contabilizada (IANC) ha sido el indicador de pérdidas establecido normativamente en Colombia por la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento (CRA) en diferentes resoluciones (Resolución CRA 31511 de 2005). En Colombia el IANC para el año 2013 se estimó en un promedio de 43% (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2007), un valor considerablemente superior a la meta regulatoria de 30% establecida por la CRA. En contraste, en Estados Unidos y Europa, el IANC normalmente está en el rango del 10% al 20%. En Colombia, del valor del IANC, aproximadamente un 40% es debido a errores de medición, un 35% corresponden a fugas y el restante 25% es debido a conexiones clandestinas, fraudes o robos (Anaya, 2015). El IANC se calcula como la relación porcentual entre un volumen total de agua no contabilizada y el volumen total de agua distribuida, calculado en un período dado, normalmente un mes, o el acumulado de un año (Ecuación 1).

$$IANC = \frac{V_p + C_a - V_f}{V_p + C_a} * 100\% \quad (1)$$

Donde, V_p corresponde al Volumen de agua producido, C_a al volumen de compra de agua, si se da el caso y V_f corresponde al volumen de agua facturado.

Aunque a nivel mundial existe una preferencia en el uso del IANC como indicador para cuantificar el progreso en la reducción del volumen de agua no contabilizada, este no tiene en cuenta la diferenciación entre pérdidas técnicas y comerciales; por ello, se debe propender por el uso de indicadores que reflejen el volumen de agua perdida, normalizando aspectos como número de conexiones, número de suscriptores, longitud de la red, que permitan hacer un análisis más intuitivo al sistema de acueducto (Galindo Salazar, 2014), conceptos que sí se abordan en el indicador ILI (Infrastructure Leakage Index), que se expresa como la relación entre las pérdidas técnicas totales (PTT) y las pérdidas técnicas inevitables (PTI); este indicador ya supone y reconoce que existe un nivel de pérdidas técnicas que es imposible reducir por parte del prestador, sin embargo, a pesar de la aparente simplicidad del parámetro ILI, la estimación de las variables PTT y PTI requiere de un conocimiento profundo y detallado del sistema de acueducto por parte del prestador del servicio con el que la gran mayoría de empresas prestadoras en Colombia no cuenta, e inclusive, su obtención incurriría en un gasto económico y operacional significativo para ellas (RD; McKenzie & Lambert, 2002).

2.4. Sectorización de redes de distribución de agua

La sectorización de una red de distribución de agua se define como la división de la red en varios conjuntos de tuberías, determinando algunas características comunes sobre cada conjunto. La sectorización hidráulica se presenta cuando estas divisiones realmente previenen el paso del flujo hacia otros sectores y la característica en común es el origen de su alimentación (Jimenez Aldana, 2003). Esta tiene como objetivos controlar las pérdidas de agua, disminuir las fugas en

las zonas de presión, optimizar y uniformizar la presión en diferentes zonas, contribuir a facilitar labores de mantenimiento preventivo programado y mantenimiento correctivo, así como facilitar la operación de daños en las redes de distribución.

La sectorización puede considerarse una estrategia de reducción de pérdidas técnicas y comerciales, con la cual es posible macromedir los volúmenes suministrados, consolidar los valores facturados, optimizar las condiciones de servicio, calcular el IANC, establecer las causas de las pérdidas y sus acciones de control, y formular proyectos estructurados de control de pérdidas, priorizarlos y hacer un seguimiento al comportamiento y a las inversiones de reducción (Jimenez Aldana, 2003).

3. Descripción de la localidad objeto de estudio

El municipio de Málaga, capital de la provincia de García Rovira se encuentra localizado al nororiente de Departamento de Santander, en la Provincia de García Rovira a los 6° 42' de Latitud Norte y 72° 44' de Longitud Occidente en una de las derivaciones de la Cordillera Oriental.

El área total del municipio es de 58 Km², el 4.87% (2.82 Km²) corresponde al sector urbano y el restante 95.13% (55.18 Km²) al sector rural. El municipio limita al norte con el municipio de Concepción, al sur con San José de Miranda. Por el oriente con el municipio de Enciso y Concepción, y por el occidente con San Andrés y Molagavita. (Véase Figura 1). La altitud media del municipio es de 2.235 m.s.n.m. con una temperatura promedio de 18°C (ECOCIALT S.A.S, 2014).

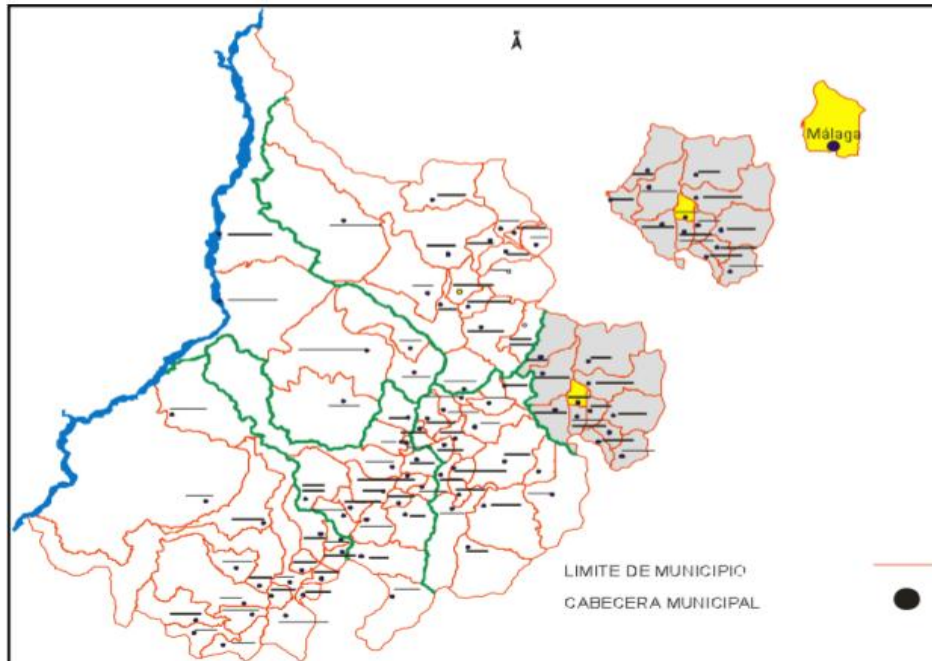


Figura 1. Localización de Málaga en Santander.

Adaptado de ECOCIALT S.A.S. (2014). PAYUEDA Programa de ahorro y uso eficiente del agua. Retrieved from <http://proactivasai.com/areasocial/descargas/Programa de Ahorro y Uso Eficiente del Agua.pdf>

4. Descripción general del sistema

El municipio de Málaga cuenta con un sistema de distribución de agua que abastece principalmente el casco urbano de la municipalidad, integrado por tres sectores de servicio independientes entre sí, los cuales se encuentran definidos por la topografía existente y la operación de dos plantas de tratamiento (Figura 2). Dicho sistema abastece una población de aproximadamente 20,830 habitantes (SISBEN, 2017), que corresponden a los 5,251 usuarios registrados por la Empresa de Servicios Públicos de Málaga ESPM a marzo de 2017.

4.1. Redes de distribución

El Sector 1 es abastecido por la planta de tratamiento principal, denominada Los Tanques, ubicada en la zona noroccidental del municipio, la cual atiende la mayor parte de la demanda de

la población. De acuerdo al estudio realizado en el marco del Programa de ahorro y uso eficiente del agua (ECOCIALT S.A.S, 2014), adelantado por la Gobernación de Santander y la Corporación Autónoma Regional de Santander en el año 2014, se determinó un caudal aproximado de 43.07 L/s. Esta planta cuenta con 8 tanques de almacenamiento de agua sin clorar que se utilizan como reserva únicamente en épocas de escasez. Existen 4 tanques adicionales de concreto reforzado de tipo semienterrado, con una capacidad conjunta de aproximadamente 2014 m³, los cuales almacenan el agua tratada que se suministra a la población por gravedad mediante salidas conectadas a la tubería principal del municipio (10" PVC). Estos tanques son llenados con el agua tratada proveniente de cloración cuando se presenta baja demanda (entre las 9:00 p.m. y las 4:00 a.m.), y pasa directamente a la tubería principal durante las horas de alta demanda. La lectura de salida se hace utilizando un macromedidor de 10" basado en el principio Woltman con aletas helicoidales que mide y acumula el volumen de agua tratada suministrada a la red de distribución.

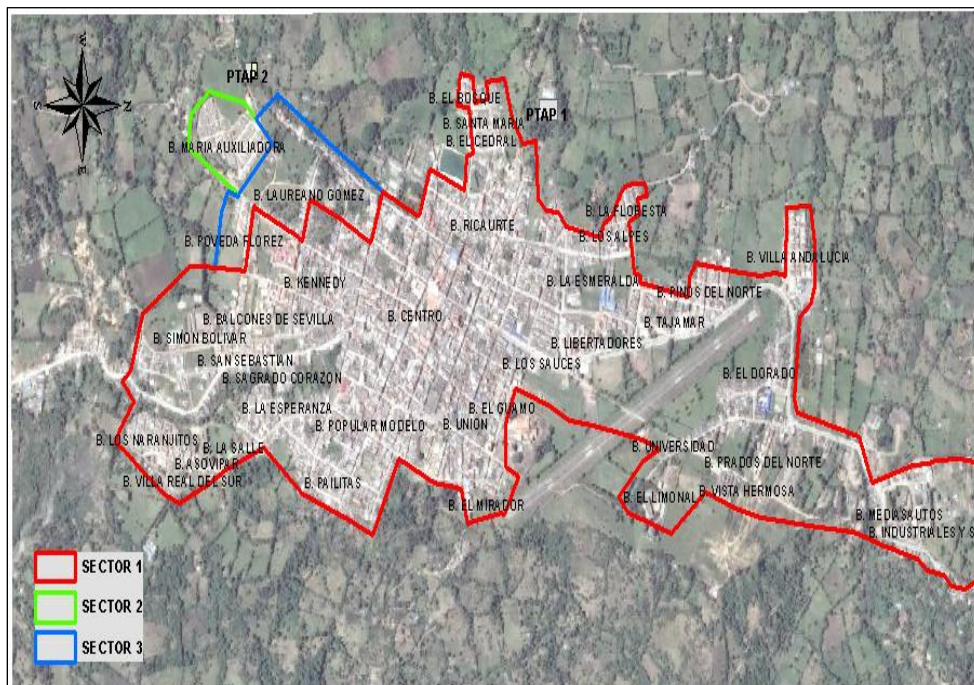


Figura 2. Sectores de la red de distribución de agua del municipio de Málaga

Existen lugares con problemas de servicio en razón de la poca diferencia de altura respecto a la PTAP, estos son los barrios La Floresta, Los Alpes y parte alta de La Esmeralda, ubicados en la zona noroccidental del municipio, y que se abastecen de un tanque de almacenamiento de tipo semienterrado construido en concreto ubicado en la Planta Los Tanques, cuyo caudal no es medido con el macromedidor, sino que su conexión se realiza antes, por tal motivo estos barrios no se tienen en cuenta para el estudio dada la dificultad para conocer el volumen de agua que circula por sus redes de distribución.

El Sector 2 es el que abastece la Planta de tratamiento denominada “María Auxiliadora”, la cual opera en el barrio del mismo nombre en la zona suroccidental del municipio, cuenta con un tanque de almacenamiento superficial en concreto reforzado con una capacidad de 175 m^3 y una tubería de salida de 4” en PVC, de acuerdo a mediciones realizadas se estima un caudal de 4.52 L/s [33].

El Sector 3 conformado por los barrios Laureano Gómez, Poveda Flórez junto con la parte alta del barrio Kennedy es alimentado por la salida del tanque Laureano Gómez, un tanque superficial construido por la comunidad e inicialmente administrado por ellos mismos con una capacidad de 150 m^3 , y que actualmente no cuenta con ningún tipo de tratamiento. Las redes de esta zona están conectadas a las de la planta general, sin embargo, existen tres válvulas de cierre permanente que separan los servicios de las redes, la tubería de salida es de 6” PVC y se estima un caudal de 9.44 L/s [33]. En el presente estudio se analizará únicamente la red de distribución alimentada por la planta de tratamiento “Los Tanques”, puesto que es la única que cuenta con macromedición a la salida, además de tener mayor cantidad de información, lo que reducirá el grado de incertidumbre de los resultados.

4.2.Plantas de tratamiento de Potabilización – PTAP

Tal como se ha mencionado, el municipio cuenta con dos plantas de tratamiento, la planta principal, denominada “Los Tanques”, que abastece la mayor parte de la población, y la planta “María Auxiliadora”, que abastece al barrio del mismo nombre.

4.2.1. Planta de tratamiento “Los Tanques”. A la planta principal llegan los caudales captados en las bocatomas de las fuentes Cuzaguetas, Carraca, Cortaderas, Los Molinos y La Magnolia a una cámara de quietamiento.

La planta cuenta con los procesos de aireación, prefiltración, filtración y cloración dada la alta calidad del agua de las fuentes, ya que éstas no poseen gran capacidad de arrastre y por tanto su turbiedad es baja, eliminando dentro de la planta el proceso de floculación, lo cual se demuestra con los análisis realizados en el laboratorio de las Empresas Públicas de Málaga (ECOCIALT S.A.S, 2014).

El proceso de potabilización de las aguas captadas inicia en la cámara de quietamiento donde se realiza precloración, de este punto se pasa a la estructura de aireación tipo cascada donde se oxida el hierro. En la figura 3 se observa la cámara de quietamiento y en la 4 el desarenador y la estructura de aireación.



Figura 3. Cámara de aquietamiento



Figura 4. Estructura de aireación y desarenador
Adaptado de ECOCIALT S.A.S. (2014). PAYUEDA Programa de ahorro y uso eficiente del agua. Retrieved from <http://proactivasai.com/areasocial/descargas/Programa de Ahorro y Uso Eficiente del Agua.pdf>

Desde la estructura de aireación se conduce el caudal al proceso de pre filtrado de flujo ascendente (Figura 5) y por medio de un canal que termina en un vertedero se llega hasta los filtros rápidos (Figura 6). La filtración está conformada por cuatro unidades de filtros, los cuales cuentan con un sistema de retro lavado. En la Figura 6 se observan estas estructuras de flujo descendente.



Figura 5. Pre filtros



Figura 6. Filtros rápidos

El último proceso que se realiza es el de la desinfección por medio de la adición de cloro, el cual se efectúa antes de llegar a los tanques de almacenamiento. En la Figura 7 puede observarse la caseta de cloración. La capacidad instalada de la planta es de 64 l/s, y en época de invierno trabaja a capacidad total. La entrada de caudal a la planta se mide mediante un vertedero localizado antes de los filtros rápidos.



Figura 7. Caseta de cloración



Figura 8. Tanques de almacenamiento

Dentro de esta planta existe un caso especial de almacenamiento de agua sin clorar. Posterior a los filtros rápidos existía un sistema de filtros lentos que fueron retirados de funcionamiento, para darle utilidad a dichas estructuras la Empresa de Servicios las está empleando como tanques de reserva para períodos secos. En total son ocho tanques intercomunicados en parejas que solo se llenan cuando el caudal proveniente de las captaciones disminuye ostensiblemente. La capacidad total de almacenamiento es de 1,792 m³ (Figura 9).

El laboratorio con que cuenta las Empresas públicas de Málaga realiza ensayos diarios de calidad de agua en cuanto a pH, turbiedad, cloro residual y análisis bacteriológico con los equipos indicados para tal fin. La PTAP cuenta además con un macromedidor a la salida que acumula el volumen de agua que pasa a través de él (Figura 10).



Figura 9. Tanques de almacenamiento adicionales



Figura 10. Macromedidor a la salida PTAP

En la Figura 11 puede observarse el esquema completo de funcionamiento de la PTAP “Los Tanques”.

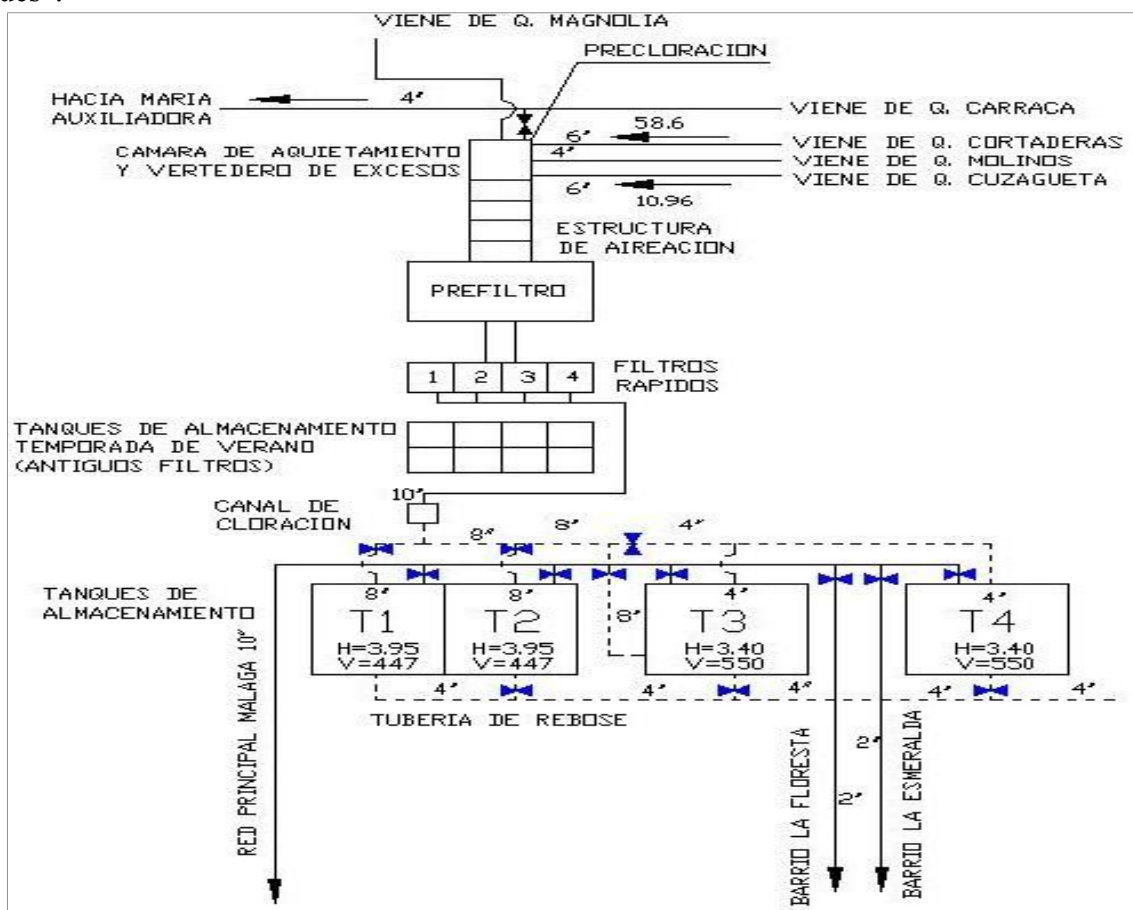


Figura 11. Esquema de PTAP los Tanques.

Adaptado de de ECOCIALT S.A.S. (2014). PAYUEDA Programa de ahorro y uso eficiente del agua. Retrieved from <http://proactivasai.com/areasocial/descargas/Programa de Ahorro y Uso Eficiente del Agua.pdf>

4.2.2. Planta de tratamiento “María Auxiliadora”. Es una planta compacta que está ubicada en la parte superior del barrio María Auxiliadora y que entró en funcionamiento el 25 de junio del año 2014. La capacidad de tratamiento de la planta es de 3.3 L/s. En las Figuras 12 y 13 pueden observarse los elementos de la planta de tratamiento y una vista de la captación en la Quebrada La Magnolia.



Figura 12. Elementos PTAP Ma. Auxiliadora



Figura 13. Captación Q. La Magnolia

5. Metodología

El desarrollo del presente estudio se realiza mediante la implementación de tres fases metodológicas. La primera consiste en caracterizar los elementos técnicos del sistema y la demanda del servicio de acueducto, previa recolección y depuración de información referente a propiedades de estructuras de tratamiento y almacenamiento; materiales, diámetros y longitudes de la red de distribución, usuarios del servicio, volúmenes de agua suministrados y consumidos en el sistema, entre otros. La segunda etapa es estimar las pérdidas del sistema. Para ello se realiza un balance hídrico en el sistema adoptando el enfoque de la IWA, donde se consideran aspectos técnicos y comerciales, evaluados mediante indicadores de la normatividad nacional

entorno a este tema. Por último, con base en la valoración realizada de las pérdidas, es posible conocer sus principales causas, con lo cual en la tercera etapa se formulan posibles alternativas de solución, priorizando la alternativa más eficiente desde el punto de vista técnico.

5.1. Identificación de las características técnicas de la red de distribución y la demanda del sistema de abastecimiento de la cabecera municipal de Málaga (Santander)

5.1.1. Catastro de la red. La empresa prestadora del servicio de acueducto no cuenta con un catastro actualizado de las redes de distribución del sistema. En relación a la información recolectada, se cuenta con un plano general de la red con características propias de la fecha para la cual se formula el Plan maestro de acueducto y alcantarillado PMAA en el año 2004 (Fundación Bolívar, 2004). Sin embargo, en este mismo contexto, para el año 2012 se ejecutó la primera fase establecida en dicho plan, correspondiente principalmente a la reposición e instalación de redes principales y domiciliarias, con los correspondientes accesorios, información que quedó registrada en el informe final presentado por el contratista. El informe relaciona la ubicación, diámetro y material de las redes que se sustituyeron.

Con esta información, se procedió a actualizar los planos iniciales, vinculando las nuevas características de la red con las direcciones especificadas, obteniendo una estimación de las longitudes, diámetros, accesorios y disposición geométrica de la red de distribución. No obstante, existía incertidumbre respecto a cambios realizados en la red fuera del marco del PMAA, por lo que se realizó una entrevista al personal de la empresa con mayor conocimiento del estado actual de la red y cambios realizados en la misma, con lo que se obtuvo finalmente un plano general actualizado de las redes principales con el mayor nivel de confianza posible respecto a los recursos disponibles.

5.1.2. Demanda en el sistema de distribución. El análisis de la demanda del sistema de acueducto se realizó para el periodo comprendido entre octubre de 2016 y marzo de 2017, correspondiente al registro más actualizado de consumo mensual facturado por la empresa al momento de la realización del estudio. Para tal efecto, se realizó inicialmente el catastro de usuarios y consumo por uso legal, a partir de la revisión y procesamiento de información relacionada con los usuarios del sistema. Esta información se obtuvo de la base de datos comercial de la ESPM. Seguidamente, se efectuó la distribución del consumo promedio de los usuarios, a partir de la evaluación del promedio facturado para el periodo de análisis especificado, con el fin de considerar las variaciones que puede tener durante este lapso de tiempo y lograr una visión general de su comportamiento actual teniendo en cuenta los tipos de uso presentes en la zona de estudio.

Posteriormente, se determinó la demanda nodal del sistema, con el fin de obtener un escenario hidráulico próximo a las condiciones de consumo en la red de distribución. Para ello fue necesario como etapa preliminar conocer la ubicación, clasificación y consumo de los suscriptores. Dado que la empresa prestadora del servicio no cuenta dentro de su estructura con componentes geográficos, se desarrolló un geocodificador de direcciones utilizando un SIG con el que se ubicaron espacialmente los usuarios y sus respectivos consumos, para en una etapa posterior, establecer la demanda nodal de la red en función del área de influencia de los consumidores respecto a los nodos del sistema. Este proceso se describe en detalle a continuación.

5.1.2.1. Procedimiento geocodificación del sector de estudio. La geocodificación es el proceso de transformar una descripción de una ubicación (un par de coordenadas, una dirección o un nombre de un lugar) en una ubicación de la superficie de la Tierra. Es necesario mencionar

que para poder realizar un proceso de geocodificación con un elevado índice de acierto son necesarias tres condiciones fundamentales: El listado de direcciones postales, un SIG con función de geocodificación y la base cartográfica de ejes viales.

El listado de direcciones postales se extrajo del registro de suscriptores de la empresa, en donde uno de sus atributos correspondía a la dirección de los usuarios. Para optimizar los resultados al momento de emplear la geocodificación, se deben estandarizar las direcciones obtenidas, por lo tanto, fue necesario establecer algunos parámetros para la captura y almacenamiento de las direcciones, y especificar una forma normalizada de escribir esta información. Los elementos regularizados de las direcciones, correspondían principalmente a la tipología vial, compuesta esencialmente por calles, carreras y transversales. En Tabla 2 se presenta un ejemplo de la normalización realizada a estos elementos y el procedimiento realizado para la depuración de esta información.

Tabla 2. *Ejemplo direcciones normalizadas*

Registro Original	Registro Normalizado
Cll 10 # 6-38	CL 10 # 6-38
Calle 13 # 6a-31	CL 13 # 6A-31
Cra 10 # 15-78	KR 10 # 15-78
Transv. 8a # 5-25	TR 8A # 5-25

Una vez normalizados los registros de direcciones, se observó que varios de estos presentaban información incompleta o incorrectamente formateada, con respecto a la estructura normal de dirección (Vía principal y generadora). En la Tabla 3 se presentan algunos ejemplos de estos problemas.

Tabla 3. *Ejemplos registros con problemas.*

Dirección
Casa # 36 b. Pinos del n.
Barrio san sebastian
Torre 4 piso 1 apart. 103
Pasaje del comercio l.1
U.centenario casa 2
Edf. Sta. Monica apt.301

Como se observa, estos registros describen de cierta forma el lugar del cual se hace referencia, más no su dirección específica. En total, de los 4,662 registros de la base de datos, aproximadamente 1,046 presentaban este tipo de inconvenientes, lo cual representó una dificultad ya que, si se tienen dispuestos de esta forma, afectará la concordancia del proceso de geocodificación.

Una de las alternativas utilizadas para establecer la dirección puntual de estos registros, fue consultar un listado catastral de predios y propietarios de la oficina de catastro municipal, en donde al comparar el nombre de los suscriptores con la dirección especificada de su predio, se pudo obtener una ubicación parcial de los usuarios que no la tenían inicialmente. Adicionalmente, se consultó el mapa catastral del municipio de Málaga en el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Figura 14), en donde se pudieron verificar propiedades de estos registros, como número de casa, nombre del barrio, entre otras, corroborando ubicaciones parciales y determinando la ubicación de otros con base en el conocimiento de la distribución territorial del municipio.

Cabe destacar que los procesos mencionados, se realizaron de forma manual registro por registro, por lo que la actividad requirió de una considerable inversión de tiempo y trabajo.

En cuanto al SIG con función de geocodificación, se utilizó el paquete de software ArcGIS, producido y comercializado por ESRI, empleando especialmente las herramientas ArcCatalog y

ArcMap. Esta última, es la aplicación central utilizada por ArcGIS, la cual representa la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en un mapa.

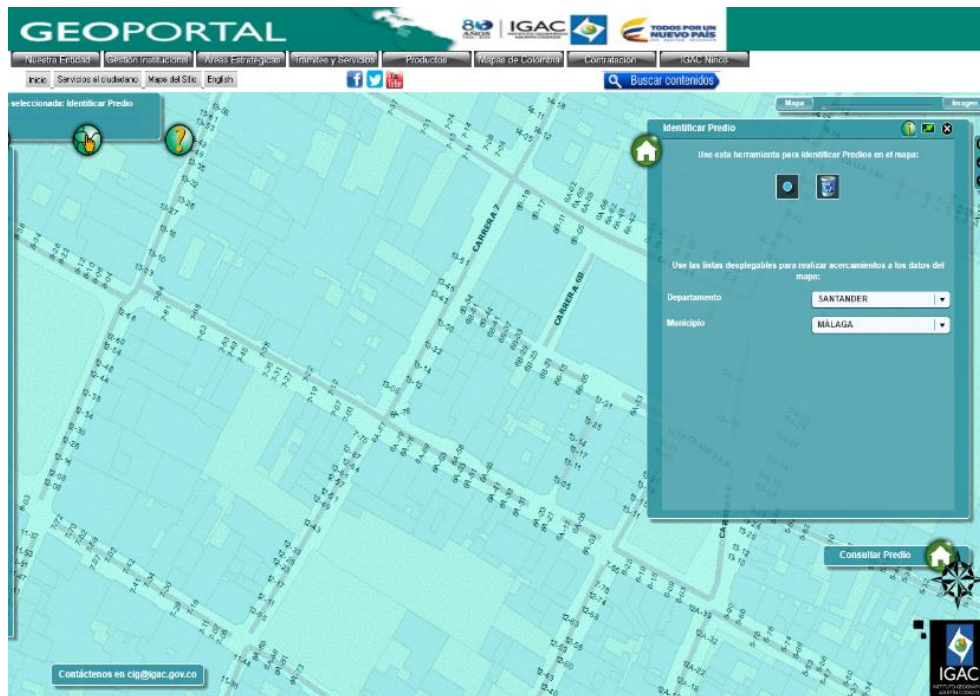


Figura 14. Identificación predios Geoportal IGAC

El modelamiento de la base cartográfica de ejes viales, también conocida como malla vial, por medio del cual se pueden localizar las direcciones de la ciudad con la finalidad de ubicarlas en un entorno espacial, sirviendo de soporte a los procesos de localización de direcciones. Su estructura es compatible con los requerimientos del software ARCGIS de tal forma que se puede fácilmente realizar la conversión de direcciones estandarizadas en coordenadas dentro de la cartografía de la ciudad. Este modelamiento se realizó en la interfaz de ArcMap, con base en el plano general del Municipio de Málaga, sobre el cual se realizó el trazado de cada una de los ejes viales. Para esto, se creó un “shape”, el cual es un formato que se utiliza para representar y almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas, en este caso, las vías del municipio.

En la Tabla 4, se presenta la estructura de los atributos de datos contenidos para la malla vial. Es importante considerar que, para identificar y designar los elementos de la tipología vial, se consultó el mapa catastral del municipio de Málaga disponible en el Geoportal del IGAC, ya que esta entidad es la fuente principal de información catastral en el país, garantizando un mayor grado de confiabilidad para proceso.

Tabla 4. Estructura de datos Malla Vial

Nombre del campo	Tipo de Datos	Descripción
ID	Object ID	Identificador único del ArcGIS
Tipo via	Texto	<p>Un dominio con los valores posibles de tipo de vía que existen en la ciudad. Para la Geodatabase Catastral se han establecido los siguientes valores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carrera (KR): Aquellas vías que poseen orientación Oriente-Occidente <ul style="list-style-type: none"> • Calle (CL): Aquellas vías que poseen orientación Sur-Norte • Transversales (TR): Aquellas vías cuya orientación no es la misma de las carreras(Oriente-Occidente) <p>Corresponde a la identificación de la vía a la cual representa. Su estructura es la siguiente:</p>
Name	Texto	<p>NAME= [VIA PRINCIPAL] “- “[VIA GENERADORA]</p> <p>Número y apéndice de la Vía Principal seguido de un guion y el Número y apéndice de la Vía Generadora</p> <p>Su función es la de determinar el cruce al cual representa.</p>
Municipio	Texto	Campo que determina el municipio al cual pertenece la vía. En este caso se colocó “Málaga”
Fromleft	Entero Largo	Campo numérico que determina el rango inicial en el costado izquierdo sobre el que se van a calcular las distancias sobre la longitud del arco. En este caso de toma como 1.
Toleft	Entero Largo	Campo numérico que determina el rango final en el costado izquierdo sobre el que se van a calcular las distancias sobre la longitud del arco. Se tomó de manera general como 99 (Considerando tramos de 100m), exceptuando el caso en que la longitud es superior a esta en donde se considera la cantidad impar de este valor.
Fromright	Entero Largo	Campo numérico que determina el rango inicial en el costado derecho sobre el que se van a calcular las distancias sobre la longitud del arco. En este caso de toma como 0.
Toright	Entero Largo	Campo numérico que determina el rango final en el costado derecho sobre el que se van a calcular las distancias sobre la longitud del arco. Se tomó de manera general como 100 (Considerando tramos de 100m), exceptuando el caso en que la longitud es superior a esta en donde se considera la cantidad par de este valor.
Shape	Geometría	Polyline.
Longitud	Doble	Longitud de la línea.

5.1.2.2. Localizador de direcciones. Uno de los primeros procesos en la geocodificación es crear un localizador de direcciones. Un localizador permite convertir descripciones textuales de ubicaciones en entidades geográficas. Para ello, además de necesitar los elementos antes descritos (Direcciones, SIG, Malla Vial), es necesario definir un estilo de ubicación de direcciones, ya que este constituye el esqueleto principal para su ejecución, al definir qué datos de referencia se pueden utilizar en la creación del localizador, además de especificar las propiedades y la gramática de análisis que guían el proceso y las salidas de geocodificación. Es fundamental elegir un estilo del localizador de direcciones adecuado para los datos que tiene y las direcciones que desea geocodificar. En este caso, se utilizó como base el estilo de direcciones de la ciudad de Bogotá. Una vez definido el estilo, se procedió a generar el localizador de direcciones (Address Locator) para el municipio de Málaga, con la utilización de cada uno de los recursos especificados anteriormente.

5.1.2.3. Comparación con bases de datos. En la siguiente etapa, el software realiza un cruce entre la información de referencia (Malla vial) y los registros de dirección agrupados en el paso de estandarización, donde compara cada campo agrupado con cada registro en la información de referencia. Por ejemplo, el algoritmo compara el campo “dirección” del registro de direcciones, con el campo “nombre de vía” de los datos de referencia. Dentro de este proceso se realizan validaciones como la comparación de intervalos a izquierda y derecha, la cual compara el número de placa con los rangos numéricos establecidos para el costado izquierdo y derecho, de este modo el software calcula por medio de un porcentaje o distancia en metros, la ubicación de la dirección en el costado y lugar correcto. Al final del proceso se indica los registros ubicados satisfactoriamente, cuales son candidatos o aproximados, y los que no se pudieron ubicar.

En la Tabla 5 se sintetiza el procedimiento necesario para realizar el proceso de geocodificación.

Tabla 5. Descripción proceso de geocodificación

Geocodificación Sector de Estudio		
Condiciones necesarias	Localizador de direcciones	Comparación base de datos
<p>Listado de direcciones postales: Información de entrada candidata al proceso de geocodificación, la cual requiere de un proceso previo de normalización.</p> <p>SIG con función de geocodificación: Herramienta sistémica que procesa la entrada y da un resultado de acuerdo a las condiciones definidas en el proceso</p> <p>Base cartográfica de ejes viales o Malla vial: Datos de referencia para localizar espacialmente las direcciones.</p>	<p>Permite convertir descripciones textuales de ubicaciones en entidades geográficas. Se define mediante un estilo específico adecuado según información primaria (Direcciones, SIG, Malla vial)</p>	<p>El software realiza un cruce entre la información de referencia (Malla vial) y los registros de direcciones estandarizados, mediante validaciones espaciales para entregar el mejor candidato de la búsqueda y mostrarlo sobre un mapa.</p>

Al finalizar el proceso, se obtuvo la ubicación de cada uno de los suscriptores pertenecientes al sector de estudio, con lo que se procedió a establecer una relación espacial (spatial join) en ArcGIS, en donde a los nodos de la red se le asignaron todos los atributos de la capa unida, correspondiente a la información de los consumidores consumo mensual, uso legal, estrato, etc.), con base en la proximidad de las dos entidades.

5.2. Estimación del porcentaje de pérdidas en el sistema de distribución

En esta etapa se realizó la evaluación de las pérdidas del sistema de abastecimiento adoptando la metodología planteada por la IWA, ya que, pese a la simplicidad del enfoque, la estimación de pérdidas obtenida a través de este método ayuda a decidir cuál debe ser el siguiente paso en los estudios de pérdidas para la red de distribución (Puust et al., 2010).

5.2.1. Volumen histórico de entrada al sistema. Para considerar este componente, se utilizaron datos históricos de volúmenes suministrados al sistema a partir del año 2012, cuando

fue instalado el macromedidor a la salida de la PTAP “Los Tanques”. Sin embargo, no se tienen registros continuos durante este lapso de tiempo. Los datos corresponden a volúmenes mensuales, calculados mediante la sumatoria de los registros diarios de volumen entregado al sistema, los cuales son tomados por los operarios de la planta de tratamiento. Se obtuvo un total de 448 registros diarios para el análisis.

5.2.2. Consumo histórico autorizado. Se procesó la información obtenida para el mismo periodo de tiempo de la información histórica de volumen suministrado al sector, la cual también presenta inconvenientes relativos a ausencia de información para ciertos lapsos de tiempo. Esta información se obtiene en la ESPM, mediante lecturas de consumo mensuales en los puntos de medición de los usuarios y se realiza por el personal a cargo de manera manual, siguiendo rutas especificadas que facilitan la ubicación de los suscriptores.

5.2.3. Pérdidas de agua. Con la información histórica de macromedición y micromedición obtenida, se procedió a calcular las pérdidas totales de agua, las cuales corresponden a la diferencia de volúmenes suministrados y consumidos en el sistema estudiado. En la Figura 15 se presentan gráficamente los datos.

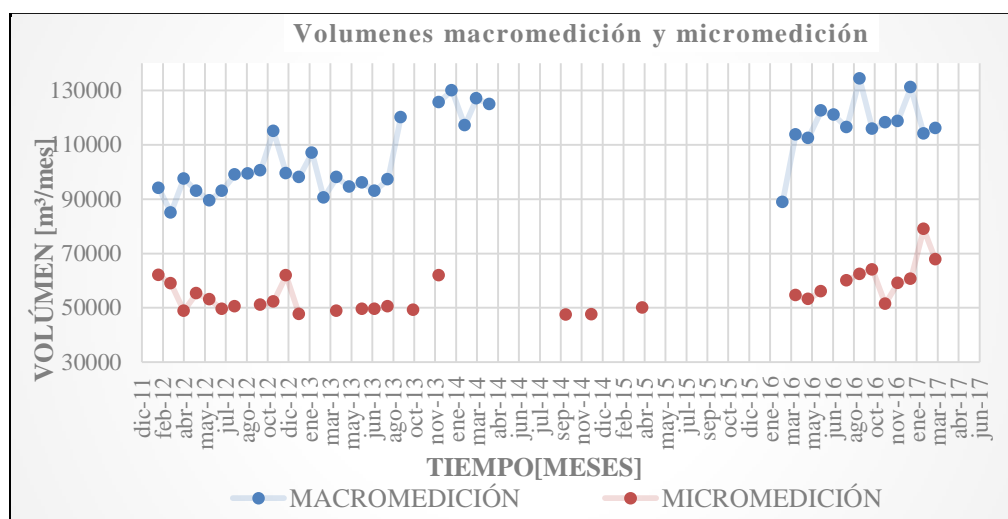


Figura 15. Registros de macromedición y micromedición disponibles en la ESPM

Puesto que no fue posible contar con información continua tanto de registros de macromedición como de consumo autorizado para el sector de estudio, se optó por considerar los valores de pérdidas correspondientes al periodo octubre 2016 a marzo 2017 ya que se disponen de manera continua. Esta proposición se verificó analizando la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los valores de pérdidas específicos para el periodo seleccionado y los valores históricos de pérdidas calculados inicialmente. Para esto, se verificó si los dos grupos de datos tenían un comportamiento normal. Esta hipótesis se comprobó mediante la prueba estadística Anderson-Darling en función de la cantidad de datos disponibles. Sin embargo, se determinó que estos no cumplen dicha hipótesis por lo que se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, donde se probó con un nivel de confiabilidad del 95%, que los datos relacionados no poseen diferencias estadísticamente significativas. A continuación, se presentan en detalle las pruebas estadísticas mencionadas anteriormente.

5.2.3.1. Pruebas estadísticas para verificar las hipótesis propuestas

5.2.3.1.1. Prueba de Anderson-Darling

➤ **Hipótesis**

- ❖ **H₀**: Los datos siguen una distribución normal
- ❖ **H_a**: Los datos no siguen una distribución normal

➤ **Estadístico de Prueba:**

$$A^2 = -n - S \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))] \quad (3)$$

Donde n es el número de datos, $F(Y)$ corresponde a la distribución de probabilidades acumulada normal con media y varianza especificadas a partir de la muestra y Y_i son los datos obtenidos de la muestra, ordenados de menor a mayor.

- **Regla de decisión:** La hipótesis nula (H_0) se rechaza con un nivel de significancia α si A^2 es mayor que el valor crítico A_T^2 . En la Tabla 6 se presenta una tabla para el ajuste a la distribución normal

Tabla 6. *Valores críticos A^2*

α	0.1	0.05	0.025	0.01
A_T^2	0.631	0.752	0.873	1.035

A continuación, se presenta la prueba realizada a los datos históricos de pérdidas (Tabla 7).

Tabla 7. *Valores históricos pérdidas de agua*

Fecha (año-mes)	Pérdidas (%)	Fecha (año-mes)	Pérdidas (%)
2012-2	34.046809	2013-4	50.136735
2012-3	30.701177	2013-6	48.46875
2012-4	49.881026	2013-7	46.726882
2012-5	40.515054	2013-8	48.093621
2012-6	40.779888	2013-12	50.773885
2012-7	46.726882	2016-4	52.014952
2012-8	49.037374	2016-5	52.690392
2012-10	49.262687	2016-6	54.293878
2012-11	54.634783	2016-8	48.405498
2012-12	37.861307	2016-9	53.57111
2013-1	51.340816		

- ❖ **H₀:** Los datos siguen una distribución normal
- ❖ **H_a:** Los datos no siguen una distribución normal

Inicialmente, se calculó la media y la desviación estándar de los valores de porcentajes de pérdidas, de donde se obtiene un promedio (μ) de 47.14 y una desviación estándar (σ) de 6.61.

En la Tabla 8, se presentan los valores obtenidos para el cálculo de la variable S, para la cual se obtuvo un valor de -22.13.

Tabla 8. Cálculo de la variable S

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
i	(2i-1)	Y_i	Y_{n+1-i}	$\frac{Z}{(Y_i - \mu)/\sigma}$	$\frac{Z}{(Y_{n+1-i} - \mu)/\sigma}$	$F(Y_i)$	$F(Y_{n+1-i})$	$\ln[7]$	$\ln[8]$	S_i
1	1	30.701	54.635	-2.485	1.133	0.006	0.871	-5.039	-2.050	-0.338
2	3	34.047	54.294	-1.979	1.081	0.024	0.860	-3.734	-1.967	-0.814
3	5	37.861	53.571	-1.403	0.972	0.080	0.834	-2.521	-1.798	-1.028
4	7	40.515	52.690	-1.002	0.839	0.158	0.799	-1.843	-1.605	-1.150
5	9	40.780	52.015	-0.961	0.737	0.168	0.769	-1.783	-1.467	-1.393
6	11	46.727	51.341	-0.063	0.635	0.475	0.737	-0.744	-1.336	-1.090
7	13	46.727	50.774	-0.063	0.549	0.475	0.709	-0.744	-1.233	-1.224
8	15	48.094	50.137	0.144	0.453	0.557	0.675	-0.585	-1.123	-1.220
9	17	48.405	49.881	0.191	0.414	0.576	0.661	-0.552	-1.081	-1.322
10	19	48.469	49.263	0.201	0.321	0.580	0.626	-0.546	-0.983	-1.383
11	21	49.037	49.037	0.287	0.287	0.613	0.613	-0.490	-0.949	-1.439
12	23	49.263	48.469	0.321	0.201	0.626	0.580	-0.469	-0.866	-1.462
13	25	49.881	48.405	0.414	0.191	0.661	0.576	-0.415	-0.858	-1.514
14	27	50.137	48.094	0.453	0.144	0.675	0.557	-0.394	-0.815	-1.554
15	29	50.774	46.727	0.549	-0.063	0.709	0.475	-0.345	-0.644	-1.366
16	31	51.341	46.727	0.635	-0.063	0.737	0.475	-0.305	-0.644	-1.401
17	33	52.015	40.780	0.737	-0.961	0.769	0.168	-0.262	-0.184	-0.701
18	35	52.690	40.515	0.839	-1.002	0.799	0.158	-0.224	-0.172	-0.661
19	37	53.571	37.861	0.972	-1.403	0.834	0.080	-0.181	-0.084	-0.467
20	39	54.294	34.047	1.081	-1.979	0.860	0.024	-0.151	-0.024	-0.325
21	41	54.635	30.701	1.133	-2.485	0.871	0.006	-0.138	-0.007	-0.282
										-22.13

Finalmente, se calcula el estadístico de la prueba A^2

$$A^2 = -21 - (-22.13)$$

$$A^2 = 1.13$$

Este valor resulta ser superior a los valores críticos para el estadístico de la prueba Anderson-Darling para los diferentes niveles de significancia presentados en la Tabla 6, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se determina que los valores de porcentaje de pérdidas no siguen una distribución normal.

5.2.3.1.2. Prueba U de Mann-Whitney

➤ **Datos**

- Porcentajes de pérdidas para el periodo de análisis. (MUESTRA 2)

Tabla 9. Porcentaje de pérdidas para el periodo de análisis.

Fecha (año-mes)	Pérdidas(%)
2016-10	44.7063903
2016-11	56.5059222
2016-12	50.2487352
2017-1	53.8161709
2017-2	30.7659947
2017-3	41.6373816

➤ **Hipótesis**

- ❖ **Ho:** La media de los porcentajes históricos de pérdidas es igual a la media de los porcentajes de pérdidas para el periodo de análisis seleccionado.
- ❖ **Ha:** La media de los porcentajes históricos de pérdidas es diferente a la media de los porcentajes de pérdidas para el periodo de análisis seleccionado.
- ❖ **Nivel de confiabilidad:** 95%

Para un nivel de confiabilidad del 95%, la prueba establece las siguientes zonas de aceptación o rechazo en función del parámetro de la distribución normal Z. (Figura 16).

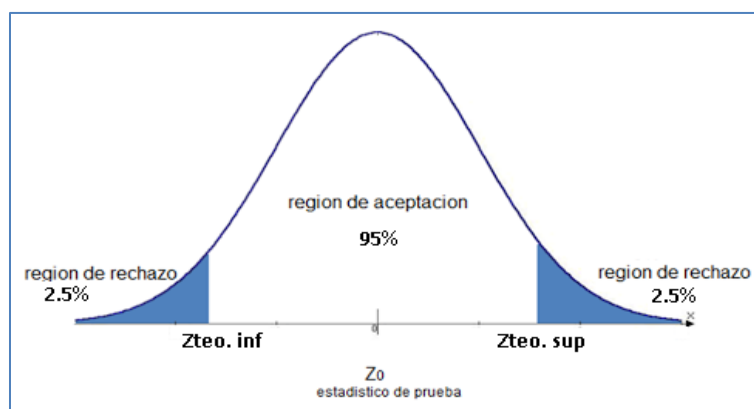


Figura 16. Aceptación de Ho

En este caso, para el nivel de confiabilidad seleccionado los valores $Z_{teo.}$ inferior y $Z_{teo.}$ superior son -1.645 y 1.645, respectivamente. El valor de Z calculado está relacionado con el estadístico U de Mann-Whitney y se determina de la siguiente expresión:

$$Z_{cal} = \frac{\min(U1, U2) - \mu_u}{\sigma_u} \quad (4)$$

Donde μ_u y σ_u corresponden a la media y desviación estándar de los datos para la prueba U y se determinan a partir de las siguientes expresiones

$$\mu_u = \frac{n1 * n2}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{n1 * n2(n1 + n2 + 1)}{12}} \quad (6)$$

Donde n_1 y n_2 corresponden al tamaño de cada una de las muestras, en este caso, $n_1 = 21$ en relación a los datos de la Tabla 3.2 y $n_2=6$ (Tabla , por lo que se obtiene que $\mu_u = 63$ y $\sigma_u = 17.15$. En cuanto a los estadísticos $U1$ y $U2$, estos se calcularon a partir de las siguientes expresiones

$$U1 = n1 * n2 + \frac{n1(n1 + 1)}{2} - R1 \quad (7)$$

$$U2 = n1 * n2 + \frac{n2(n2 + 1)}{2} - R2 \quad (8)$$

$R1$ y $R2$ corresponden a los rangos establecidos de acuerdo a la organización de los datos de las muestras. En la Tabla 10 se presentan estos valores.

Tabla 10. Rangos de la prueba *U* de Mann-Whitney

i	Población	R inicial	R final
30.701	1	1	1
30.766	2	2	2
34.047	1	3	3
37.861	1	4	4
40.515	1	5	5
40.78	1	6	6
41.637	2	7	7
44.706	2	8	8
46.727	1	9	9.5
46.727	1	10	9.5
48.094	1	11	11
48.405	1	12	12
48.469	1	13	13
49.037	1	14	14
49.263	1	15	15
49.881	1	16	16
50.137	1	17	17
50.249	2	18	18
50.774	1	19	19
51.341	1	20	20
52.015	1	21	21
52.69	1	22	22
53.571	1	23	23
53.816	2	24	24
54.294	1	25	25
54.635	1	26	26
56.506	2	27	27

Los valores R1 y R2 se obtiene a partir de la sumatoria de los rangos finales de los respectivos conjuntos de datos, obteniéndose que R1=292 y R2=86. A partir de estos valores se calculó que U1=65 y U2=61. Finalmente, se calcula el valor Z para la prueba a partir de la Ecuación 4.

$$Z_{cal} = \frac{61 - 63}{17.15} = -0.12$$

Este valor se ubica en la gráfica de referencia para la aceptación de Ho. (Figura 17).

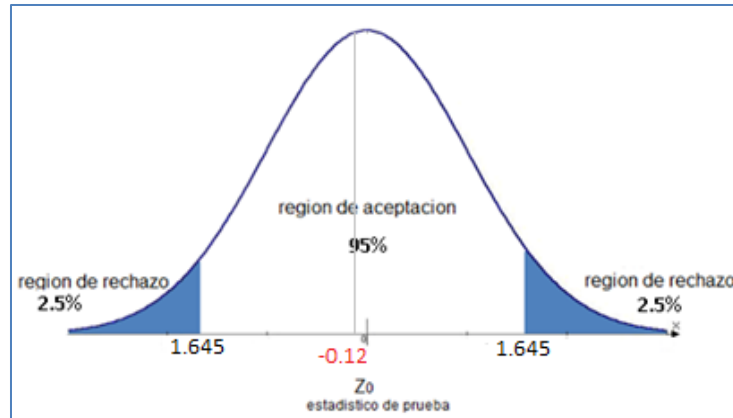


Figura 17. Aceptación o rechazo de Z calculado

Como se observa, el valor de Z calculado se ubica en la zona de aceptación de H_0 , por lo cual se obtiene con un nivel de confiabilidad del 95% que la media de los porcentajes históricos de pérdidas es igual a la media de los porcentajes de pérdidas para el periodo de análisis seleccionado.

Considerando lo anterior, fue posible realizar la descripción de cada uno de los componentes del balance hídrico con base en el periodo de análisis seleccionado.

5.2.4. Balance hídrico del sistema para el periodo octubre 2016 – marzo 2017. A

continuación, se describen los componentes del balance hídrico definido como medio de evaluación de las pérdidas de agua en el sistema, considerando el valor promedio de los datos estudiados.

5.2.4.1. Volumen de entrada del sistema (V_e). Se calculó a partir de los datos de macromedición diaria que se tenía en el sistema para el periodo de análisis especificado. Para calcular volúmenes diarios, fue necesario restar las lecturas tomadas en días consecutivos a una misma hora. Posteriormente, se totalizaron los registros diarios como volúmenes mensuales.

5.2.4.2. Consumo autorizado (C_a). Para su determinación fue necesario identificar a todos los clientes inscritos en los registros de facturación de la empresa y se calculó como la

suma de los consumos facturados medidos (Cafm) y los consumos facturados no medidos (Cafnm). Los Cafm, corresponden a consumidores con medidores de servicio en funcionamiento, mientras que los Cafnm corresponden usuarios que cuentan con medidores de servicio con mal funcionamiento (imposibilitando la toma real de lecturas de consumo), para los cuales se factura con el promedio de los seis meses anteriores al periodo de lectura. Esta relación se presenta en la Ecuación 9.

$$Ca = Cafm + Cafnm \quad (9)$$

5.2.4.3. Consumo autorizado no facturado. Corresponde a consumos que son permitidos y avalados por la Empresa a agentes externos pero que no son facturados por encontrarse bajo un régimen especial definido por la misma. En este caso, en la ESPM se encuentra definida la política de que todo consumo debe ser facturado, independientemente de su categorización.

5.2.4.4. Pérdidas totales de agua. (Pta). Corresponde al volumen de agua perdida entre el punto de suministro y el medidor del cliente debido a consumos ilegales, fugas en tuberías, alteraciones en los medidores, entre otros. Las pérdidas totales se calcularon como la diferencia entre el volumen de entrada al sistema y el consumo autorizado (Ecuación 10). Dichas pérdidas se discriminaron como pérdidas aparentes (Pa) y pérdidas técnicas o reales (Pt) (Ecuación 11).

$$Pta = Ve - Ca \quad (10)$$

$$Pta = Pa + Pt \quad (11)$$

Respecto de las pérdidas aparentes se componen principalmente de consumos ilegales (Pci) y errores debidos a: errores de facturación (Pef) y errores de medición (Pem). Cabe aclarar que, en relación al consumo ilegal en el sistema, esta información resulta no ser tan fácil de estimar, ya que no se tiene información de clientes del servicio que no se encuentran registrados, por lo que en el análisis no se tendrá en cuenta este componente (Ecuación 12).

$$Pa = Pci + Pef + Pem \quad (12)$$

En relación con las *pérdidas aparentes por errores de medición (Pem)*, se considera que los medidores tienden a registrar menos consumo con el paso del tiempo (Arregui & Cruz, 2016), por lo que es importante considerar esta submedición dentro de la estimación de pérdidas aparentes en el sistema. Inicialmente se calculó el volumen real de consumo tomando como referencia aquellos medidores en funcionamiento con lecturas mensuales tomadas en el punto de medición del cliente y el porcentaje de error característico de dichos medidores (Ecuación 13).

$$V_{real} = V_{facturado} * \left(1 + \frac{\% \text{ error}}{100}\right) \quad (13)$$

Donde V_{real} , corresponde al volumen real de usuarios con lectura y $V_{facturado}$, corresponde al volumen facturado para usuarios con lectura.

Posteriormente, se procedió a estimar el volumen de pérdidas mensuales que se estaría submidiendo a causa del error propio de los medidores, mediante la diferencia entre el volumen mensual real de usuarios con lectura y el volumen mensual facturado para estos consumidores. (Ecuación 14).

$$P_{em} = V_{real} - V_{facturado} \quad (14)$$

Para las *pérdidas aparentes por errores de facturación (Pef)* se consideran aquellos consumos facturados obtenidos como el promedio de consumos históricos del respectivo suscriptor, situación que se da por el hecho de tener medidores con mal funcionamiento, que imposibilitan su lectura mensual. Para estimar las pérdidas correspondientes a este componente, fue necesario inicialmente identificar a todos los usuarios registrados a los cuales se les asigna un consumo promedio mensual y las causas que motivan dicha situación, información que fue verificada en los registros de usuarios, que incluyen el estado de los medidores de servicio.

A continuación, se estimaron los volúmenes *perdidos por errores de facturación*, con base en el análisis detallado del consumo promedio específico para cada uno de los usuarios con lectura de acuerdo a su categorización, asignando dicho promedio a aquellos usuarios facturados con promedios mensuales, para estimar el volumen total que debería ser facturado por estos usuarios (Ecuación 15).

$$V_{tp} = N^{\circ} \text{ servicios} * \text{Consumo prom.} \quad (15)$$

Donde V_{tp} equivale al volumen total estimado de usuarios con cargo promedio, $N^{\circ} \text{ servicios}$ corresponde a la cantidad de usuarios con cargo promedio y Consumo prom. representa el consumo promedio de usuarios con lectura.

Finalmente, se establece la diferencia entre el consumo estimado con esta presunción y el volumen facturado por usuarios con consumo promedio (Ecuación 16), con el fin de obtener el volumen perdido por errores de facturación.

$$P_{ef} = V_{tp} - V_{fp} \quad (16)$$

Donde V_{fp} , representa el volumen facturado a usuarios con cargo promedio

Por último, se presentan las *pérdidas técnicas o reales* (P_t) (Ver Ecuación 17), éstas constituyen las fugas desde tuberías de transmisión y distribución, fugas desde conexiones de servicio y fugas desde tanques de almacenamiento. Para conocer las pérdidas reales de sistema fue necesario inicialmente estimar el volumen de agua que se pierde en el sistema (Ecuación 11). Posteriormente, al tener un valor estimativo del volumen de pérdidas aparentes (Ecuación 12), fue posible inferir el volumen de agua perdido por condiciones físicas en la red. Despejando su valor de la Ecuación 11 se obtiene:

$$P_t = P_{ta} - P_a \quad (17)$$

Para contrastar el valor de pérdidas reales obtenido en esta etapa, se propuso utilizar el *método de flujo nocturno mínimo (MNF)*, el cual ha sido ampliamente adoptado como el más preciso para la evaluación de las pérdidas reales de agua (Babić, Đukić, & Stanić, 2014). Esta metodología es aplicada principalmente a sectores hidráulicos aislados en una red de distribución, sin embargo, con el propósito de obtener un valor estimado de pérdidas de acuerdo a las condiciones de operación del sistema y considerando los recursos disponibles, se aplicó esta metodología para el sector de estudio. Esta técnica considera que las fugas en los sectores de abastecimiento se pueden estimar cuando el flujo en estos sectores está en su valor mínimo. Normalmente esto ocurre en la noche entre la 1:00 a.m. y las 4:00 a.m., cuando la demanda del cliente registra sus valores mínimos, y, por tanto, la fuga es el componente principal del flujo (Cheung, Guilherme, Abe, & Propato, 2010). Para calcular este caudal de fugas, se utilizó la siguiente expresión (Tabesh, Asadiyami Yekta, & Burrows, 2009):

$$Q_{fn} = Q_{mn} - Q_{un} \quad (18)$$

Donde Q_{fn} corresponde al Caudal de fugas nocturnas, Q_{mn} y Q_{un} , equivalen al caudal mínimo nocturno y el consumo nocturno de usuarios, respectivamente. Para obtener el caudal mínimo nocturno, se realizaron mediciones a la salida de la planta de tratamiento entre la 1:00 a.m. y las 3:00 a.m., labor que se realizó en compañía del personal encargado de la operación de la planta. En cuanto a los consumos nocturnos, estos no se pueden determinar con gran precisión debido al gran número de posibles consumidores nocturnos, por lo que se requerirían investigaciones rigurosas de campo. En ausencia de tales estudios detallados, experiencias en varias partes del mundo han mostrado que aproximadamente el 6% del total de la población abastecida está activa la durante las horas de mínimo flujo, con un consumo de 10 l/hab/hora (R McKenzie, 1999), por lo que para el estudio se adoptaron estos valores para estimar el caudal de

fugas nocturnas. Así mismo, se considera que por razones de baja en la presión hidráulica durante el día, el valor de las fugas diurnas es aproximadamente el 75% de las fugas nocturnas (Jimenez Aldana, 2003).

$$Q_{fugas\ prom.\ diario} = 0.75 * Q_{fn} \quad (19)$$

De acuerdo a lo anterior, se consideró el comportamiento de consumo para el sistema con base en la curva de modulación, para las horas de bajo consumo nocturno se estimó la totalidad del caudal de fugas con base en la medición realizada del caudal mínimo nocturno y para las horas diurnas se determinó considerando el porcentaje especificado en relación a las fugas nocturnas.

5.3. Formulación de alternativas para optimizar el funcionamiento técnico del sistema.

5.3.1. Actividades de control y reducción de pérdidas comerciales

5.3.1.1. Renovación de micromedidores. Es necesario contrarrestar la inexactitud generada con el paso del tiempo en los aparatos de medida, así como la baja sensibilidad en el arranque que presentan algunos tipos de medidores y cambiar aquellos que dejan de funcionar debido al cumplimiento de su vida útil. Como un primer paso en el proceso considerado de renovación, se identificaron espacialmente aquellos suscriptores que presentan micromedidores con mal funcionamiento y las zonas en que se presenta mayormente este problema, con el fin de visualizar que sectores requerirían atención prioritaria en este aspecto. Esta actividad se realizó utilizando los datos georeferenciados obtenidos en la primera etapa de este estudio. Se generó cartografía básica con la ubicación de los suscriptores.

5.3.1.2. Detección de usuarios fraudulentos y renovación de acometidas. Esta actividad consiste en estudiar, detectar y normalizar la situación de consumo de aquellos usuarios que

recurren a intervenciones físicas ilegales sobre la red de distribución, la acometida domiciliaria o sobre el micromedidor, con el propósito de ocultar, disminuir o alterar el consumo real o la lectura del medidor. Para contrarrestar el fraude existente de parte de estos consumidores, se plantea adaptar medidas de intervención propuestas (Jimenez Aldana, 2003), que se plantean adelantar una investigación detallada inicialmente identificando los usuarios que tienen un consumo por debajo del 25% del consumo promedio de su uso legal y estrato, conformando un conjunto de usuarios fraudulentos potenciales. Estos usuarios se identificaron y representaron con su ubicación espacial, para facilitar posibles tareas posteriores que se puedan llevar a cabo al respecto, como puede ser investigar la composición familiar, mediante el censo de número de habitantes por unidad de vivienda y el estado del micromedidor (Jimenez Aldana, 2003).

5.3.2. Actividades de control y reducción de pérdidas técnicas. La gestión y optimización de la presión en las redes de distribución contribuye a la reducción de fugas y explosiones de la tubería, limitando la pérdida del recurso hídrico (Darvini & Soldini, 2015). Atendiendo a la necesidad de reducir las pérdidas en el sistema, y teniendo en cuenta que el mayor porcentaje de éstas es debido a pérdidas técnicas, se proponen alternativas encaminadas a su reducción y control. Se plantean como alternativas la renovación priorizada de tuberías y la sectorización de la red, para ello se hace necesaria la modelación de la topología existente en un software de simulación de redes hidráulicas, para el caso se utilizó Epanet, un software desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Rossman, 2000), dada su simplicidad e integración con SIG.

5.3.2.1. Modelado de la red de distribución. Para la construcción del modelo, se vincularon datos entre Arcview y Epanet utilizando la extensión GisRed, la cual está orientada a la modelación y calibración de redes de distribución de agua (Alzamora, Bartolín Ayala, Iranzo,

& Prats, 2004), que genera automáticamente una topología coherente característica de la red y posteriormente, se agregan aquellos accesorios que no pueden ser suministrados en GisRed tales como válvulas de control, tanques y depósitos (Motiee et al., 2007).

Además, es necesario contar con una curva de modulación que, para el caso de estudio no estaba disponible, por lo que fue necesario realizar mediciones en la zona, tomando datos del caudal consumido por la población cada hora durante un día típico y uno atípico para establecer el comportamiento que sigue la demanda en la población. La Figura 18 muestra la curva asignada al modelo matemático de Epanet.

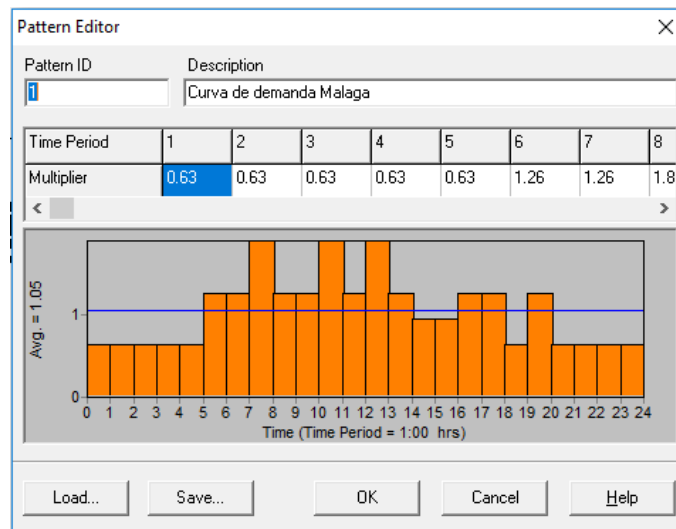


Figura 18. Curva de demanda de la red

Pese a que la calibración de redes de distribución es un proceso necesario para asegurar que los resultados brindados por el modelo se correspondan con los datos que se midan en campo (Patricia & Fuentes, 2014), en los que generalmente se comparan datos de presión y caudal registrados en puntos estratégicos del sistema; para el estudio se ha optado por tomar los valores del modelo sin realizar dicho proceso, en razón a que ello requiere mediciones continuas, exactas y un gran volumen de datos que permitan ajustar los parámetros de calibración; no obstante, se ha realizado una comparación entre los valores de presión que se presentan en un día típico a una

hora de baja demanda, en contraste con los obtenidos en el modelo matemático, observándose una variabilidad entre ellos, pero que se interpretan como consecuentes, considerando el alto índice de fugas en el sistema.

5.3.2.1.1. *Datos de presión en campo vs. Presiones arrojadas por el modelo de Epanet.*

Epanet cuenta con una herramienta que permite observar la variabilidad de los datos gráficamente, este compara los valores medidos en campo con los que arroja el modelo. Epanet ofrece la posibilidad de confrontar variables como demanda, cabeza, presión, calidad, flujo y velocidad. Dada la mayor facilidad para la toma de datos se decide contrastar con la presión en puntos de la red de distribución como se indica en la Tabla 11.

Tabla 11. Presiones en la red de distribución

Punto	Nodo	Diámetro	Cota	Diferencia con planta (m)	Consumo l/s	Presión nodo
1	J574	3"	2167	94	0.03858	77.44
2	J754	3"	2203	58	0.049769	44.35
3	J785	3"	2222	39	0.133873	35.2

Dichos datos se han introducido en Epanet obteniéndose el informe de calibración que puede observarse en la Figura 19 y gráficamente se puede observar la comparación de valores medios de presión en la Figura 20.

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
J574	1	77.44	96.17	18.726	18.726
J754	1	44.35	60.87	16.525	16.525
J785	1	35.20	42.80	7.604	7.604
Network	3	52.33	66.61	14.285	15.073

Correlation Between Means: 0.991

Figura 19. Estadística de calibración por presión

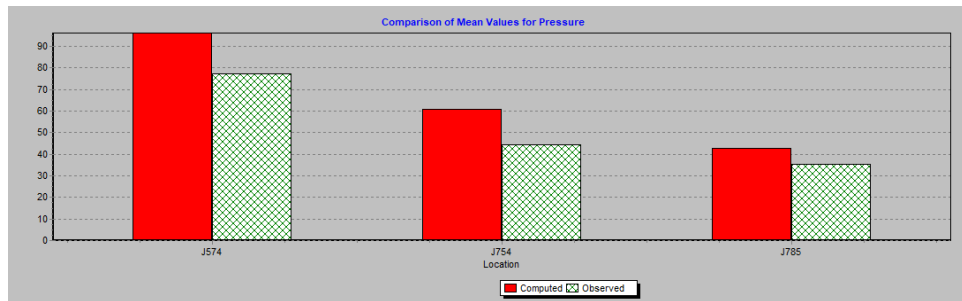


Figura 20. Comparación de valores medios de presión

5.3.2.2. Renovación priorizada de redes de distribución. El paso de tiempo trae consecuencias negativas en las redes de distribución de agua potable, problemas como la reducción de la capacidad hidráulica, el aumento de las pérdidas de agua, interrupciones en el servicio y deficiencia en la calidad del fluido, son algunas de las derivaciones (Saldarriaga, Susana, Moreno, Romero, & Córtes, 2010). En la literatura pueden encontrarse una serie de metodologías y estudios que ilustran la forma óptima para decidir sobre la reposición de redes de distribución, basadas en conceptos de índices de resiliencia, potencia unitaria y potencia consumida, datos ampliamente ligados con la tubería y sus características (Saldarriaga et al., 2010).

Tlili y Nafi, proponen un práctico esquema de priorización para el reemplazo de tuberías, basados en una serie de criterios de evaluación de redes, asignándoles un grado de importancia a cada uno de ellos, para obtener un concepto global de la siguiente manera: la tasa de rotura medida en número de roturas de tubería por unidad de longitud o de tiempo, con un 17%; la demanda para dicha tubería en el período pico, identificada en ambos lados de la tubería, suponiendo que la demanda se agrupa en los nodos, con un grado de importancia del 9%; la capacidad hidráulica de la tubería, que expresa la condición física de la sección de tubería representada en un 13.5%; la edad de la tubería con un 13.5%; el diámetro de la tubería, correspondiente al 5% sabiendo que los diámetros grandes fallan menos que los más pequeños;

la agrupación a la que pertenece una tubería, con un 14%, entendiéndose como prioridad cuando pertenece a un grupo caracterizado por una alta densidad de roturas, la localización con un 14% , entendida como la importancia de una tubería en el funcionamiento de la red y el impacto de un evento al azar sobre la fiabilidad del servicio y el material de la tubería con una importancia del 14%, criterios constituyentes en la decisión de renovación (Tlili & Nafi, 2012).

Para el caso en estudio se tomaron algunos de los criterios antes mencionados como son la edad de la tubería, historial de daños ubicados espacialmente en la red de distribución, diámetro de la tubería, material y la presión promedio a la que está sometida. Con estos datos se hizo un análisis espacial utilizando SIG para ubicar aquellas tuberías que bajo los criterios antes mencionados y basándose en conceptos estrictamente técnicos tiene una mayor tendencia a presentar roturas, daños o fallas de tipo hidráulico y estructural. Se realizaron consultas en ArcMap de acuerdo a los atributos definidos para grupos de características similares que representan condiciones críticas y con ello se definieron cuáles serán aquellas renovaciones que garantizarían el óptimo funcionamiento del sistema.

5.3.2.3. *Modelo de regresión lineal para la predicción de daños en tuberías.* El modelo plantea que la tasa de daños anual que se presentará en una tubería depende de la edad de las mismas (Kettler & Goulter, 1986), si es así, las empresas prestadoras de servicios de acueducto pueden usar esta información para estimar y programar actividades de mantenimiento y reposición de redes. El modelo requiere datos tales como longitud, fecha de instalación e historial de daños. La ecuación del modelo es la siguiente:

$$N = K_0 \text{Edad} \quad (20)$$

Donde K_0 corresponde al parámetro de regresión lineal y N al número de daños al año.

Para un análisis de tipo preventivo predictivo es indispensable disponer de información sobre las características de las tuberías incluyendo el tipo de material, el diámetro, rugosidad y edad, al igual que características del ambiente, tipo de suelo y condiciones climáticas de la zona, además de propiedades operativas de la red, como las variaciones de presión.

Debe tenerse en cuenta que el proceso de predicción depende completamente de la inspección de los estados actuales de la red de distribución y el análisis de los registros históricos, es decir que, de la precisión y calidad de la información recolectada dependen los resultados del análisis. Las tuberías se agruparon según su material y a su vez, cada material se subdividió en varios grupos dependiendo de criterios como la edad, el diámetro y las presiones a las cuales se encuentran sometidas.

Se realizaron las consultas en ArcMap para cada uno de los grupos definidos, sin embargo, cabe mencionar que para asumir que una muestra es estadísticamente significativa, el tamaño de esta para el análisis debe seguir la siguiente fórmula:

$$n > 50 + 8m \quad (21)$$

Donde n , es el número de observaciones y m el número de variables predictoras, para el caso dado que se trata de un modelo lineal, sólo se cuenta con una variable exploratoria (la edad de las tuberías), es decir, que como mínimo se necesitan 59 datos para obtener resultados válidos.

La implementación de la metodología implica la recolección de información no solo topológica, sino también de ubicación y la edad de tuberías, la cual no se hallaba especificada, por lo que fue necesario acudir al personal que labora en ESPM para obtener dicha información. En cuanto a la ubicación y características, estas se manipularon y visualizaron con mayor facilidad utilizando los sistemas de información geográfica de ArcGis.

En la Tabla 12 se observan los grupos homogéneos propuestos para el análisis estadístico lineal.

Tabla 12. Grupos homogéneos para el análisis estadístico lineal.

Nombre	Material	Edad (años)	Diámetro (pulg)	Presión (mca)
Grupo 1	AC	> 40	< 2"	> 20 y ≤ 40
Grupo 2	AC	> 40	> 2 y < 4	< 20
Grupo 3	AC	> 40	> 2 y < 4	> 50 y ≤ 85
Grupo 4	AC	> 20	≥ 1 y ≤ 3	≥ 65
Grupo 5	AC	> 40	≥ 2 y ≤ 4	≥ 55
Grupo 6	AC	> 40	≥ 2 y ≤ 6	≥ 60
Grupo 7	AC	> 40	≥ 2 y < 4	≥ 50
Grupo 8	AC	> 40	≥ 2 y ≤ 6	≥ 60 y < 80
Grupo 9	AC	> 35	≥ 2 y ≤ 6	≥ 55
Grupo 10	AC	> 40	≥ 2 y ≤ 6	> 50 y ≤ 75
Grupo 11	PVC	>20	≥ 1 y ≤ 4	≥ 70
Grupo 12	PVC	> 20	≥ 1 y ≤ 6	≥ 50
Grupo 13	PVC	> 30	≥ 1 y ≤ 6	≥ 50

Teniendo los grupos definidos y hechas las consultas se hace uso de la herramienta geoestadística de análisis espacial para Mínimos cuadrados ordinarios (OLS por sus siglas en inglés), que muestra el rendimiento del modelo, usando únicamente la variable de la edad de las tuberías para explicar la tasa de daños anual (Anaya, 2015). Posterior a ello, se verifican los parámetros estadísticos que definen si se acepta la hipótesis original, y si la ecuación se ajusta o no al modelo de regresión. Se revisó si el coeficiente tenía el signo esperado, un coeficiente positivo para la variable edad indica que a medida que la edad aumenta, también lo hace el número de daños. La variable explicativa debe tener coeficientes estadísticamente significativos, un R^2 entre cero (0) y uno (1) indica cuanta variación existe en la variable dependiente, generalmente se buscan valores de 0.5 o más, pero esto depende también de lo que se esté modelando y del número de observaciones para la construcción del modelo. Por último, es necesario inspeccionar que los residuos no estén espacialmente autocorrelacionados, lo que puede comprobarse con la herramienta de I-Morans en el software ArcGis.

5.3.2.4. Sectorización de redes de distribución de agua. Se planteó realizar una optimización de la presión en la red de distribución mediante la sectorización hidráulica de la zona en estudio, se propone hacer la división siguiendo criterios establecidos en el RAS 2000 y los definidos por Jiménez en publicaciones del Acueducto de Bogotá (Jimenez Aldana, 2003).

La optimización operacional implica consolidar un sistema de distribución que garantiza un servicio continuo con presiones dentro del rango establecido: por encima de los valores mínimos en condiciones de máxima demanda en zonas extremas del servicio y presiones por debajo de la máxima en las zonas susceptibles de tener presiones elevadas en condiconas de mínima demanda (Jimenez Aldana, 2003), para el caso, siendo un sistema con un nivel de complejidad medio-alto las presiones corresponden a 60 y 15 m.c.a., respectivamente. El establecimiento de las zonas de presión se hace con el fin de obtener la máxima uniformidad en el gradiente de presiones entre los tanques, estaciones reductoras, estaciones sostenedoras de presión o estaciones de bombeo y los puntos de mínima presión (Territorio, 2010).

Las áreas ubicadas en terrenos altos y que requieran mayores presiones para ser abastecidas deben tener, en lo posible, sistemas separados de presión, debiendo mantenerse por medio de tanques elevados o por bombeo. Partes de una misma zona de presión podrán presentar presiones estáticas mayores a la máxima definida y menores que la mínima fijada, siempre y cuando sean cumplidas las condiciones siguientes: (a) El área por abastecer con presión estática superior en 20% al máximo establecido para esa zona de presión podrá corresponder al 10% del área de la zona. El área por abastecer con una presión estática superior en un 40% a la presión máxima establecida podrá corresponder hasta 5% del área de la zona de presión, (b) El área por abastecer con presión dinámica mínima igual a las dos terceras partes del mínimo establecido para la zona de presión, debe corresponder como máximo al 10% del área de la zona de presión. El área por

abastecer con presión dinámica mínima inferior a la mitad del mínimo establecido podrá corresponder al 5% del área de la zona de presión. En ningún caso se permite un valor inferior al mínimo establecido y (c) Las presiones estáticas y dinámicas serán referidas así: la primera, con respecto al nivel de agua máximo, y la segunda, al nivel de agua mínimo de los tanques o embalses de distribución (Territorio, 2010).

Es aconsejable que las unidades operativas conformadas tengan un área promedio de entre 5 y 15% del área total del servicio, como una alternativa para fraccionar geográficamente el problema de controlar la infraestructura y controlar las fugas (Jimenez Aldana, 2003), así mismo, el límite de cada sector debe elegirse de tal manera que seccione la menor cantidad posible de tuberías de la red y en lo posible deben estar dispuestos en áreas de forma regular, con trazos rectos para facilitar la identificación de usuarios; debe evitarse el cierre de válvulas en tuberías de diámetros superiores al mínimo definido para la red matriz, los sectores deben adecuar sus límites a los accidentes geográficos tales como ríos y cambios topográficos importantes evitando tuberías atravesadas, lo mismo que a construcciones u obras importantes como canales, líneas férreas, avenidas, etc., los sectores deben limitar el número de tuberías de suministro, dejando aquellas con diámetros suficientes para entregar el caudal requerido para cada entidad, sin desmejorar las condiciones del servicio y de ser viable , armonizar con los límites entre estratos socioeconómicos, no deben dividir manzanas con líneas imaginarias irreales de difícil materialización y deben tener en cuenta la disposición de las cuencas hidrográficas de drenaje (Jimenez Aldana, 2003).

Finalmente, habiendo revisado todos los criterios pertinentes se definió la red matriz que abastece las diferentes partes del sistema, se propusieron los sectores que planean ejecutarse en la red, verificando los límites y la efectividad en la reducción de la presión de estos mediante la

utilización del modelo hidráulico de simulación de Epanet para comprobar el funcionamiento hidráulico de los planteamientos.

6. Resultados y discusión

6.1. Identificación de las características técnicas de la red de distribución y la demanda del sistema de abastecimiento de la cabecera municipal de Málaga (Santander).

6.1.1. Catastro de válvulas y tuberías. La red actual está instalada en tuberías de asbesto cemento (AC) y policloruro de vinilo (PVC), es de tipo mixta, la tubería principal forma una malla en el centro de la localidad y de ella se desprenden ramales perimetralmente hacia las zonas apartadas del municipio. Presenta tuberías de diámetros entre 10 y 2'' en PVC y AC y para acometidas domiciliarias diámetros de 1 y 1½'' en PVC. Anteriormente, la mayor parte de la red se encontraba en AC, con tiempos de servicio que superaba los 40 años, sin embargo, en la primera fase ejecutada del PMAA se realizó un cambio de redes y se modificaron algunos diámetros y materiales a PVC principalmente en los sectores centro y noroccidente del municipio, en los barrios Centro, Ricaurte, Unión, Popular Modelo, Kennedy y La Esmeralda, también se dispone de válvulas de corte, no hay válvulas de ventosa dentro del sistema de distribución y no existe registro de existencia de válvulas de reductoras de presión ni válvulas de purga. En la Figura 21 puede observarse la geolocalización de las tuberías que fueron cambiadas en el año 2012.

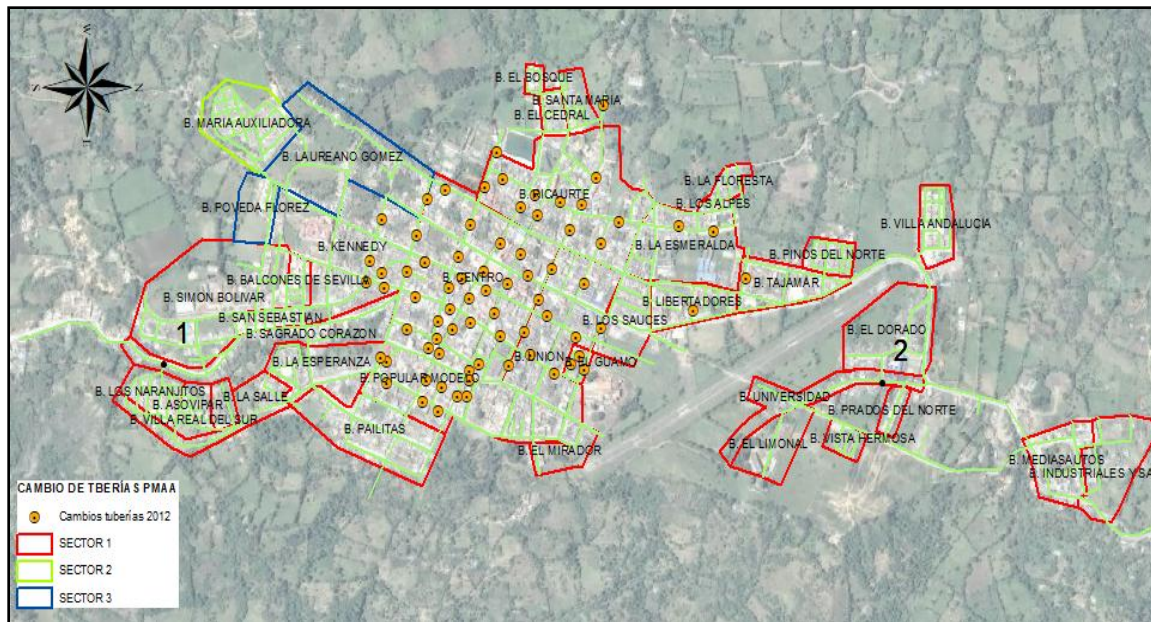


Figura 21. Cambios de tuberías realizados en 2012

La red de distribución cuenta con 35 hidrantes, con ubicación estratégica en el parque municipal, zonas comerciales y plaza de mercado, entre otros, para cubrir cualquier eventualidad de incendio, así mismo se ha elaborado un resumen de las diferentes válvulas y accesorios que se operan en la red de distribución que puede consultarse en la Tabla 13.

Tabla 13. Resumen de accesorios

Accesorio	Total
Válvula de corte	157
Hidrante	35
Codo	222
Reducción	48
Tee	466
Cruz	82

En la Tabla 14 se presenta un resumen de la información actualizada a abril de 2017 del catastro de redes del municipio, especificando el material y diámetro de las tuberías y el porcentaje que representa de los 32234 m de tubería que sirven como abastecedoras para los

habitantes de la municipalidad, observándose que, del total de la red, el 67% de la red está instalado en PVC frente a un 33% que se encuentra en AC.

Tabla 14. Catastro de tuberías en la red de distribución.

Material	Diámetro (in)	Longitud (m)	%
PVC	3/4	285.34	0.89
	1	123.12	0.38
	1 1/2	62.79	0.19
	2	7,571.07	23.49
	3	10,263.52	31.84
	4	910.59	2.82
	6	2,003.55	6.22
	10	517.11	1.60
Total PVC		21,737.09	67.43
AC	1	58.77	0.18
	2	1,241.64	3.85
	3	7,749.35	24.04
	4	878.42	2.73
	6	569.06	1.77
Total AC		10,497.23	32.57
Total		32,234.32	100

En la Figura 22 se presentan gráficamente los diferentes componentes de la red y su ubicación.

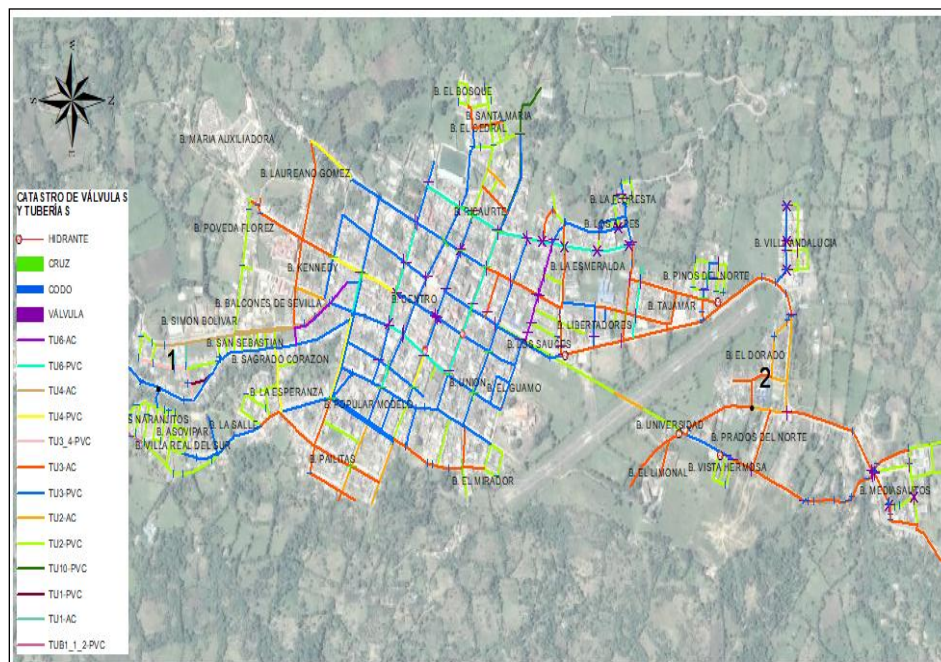


Figura 22. Tuberías y válvulas en la red de distribución

6.1.2. Demanda en el sistema de abastecimiento.

6.1.2.1. Catastro de usuarios y consumo por uso legal. El sector estudiado cuenta con 4,662 suscriptores, los cuales corresponden al 88.8% del total de usuarios abastecidos por el sistema de acueducto. Los suscriptores se encuentran clasificados por uso y categoría, es decir, según el tipo de actividad económica que se desarrolla en el predio. De acuerdo a esto se clasifican en Residencial, Comercial, Industrial y Oficial. En la Tabla 15 se presenta la clasificación según el uso de los usuarios del sector y su correspondiente consumo mensual promedio, en donde se evidencia que la población abastecida es principalmente residencial con un 88.8%, la cual consume aproximadamente el 83.2% del volumen mensual facturado.

Tabla 15. Distribución y consumo de suscriptores según su clasificación

Uso	Usuarios	%	Consumo [m ³ /mes]	%
Residencial	4,140	88.8	52,936.83	83.2
Industrial	6	0.13	12,167	0.19
Comercial	480	10.3	7,127.50	11.2
Institucional	36	0.77	3,438.50	5.4
Total	4,662	100	63,624.50	100

En cuanto a los usuarios de tipo residencial, estos se clasifican de acuerdo a su estrato socioeconómico, en donde se evidencia que predominan en la población los usuarios de estratos 1 y 2, con un 23.65% y 62.34%, respectivamente. El mayor consumo residencial proviene de usuarios estrato 2, los cuales consumen aproximadamente el 63% del volumen residencial promedio. En la Tabla 16 se presenta esta información.

Tabla 16. Distribución y consumo de suscriptores de tipo residencial.

Uso residencial	Usuarios	%	Consumo[m ³ /mes]	%
Estrato 1	979	23.65	12,576.17	23.76
Estrato 2	2,581	62.34	33,250.83	62.81
Estrato 3	573	13.84	7,023.83	13.27
Estrato 4	7	0.17	86	0.6
Total	4,140	100	52,936.83	100

Al comparar la malla vial con los registros de referencia, mediante el localizador de direcciones, se obtuvo un mapa con la ubicación espacial del total de los usuarios del sector estudiado. Estos son representados por un archivo de puntos el cual contiene los mismos atributos que el registro base, es decir, información del nombre del suscriptor, consumo mensual, uso, estrato y estado del medidor de servicio. Posteriormente, al establecer la relación espacial entre los usuarios georeferenciados y los nodos de la red (Figura 24), fue posible determinar la demanda nodal en el sistema, la cual es de aproximadamente $185.82 \text{ m}^3/\text{mes}$ equivalente a 0.072 l/s . Esta demanda se obtiene como el promedio mensual para el periodo de análisis en consideración.

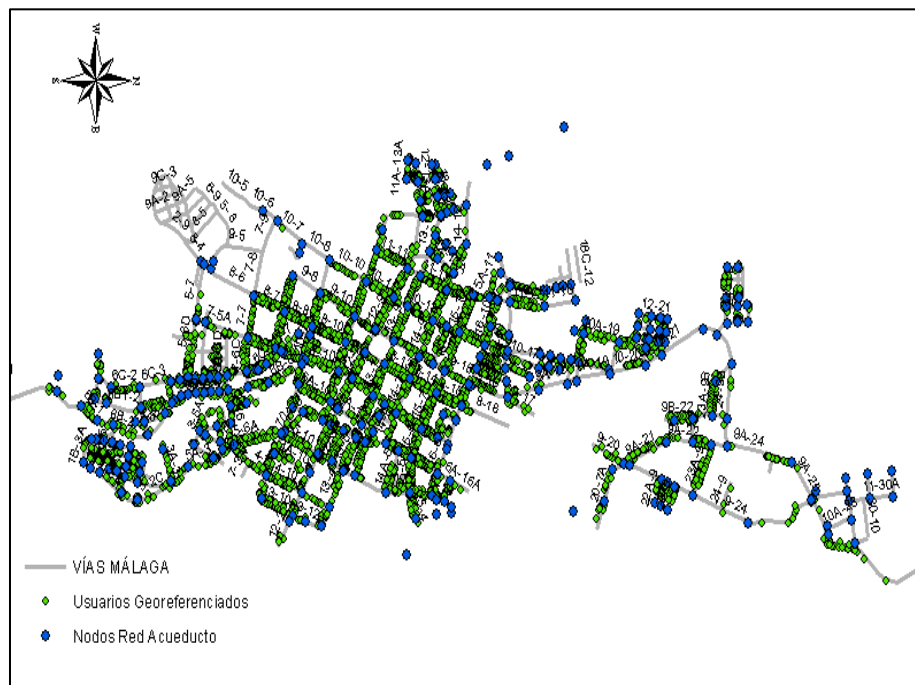


Figura 24. Usuarios georeferenciados del sistema de acueducto

6.2. Estimación del porcentaje de pérdidas en el sistema de distribución.

6.2.1. Balance hídrico del sistema para el periodo octubre 2016 – marzo 2017.

6.2.1.1. Volumen suministrado al sistema (V_e). Una vez procesada la información de registros de macromedición diarios, se consolidó esta información en valores de volúmenes

mensuales, los cuales se presentan en la Tabla 18. Se tiene que en promedio el volumen suministrado al sistema es de 118,983 m³/mes (\pm 6,162 m³/mes).

6.2.1.2. Consumo autorizado (Ca). El consumo autorizado corresponde a la información de facturación obtenida para el periodo de estudio. En la Tabla 18 se presenta esta información, en donde se obtiene que, en promedio, el consumo autorizado para los usuarios del sector es de 63,624.5 m³/mes.

Tabla 18. *Volumen de entrada al sistema.*

Mes	Volumen de entrada [m ³ /mes]	Volumen consumido [m ³ /mes]
Octubre 2016	115,800	64,030
Noviembre 2016	118,200	51,410
Diciembre 2016	118,600	59,005
Enero 2017	131,100	60,547
Febrero 2017	114,100	78,996
Marzo 2017	116,100	67,759

6.2.1.2.1. Consumo autorizado facturado medido (Cafm). Del total de consumo facturado, una parte corresponde al consumo registrado para los usuarios que cuentan con medidores de servicio con buen funcionamiento. En la Tabla 19 se presenta la distribución de usuarios con lectura y su respectivo consumo, de donde se obtiene que el volumen promedio medido durante el periodo de análisis, es de aproximadamente 44,443 m³/mes.

Tabla 19. *Distribución consumo facturado medido*

Uso	Consumo [m ³ /mes]	Usuarios
Estrato 1	8,119.165	642
Estrato 2	24,060.986	1,776
Estrato 3	5,049.997	369
Estrato 4	86.00	7
Industrial	95.00	4
Comercial	5,472.674	301
Oficial	1,558.998	19
Total	44,442.82	3,118

Respecto al *consumo autorizado facturado no medido (C_{fnm})*, de la Ecuación 9 se obtiene el volumen autorizado facturado no medido equivalente a la diferencia entre el consumo autorizado y el consumo facturado medido, en este caso es de 19,181.5 m³/mes, lo cual indica que, del consumo autorizado, alrededor del 30% es facturado con consumos promedios.

6.2.1.3. *Consumo autorizado no facturado.* Como se especificó anteriormente, todos los suscriptores del sistema de acueducto son facturados, independientemente de su categorización, luego este consumo equivale a 0.

6.2.1.4. *Pérdidas totales de agua (P_{ta}).* De la Ecuación 10, se obtiene el volumen mensual promedio perdido a través del sistema, el cual se estima en 55,358.5 m³/mes, lo que corresponde a un 46.53% del volumen total de entrada al sistema.

6.2.1.4.1. *Pérdidas aparentes.* Inicialmente, se calculan las *pérdidas aparentes por errores de medición*. En el PMAA se relaciona un estudio llevado a cabo por el Ministerio de Desarrollo Económico para el año 2004, en el cual se plantea que el porcentaje de error asociado a los medidores de servicio en funcionamiento es aproximadamente del 3.1%. Si bien esta información resultó estar desactualizada, un proceso de revisión y calibración de los medidores en servicio debería ser implementado para tener un valor más específico y confiable, sin embargo, debido a que estas prácticas no se desarrollan en la empresa, se tomó el 3.1% de error como valor de referencia para calcular este componente. De esta manera, mediante el cálculo la Ecuación 13, se obtiene que el volumen real de usuarios con lectura es de 45,820.73 m³/mes. Con lo que se estima a partir del cálculo de la Ecuación 14, el volumen de agua perdida por errores de medición, en este caso corresponde a 1,378 [m³/mes].

En cuanto a las *pérdidas aparentes por errores de facturación*, inicialmente se identificó en el registro de usuarios de la empresa, aquellos que presentaban consumos promedios durante los

últimos meses, y se pudo asociar estos consumos al registro de estado de los medidores, encontrándose que en total aproximadamente 1,331 usuarios son facturados con promedios mensuales de los cuales se infiere que aproximadamente el 76% se debe a medidores de servicio parados. Esta información se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20. *Identificación motivos para facturación con consumos promedio*

Motivo	Usuarios
Medidor Parado	1,012
Lectura Para Revisar	108
Sin Medidor	122
Medidor Tapado	9
Talco Quebrado	4
Medidor en Mal Estado	71
Medidor Invertido	2
Cortado	3
Total	1,331

Posteriormente, para cada una de las posibles fuentes de error de facturación presentadas, se calculó el promedio mensual por suscriptor y se totalizaron como volúmenes mensuales multiplicando por la cantidad de usuarios de cada posible fuente de error. Este mismo proceso se realizó para los usuarios con lectura, por lo que al final al aplicar las Ecuaciones 15 y 16 se obtienen los valores presentados en la Tabla 21. Es importante considerar que además de los motivos anteriormente descritos, se tuvieron en cuenta suscriptores con predios deshabitados que teóricamente no deberían registrar valores de consumo, más sin embargo los registran. Del mismo modo se consideraron volúmenes de pérdidas vinculados a suscriptores con medidores en funcionamiento que registran valores de consumo cero durante todo el periodo de análisis.

Tabla 21. *Volúmenes de pérdidas por errores de facturación*

Estado medidor	Volumen real estimado [m³/mes]	Volumen facturado [m³/mes]	Pérdidas [m³/mes]
Lectura Cero	748.3	0	748.3
Medidor Parado	14,992.3	14,305.996	686.3
Lectura Para Revisar	1,482.1	1,080.998	401.1
Sin Medidor	1,900.0	1,706.168	193.8
Medidor Tapado	130.2	160.999	-30.8
Talco Quebrado	54.6	40.167	14.4
Medidor en Mal Estado	990.2	913.668	76.5
Medidor Invertido	27	20.667	6.7
TOTAL	20,325.0	18,228.7	2,096.3

El hecho de que en el campo de pérdidas para medidor tapado el valor resulte ser negativo, significa que se estaría facturando una cantidad mayor que la que se estima consumen dichos usuarios. Por lo tanto, considerando la información de la Tabla 21, y considerando que según los registros de volumen facturado para usuarios con predios deshabitados es de 927.33 [m³/mes], se obtiene que el volumen estimado de pérdidas aparentes por errores de facturación es de aproximadamente 3,024 [m³/mes]. De esta manera, al estimar los componentes de las pérdidas aparentes, se tiene un valor total estimado para éstas, de acuerdo a de 4,402 [m³/mes], de acuerdo a la Ecuación 12.

6.2.1.4.2. *Pérdidas técnicas o reales.* De la Ecuación 11 se obtiene que el volumen de pérdidas reales corresponde a la diferencia entre el volumen de pérdidas totales (55,358.5 [m³/mes]) y las pérdidas aparentes estimadas anteriormente, por lo que el volumen de pérdidas reales estimado es de 50,956.5 m³/mes.

Finalmente, se tiene en la Tabla 22, los volúmenes del balance hídrico estimados para el periodo de estudio.

Tabla 22. Balance hídrico para el sistema de distribución (octubre 2016 – marzo 2017)

Volumen de entrada del sistema 118983 m ³ /mes	Consumo autorizado 63,624.5 m ³ /mes 53.47%	Consumo autorizado facturado 63,624.5 m ³ /mes 100%	Consumo facturado medido 44443 m³/mes 69.85%	Facturación	Agua facturada
			Consumo facturado no medido 19171.5 m³/mes 30.15%		
	Pérdidas de agua 55,358.5 m ³ /mes 46.53%	Consumo autorizado no facturado 0%	Consumo no facturado medido Consumo no facturado no medido	Pérdida comercial	Agua no facturada
		Pérdidas aparentes 4,402 m ³ /mes 7.96%	Consumo ilegal Errores de medición y facturación		
		Pérdidas reales 50,956.5 m ³ /mes 92.04%	Fugas de transmisión y distribución	Pérdida técnica	
			Fugas y reboses en tanques de almacenamiento Fuga en conexiones de servicio hasta el punto de medición del cliente		

6.2.1.5. Estimación pérdidas reales con el Método flujo nocturno mínimo. Durante la medición de macromedición realizada, se obtuvo que el caudal mínimo nocturno correspondiente a las horas de mínima demanda fue de 95 m³/hora. Para estimar el consumo nocturno, se estima inicialmente la población abastecida en el sector. Para esto, se tiene que las viviendas en el área urbana del municipio de Málaga están habitadas en promedio por 3.6 personas (ECOCIALT S.A.S, 2014), por lo que, para los 4,662 suscriptores del servicio, correspondería a una población aproximada de 16,783 habitantes. De esta población, se considera como posibles consumidores nocturnos al 6%, es decir que la población a considerar corresponde a 1,007 personas. Con base en este dato, se estima el consumo que tendría el sistema durante las horas de mínima demanda, utilizando el dato de referencia de 10 l/hab/hora, obteniéndose un consumo nocturno de 10.07

m³/hora. Posteriormente, se estima que el caudal de fugas nocturnas en el sistema es de aproximadamente 84.93 m³/hora.

De acuerdo a la curva de modulación de consumo, los valores mínimos corresponden al periodo comprendido entre las 9:00 a.m. y las 5:00 a.m., con lo que el volumen de fugas nocturnas para este periodo equivale a 679.44 m³. Para las demás horas, el caudal de fugas correspondería al calculado con la Ecuación 18, obteniéndose 63.7 m³/hora.

Teniendo en cuenta las horas del día en que posiblemente se da esta condición (5:00 a.m. – 8:00 p.m.), se estima un volumen de fugas diurnas de 1,019.2 m³. De esta forma, se tienen los dos componentes de fugas para estimar las fugas totales durante un día típico, obteniéndose un caudal de fugas diario de 1,698.64 [m³/día]. Esta información se extrapola para un periodo mensual en donde finalmente se estima el volumen de pérdidas técnicas o reales en 50,959 [m³/mes] el cual es un valor muy cercano al estimado mediante el balance hídrico.

6.2.2. Índice de agua no contabilizada IANC. Aplicando la Ecuación 1 se obtuvo un IANC para el periodo de estudio del 46.53%, un valor muy superior a la meta establecida por la CRA (i.e. 30%), sin embargo, estos valores no deberían fijarse igual para todos los sistemas, sino que deberían evaluarse otros aspectos que influyen en los parámetros de cálculo, como el nivel de complejidad del sistema y la disponibilidad para implementar programas de gestión del agua no contabilizada en la población.

6.3. Formulación de alternativas para optimizar el funcionamiento técnico del sistema

En esta etapa, se formularon alternativas de mejoramiento del servicio conforme a los resultados obtenidos en la etapa previa de evaluación del balance hídrico del sistema, donde fue posible identificar los factores que motivan las principales deficiencias en el manejo del recurso, las

cuales obedecían tanto a aspectos técnicos como comerciales, por lo que se plantearon acciones que permitan su corrección, reducción y control.

6.3.1. Actividades de control y reducción de pérdidas comerciales.

6.3.1.1. Renovación de micromedidores. Como resultado de este proceso planteado preliminarmente a la posible renovación de medidores, se puede observar en la Figura 25 la ubicación espacial de los 1,331 medidores que presentan problemas de funcionamiento, estos se agrupan principalmente en los barrios Centro con 209 y Unión con 169, lo cual daría un indicio de priorización de renovación respecto a los otros sectores de la población.

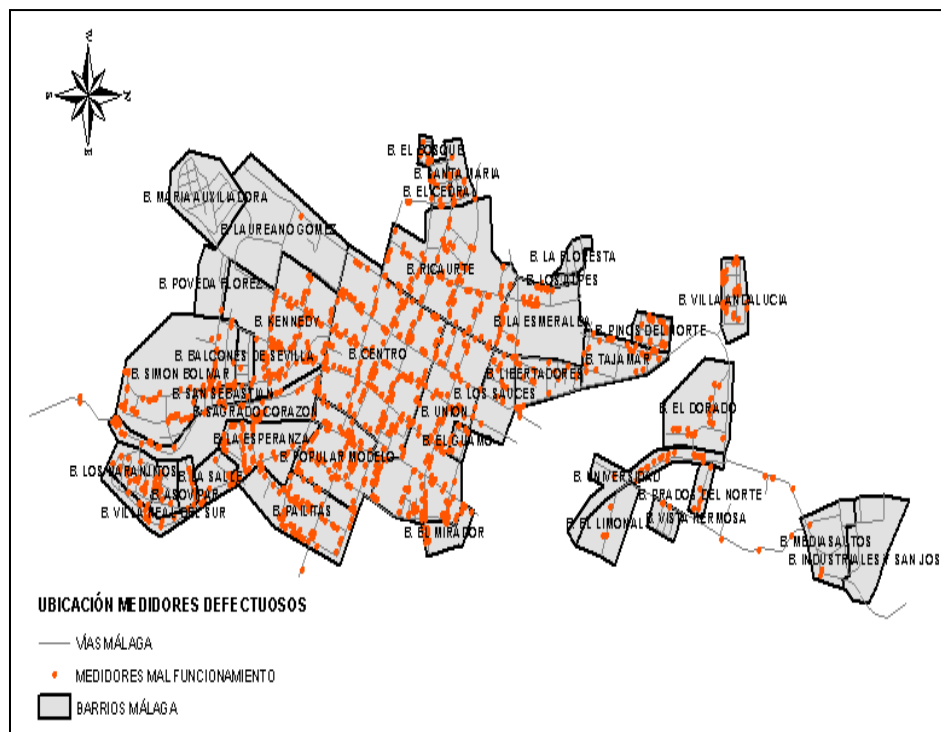


Figura 25. Ubicación espacial micromedidores con mal funcionamiento

6.3.1.2. Detección de usuarios fraudulentos y renovación de acometidas. Una vez identificados los usuarios con consumos inferiores al 25% del promedio del respectivo uso, se generó un mapa con su ubicación espacial, el cual se observa en la Figura 26. De éste grupo de

usuarios solo se consideraron aquellos que registran lecturas mensuales, ya que se identificaron algunos consumos bajos correspondientes a medidores con mal funcionamiento, sin embargo, éstos ya se consideran para el proceso de renovación, por lo que en el análisis se deben priorizar aquellos con funcionamiento.

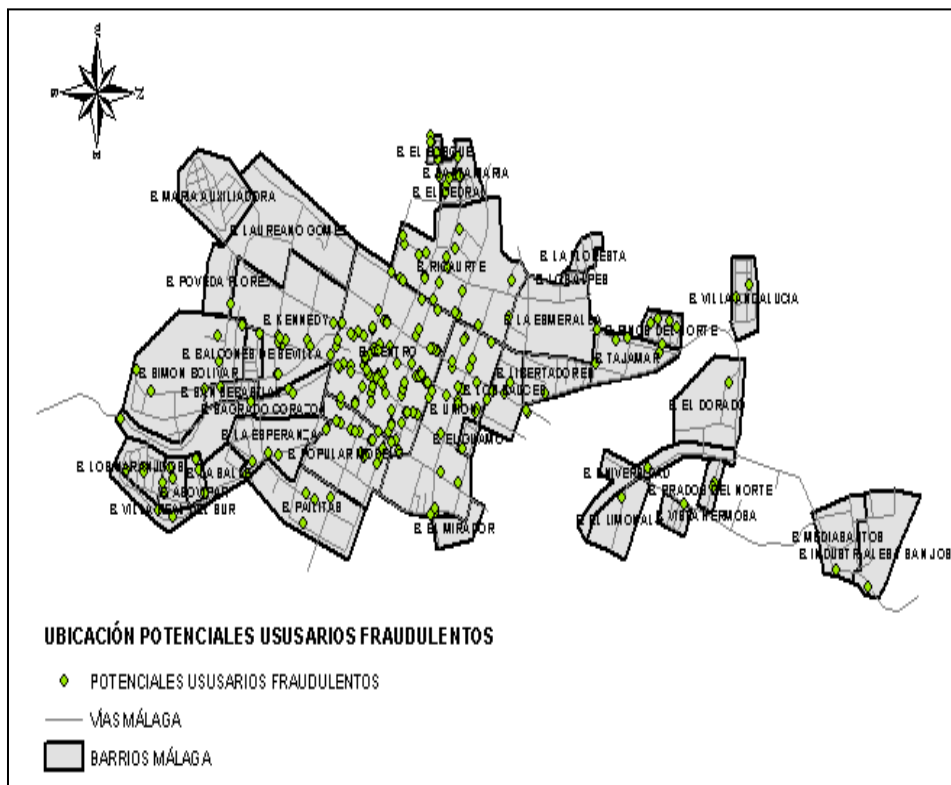


Figura 26. Ubicación espacial de potenciales usuarios fraudulentos

En total se obtiene que 274 usuarios se pudieran considerar como potenciales usuarios fraudulentos en relación a sus bajos consumos, ubicados en su mayoría en el barrio El Centro. Del total de los usuarios identificados, se tiene que 125 corresponden a usuarios estrato 2 y 83 a usuarios de uso comercial, por lo que se debería llevar un seguimiento a estos usuarios e identificar la razón de sus bajos consumos.

6.3.2. Actividades de control y reducción de pérdidas técnicas.

6.3.2.1. Modelado de la red de distribución en Epanet. La demanda nodal asignada, fue la calculada con ArcGis usando los datos de micromedición, además, para tener en cuenta el volumen de fugas que no se registra por los usuarios, pero que circula por la red se ha tomado dicho volumen de pérdidas y se ha dividido en el total de nodos en la red, para así asignar la demanda base de pérdidas en cada una de las conexiones obteniéndose una demanda base de 0.062 L/s para cada uno de los nodos de la red de distribución.

Finalmente, con las características de la red actualizadas, se procedió a correr el modelo y verificar el funcionamiento hidráulico del sistema de distribución, El esquema obtenido para la red de distribución puede observarse en la Figura 27.

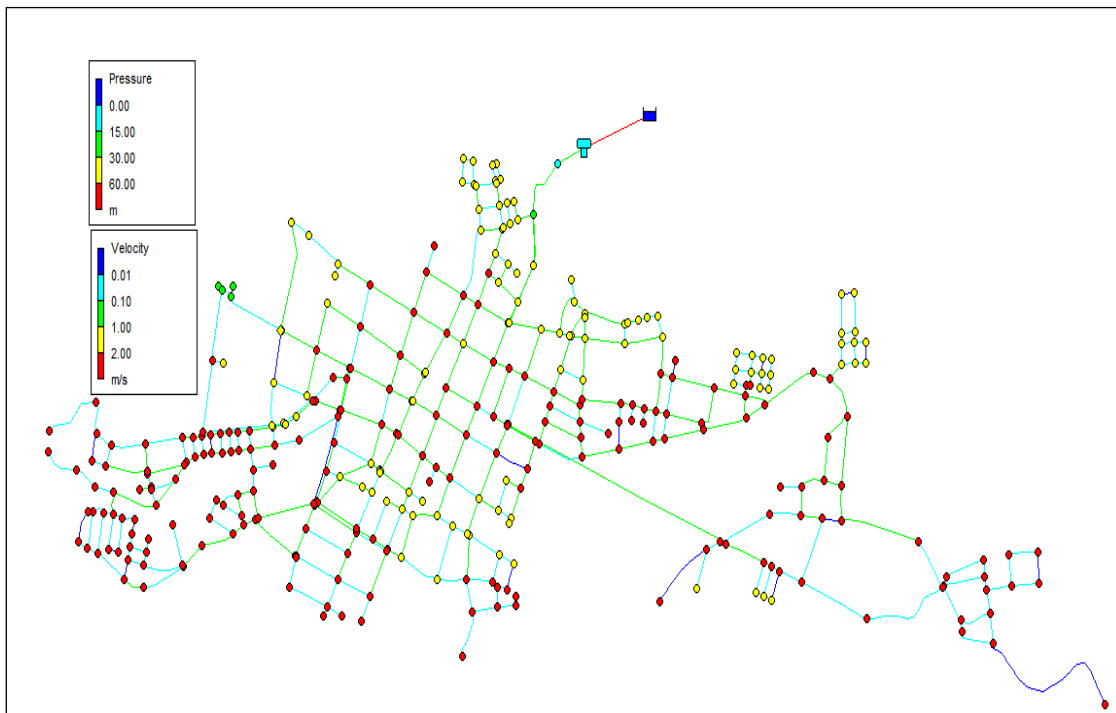


Figura 27. Modelado de la red de distribución

6.3.2.2. Renovación priorizada de tuberías. Como resultado del proceso de identificación de aquellas tuberías con mayor probabilidad de presentar problemas de funcionalidad y que requerirían por tanto ser renovadas, se presenta en la Figura 28 su respectiva ubicación.

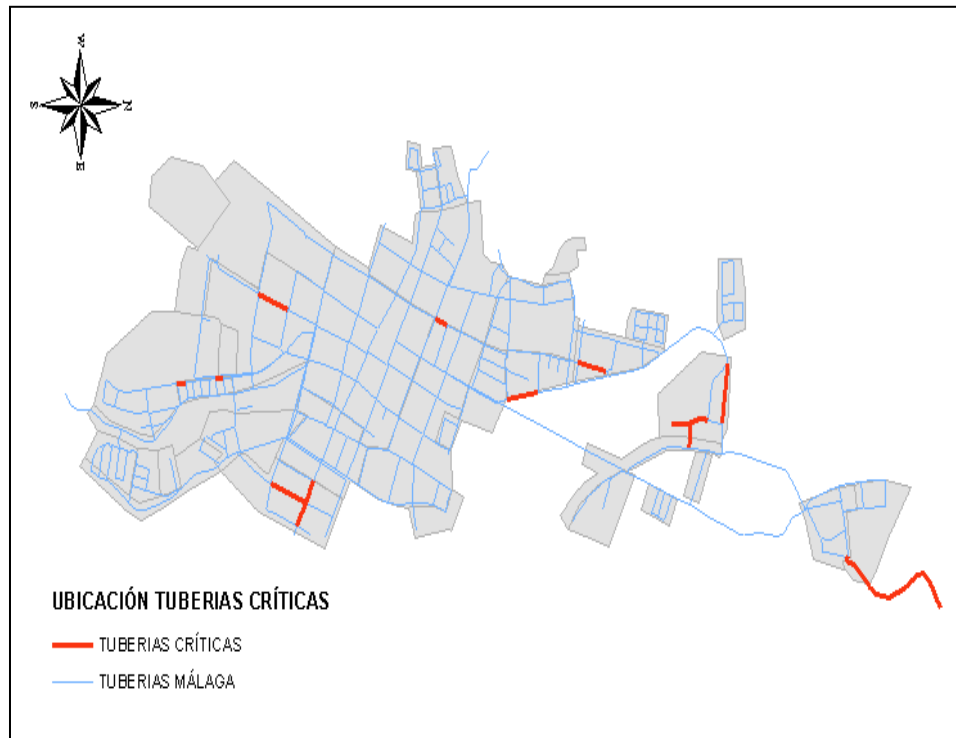


Figura 28. Tuberías con condiciones críticas para renovación

Estas tuberías fueron seleccionadas de acuerdo a los criterios planteados en la metodología y se agruparon en relación a los valores más críticos presentados para cada uno de ellos. Estos fueron: tuberías que presentaban reporte de daños; tuberías de asbesto cemento, las cuales presentan edades superiores a 40 años y tuberías con presiones superiores a la máxima permisible establecida por el Título A del RAS 2000 (literal A.11.1.16.2), en el que se establece como presión máxima 60 m.c.a. Por último, se tiene que estas tuberías tienen una longitud conjunta de aproximadamente 1,526 m, lo cual tendrá que ser tomado en cuenta al momento de plantear actividades de renovación respecto al costo que podría representar.

6.3.2.3. Modelo estadístico lineal para predicción de daños. A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento seguido para uno de los grupos especificados, con los cuales se hizo el modelo estadístico.

Grupo 10. El grupo corresponde a las tuberías de A.C. con más de 40 de servicio, cuyos diámetros varían entre 2 y 6'' y las presiones promedio se encuentran entre 50 y 75 m.c.a. En la Figura 29 se observa la ubicación de las tuberías pertenecientes a este grupo.



Figura 29. Distribución espacial del grupo homogéneo 10

Posteriormente, se aplica el modelo de regresión de mínimos cuadrados ordinarios (OLS por sus siglas en inglés), obteniéndose el modelo de predicción de la Figura 30.



Figura 30. Capa de salida de OLS para el Grupo 10

La herramienta OLS produce muchas salidas numéricas que permiten validar el ajuste del modelo y de esta manera comprobar o rechazar la hipótesis original (Figura 31). Para este caso se parte de la premisa:

- Variable Dependiente: Tasa de daños anual.
- Variable Explicatoria: Edad de las tuberías.

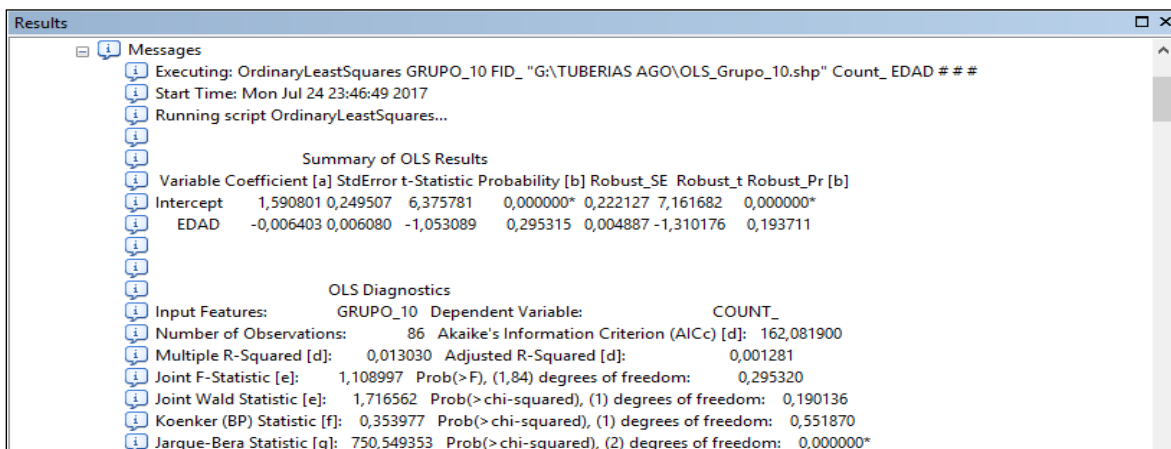


Figura 31. Resultados numéricos regresión OLS

La ecuación representativa de esta modelo sería:

$$N = 1.5908 - 0.0064Edad \quad (22)$$

La primera observación que se puede realizar es que el valor de R cuadrado (R^2), coeficiente de determinación, ajustado es de 0.001281 o del 0.128%, esto indica que, usando solamente la edad, el modelo solo explica el 0.128% de la tasa de daños anuales. Pero dado que el coeficiente que acompaña a la variable explicatoria, la edad de las tuberías, podemos concluir que el modelo no se ha ajustado y por tanto la hipótesis no puede ser sustentada, al menos con la cantidad de datos disponibles de daños para contrastar con el modelo estadístico.

Al revisar si el coeficiente tiene el signo esperado. Cuando un coeficiente es positivo significa que la relación es positiva, uno negativo que la relación es negativa o inversa. Note que el coeficiente para la variable edad en años es negativo. Esto significa que a medida que la edad en años aumenta, el número de daños en la tubería decrece. Se esperaba un coeficiente positivo. Dado que el coeficiente es negativo, no se puede confiar en el modelo.

Así que, mirando nuevamente la hipótesis original, de si la tasa de daños anual en las tuberías es simplemente una función de la edad. ¿Podría las empresas prestadoras de servicios predecir futuras operaciones solo a partir de las proyecciones de edad de las tuberías? Probablemente no.

Si relación entre la tasa de daños y las edades de las tuberías hubiese sido mayor al 80%, podría no necesitar ningún otro tipo de regresión. Pero con el 0.128% del total, parece que otros factores y otras variables se necesitan para modelar efectivamente la tasa de daños.

De los diferentes grupos homogéneos establecidos para la realización del análisis lineal, muy pocos de ellos dieron como resultado un estadístico positivo que se ajustara al modelo, más aún, ninguno de ellos logró superar el 0.5 esperado para establecer que la hipótesis es verdadera, esto debido probablemente a la poca cantidad de datos de daños disponible, y a la imprecisión de dicha información, por tanto se dice que el estudio no resultó en la predicción de daños esperada

debida a la edad de las tuberías y menos en la priorización de tuberías que deben ser reemplazadas cumpliendo con un equilibrio entre las condiciones técnicas e hidráulicas y las condiciones económicas de la empresa prestadora del servicio.

Sin embargo, como se había mencionado, el estudio depende de los registros históricos de daños; y pese a que la información es escasa, no debe dejarse de lado la utilización de dicha metodología, se recomienda que la empresa continúe con el registro de las eventualidades de falla en la red de distribución, para que en un futuro pueda hacerse uso de esta y puedan obtenerse resultados concluyentes que realmente contribuyan a la toma de decisiones en lo concerniente a mantenimiento, reparación y reposición de tuberías en la red de distribución.

6.3.2.4. Sectorización de la red de distribución. La sectorización de la red de distribución se realizó teniendo en cuenta los criterios anteriormente mencionados, a la entrada de cada sector se propone la instalación de válvulas que permitan el control del flujo que entra en el subsistema, un macromedidor de caudal para registrar el volumen de flujo, además de las válvulas de cierre permanente requeridas para aislar los diferentes sectores definidos. El criterio de mayor importancia para la selección de los sectores fue la reducción de las presiones, puesto que en algunos sitios ésta superaba por amplio margen la admisible de acuerdo con las normas colombianas. En la Figura 32 puede verse un plano de distribución de presiones para la red de distribución.

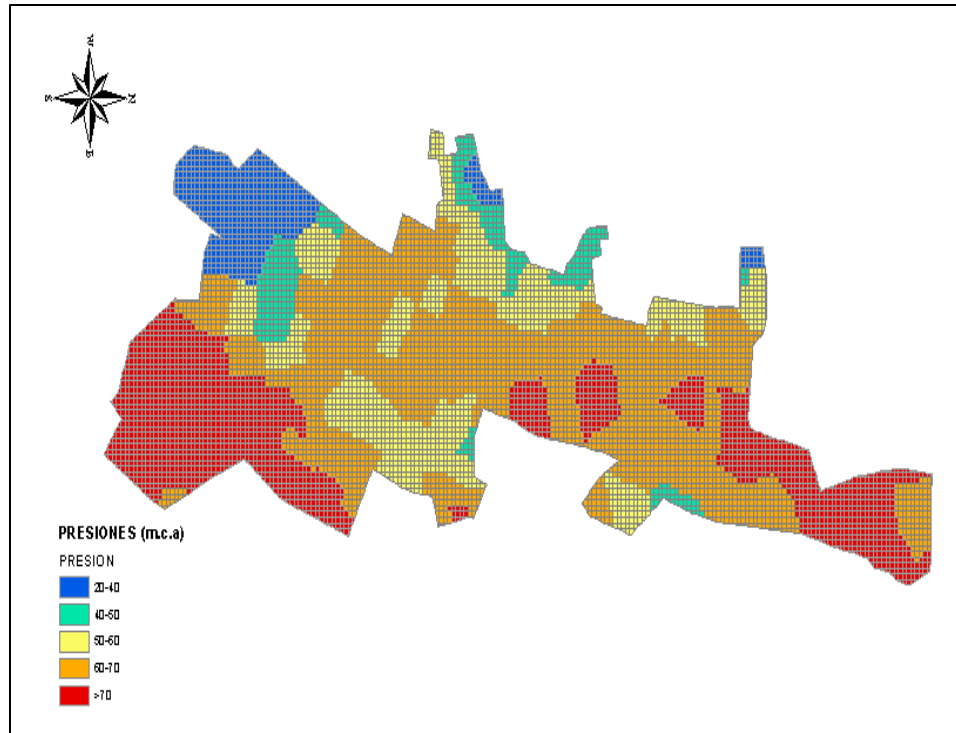


Figura 32. Plano de distribución de las presiones en la red de distribución

Para la definición de la red matriz se encontró que ésta viene de la PTAP en diámetro de 10'' y posteriormente se ramifica en tuberías de 6''. Se definieron para el sistema de distribución siete sectores los cuales se describen a continuación:

- **S01:** Conformado por los barrios El bosque, Santa María y El Cedral, ubicado en la parte alta de la localidad muy cerca de la PTAP, se propone aislar el sector mediante válvulas de cierre permanente, además se plantea la instalación de un macromedidor a la entrada del sector y válvulas de corte que permita contabilizar y regular el flujo a través del mismo.
- **S02:** Conformado por la parte alta del barrio Ricaurte, y los barrios La esmeralda, Tajamar, Pinos del Norte y Villa Anda Lucía, constituye otro sector ubicado en la parte alta del municipio, dada su cercanía con la PTAP no requiere un control estricto de presiones, puesto que ellas se encuentran dentro del rango admisible según las normas. Se plantea la

instalación de válvulas de cierre permanente que contribuyan al aislamiento del sector permitiendo el flujo por una única ubicación.

- **S03:** Los barrios La Universidad, El limonar, Vista hermosa, Medisautos, Industriales y parte baja de Prados del norte conforman el sector, ubicado en la zona suroccidental de la población. Se requiere que la tubería de ingreso al sector sea de 3'' de diámetro, así como la instalación de una válvula reductora de presión de 1 ½'', la cual permitirá una presión de salida de 40 m.c.a., además de las válvulas de cierre permanente que aíslan el sector.
- **S04:** Conformado por los barrios Los Sauces, Libertadores, Tajamar, El Guamo y parte alta del barrio Unión. EL distrito requiere la instalación de unas válvulas de corte que aíslen sus límites al igual que una válvula reductora de presión de 2'' de diámetro que permitirá una salida de 20 m.c.a.; también se propone la instalación de un macromedidor a la entrada del sector, que permita contabilizar el volumen de agua consumida, lo que a su vez permitirá el cálculo de otros factores.
- **S05:** Conformado por los barrios Popular Modelo, El Mirador, Pailitas, La Esperanza, La Salle, Paraíso Asovipar, Villa Real del Sur y parte baja del barrio Unión. El sector es controlado mediante una válvula reductora de presión de 2 ½'', cuya presión de salida se estableció en 30 m.c.a., al igual que las válvulas de cierre permanente necesarias clausurar el flujo de agua.
- **S06:** Conformado por los barrios San Sebastián, Sagrado Corazón y Naranjitos, son los barrios de la zona baja y los que mayor diferencia de altura presentan respecto a la PTAP, el sector requiere válvulas de cierre permanente para aislarlo de los otros sectores y una válvula reductora de presión de 2'', cuya presión de salida se estableció en 30 m.c.a.

- **S07:** Los barrios El Centro, Ricaurte, Kennedy, Balcones de Sevilla y Simón Bolívar componen el sector, serán necesarias las válvulas de cierre permanente que permitirán mantenerlo aislado de los otros sectores.

En la Figura 33 se observa un diagrama de la sectorización propuesta. De esta manera, se lograría un manejo de las presiones en cada uno de los sectores y en la red en general, pasándose de una presión máxima de 101.17 m.c.a a 70.83 m.c.a para las horas de baja demanda. Respecto a la presión promedio en el sistema, esta se reduciría de 64.32 a 44.45 m.c.a, lo que representaría mejores condiciones para el funcionamiento del sistema.

En la Figura 34 puede observarse el plano de presiones una vez implementada la sectorización con el modelo de simulación, donde se evidencian considerables reducciones de la presión en relación a las condiciones iniciales del sistema (Figura 32), como se especificó anteriormente.

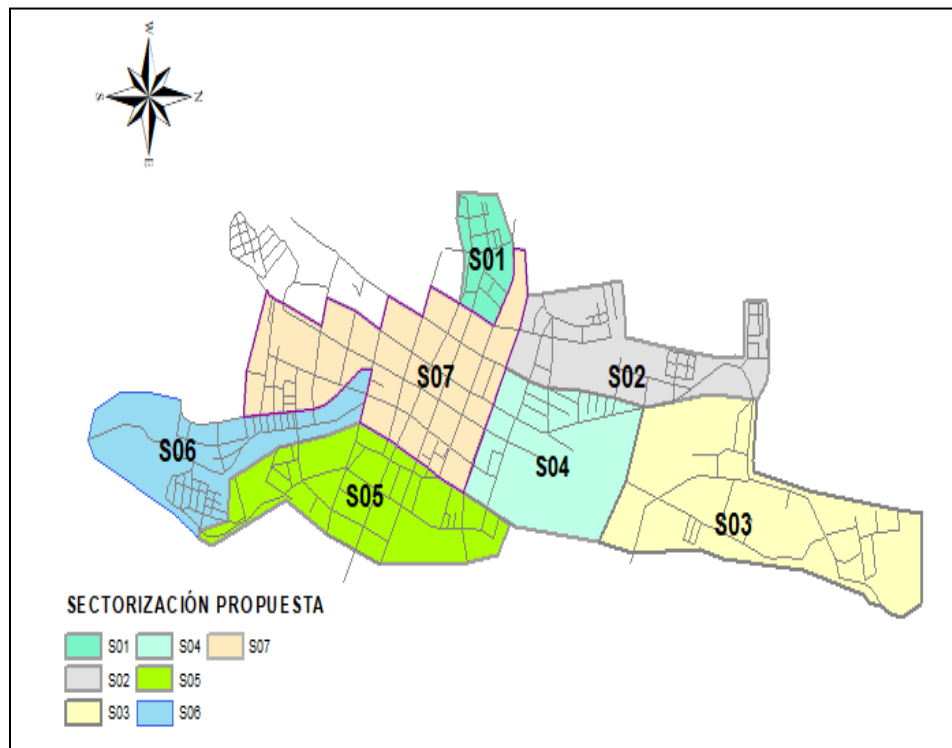


Figura 33. Sectorización hidráulica propuesta de la red

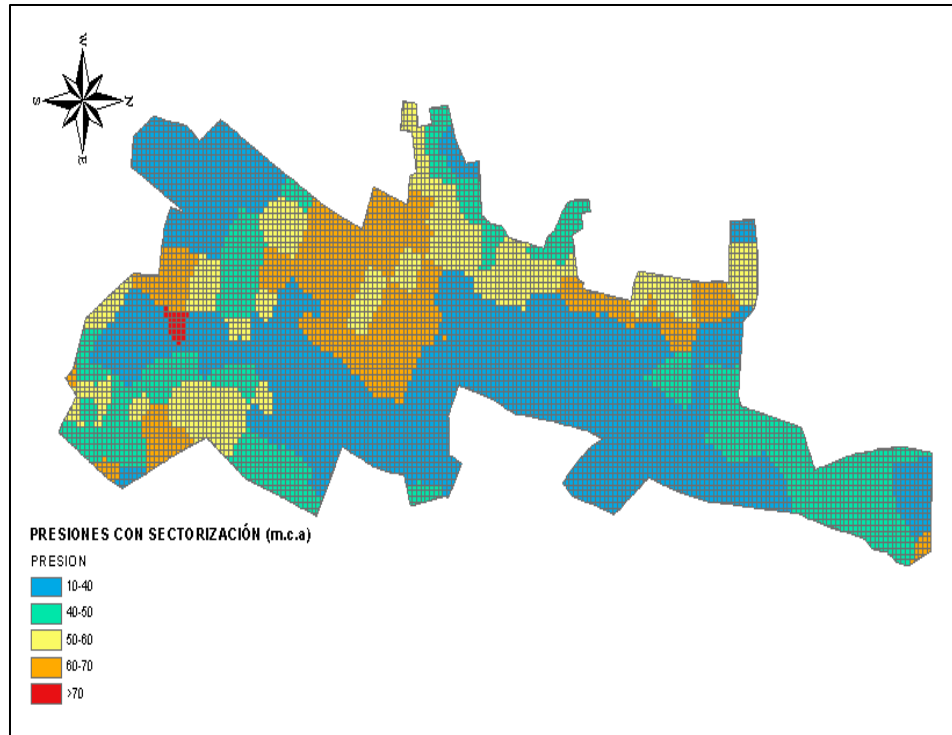


Figura 34. Plano de presiones luego de la sectorización

7. Conclusiones

Es común en los países en desarrollo que los sistemas de distribución presenten elevadas presiones y elevados índices de pérdida. Es el caso del sistema estudiado donde se presenta un 46.53% de índice de agua no contabilizada, lo cual evidencia el ineficiente uso del recurso hídrico, lo que hace necesario implementar políticas de gestión del sistema encaminadas espacialmente al manejo de fugas.

En el estudio se evidencia que aproximadamente un 30% de los usuarios presenta medidores en mal estado, lo que equivale a un volumen estimado de pérdidas de 4,403 m³/mes. Esta situación implica que, al no tenerse un registro real del consumo, pueden existir desperdicios y usos inadecuados del agua por parte de los usuarios, por lo que se sería conveniente reemplazar

estos medidores. Es probable que los suscriptores reaccionen ante al incremento de facturación, ocasionado por el nuevo medidor más sensible y preciso, reduciendo sus consumos o bien solucionando escapes internos, contribuyendo a un manejo sostenible del recurso.

En cuanto a la administración del sistema, sería apropiado que la empresa prestadora del servicio, cuente con sistemas de información geográficos que permitan ubicar espacialmente a los suscriptores, controlando características asociadas al servicio tales como la demanda en los sectores, presiones en las redes, topología de las redes, cambios e inconvenientes que se presenten en las mismas, teniendo así un recurso disponible que apoya decisiones que pudieran tomarse respecto a la programación de actividades de operación y mantenimiento, como cambio de redes, renovación de medidores, reparación de daños e incluso detección de usuarios ilegales.

Para corroborar las hipótesis planteadas en el desarrollo del estudio, sería necesario realizar actividades de campo tales como mediciones continuas de volúmenes de entrada y consumidos en la red, banco de prueba de medidores, calibración de la red, seguimiento a usuarios con características de bajo consumo, entre otras, que permitan validar y/o ajustar las variables consideradas y así poder implementar con mayor confiabilidad las estrategias planteadas.

El planteamiento de alternativas y proyectos para mejorar las condiciones de operación de los sistemas de distribución no es una tarea fácil, deben considerarse muchas variables no solo desde el punto de vista económico, sino técnico y operacional. Muchas veces las empresas prestadoras de servicios de acueducto basan sus decisiones en su disponibilidad presupuestal sin analizar cuál será la opción eficiente que contribuirá realmente a la optimización del sistema.

Considerando que las altas presiones ocasionan roturas en las tuberías y contribuyen a aumentar el caudal de fugas y por ende al aumento de pérdidas en la red, se concluye que es más

viable la implementación de la sectorización hidráulica para el manejo de presiones, que conllevaría a la reducción de presiones máximas y promedio hasta en un 30%, lo que conllevaría a la disminución del volumen de fugas y consecuentemente a una menor captación de agua para el abastecimiento en general.

Referencias Bibliográficas

- Adachi, S., Takahashi, S., Kurisu, H., & Tadokoro, H. (2014). Estimating area leakage in water networks based on hydraulic model and asset information. *Procedia Engineering*, 89, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.188>
- Alzamora, F. M., Bartolín Ayala, H. J., Iranzo, H. S., & Prats, M. A. (2004). GISRed v1.0: Una herramienta SIG de ayuda para la confección de modelos y planes directores de redes de distribución de agua. *Tecnología Del Agua*, 24(250), 32–41.
- Anaya, S. A. (2015). Modelo de gestión y optimización operacional de los daños en redes de distribución de agua.
- Arregui, F., & Cruz, D. (2016). Customer Metering Inaccuracies, 1–43.
- Babić, B., Đukić, A., & Stanić, M. (2014). Managing water pressure for water savings in developing countries, 40(2), 221–232.
- Beuken, R. H. S. ; Lavooij , C. S. W. ; Bosch, A. ; and Schaap, P. G. (2006). Low Leakage in the Netherlands Confirmed. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1–8. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/40941\(247\)174](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/40941(247)174)
- Cheung, P. B., Guilherme, V., Abe, N., & Propato, M. (2010). Night flow analysis and modeling for leakage estimation in a water distribution system, (August), 509–513.
- CRA Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2013). Nivel de Pérdidas

Aceptable para el Cálculo de los Costos de Prestación de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado. Ministerio de Vivienda de Colombia (MinVivienda).

Darvini, G., & Soldini, L. (2015). Pressure control for WDS management. A case study. *Procedia Engineering*, 119(1), 984–993. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.989>

ECOCIALT S.A.S. (2014). *PAYUEDA Programa de ahorro y uso eficiente del agua*. Retrieved from <http://proactivasai.com/areasocial/descargas/Programa de Ahorro y Uso Eficiente del Agua.pdf>

Farley, M. (2001). Leakage Management and Control : A Best Practice Training Manual, 1–169. Retrieved from http://whqlibdoc.who.int/hq/2001/WHO_SDE_WSH_01.1_pp1-98.pdf

Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in Distribution Networks – A Practitioner’s Guide to Assessment, Monitoring and Control*. (IWA Publishing, Ed.). London.

Fuentes-Mariles, O. A., Palma-Nava, A., & Rodríguez-Vázquez, K. (2011). Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos. *Ingeniería Investigación Y Tecnología.*, XII,(2), 235–242.

Fundación Bolívar. (2004). *PMAA Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado del municipio de Málaga Santaner - Tomo I Diagnóstico general*.

Galindo Salazar, D. C. (2014). Herramientas para el estudio de la incertidumbre asociada a la estimación del balance hídrico en el sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/46232/>

Horne, J. (2013). Economic approaches to water management in Australia. *International Journal*

of Water Resources Development, 29(4), 526–543.

<https://doi.org/10.1080/07900627.2012.712336>

Jimenez Aldana, M. (2003). *La sectorización hidráulica como estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto*. (A. agua y alcantarillado de Bogotá, Ed.). Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.

Kanakoudis, V., & Gonelas, K. (2014). Applying pressure management to reduce water losses in two greek cities' WDSs: Expectations, problems, results and revisions. *Procedia Engineering*, 89, 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.194>

Karathanasi, I., & Papageorgakopoulos, C. (2016). Development of a Leakage Control System at the Water Supply Network of the City of Patras. *Procedia Engineering*, 162, 553–558. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.100>

Kettler, A. J., & Goulter, C. (1986). An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water Distribution Networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 13(1), 117–117. <https://doi.org/10.1139/186-016>

Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). Water supply and sanitation sector board discussion paper series - The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries How the Private Sector Can Help : A Look at Performance-Based Service Control, (8).

Lallana, C. (2001). (WQ06) Water use efficiency (in cities): leakage. *Water*, 1–5.

Lambert, A. (1997). Pressure management/leakage relationships: theory, concepts and practical applications. *Proceedings of Minimizing Leakage in Water Supply/distribution Systems*,

IQPC Seminar. London.

Lambert, A., & Hirner, W. (2000). Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. IWA website.

Liemberger, R., & Farley, M. (2004). Developing a non-revenue water reduction strategy Part 1: Investigating and assessing water losses. *Proceeding of IWA WWC 2004 Conference*. Marrakech, Morocco.

Mamlook, R., & Al-Jayyousi, O. (2003). Fuzzy sets analysis for leak detection in infrastructure systems: a proposed methodology. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 6(1), 26–31. <https://doi.org/10.1007/s10098-003-0209-8>

Mazzolani, G., Berardi, L., Laucelli, D., Martino, R., Simone, A., & Giustolisi, O. (2016). A Methodology to Estimate Leakages in Water Distribution Networks Based on Inlet Flow Data Analysis. *Procedia Engineering*, 162, 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.082>

McKenzie, R. (1999). Development of a standardised approach to evaluate burst and background losses in water distribution systems in South Africa. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Development+of+a+standardised+approach+to+evaluate+burst+and+background+losses+in+water+distribution+systems+in+South+Africa#0>

McKenzie, R., & Lambert, A. (2002). ECONOLEAK user guide. South Africa: Water Research Commission, WRC Report TT169/02.

Motiee, H., McBean, E., & Motiee, a. (2007). Estimating physical unaccounted for water (UFW)

in distribution networks using simulation models and GIS. *Urban Water Journal*, 4(1), 43–52. <https://doi.org/10.1080/15730620601145899>

ORION SA. (2014). Diagnóstico institucional y validación del diagnóstico técnico operativo de los operadores de acueducto, alcantarillado y aseo del departamento de Santander-Municipio de Málaga.

Patricia, I., & Fuentes, B. (2014). Calibración y simulación del sistema fuente para abasto de agua del acueducto El Gato Calibration and simulation of the source system for El Gato water supply aqueduct, XXXV(1), 101–115.

Petroulias, N., Foufeas, D., & Bougoulia, E. (2016). Estimating Water Losses and Assessing Network Management Intervention Scenarios: The Case Study of the Water Utility of the City of Drama in Greece. *Procedia Engineering*, 162, 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.101>

Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1080/15730621003610878>

Rossman, L. a. (2000). *EPANET 2: users manual*. Cincinnati US Environmental Protection Agency National Risk Management Research Laboratory (Vol. 38). <https://doi.org/10.1177/0306312708089715>

Saldarriaga, J., Susana, O., Moreno, M., Romero, N., & Córtes, O. (2010). Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria. *Universidad de Los Andes*, 7–15.

Sardinha, J., Serranito, F., Donnelly, A., Marmelo, V., Saraiva, P., Dias, N., ... Rocha, V. (2017). *Active Water Loss Control*.

SISBEN. (2017). *Usuarios registrados SISBEN*.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2007). Informe Anual De Servicios Públicos En Colombia, 295. Retrieved from <http://www.superservicios.gov.co/content/download/3487/36610>

Tabesh, M. (2002). Archive of SID head-driven simulation of watee supply networks, *15*(1), 11–22.

Tabesh, M., Asadiyami Yekta, A. H., & Burrows, R. (2009). An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9284-2>

Territorio, M. de V. C. y. (2010). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO B. In *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico* (2 ed., p. 480). Retrieved from <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO B 030714.pdf>

Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). *Water loss control*. <https://doi.org/10.1036/0071499180>

Tlili, Y., & Nafi, A. (2012). A practical decision scheme for the prioritization of water pipe replacement. *Water Science and Technology: Water Supply*, *12*(6), 895–917. <https://doi.org/10.2166/ws.2012.068>

Vilanova, M. R. N., Magalhães Filho, P., & Balestieri, J. A. P. (2015). Performance

measurement and indicators for water supply management: Review and international cases.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 1–12.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.043>

Xin, K., Li, F., Tao, T., Xiang, N., & Yin, Z. (2015). Water losses investigation and evaluation in water distribution system – the case of SA city in China. *Urban Water Journal*, 12(5), 430–439. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916313>