



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Evaluación del sistema hidráulico del agua potable en la
cabecera municipal de Cárdenas, S.L.P. mediante
modelación numérica**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Marco Antonio Castañón Barragán

Asesor:

Dr. Clemente Rodríguez Cuevas

San Luis Potosí, S. L. P.

Junio del 2026



22 de enero de 2022

**ING. MARCO ANTONIO CASTAÑÓN BARRAGÁN
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Clemente Rodríguez Cuevas y Carlos Couder Castañeda**, *Asesor y Coasesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Evaluación del sistema hidráulico del agua potable en la cabecera municipal de Cárdenas, S.L.P. mediante modelación numérica"

1. Introducción.
 2. Antecedentes y descripción del área de estudio.
 3. Campañas de medición para la obtención de datos hidráulicos y topográficos.
 4. Modelación numérica de la red de agua potable.
 5. Resultados y propuestas de optimización.
 6. Conclusiones.
- Referencias.
Anexos

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“Evaluación del sistema hidráulico del agua potable en la cabecera municipal de Cardenas S.L.P.
mediante modelación numérica”

se realizó en el periodo septiembre de 2020 a junio de 2026 bajo la dirección del Dr. Clemente Rodríguez Cuevas.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Marco Antonio Castanon Barragán.

Contenido

1.Introducción	7
1.1 Justificación	9
1.2 Objetivo	10
1.3 Objetivos específicos	10
1.4 Hipótesis	10
2. Antecedentes y descripción del área de estudio.	11
2.1 Sistemas de abastecimiento de agua potable	11
2.2 Estudios Previos	13
2.3 Ubicación del municipio de Cárdenas, S.L.P.	15
2.4 Fundación del municipio.....	17
2.5 Orografía	17
2.6 Hidrografía	18
2.7 Clima	19
2.8 Características y uso del suelo	20
2.9 Principales actividades económicas.....	21
2.9.1 Agricultura.....	21
2.9.2 Ganadería	21
2.9.3 Silvicultura.....	22
2.9.4 Industria Manufacturera.....	22
2.9.5 Comercio	22
2.10 Introducción del sistema de abastecimiento de agua potable.....	23
2.11 Descripción general de la operación del sistema de abastecimiento de agua potable.....	26

2.12 Problemática	30
3. Campañas de medición para la obtención de datos hidráulicos y topográficos.....	31
3.1 Campañas de medición para la obtención de datos topográficos	32
3.1.1 Elaboración de planes de vuelo mediante el uso de VANTS en la zona conurbada	32
3.1.2 Localización de vértice geodésico para establecer puntos de control topográfico	35
3.1.3 Establecer puntos de control topográfico mediante un equipo GPS (GNSS)	36
3.1.4 Postproceso de coordenadas	40
3.1.5 Vuelos fotogramétricos con VANT	41
3.1.6 Procesamiento de imágenes mediante Agisoft Metashape para la obtención del relieve y ortomosaico.....	43
3.2 Campañas de medición para la obtención de datos hidráulicos	49
3.2.1 Censo de infraestructura hidráulica	49
3.2.2. Ubicación de tanques de almacenamiento.....	51
3.2.3 Toma de presiones	60
4. Modelación numérica de la red de agua potable.....	61
4.1 Población.....	63
4.1.1 Población de proyecto para el año 1966	64
4.2 Elaboración del modelo digital de la red de distribución.	65
4.3 Asignación de caudal de demanda a cada nodo.....	67
4.3.1 Recolección de Datos	68
4.3.2 Preparación de Datos	68
4.3.3 Generación de Polígonos de Thiessen	68

4.3.4 Asignación de población a nodos.....	69
4.3.5 Asignación de caudal a nodos	70
4.3.6 Cálculo del caudal de salida	70
4.4 Asignación de parámetros en EPANET	70
4.5. Calibración de la red de distribución de agua potable en EPANET	72
4.6 Validación de presiones.	73
5. Resultados y propuestas de optimización.....	74
5.1 Resultados de la simulación numérica por sector	75
5.1.1 Sector 1.....	75
5.1.2 Sector 2.....	82
5.1.3 Sector 3.....	86
5.1.4 Sector 4.....	90
5.1.5 Sector 5.....	93
5.1.6 Sector 6.....	95
5.1.7 Sector 7.....	97
5.1.8 Representación gráfica de resultados por sector.	99
5.2 Discusión de resultados	100
5.3 Propuestas de mejora	104
5.4 Propuesta de sectorización hidráulica.....	107
6. Conclusiones.....	109
Referencias	111

Índice de Figuras.

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.	16
Figura 2. Orografía del municipio de Cárdenas S.L.P.	18
Figura 3. Clima del municipio de Cárdenas S.L.P.	20
Figura 4. Ubicación de pozos.	25
Figura 5. Esquema hidráulico de la red de distribución de agua potable.	27
Figura 6. Sectores de la cabecera municipal.	29
Figura 7. Metodología.	31
Figura 8. Interfaz de la aplicación DroneDeploy.	33
Figura 9. Plan de vuelo 1.	34
Figura 10. Plan de vuelo 2.	35
Figura 11. Equipo GPS.	36
Figura 12. Puntos de control.	38
Figura 13. Ubicación de nodos y puntos de control.	39
Figura 14. Dron DJI modelo Phantom 4 PRO.	41
Figura 15. Vuelo 5.	43
Figura 16. Orientación de imágenes.	45
Figura 17. Puntos de control.	45
Figura 18. Corrección del error.	46
Figura 19. Nube de puntos densa.	46
Figura 20. Nube de puntos densa 2.	47
Figura 21. Malla.	47
Figura 22. Modelo digital de elevación.	48
Figura 23. Curvas de nivel.	48
Figura 24. Ortomosaico.	49
Figura 25. Censo de accesorios.	51
Figura 26. Ubicación de tanques de almacenamiento.	52
Figura 27. Tanque 1.	53

Figura 28. Tanque 2.	54
Figura 29. Tanque 3.	55
Figura 30. Tanque 4.	56
Figura 31. Tanque 5.	57
Figura 32. Tanque 6.	58
Figura 33. Tanque 7.	59
Figura 34. Manómetro empleado para toma de presiones.	61
Figura 35. Sector 1 en EPANET.	66
Figura 36. Polígonos de Thiessen que delimitan las áreas de servicio para cada nodo.....	69
Figura 37. Asignación de parámetros en EPANET.	71
Figura 38. Sector 1, EPANET.	75
Figura 39. Sector 2, EPANET.	82
Figura 40. Sector 3, EPANET.	86
Figura 41. Sector 4, EPANET.	90
Figura 42. Sector 5, EPANET.	93
Figura 43. Sector 6, EPANET.	95
Figura 44. Sector 7, EPANET.	97
Figura 45. Representación gráfica de presiones en AUTOCAD.	99

Índice de tablas.

Tabla 1. Población de proyecto 1996.	24
Tabla 2. Puntos de control.....	38
Tabla 3. Dimensiones Tanque 1.....	53
Tabla 4. Dimensiones Tanque 2.....	54
Tabla 5. Dimensiones Tanque 3.....	55
Tabla 6. Dimensiones Tanque 4.....	56
Tabla 7. Dimensiones Tanque 5.....	57
Tabla 8. Dimensiones Tanque 6.....	58
Tabla 9. Dimensiones Tanque 7.....	59
Tabla 10. Datos del proyecto de 1996.....	64
Tabla 11. Incremento de la población.	64
Tabla 12. Parámetros calculados al 2020.	65
Tabla 13. Presiones EPANET Sector 1	75
Tabla 14. Presión de campo vs EPANET, Sector 1.	81
Tabla 15. Presiones EPANET Sector 2	82
Tabla 16. Presión de campo vs EPANET, Sector 2.	86
Tabla 17. Presiones EPANET Sector 3	87
Tabla 18. Presión de campo vs EPANET, Sector 3	90
Tabla 19. Presiones EPANET Sector 4.....	91
Tabla 20. Presión de campo vs EPANET, Sector 4.	92
Tabla 21. Presiones EPANET Sector 5.....	93
Tabla 22. Presión de campo vs EPANET, Sector 5.	95
Tabla 23. Presiones EPANET Sector 6	96
Tabla 24. Presión de campo vs EPANET, Sector 6.	97
Tabla 25. Presiones EPANET Sector 7	98
Tabla 26. Presión de campo vs EPANET, Sector 7	99

Evaluación del sistema hidráulico del agua potable en la cabecera municipal de Cárdenas, S.L.P. mediante modelación numérica.

1. Introducción

El agua es el recurso fundamental para todas las necesidades humanas, incluyendo la alimentación, la disponibilidad de agua potable, los sistemas de saneamiento, la salud, la energía y el alojamiento. La gestión adecuada de los recursos hídricos constituye uno de los retos más grandes para la sociedad. Sin agua, no hay sociedad, no hay economía, no hay cultura, no hay vida. (Organización de las Naciones Unidas, 2023)

La Ley Federal de Aguas Nacionales (LAN) y su reglamento, editada el 2 de noviembre de 1992, define como objetivo, regular la explotación, uso, aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo sustentable. La LAN en su artículo 14 BIS 5 y la Ley de Aguas del Estado de San Luis Potosí artículo 16 establecen que: El agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad y sustentabilidad es tarea fundamental del Estado y la Sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional (CONAGUA, 2017) .

El agua es empleada de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir, producir e intercambiar bienes y servicios. Un gran desafío hídrico que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo (CONAGUA, 2015).

Para que una población tenga un desarrollo propicio es indispensable su acceso al agua potable. Sin embargo, los servicios de agua potable y saneamiento enfrentan graves problemas. En México, tanto la cobertura como la calidad del servicio representan un problema para la calidad de vida de millones de personas, e incluso para las finanzas públicas locales. Los niveles de cobertura, calidad del servicio y la eficiencia física son

inferiores a lo que esperaríamos para un país de su nivel de desarrollo (González-Villarreal, 2016).

Generalmente, los problemas detectados en los sistemas de distribución de agua potable, se encuentran relacionados con las fugas, a los asentamientos o hundimientos del terreno natural por causa del aprovechamiento intensivo de los acuíferos y a tuberías con un tiempo de servicio de más de 30 años. La falta de mantenimiento acelera el deterioro de la infraestructura, ocasionando el incremento de fugas. En el caso de los equipos de bombeo, no sólo se reduce la eficiencia en su operación incrementándose los consumos de energía eléctrica, sino también presentan fallas continuas y deficiencias que demeritan la calidad del servicio (Fragoso Sandoval, 2016).

Durante los últimos años se han desarrollado programas de cómputo para conocer a detalle el comportamiento hidráulico de los sistemas de distribución de agua potable (Arreguín, 2010). La modelación de los sistemas de distribución de agua ha tomado gran interés en términos de optimización, principalmente cuando se emplean programas de cómputo de libre acceso como el EPANET (Sunela, 2015).

La modelación hidráulica mediante el uso de métodos numéricos es una herramienta valiosa para caracterizar e interpretar el funcionamiento de la red de distribución de agua potable de una localidad (Vekemans, 2017). Estas simulaciones permiten obtener un punto de vista moderno para el análisis de la red de distribución de agua potable en términos de velocidad del flujo de agua, eficacia, uso de energía, etc., además de que provee una descripción cualitativa del sistema de abastecimiento (Haut, 2007).

La cabecera municipal de Cárdenas no es la excepción, ya que, debido a la antigüedad del sistema de abastecimiento de agua potable y, a su falta de mantenimiento, conllevan a que los recursos hídricos no sean aprovechados de manera adecuada. Como resultado de esto, la población no cuenta con un servicio de agua potable equitativo que pueda satisfacer sus necesidades. Por ello, para conocer su operación y proponer mejoras, se realizó una modelación numérica del sistema de abastecimiento de agua potable utilizando el

programa de cómputo EPANET para definir las cargas piezométricas que favorezcan la distribución.

En la evaluación de una red de distribución de agua potable existente se hace referencia al artículo 8, fracción XL, de la ley de aguas del Estado de San Luis Potosí que establece que la Comisión Estatal del Agua tendrá la atribución de diseñar indicadores de gestión que permitan evaluar la eficiencia de los prestadores del servicio de agua potable, drenaje y alcantarillado (H. Congreso del Estado de San Luis Potosí, Instituto de Investigaciones Legislativas, 2022).

1.1 Justificación

Con una población en crecimiento y una economía basada principalmente en la agricultura y la ganadería, la disponibilidad de agua potable es esencial para el bienestar de sus habitantes.

En el municipio objeto de estudio desde que el primer pozo fue perforado y se introdujo el servicio de agua potable a la cabecera municipal no existen registros de cualquier clase de mantenimiento que se le haya brindado al sistema de abastecimiento, tampoco se cuenta con información digital que describa el funcionamiento de la red.

La falta de mantenimiento y evaluación periódica del sistema de agua potable ha generado múltiples problemas, tales como la disminución en la eficiencia de bombeo, la reducción del caudal disponible, la presencia de fugas y la obsolescencia de la infraestructura. Estas deficiencias derivan en cortes recurrentes del servicio, un incremento en los costos de operación y mantenimiento correctivo, así como en riesgos sanitarios para la población.

Un análisis permitirá establecer un plan de mantenimiento preventivo y correctivo. La implementación de nuevas tecnologías, como software de modelación hidráulica, representa una alternativa para mejorar la eficiencia del servicio y reducir pérdidas de agua.

1.2 Objetivo

Realizar un diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua potable en la cabecera municipal, con el propósito de identificar sus principales deficiencias y proponer alternativas de mejora mediante la aplicación de un modelo de simulación numérica.

1.3 Objetivos específicos

1. Evaluar el funcionamiento del sistema de distribución por gravedad mediante la elaboración del modelo del relieve de la zona conurbada a partir de la digitalización obtenida mediante el uso de VANT's (drones) y el procesamiento de modelos fotogramétricos.
2. Analizar de la red de agua potable mediante el censo de sus componentes y accesorios, con el propósito de recopilar la información y los parámetros requeridos para su modelación hidráulica en el software EPANET.
3. Aplicar el programa de cómputo EPANET para diagnosticar las condiciones actuales de operación del sistema de abastecimiento de agua potable, con el fin de obtener una representación de su comportamiento actual.
4. Proponer mejoras al sistema hidráulico con base en los resultados de la modelación numérica a través de la implementación de ajustes en la red de distribución.

1.4 Hipótesis

El uso de un programa de cómputo especializado para la evaluación de un sistema de abastecimiento de agua potable facilitará el análisis de su desempeño, permitiendo la identificación de deficiencias operativas y estructurales, mejorando la gestión de recursos

hídricos y la toma de decisiones en cuanto a mantenimiento, expansión y sostenibilidad del sistema.

La generación de reportes automatizados permitirá una gestión más eficiente del abastecimiento de agua, garantizando una distribución equitativa y sostenible para la población.

2. Antecedentes y descripción del área de estudio.

2.1 Sistemas de abastecimiento de agua potable

Los sistemas abastecimiento de agua son parte fundamental en el bienestar y desarrollo de la población. Sin embargo, en ellos se presentan problemas como la escasez de agua y la distribución irregular. Resolver estos problemas exige alcanzar un conocimiento profundo de los sistemas de distribución de agua para tomar mejores decisiones y optimizar el servicio (CONAGUA, 2019).

Un sistema moderno de abastecimiento de agua potable se compone de instalaciones para la captación, almacenamiento, conducción, bombeo, tratamiento y distribución. Las obras de captación y almacenamiento permiten reunir las aguas aprovechables de ríos, manantiales y agua subterránea. Incluyen actividades como el desarrollo y cuidado de la cuenca de aportación, pozos y manantiales, así como la construcción de presas y de galerías filtrantes. La conducción engloba a los canales y acueductos, así como instalaciones complementarias de bombeo para transportar el agua desde la fuente hasta el centro de distribución. El tratamiento es la serie de procesos que le dan al agua la calidad requerida y finalmente, la distribución es dotar de agua al usuario para su consumo. Una vez que el agua ha sido empleada, debe ser desalojada a través de una red de alcantarillado y conducida a una planta de tratamiento para que posteriormente pueda ser reutilizada o reintegrada a la naturaleza sin causar deterioro ambiental (Rahman & Vanier, 2019).

Una red de distribución es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta las tomas domiciliarias o hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como el extinguir incendios. La red debe proporcionar este servicio todo el tiempo, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada (CONAGUA, 2015).

La red de distribución está formada por un conjunto de tuberías que se unen en diversos puntos denominados nodos o uniones. De acuerdo con su función, la red de distribución puede dividirse en: red primaria y red secundaria. A la tubería que conduce el agua desde el tanque de regulación hasta el punto donde inicia su distribución se le conoce como línea de alimentación, y se considera parte de la red primaria (CONAGUA, 2015).

La división de la red de distribución en red primaria o secundaria dependerá del tamaño de la red y de los diámetros de las tuberías. De esta forma, la red primaria se constituye de los tubos de mayor diámetro y la red secundaria por las tuberías de menor diámetro, las cuales abarcan la mayoría de las calles de la localidad (CONAGUA, 2015).

Las piezas especiales son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tuberías de diferente material o diámetro, y terminales de los conductos, entre otros. A las piezas o conjuntos de accesorios especiales con los que, conectados a la tubería, se forman deflexiones pronunciadas, cambios de diámetro, derivaciones y ramificaciones se les llama cruceros. También permiten el control del flujo cuando se colocan válvulas, estas se utilizan para disminuir o evitar el flujo en las tuberías (CONAGUA, 2015).

Un tanque de regulación es un depósito situado generalmente entre la captación y la red de distribución que tiene por objeto almacenar el agua proveniente de la fuente, el almacenamiento permite regular la distribución. Se le llama tanque de regulación cuando guarda cierto volumen adicional de agua para aquellas horas del día en que la demanda en la red sobrepasa al volumen suministrado por la fuente. La mayor parte de los tanques existentes son de este tipo (CONAGUA, 2015).

Una red de distribución puede ser alimentada por varios tanques correspondientes al mismo número de fuentes o tener tanques adicionales de regulación dentro de la misma zona de la red con el fin de abastecer sólo a una parte de la red (CONAGUA, 2015).

2.2 Estudios Previos

El análisis y modelación a través de modelos hidráulicos en la actualidad están constituyendo una herramienta confiable y eficaz en la toma de decisiones, además de la creación de diferentes escenarios que promuevan en forma conjunta una mejora en el rendimiento, confiabilidad del diseño y eficacia en el suministro de agua potable (Chuquín Nelson, 2018).

La modelación numérica aplicada a sistemas de abastecimiento de agua potable ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en una herramienta clave para el diseño, análisis, operación y optimización de estos sistemas. Su desarrollo está estrechamente vinculado con los avances en matemáticas aplicadas, hidráulica computacional y tecnologías de la información (Rossman, 2000).

En sus inicios, el análisis de redes hidráulicas se realizaba mediante métodos manuales como el método de Hardy Cross (1936), una técnica iterativa que permitió resolver redes cerradas considerando la conservación de masa y energía. Aunque rudimentario, este método marcó el inicio de los estudios sistemáticos sobre redes de distribución (Walski, 2003).

Con el avance de la informática en los años 60 y 70, comenzaron a desarrollarse los primeros programas computacionales para simular redes hidráulicas. Uno de los hitos más importantes fue el desarrollo de EPANET por parte de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en los años 90. Este programa de cómputo gratuito permitió la simulación dinámica del comportamiento hidráulico y de calidad del agua en redes de

distribución, facilitando el análisis de presiones, caudales, velocidades y concentraciones de contaminantes o desinfectantes (Rossman, 2000).

La modelación numérica ha permitido no solo representar físicamente los sistemas, sino también incorporar aspectos complejos como la variabilidad de la demanda, fallas en componentes, calidad del agua, control operacional y eficiencia energética. Esto ha dado paso al uso de herramientas de optimización, inteligencia artificial y sistemas de información geográfica (SIG) para una mejor toma de decisiones (Walski, 2003).

Actualmente, los modelos numéricos son indispensables para el diseño de nuevas infraestructuras, la detección de fugas, el manejo de emergencias, el control de calidad del agua y la planificación a largo plazo, especialmente frente a desafíos como el crecimiento urbano, el cambio climático y la escasez de recursos hídricos (Mays, 2000).

Hoy en día son muchas las investigaciones realizadas para el análisis y diseño de redes de distribución de agua potable, desde la aplicación de metodologías de optimización tradicional hasta el modelado por computadora. Actualmente son varios los autores que han realizado estudios para analizar los sistemas de abastecimiento de agua potable mediante distintos programas de cómputo, algunos de ellos se mencionan a continuación.

Muranho, et al. evaluó los índices de gestión operativa de las redes de abastecimiento de agua potable apoyándose en EPANET y el módulo de WaterNetGen. En este caso WaterNetGen se aplicó para hacer el análisis de rendimiento en las tuberías, encontrando que los elementos de evaluación del desempeño incluidos en el programa pueden beneficiar a grandes poblaciones por su fácil manejo (J. Muranho, 2012).

Toxky se apoyó en EPANET para hacer el análisis hidráulico para automatizar la red de distribución de agua de una sección de la Delegación Miguel Hidalgo, en la Cd. de México, con el objetivo de dividir la red para controlar caudales y a su vez minimizar las fugas mediante la regulación de las presiones en los nodos de demanda (Lopez, 2012).

Cabrera and Tzatchkov llevaron a cabo el estudio de Modelación y diseño de redes de distribución de agua con suministro intermitente, en donde utilizan el modelo de manejo

de aguas pluviales para cuantificar el escurrimiento y la calidad de agua que transporta este escurrimiento, utilizándolo como modelo para el llenado inicial de la RDA y una vez llena la red continúan con el modelado utilizando EPANET, modelando la RDA con tinacos como un depósito conectado a la red, recomendando el programa para el modelado de la red una vez presurizada (Cabrera-Béjar, 2012).

Marchi, et al. realizaron la comparación de las propuestas para optimizar el diseño y operación de la Red de agua potable de varios algoritmos matemáticos (genéticos, evolución diferencial, colonia de hormigas, enjambre de partículas y rana saltarina) sobre el desempeño, la velocidad de convergencia y la consistencia de las soluciones y emplearon EPANET para la modelación hidráulica para cada algoritmo por ser un programa preciso y de fácil manejo (Morelos Raúl A., 2017).

Morelos y Ramírez analizaron y realizaron un diseño hidráulico por computadora de la red de agua potable para una zona de México mediante el software EPANET, con ello se logró corregir las áreas con bajas presiones, velocidades y pérdidas de carga y consecuentemente mejorar el servicio de agua potable en la zona (Morelos Raúl A., 2017).

Recientemente, Sánchez, et al. mostró como optimizar el tiempo de diseño de redes de distribución en la obtención de los datos de entrada como son las elevaciones, áreas aferentes y demanda base en los puntos de conexión del sistema, además de realizar correcciones al trazado por medio de un análisis topológico mediante la aplicación de las herramientas del software ArcGIS obteniéndose resultados de una manera más fácil, rápida y confiable para llevarlos a EPANET, garantizando un diseño óptimo y de calidad (Sánchez Tapiero, 2021).

2.3 Ubicación del municipio de Cárdenas, S.L.P.

El municipio se encuentra localizado al este de la capital del estado en la zona media, la cabecera municipal tiene las siguientes coordenadas: 99°39" de longitud oeste y 22°00" de latitud norte, con una altura de 1,200 msnm. Sus límites son: al norte con Alaquines; al

este Tamasopo; al sur Rayón; al oeste Rioverde. El área de estudio se limita a la cabecera municipal, como se muestra en la Figura 1, (Gobierno municipal de Cárdenas, San Luis Potosí, 2018).

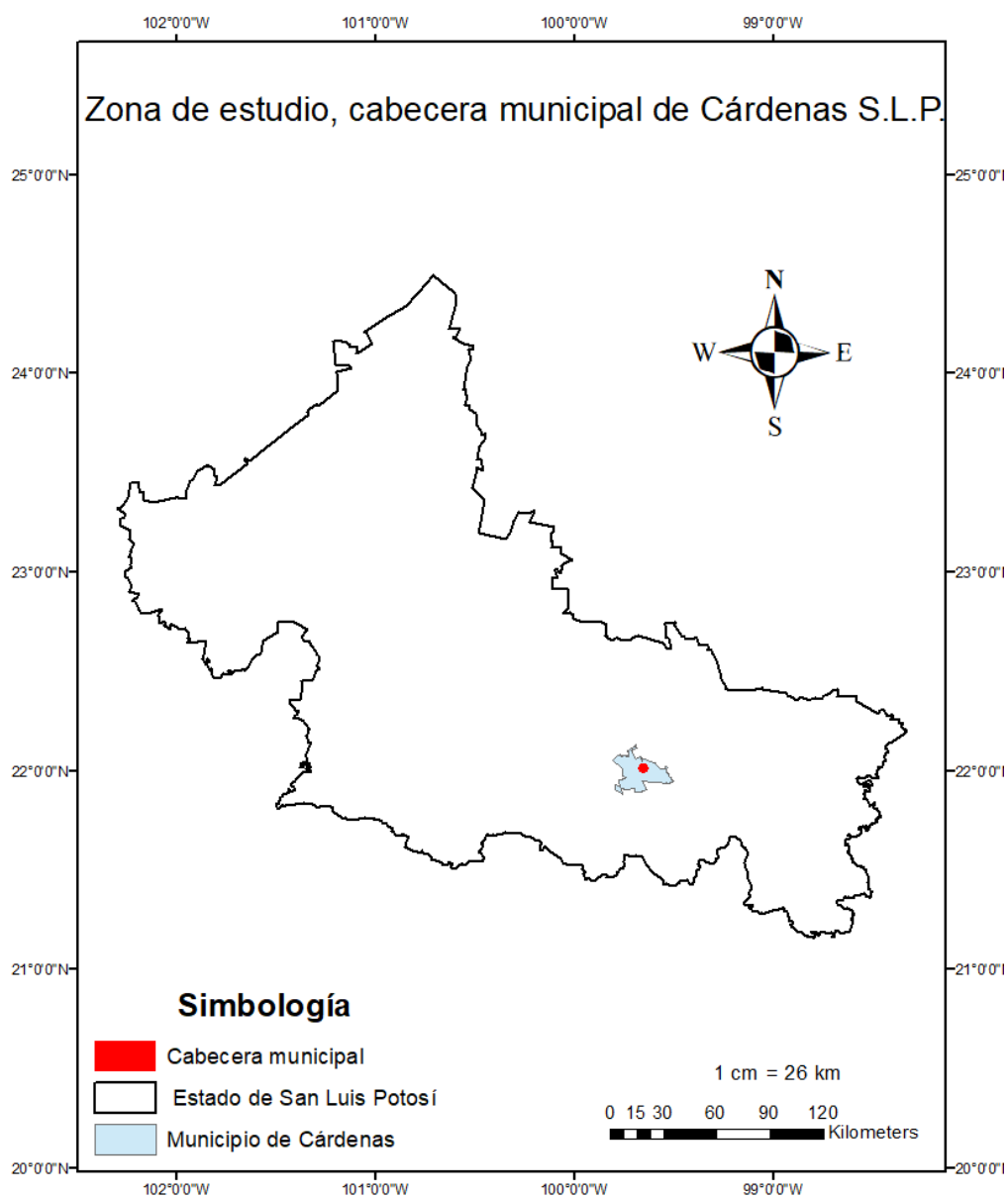


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

2.4 Fundación del municipio

El municipio de Cárdenas, San Luis Potosí, fue fundado el 9 de octubre de 1613. Su fundación se debe a la colonización española en la región, no se sabe quiénes fueron los primeros españoles que llegaron a esta tierra. En documentos antiguos se habla de varios frailes en el primer tercio del siglo XVII en que encontramos misiones, rancherías y haciendas; entre estas últimas y como principal de ellas, aparece la enorme hacienda de Ciénega de San Nicolás, fundada al parecer por Luis de Cárdenas. En esos años se habla de ella como la Ciénega de San Nicolás y por el apellido de su propietario se le llamó después Hacienda de Cárdenas. Durante más de un siglo fue poseída por la familia Cárdenas. Durante todo ese tiempo y años después fue en aumento su población en las que había familias de todas castas, pero la mayoría eran pames y pocos hablaban el castellano, no estaban concentrados en una sola localidad sino en varias rancherías dispersas (Gobierno municipal de Cárdenas, San Luis Potosí, 2018).

Alrededor del año 1881 empezó uno de los proyectos que formarían al municipio como tal y como uno de los más modernos del estado, el ferrocarril, el proyecto incluiría la construcción de la vía férrea San Luis Potosí-Tampico, a partir de entonces se transformó totalmente la vida en Cárdenas (Gobierno municipal de Cárdenas, San Luis Potosí, 2018).

Creció la población, se fundó el barrio de Rasconcito y la Colonia Americana, se activó notablemente el comercio con la afluencia de muchas familias que llegaron procedentes de Alaquines, Rayón, Lagunillas y de otros lugares aún más distantes (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2012).

2.5 Orografía

Se localizan formaciones montañosas como la sierra de Santa Gertrudis, sierra Paredes, El Picacho, El Azafrán, Catana y El Grande (Gobierno municipal de Cárdenas, San Luis Potosí, 2018)(Figura 2).

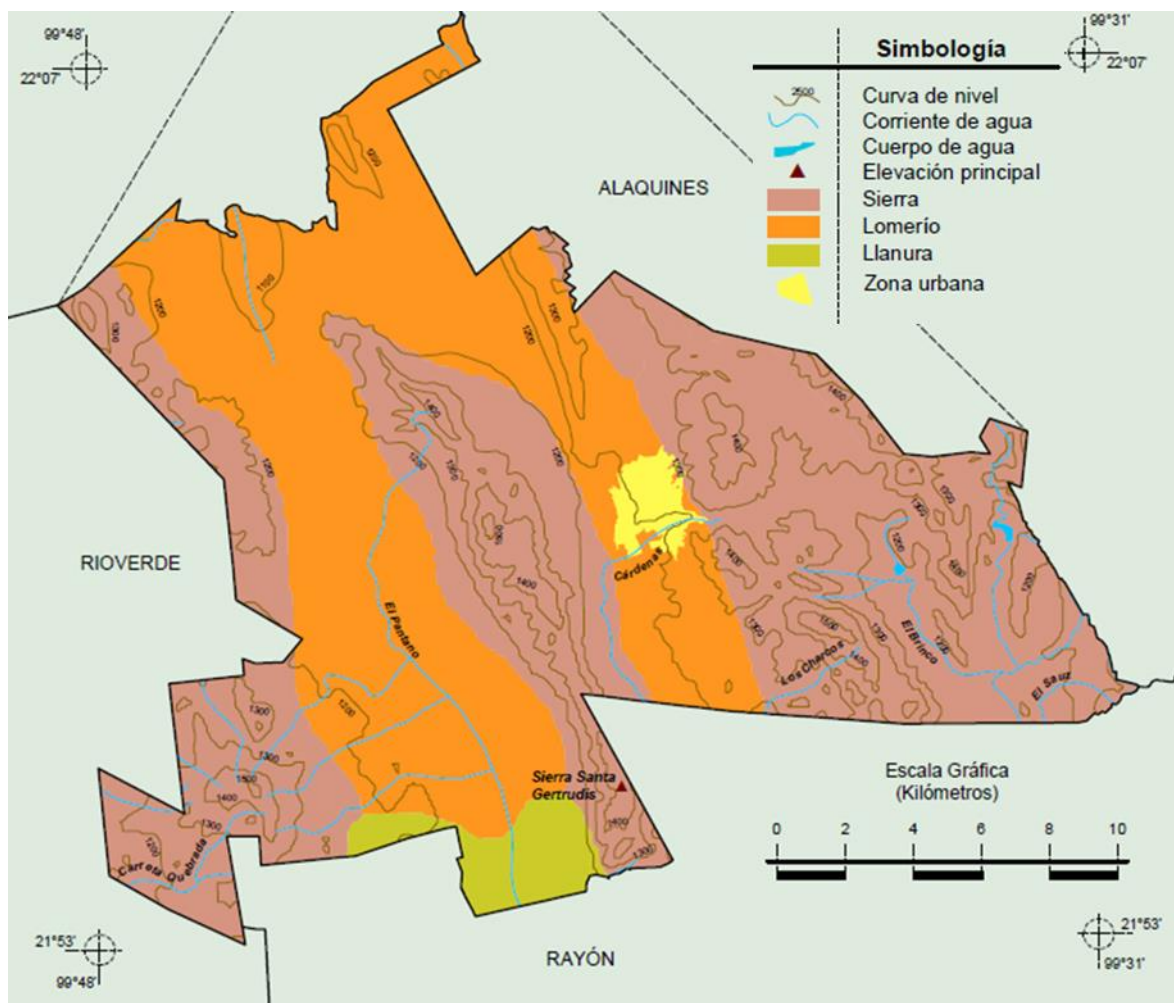


Figura 2. Orografía del municipio de Cárdenas S.L.P.

2.6 Hidrografía

Cárdenas se ubica en la zona centro-oriental de San Luis Potosí; su hidrografía está dominada por un clima que va de seco a semi-seco y por corrientes intermitentes y escurrimientos ligados a las subcuencas regionales del estado. Tanto las aguas superficiales (ríos y arroyos locales) como las subterráneas (acuíferos regionales) determinan el abastecimiento local y las limitantes para riego y uso urbano. No hay grandes ríos

permanentes dentro del municipio; predominan arroyos y corrientes intermitentes que elevan el riesgo de crecidas torrenciales en temporada lluviosa y de estiaje en la temporada seca. Algunos de los arroyos son: El Pantano, Cárdenas, El Chivato, La Megua, La Zorra, El Abanico y Los Charcos. También se cuenta con la Presa de los Nopales en el municipio, y otras como El Naranjo e Higinio Olivo que podrían influir en el almacenaje de agua superficial y regulación de escurrimientos (Gobierno municipal de Cárdenas, San Luis Potosí, 2018).

2.7 Clima

Según la clasificación de climas de Köppen modificada de Enriqueta García, el clima predominante en Cárdenas, S.L.P. es: BS_h (semiseco cálido), (García, 2024).

- Temperatura media anual: 18–22 °C
- Lluvias en verano (junio–septiembre)
- Temporada seca marcada en invierno
- Propio de la zona centro-oriental del estado

La precipitación anual promedio registrada es de 616.6 mm y predomina en gran parte del poniente de la región el clima semi-seco-semi-cálido al centro, semi cálido-subhúmedo y al oriente semicálido-húmedo con lluvias en verano (INEGI, 2002). En la Figura 3 se muestra un mapa que representa su clima.

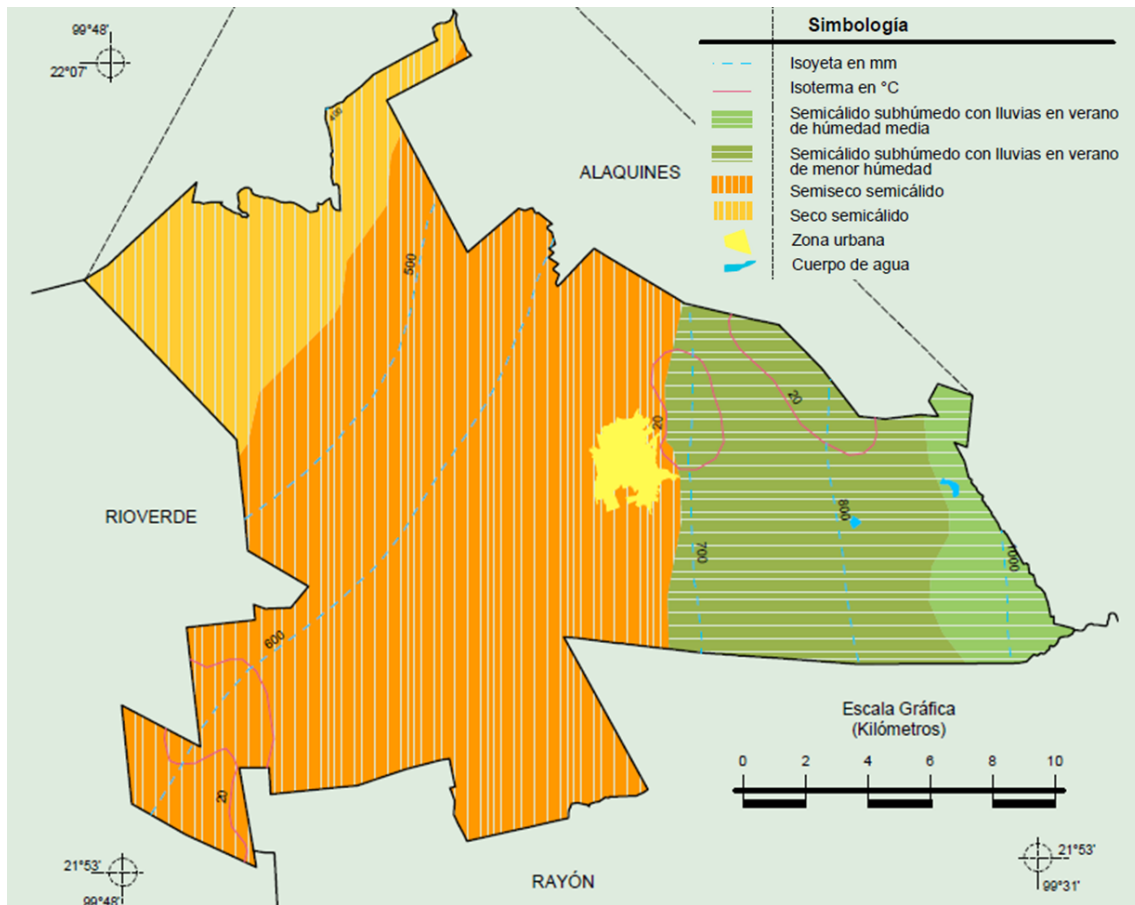


Figura 3. Clima del municipio de Cárdenas S.L.P.

2.8 Características y uso del suelo

Predominan suelos de tipo feozem, calcárico, litosol, con capa superficial oscura a color claro, rica en materia orgánica, textura arcillosa a arcillosa-arenosa (Monografías de los Municipios de México, 2012).

2.9 Principales actividades económicas

2.9.1 Agricultura.

El agua constituye un recurso estratégico para el desarrollo agrícola de cualquier municipio, ya que de su disponibilidad y calidad depende la productividad del campo y, en consecuencia, la seguridad alimentaria local. En el ámbito municipal, el agua permite sostener cultivos básicos y de alto valor comercial, garantizando la economía rural y generando empleos directos e indirectos. Su papel es esencial en la irrigación de tierras de cultivo, pues permite compensar la estacionalidad de las lluvias y asegurar cosechas incluso en épocas de sequía.

El municipio tiene como principales cultivos: maíz, frijol, jitomate, chile y sorgo. La comercialización de los productos debido a las necesidades humanas se destina al autoconsumo y cuando se tienen excedentes se comercializa a nivel local o hacia la misma región (Plan municipal de desarrollo, Cárdenas S.L.P., 2019).

2.9.2 Ganadería

En el ámbito municipal, la ganadería contribuye significativamente a la economía local y a la seguridad alimentaria de la región; sin embargo, su sostenimiento depende de la existencia de fuentes de agua confiables. El agua no solo cubre las necesidades fisiológicas de los animales, sino que también influye en la calidad de los pastizales y forrajes, pues sin humedad suficiente la capacidad de carga ganadera disminuye. En el municipio se crían especies de bovinos, porcinos y aves para consumo propio y distribución a localidades vecinas (Plan municipal de desarrollo, Cárdenas S.L.P., 2019).

2.9.3 Silvicultura.

La actividad forestal de productos maderables se da con algunas unidades de producción rural. Por otra parte, la actividad de recolección se realiza mediante unidades de producción rural. El agua es indispensable para la silvicultura municipal, no solo como insumo para el crecimiento de los árboles, sino también como un recurso que se protege y multiplica gracias al manejo forestal sustentable (Plan municipal de desarrollo, Cárdenas S.L.P., 2019).

2.9.4 Industria Manufacturera.

En la cabecera municipal se localiza la empresa Uniformes de San Luis SA. De CV del ramo textil. El agua es un insumo indispensable para la producción, pero también un factor crítico para la calidad del producto, la eficiencia operativa y la responsabilidad ambiental de la compañía (Plan municipal de desarrollo, Cárdenas S.L.P., 2019).

2.9.5 Comercio

La actividad comercial del municipio se lleva a cabo en establecimientos de diferentes giros y tamaños, de propiedad privada, ubicados principalmente en el mercado de la cabecera municipal. En estos espacios, los vendedores y comerciantes dependen del agua para la higiene de productos alimenticios, limpieza de espacios, mantenimiento de instalaciones y preparación de alimentos frescos, como frutas, verduras, carnes y productos preparados. Además, la disponibilidad de agua asegura la salud pública, evitando la proliferación de bacterias y enfermedades que pueden surgir por condiciones insalubres. El comercio es la principal actividad económica del municipio (Plan municipal de desarrollo, Cárdenas S.L.P., 2019).

2.10 Introducción del sistema de abastecimiento de agua potable al municipio

Durante el año de 1894 en la calle Álvaro Obregón la empresa del Ferrocarril Central Mexicano construyó una pila de 6 m de diámetro y 2 m de profundidad para almacenar agua que servía para el abastecimiento público y como abrevadero del ganado. En 1921 el ayuntamiento le solicitó a la propietaria de la Hacienda de Cárdenas la concesión del agua del nacimiento "El Sauz", para el siguiente año ya se contaba con el proyecto de Bases para un contrato con el Ferrocarril para la introducción del sistema de agua potable. Dos años más tarde, en un telegrama procedente de la ciudad de México se comunica al H. Ayuntamiento que ya se había ordenado la adquisición de la tubería para el agua potable (Anaya Ortega R., 2018).

En 1925 se gestionó la perforación de un pozo debido a que los ayuntamientos deseaban que el municipio contara con abasto de agua potable independiente al del ferrocarril; ese mismo año, se compraron en Estados Unidos 4,200 m de tubo de fierro negro de 4 pulgadas de diámetro, dicha tubería fue embarcada en Nueva York en el vapor Erholw, en total eran 673 tramos de tubo destinados para la red de agua potable. Más tarde, en 1950 se reunieron 7 mil pesos que había que entregar al Gobierno Federal para entrar a un programa que beneficiaría al municipio con la introducción del servicio de agua potable, pero no fue hasta 1965 que el presidente municipal de aquella época gestionó ante el gobierno Estatal que la Secretaría de Recursos Hidráulicos de la Federación enviara una máquina perforadora para perforar el pozo que ya se tenía localizado, un año después el pozo quedó terminado, en ese entonces ya se contaba con estudios técnicos realizados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos para las obras de introducción de agua potable a la ciudad (Anaya Ortega R., 2018).

La obra de perforación del pozo 1 se llevó a cabo en 1966 de acuerdo a los siguientes datos registrados en la Tabla 1:

Tabla 1. Población de proyecto 1996.

Población censal de 1960	12,461 habitantes
Población de proyecto	20,000 habitantes
Dotación	200 l/hab/d
Gasto medio	46.3 lps
Gasto máximo diario	55.6 lps
Gasto máximo horario	83.4 lps
Coeficiente de variación diario	1.2
Coeficiente de variación horario	1.5
Fuente de abastecimiento	Pozo profundo
Longitud aproximada de tubería	50 Km

En mayo de 1967 se inaugura el pozo número 1 y en 1970 las obras de agua potable restantes. Posteriormente, en 1983 se solicitó al gobierno del Estado como obra prioritaria la perforación de un pozo profundo (pozo número 2) para el abastecimiento de agua potable pues el que se tenía no era insuficiente. En 1991 el gobierno del Estado entregó al municipio el ducto número 2 de agua potable, el cárcamo de rebombeo y la tercera pila de almacenamiento. Finalmente, en febrero de 1996 se acuerda la creación de un organismo operador de agua potable en el municipio, dando lugar a lo que ahora es APASCAR (Agua Potable y Alcantarillado de Cárdenas) es la entidad encargada del suministro de agua potable y del manejo del alcantarillado en el municipio de Cárdenas, San Luis Potosí. Esta organización tiene la responsabilidad de asegurar que el agua potable llegue a todos los hogares, empresas y servicios públicos del municipio de manera eficiente y segura. El pozo número 3 en el año 2012 y se utiliza únicamente para abastecer al tanque número 6 (Anaya Ortega R., 2018). En la Figura 4 se muestra la ubicación de los pozos.

2.11 Descripción general de la operación del sistema de abastecimiento de agua potable.

Desde octubre del 2018 se descentralizó del ayuntamiento el servicio del agua y es administrado por el organismo operador (APASCAR). Este brinda el servicio a 15,204 habitantes de la cabecera municipal, lo que representa un 85% de cobertura. Se tienen 5302 tomas registradas en sus 3 diferentes usos: doméstico, industrial y comercial. La tarifa del agua es de \$50/mes precio base, que cubre un consumo de 10m³/mes más el excedente que consuma cada casa tiene un costo de \$10/m³ (APASCAR, 2018).

Se cuenta con 3 pozos con una profundidad de alrededor de 180 m y nivel dinámico de 90m cada uno que son las fuentes de abastecimiento, el pozo 1 produce 26.5 L/s, el pozo 2 25 L/s y el pozo 3 17 L/s, el pozo 1 y 2 operan 24 horas al día y el 3 solo 12 horas. El agua se clora a nivel de pozo y en una pileta que reciben agua del pozo 2, desde donde se bombea a una segunda pileta ubicada en altitud para su distribución a la población por gravedad. En la distribución por gravedad el agua de la fuente se conduce o bombea hasta un tanque elevado desde el cual fluye por gravedad hacia la población. De esta forma se busca mantener una presión suficiente y prácticamente constante en la red para el servicio a los usuarios. Este es el método más confiable y se debe utilizar siempre que se disponga de cotas de terreno suficientemente altas para la ubicación del tanque, para asegurar así las presiones requeridas en la red (APASCAR, 2018).

La red de distribución de la cabecera municipal se encuentra dividida en 7 sectores para fines de abastecimiento. Existen 7 tanques de almacenamiento para este fin, cada uno suministra un sector por medio del tandeo, al mes se distribuyen en promedio 55,385 m³. La red se compone de casi 50 km de tubería, el 50 % de estas son de asbesto y tienen una antigüedad de más de 50 años, el material del resto de la tubería es PVC, polietileno de alta densidad (PAD) y acero. El agua se percibe como de buena calidad, aunque pocas personas la consumen. La población en general prefiere consumir agua embotellada (APASCAR, 2018).

En la Figura 5 se muestra un esquema general de la red de distribución de agua potable.

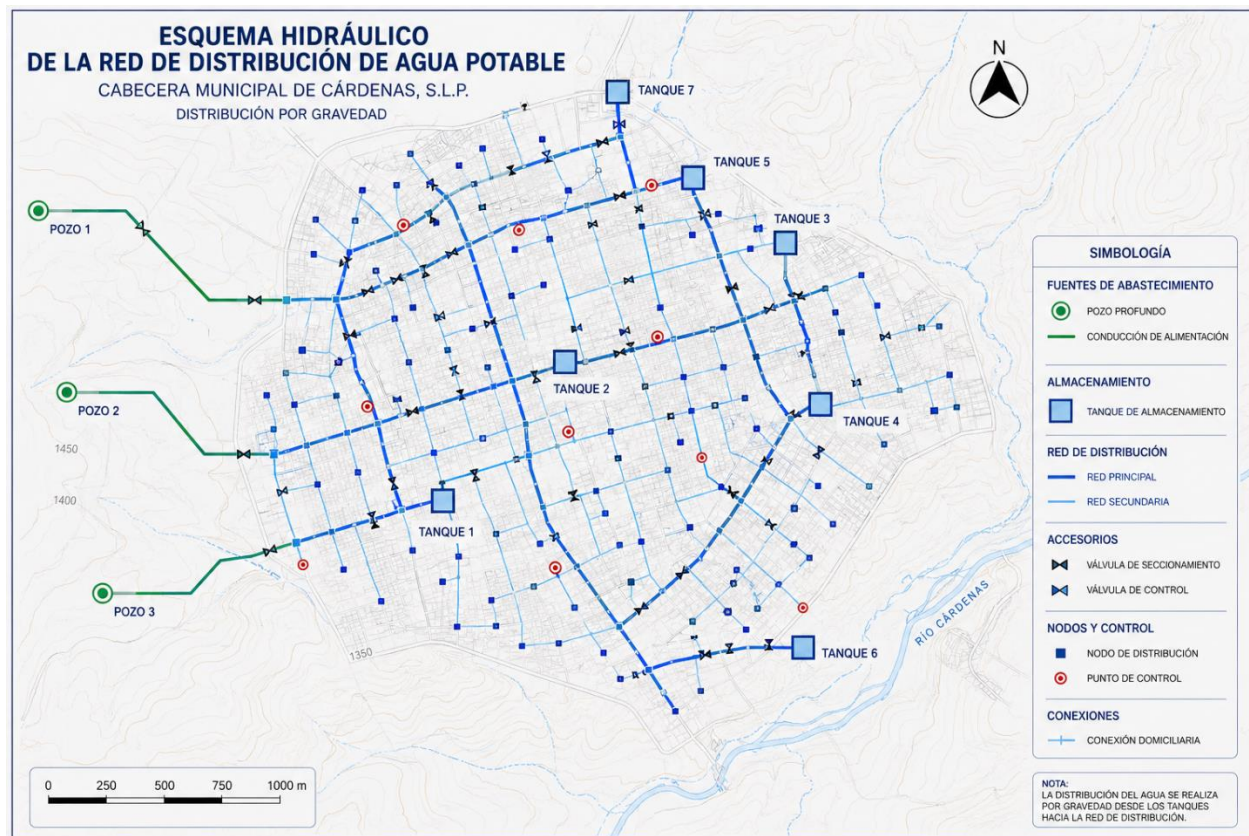


Figura 5. Esquema hidráulico de la red de distribución de agua potable.

La sectorización hidráulica consiste en dividir una red de distribución de agua potable en sectores o distritos hidráulicos (conocidos como *District Metered Areas*, DMA por sus siglas en inglés), con el objetivo de mejorar la gestión, el monitoreo y el control operativo del sistema. Esta técnica es ampliamente utilizada en municipios que buscan una gestión más eficiente de los recursos hídricos, reducir pérdidas y mejorar la calidad del servicio (Fragoso Sandoval, 2016).

Los objetivos principales de la sectorización son los siguientes:

1. Control de presiones: Ayuda a evitar presiones excesivas que puedan dañar tuberías y conexiones.

2. Detección de fugas: Facilita la localización de pérdidas al monitorear caudales y presiones en sectores definidos.
3. Mejora en la operación y mantenimiento: Permite aislar sectores específicos para realizar reparaciones sin afectar todo el sistema.
4. Reducción de agua no contabilizada: Mejora el control sobre el consumo real vs. el volumen suministrado.
5. Monitoreo de calidad del agua: Facilita la toma de muestras y el seguimiento en zonas más pequeñas y controladas.

Si bien la sectorización proporciona grandes beneficios en este caso no es así ya que la red se encuentra sectorizada únicamente para fines de distribución además de que se carece de información para que con la sectorización actual se logre una mayor eficiencia en el servicio. Durante el desarrollo de este proyecto se contó con la colaboración del operador de los pozos, con base a la información que el proporcionó se trazaron los sectores.

En la Figura 6 se muestra la distribución de los sectores en la cabecera municipal y el número de habitantes aproximado al que abastece cada uno.

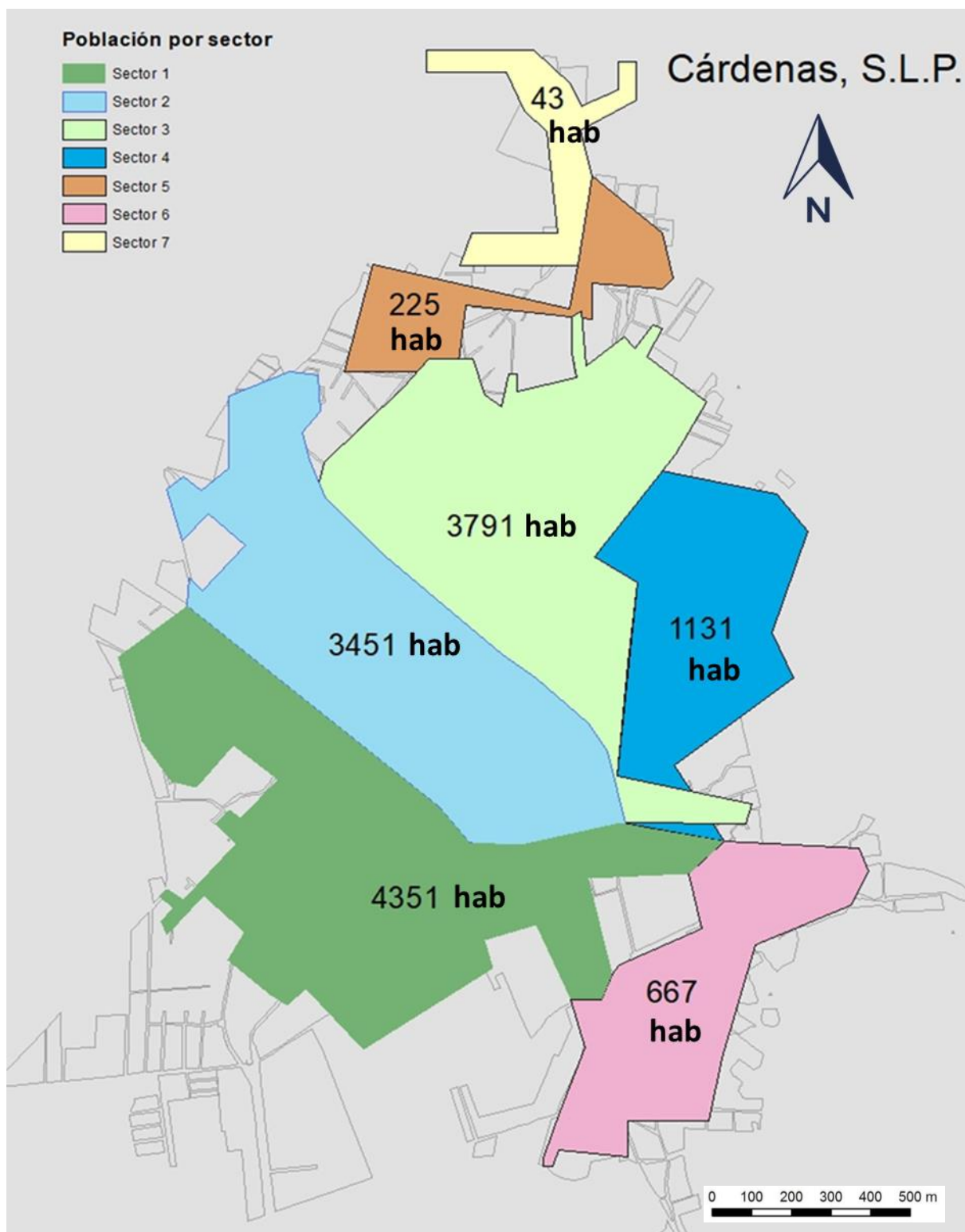


Figura 6. Sectores de la cabecera municipal.

2.12 Problemática

Desde que existen registros históricos (1996 fundación de APASCAR) se cuenta con muy poca información acerca del funcionamiento del sistema.

En el año de 1967, cuando el primer pozo comenzó a operar, la población era de 12,461 habitantes en la cabecera municipal, al año 2020 la población ascendió a 15,341 habitantes lo que conlleva a un aumento en el número de viviendas a las que se les ha buscado brindar el servicio de agua potable bajo las mismas condiciones de operación del proyecto inicial (INEGI, 2020).

Esto ha causado desigualdad en la percepción del servicio en algunos sectores de la población, sobre todo en la zona centro de la cabecera municipal, el cual es el sector más antiguo y de mayor demanda debido a que en esta zona se encuentra la mayor parte del comercio local.

Las primeras líneas de conducción instaladas fueron de asbesto (alrededor del 50%), mismas que continúan funcionando actualmente, sin embargo, este tipo de material ya no es empleado ya que representa un riesgo para la salud además de que se considera que su vida útil ha terminado (Anaya Ortega R., 2018).

Desde sus inicios el sistema de abastecimiento ha recibido poco o nulo mantenimiento, el cual es uno de los principales factores que contribuye a la deficiencia de su funcionamiento y a las fugas que presenta. En el 2019 se buscó el apoyo de SEDESOL para el mantenimiento de los pozos y de la red de distribución sin embargo no se logró concretar ningún proyecto.

El organismo operador no cuenta con un plano actualizado con los componentes y sus características del sistema.

3. Campañas de medición para la obtención de datos hidráulicos y topográficos

Las campañas de medición para la obtención de datos hidráulicos y topográficos en una red de agua potable son fundamentales para garantizar su diseño, operación eficiente y mantenimiento. Estos datos permiten mejorar el funcionamiento de la red, detectar problemas, y diseñar soluciones técnicas que mejoren la calidad del servicio y reduzcan las pérdidas de agua. A continuación, se muestra un diagrama de la metodología empleada (Figura 7).

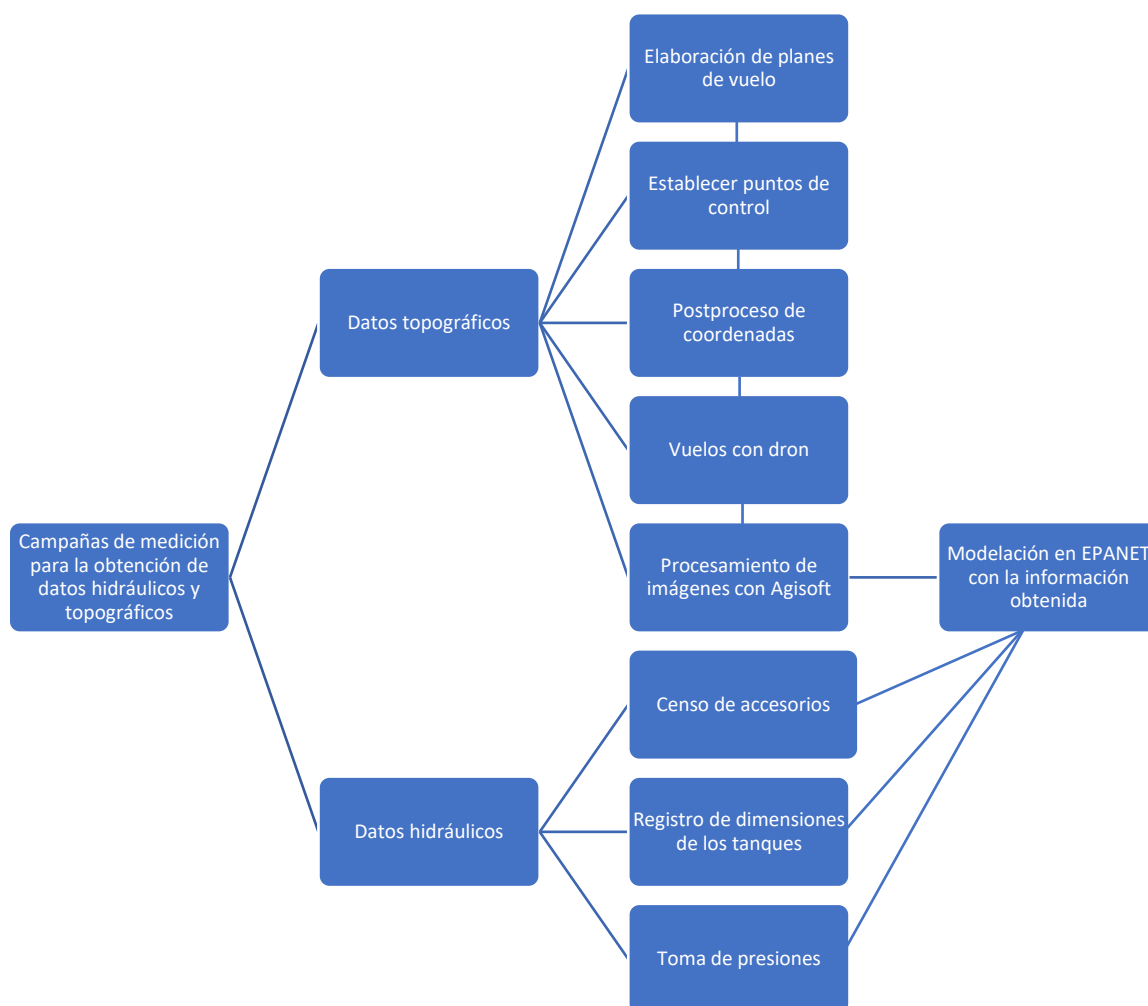


Figura 7. Metodología.

3.1 Campañas de medición para la obtención de datos topográficos

La topografía es uno de los aspectos más importantes en el diseño y análisis de redes de agua potable porque influye directamente en el comportamiento hidráulico del sistema, la eficiencia energética y la distribución uniforme del agua. La topografía define las elevaciones del terreno, las cuales determinan la energía potencial del agua (altura) en cada punto del sistema. En zonas altas se pueden presentar bajas presiones, lo que dificulta el suministro y en zonas bajas, las presiones excesivas pueden dañar tuberías y accesorios. Por eso, el diseño debe equilibrar las presiones en función de las diferencias topográficas (Organización Panamericana de la Salud, 2003).

Los depósitos de almacenamiento (tanques o cisternas) deben situarse en puntos elevados estratégicos para aprovechar la gravedad y reducir el uso de bombeo. Una mala elección topográfica puede generar altos costos energéticos y una distribución ineficiente del caudal (Organización Panamericana de la Salud, 2003).

La pendiente del terreno, derivada de la topografía, permite conocer las rutas naturales de flujo del agua dentro de la red. Esto ayuda a definir la sectorización hidráulica y a prever posibles zonas de estancamiento o baja velocidad del agua (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2012).

El análisis topográfico evita problemas como golpe de ariete, aire atrapado, o vacíos en tuberías al considerar los puntos altos y bajos de la red. Conocer la topografía permite anticipar expansiones futuras y proyectar redes más sostenibles, adaptadas a la morfología del terreno (American Water Works Association, 2019).

3.1.1 Elaboración de planes de vuelo mediante el uso de VANTS en la zona conurbada

La elaboración de planes de vuelo para VANTS (Vehículos Aéreos No Tripulados), también conocidos como drones, es un proceso crucial para garantizar que las operaciones se

realicen de manera segura y eficiente. Antes de elaborar un plan de vuelo, es fundamental definir claramente el objetivo de la misión y la plataforma que se empleará, en este caso se utilizó Dronedeploy (López Jiménez, 2017).

Dronedeploy es una plataforma de mapeo de alta precisión que permite el análisis espacial, la creación de mapas, geocodificación de información, gestión de imágenes, importación y exportación de datos, obtención de imágenes en 3D, uso compartido de mapas, entre otros; con diversas aplicaciones como la agricultura, construcción y topografía, minería, energías renovables, etc. (DroneDeploy, s.f.).

Mediante la plataforma se selecciona el área de operación y se programan las líneas de vuelo a una altura predeterminada de 120 m desde el punto de partida con un VANT modelo Phantom 4 Pro DJI, siguiendo una dirección establecida, asegurándose de que se cubran todas las áreas de interés. En la Figura 8 se puede apreciar la interfaz de la aplicación.

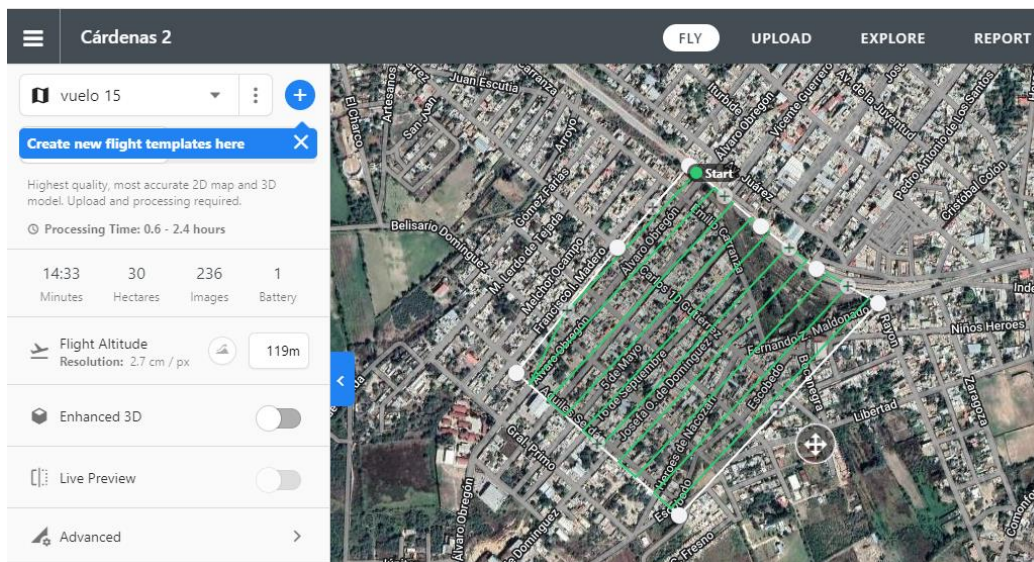


Figura 8. Interfaz de la aplicación DroneDeploy.

La aplicación DroneDeploy automatiza el vuelo en avión teledirigido y también facilita la captura de imágenes aéreas. La plataforma procesa las imágenes de los vehículos aéreos no tripulados utilizando la visión por ordenador, convirtiéndolas en mapas en 2D, 3D, modelos y más.

Se realizaron 26 vuelos con los cuales se cubrió el total la zona conurbada de la cabecera municipal (680 Ha), algunos de los planes de vuelo se muestran las siguientes Figuras 9 y 10.



34



Figura 10. Plan de vuelo 2.

3.1.2 Localización de vértice geodésico para establecer puntos de control topográfico

Un vértice geodésico es un punto de referencia cuya posición ha sido medida con alta precisión usando técnicas geodésicas. Estos puntos se utilizan para la realización de trabajos de topografía, cartografía y geodesia, proporcionando una base precisa para la medición y el mapeo de grandes áreas. Estos puntos están ubicados en lugares geográficamente estables y permanentes para garantizar que las mediciones sean consistentes a lo largo del tiempo (Dueñas, 2019).

Para la localización del vértice se inicia la configuración del equipo GPS marca EMLID Reach RS2 de 3 bandas con sistema RTK, montando en tripié y centrado el equipo en la marca geodésica de INEGI, esperando se enlace el equipo con la mayor constelación de satélites disponibles.

El tiempo de espera fue alrededor de 10 minutos, se ubicó un punto de liga con coordenadas obtenidas por equipo RTK para realizar el traslado del vértice al domicilio ubicado en calle Morelos # 30 del mismo municipio, dicho vértice se colocó en varilla de acero empotrada en concreto en la azotea de la segunda planta, como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Equipo GPS.

El lugar se eligió por su ubicación en el centro de la cabecera municipal tomando como referencia 1.8 km a la redonda para realizar las mediciones correspondientes a la red de agua potable que se encuentra la cabecera del municipio.

Se localizó el vértice geodésico de INEGI # V24445 de la RED GEODESICA NACIONAL PASIVA con coordenadas latitud $22^{\circ}0'37.82994''N$, longitud $99^{\circ}38'18.58285''E$, altura elipsoidal 1248.77400 m, como referencia empotrado en la banqueta a las afueras de la Institución Educativa CBTIS 185.

3.1.3 Establecer puntos de control topográfico mediante un equipo GPS (GNSS)

Los puntos de control topográfico son ubicaciones específicas cuyas coordenadas y elevaciones se conocen con precisión. Estos puntos son fundamentales en la topografía y la

cartografía para asegurar la precisión de las mediciones y los mapas. La precisión de las mediciones puede requerir el uso de técnicas avanzadas y equipos de alta precisión como estaciones totales, GPS y niveladoras para medir las coordenadas y elevaciones de los puntos (Dueñas, 2019).

Los VANTs equipados con tecnología de georreferenciación pueden capturar datos topográficos y utilizar puntos de control para mejorar la precisión.

Los puntos de control son establecidos estratégicamente sobre el terreno para obtener sus coordenadas X, Y Z de precisión en el espacio y fijarlos dentro del post procesamiento de la fotogrametría. Al realizarse un levantamiento a detalle de una zona muy extensa, es recomendable cubrir el área con una red de triangulación, es decir, una red de puntos “fijos” en los que el o los vuelos se puedan apoyar. La triangulación consiste en un esqueleto básico compuesto por triángulos, es la base del levantamiento para la referenciación correcta de la proyección (Píriz, s.f.).

Básicamente, consiste en ubicar en un sitio elevado y despejado un centro de marca visible en un sitio fijo e inmóvil donde se deberá colocar, centrar y nivelar el trípode correspondiente a la base de la antena del GPS, se anota la altura del equipo y se deja fijo durante el tiempo que dure el levantamiento topográfico para conocer la coordenada (x,y,z) con precisión milimétrica, estos puntos se marcarán con pintura visible para poder realizar la georreferenciación de las imágenes captadas por la cámara del VANT, como se muestra en la Figura 12.



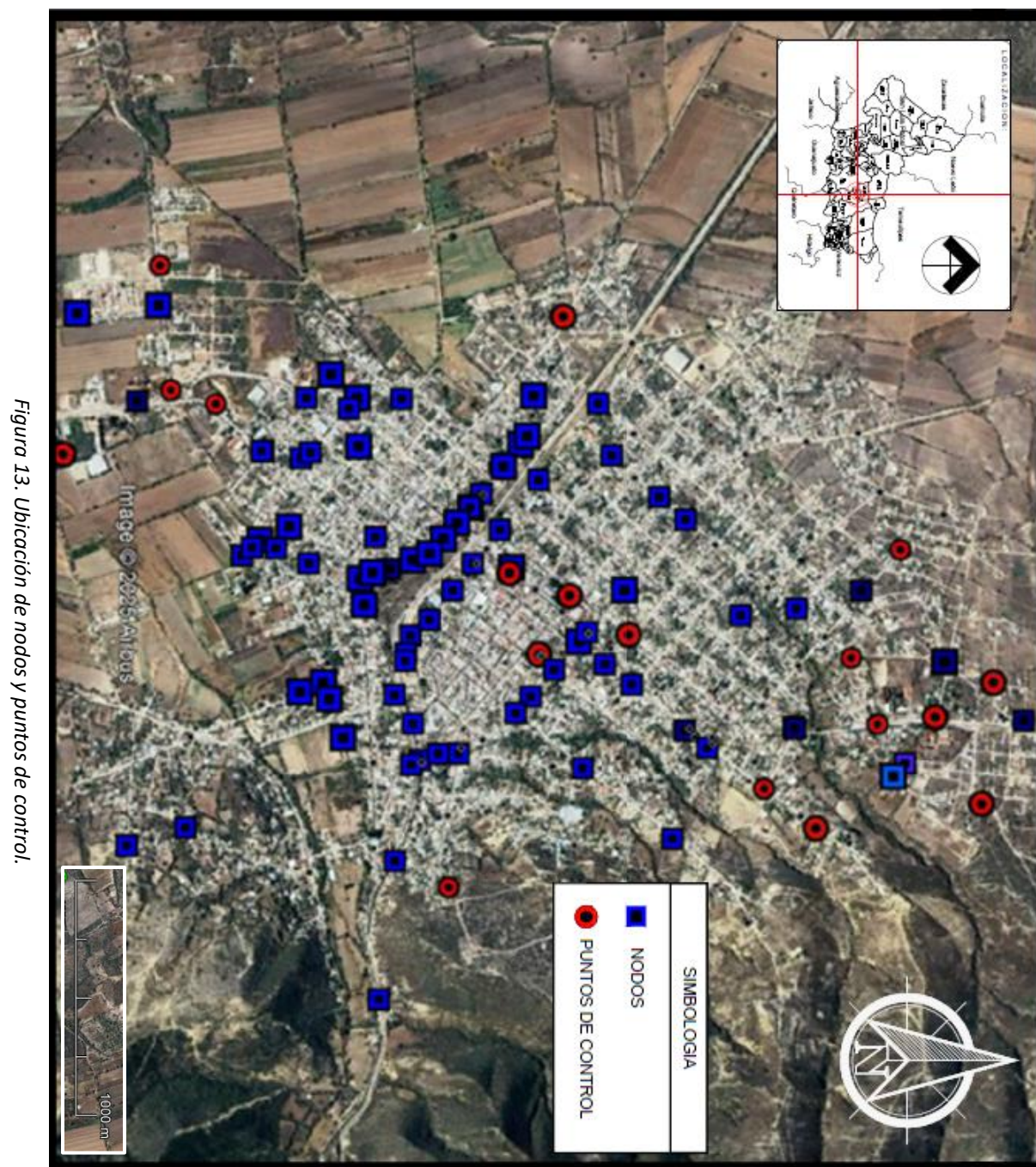
Figura 12. Puntos de control.

Las coordenadas de los puntos de control empleados para realizar un vuelo se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Puntos de control.

ID	Este (Metro)	Norte (Metro)	Elevación (Metro)
16 Sep/Carlos D Gtz	433510.349	2432513.844	1205.453
Bocanegra/Arista	433757.771	2432352.032	1201.053
Escobedo/Suarez	433594.085	2432302.557	1198.054
ISLP	292138.016	2450168.646	1922.751
H. Nacozari/B. Domínguez	433474.978	2432238.205	1195.286
Pozo 1	432166.434	2431010.215	1173.984
Pozo 2	432543.680	2431170.209	1174.559
Pozo 3	432649.123	2431864.647	1177.750
Válvula 1	433111.215	2431359.696	1178.678

En la Figura 13 se muestra la ubicación de los puntos de control y los nodos.



3.1.4 Postproceso de coordenadas

La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) es un conjunto de estaciones de operación permanente que registran los datos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), distribuidas estratégicamente en el territorio nacional, que materializan el Sistema Geodésico Nacional en su vertiente horizontal, y proporcionan servicios de posicionamiento geodésico a los usuarios mediante datos en línea y coordenadas de la más alta exactitud posicional en el país. Las estaciones proporcionan datos de posicionamiento en tiempo real, permitiendo la realización de mediciones precisas y actualizaciones continuas. La RGNA ofrece datos de alta precisión para aplicaciones que requieren una exactitud milimétrica en la determinación de coordenadas y elevaciones (INEGI, Geografía y medio ambiente, 2008).

Para la descarga de datos de posicionamiento de la red activa se requiere conocer la hora en la que fue realizado el levantamiento y la zona horaria en la que se encuentra el lugar de estudio. Todos los sistemas GNSS existentes procuran mantener sus escalas de tiempo de sistema muy cercanas al UTC (Tiempo Universal Coordinado), que es el sistema oficial de tiempo internacionalmente adoptado. Las zonas horarias están definidas con relación al UTC y están centradas a las fronteras y a los meridianos con una longitud que es un múltiplo de 15°, estas zonas parten del meridiano de Greenwich (GNSS Solutions , 2012).

La estación base para la corrección de coordenadas de cada punto tomado es la estación ISLP San Luis Potosí, S.L.P. Esta se encuentra sobre el edificio T de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, por la zona en la que se encuentra con el meridiano cero, la estación inicia su día a las 18:00 horas en horario de invierno y a las 19:00 horas en verano, tomándose esta como la hora primera del día.

Una vez ubicada la zona horaria se entra a la página de INEGI a la Red Geodésica Nacional Activa y se descargan los archivos RINEX que serán empleados en el post-procesamiento de datos con el software GNSS solutions.

GNSS solutions es un programa de cómputo de post – procesamiento de datos GPS, GLONASS y SBAS. Este incluye herramientas avanzadas de detección de errores y análisis de

calidad para asegurar resultados precisos y confiables. La interfaz presenta información de los levantamientos en forma gráfica y tabular. Conforme se lleva a cabo el post - proceso, GNSS Solutions actualiza continuamente una visualización gráfica para proporcionar una representación fiel del campo de trabajo (GNSS Solutions , 2012).

El programa GNSS Solutions permite procesar las coordenadas de los puntos levantados con el GPS Emlid Reach. La información se ingresa al programa para procesar los datos, una vez ajustados los puntos se mostrará la corrección con la estación base, los archivos creados se guardan automáticamente dentro del equipo en una carpeta generada por el mismo programa.

3.1.5 Vuelos fotogramétricos con VANT

Una vez programados los vuelos en la aplicación Dronedeploy, se debe trasladar a la zona de estudio y ubicar el área donde se llevará a cabo el vuelo. Se debe elegir una zona despejada, con ausencia de maleza, árboles, cables de conducción eléctrica y todos aquellos obstáculos que pudieran afectar el manejo del equipo, preferentemente se parte de una superficie plana. Posteriormente se arma el equipo (VANT marca DJI modelo Phantom 4 PRO (Figura 14), esto consiste básicamente en colocar las 4 hélices helicoidales en posición correcta y verificar que la batería tenga carga completa para garantizar que se complete el vuelo, el cual tiene una duración de aproximadamente 14-15 minutos sin riesgo para el equipo.



Figura 14. Dron DJI modelo Phantom 4 PRO.

Antes de comenzar la operación del VANT es necesario verificar la instalación de una memoria microSD donde se almacenarán todas las fotografías tomadas. Una vez realizado lo anterior se conectará y encenderá el control de mando del equipo a un smartphone o tableta para la visualización del vuelo en tiempo real y la configuración de parámetros como: la altura de vuelo, tiempo estimado, monitoreo de la carga de la batería y GPS para conocer su posición en cada una de las líneas de vuelo.

Previo al despegue se debe realizar una revisión completa del VANT, incluyendo el estado de las baterías, verificar las condiciones meteorológicas y considerar el impacto de la temperatura en el rendimiento del VANT, posteriormente se inicia el vuelo a través de la aplicación comenzando con la elevación del VANT a la altura asignada (120 metros) y se autodirige al punto de partida de las líneas de vuelo siguiendo el mismo orden para así tomar las fotografías de manera automática.

Se espera a que termine el plan de vuelo y el VANT regresa de forma automática al punto de donde partió, este realiza un descenso paulatino y aterriza de manera segura. Una vez que el equipo toca tierra se procede al desarmado para almacenarlo en su respectivo estuche y trasladarlo de manera segura al siguiente sitio. Este procedimiento se realizó para los 26 vuelos que se distribuyeron en varias visitas de campañas de medición a la zona de estudio.

A continuación (Figura 15), se muestran algunas de las fotografías que se obtuvieron de cada vuelo, en este caso corresponden al vuelo 5. En cada vuelo se toman alrededor de 180 fotografías.



Figura 15. Vuelo 5.

3.1.6 Procesamiento de imágenes mediante Agisoft Metashape para la obtención del relieve y ortomosaico

La información topográfica es creada a partir del análisis y procesamiento de las fotografías tomadas por el VANT, dentro de un programa de cómputo fotogramétrico (en este caso se empleó Agisoft Metashape).

El programa de cómputo Agisoft Metashape es un programa autónomo que permite realizar el proceso fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D. Es muy utilizado en aplicaciones SIG, documentación de patrimonio cultural y producción de efectos visuales, así como para mediciones indirectas de objetos de diversas escalas.

Agisoft está adecuado tanto para fotogrametría aérea como terrestre, anteriormente el programa era conocido como Agisoft Photoscan. Este cuenta con herramientas para la generación de un mallado 2D/3D, y clasificaciones de los puntos para la reconstrucción de la geometría, por lo que, mediante el reconocimiento de objetos del software es posible filtrar edificios, árboles, vehículos, entre otros (Granados Zafra, s.f.).

El equipo de cómputo empleado requiere un software con procesador Intel (R) Core (TM) i7-6700 CPU y RAM 32GB como mínimo para llevar a cabo el postproceso de imágenes de cada vuelo. El procedimiento que se siguió dentro del programa de cómputo consta de los siguientes pasos:

- Cargar las imágenes obtenidas en los vuelos en el programa de cómputo.
- Asignar el sistema de coordenadas a las imágenes.
- Agregar el archivo de los puntos de control en el programa de cómputo.
- Orientar las imágenes.
- Colocar los puntos de control dentro de cada imagen.
- Fijar las partes móviles
- Corrección de error.
- Crear la nube de puntos densa.
- Clasificar los puntos del terreno.
- Crear la malla a partir de la nube de puntos densa.
- Suavizar la malla.
- Crear el modelo digital de elevación.
- Generar las curvas de nivel.
- Elaborar el ortomosaico.

El resultado fue la obtención de la topografía de la zona de estudio y se empleó para obtener pendientes de cada nodo y las longitudes de las tuberías. Las fotografías obtenidas de cada vuelo se procesaron con el programa de cómputo Agisoft, en las siguientes Figuras (16 a 24) muestran los pasos realizados. Cada imagen muestra un paso realizado para completar el proceso por vuelo.

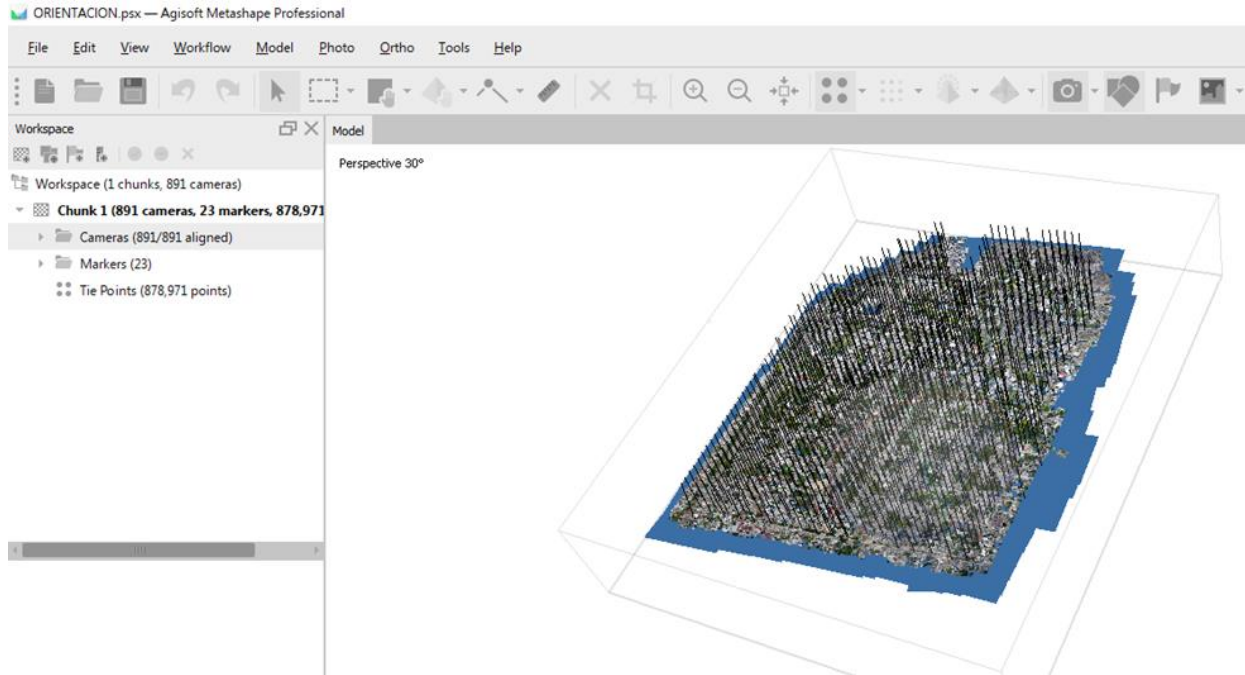


Figura 16. Orientación de imágenes.

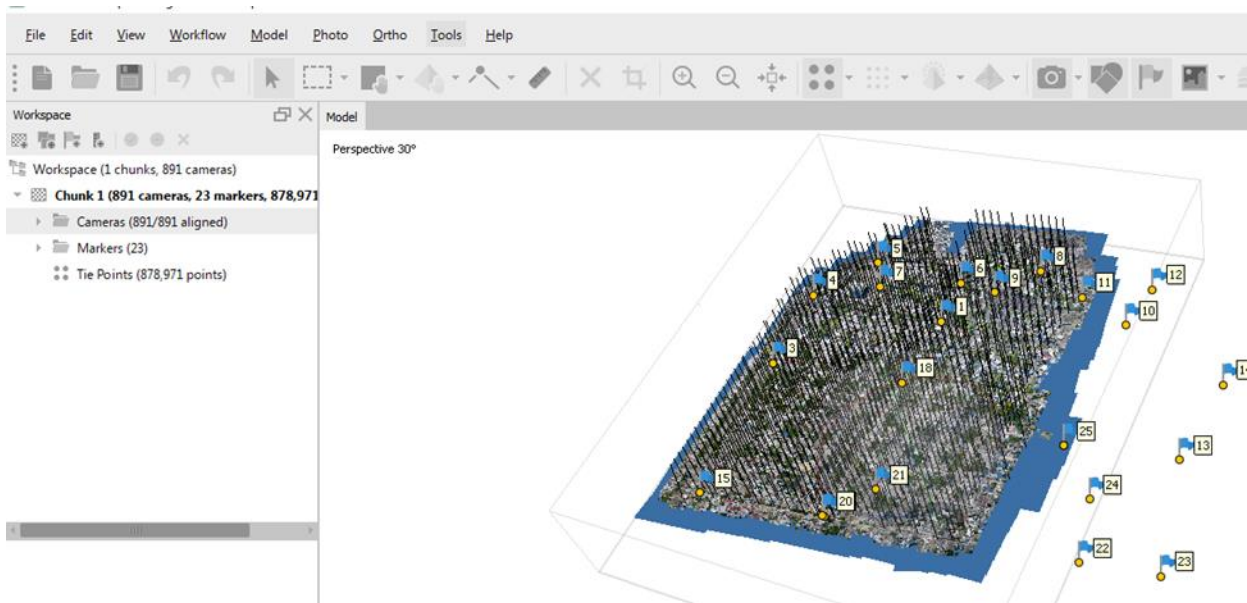


Figura 17. Puntos de control.

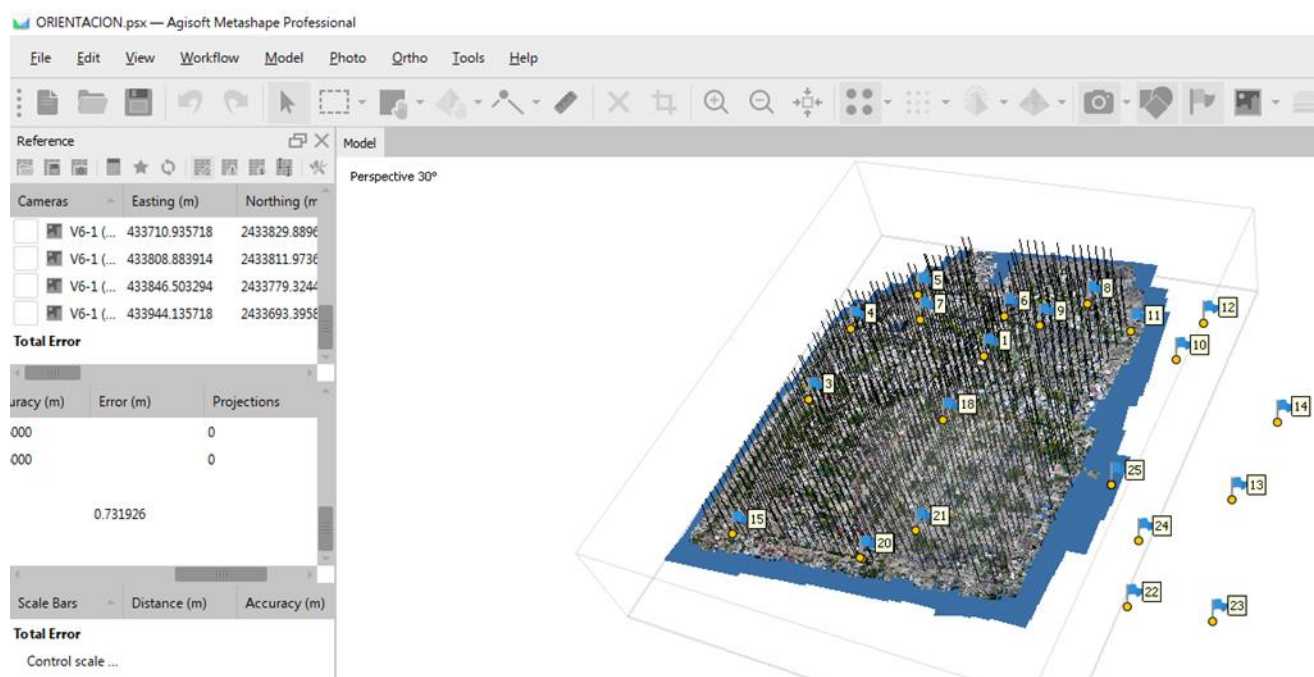


Figura 18. Corrección del error.

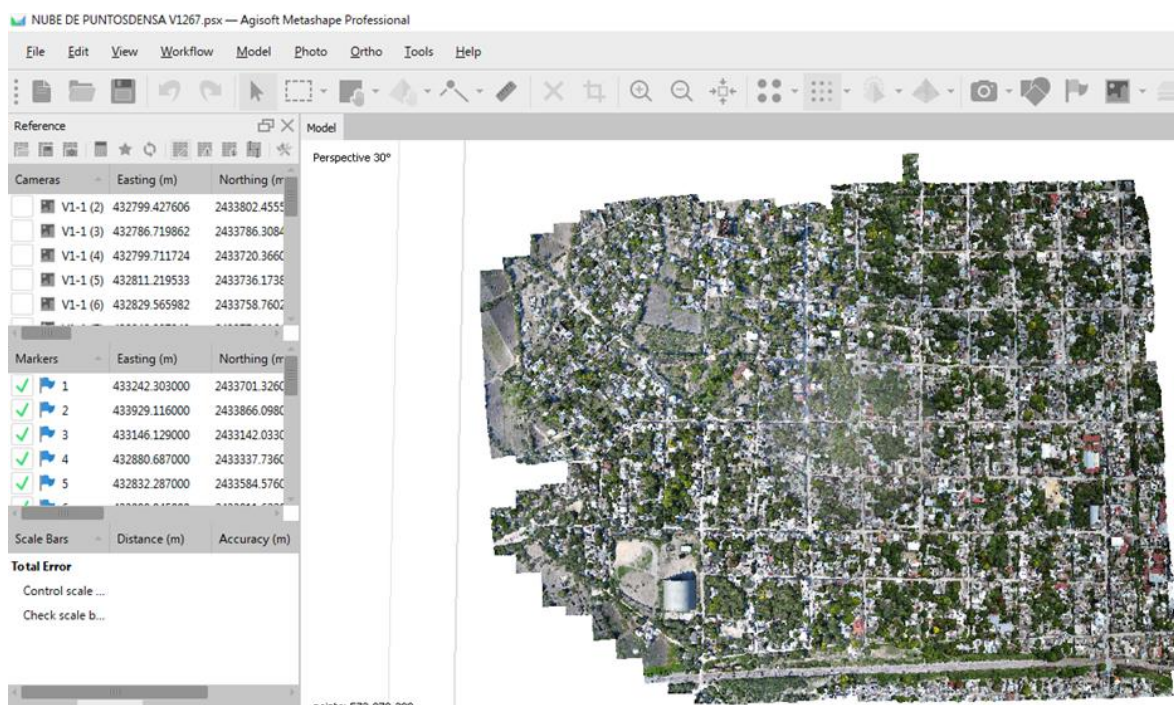


Figura 19. Nube de puntos densa.



Figura 20. Nube de puntos densa 2.

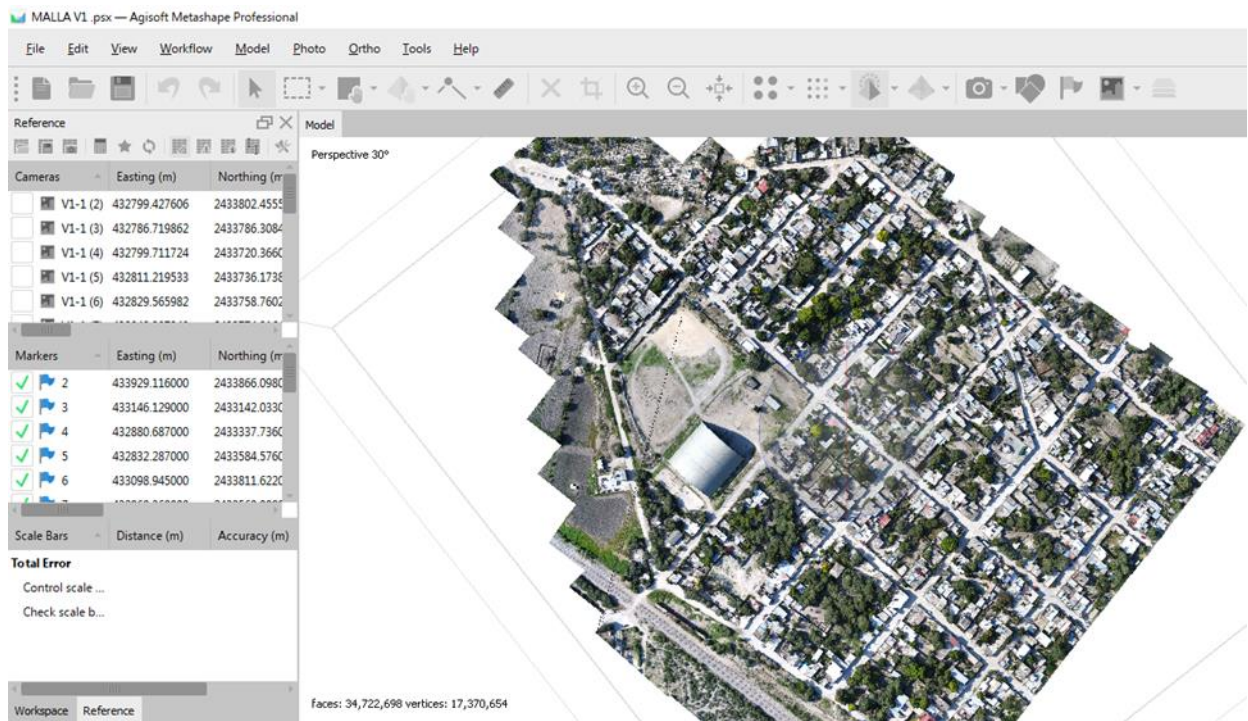


Figura 21. Malla.

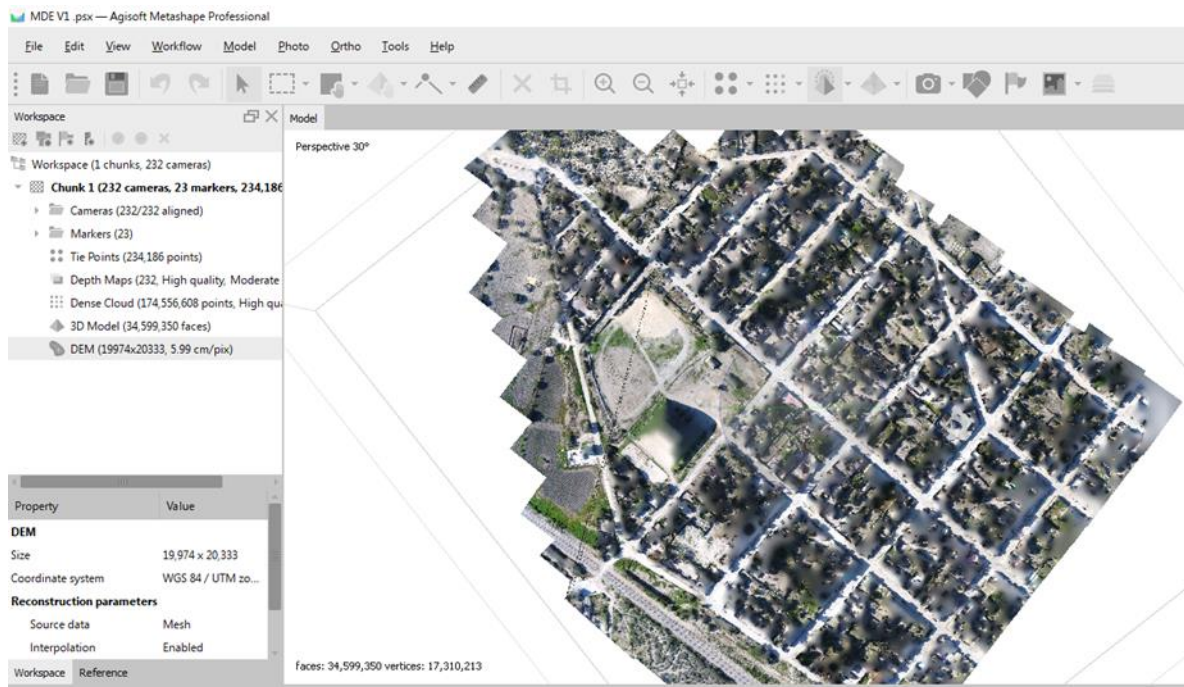


Figura 22. Modelo digital de elevación.

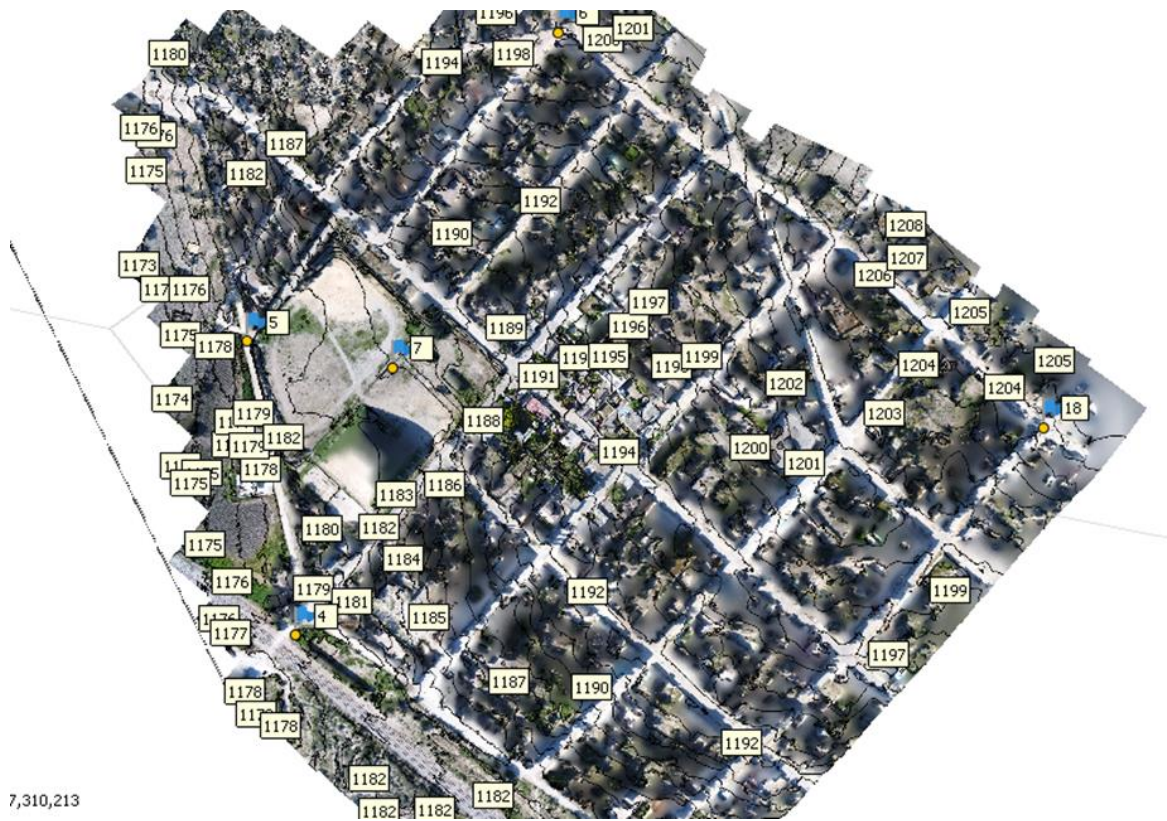


Figura 23. Curvas de nivel.

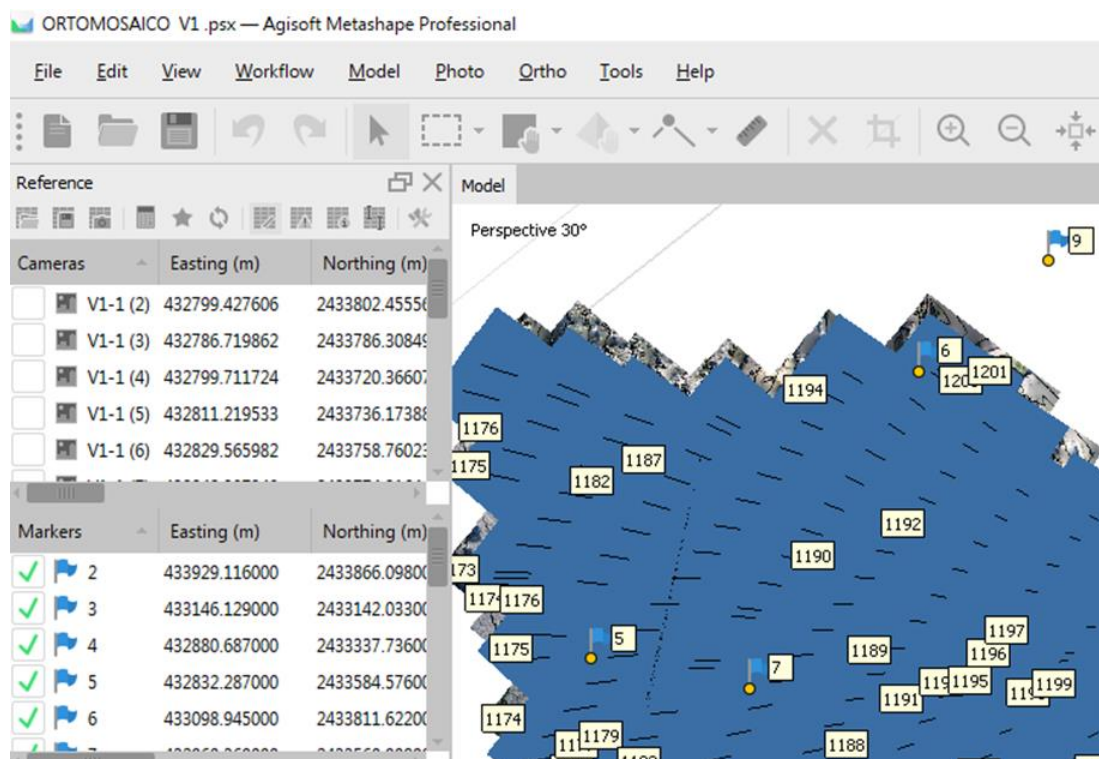


Figura 24. Ortomosaico.

3.2 Campañas de medición para la obtención de datos hidráulicos

3.2.1 Censo de infraestructura hidráulica

Un censo de infraestructura hidráulica es un levantamiento sistemático de información que permite identificar, registrar y analizar las características, el estado y la funcionalidad de las instalaciones y estructuras relacionadas con la gestión del agua. Esto incluye una amplia gama de estructuras y equipos utilizados para captar, almacenar, tratar, distribuir y controlar el agua en diversos contextos, como el abastecimiento de agua potable, riego agrícola, drenaje y la prevención de inundaciones. Este proceso permite evaluar la capacidad, funcionalidad y condiciones de la infraestructura, facilita la toma de decisiones para inversiones, mantenimiento, o expansión de la red hidráulica y asegura que las

instalaciones cumplen con las normativas locales, nacionales e internacionales. (Villareal, 2020).

Mediante varias visitas a campo se identificaron diámetros de tuberías, así como sus longitudes, material de fabricación, presiones y fuentes de abastecimiento.

Se realizaron recorridos en auto (barrido) por las calles de la zona conurbada y se identifica en cada intersección de calle la existencia de tapas de control de válvulas (nodo). Para obtener las coordenadas se emplea una tableta colectora y una baliza con antena GPS marca Emlid Reach tipo Rover; el proceso consistió en nivelar la baliza y dejarla por un tiempo estimado de 3 minutos en el punto deseado a conocer, mediante este procedimiento se obtuvo su ubicación. Posteriormente, se abrió la tapa y se registra diámetro, tipo de tubería, tipo de válvula, etc. Los datos obtenidos fueron registrados para ser empleados posteriormente.

Se registraron diámetros de 6 pulgadas en las principales líneas de conducción, disminuye a 4, 2.5, 2 en la mayor parte de la zona centro y $\frac{3}{4}$ de pulgada en la periferia. Como se mencionó anteriormente, la red de distribución se compone de casi 50 km de tubería, el 50 % de estas son de asbesto y tienen una antigüedad de más de 50 años, el material del resto de la tubería es PVC, polietileno de alta densidad (PAD) y acero. En la Figura 25 se muestran algunos ejemplos de las tuberías censadas.



Figura 25. Censo de accesorios.

3.2.2. Ubicación de tanques de almacenamiento.

Los tanques de almacenamiento de agua potable son esenciales para garantizar un suministro continuo y seguro de agua para consumo humano. Estos tanques pueden variar en tamaño y material, dependiendo de las necesidades específicas y las condiciones de instalación (American Water Works Association, 2013).

Los tanques poseen un volumen determinado de almacenamiento de agua, el cual se compone de un volumen para regular, otro para almacenar (usado en caso de falla de la fuente o emergencias) y uno adicional para el combate contra incendios. Lo más común es emplear el tanque para regular (tanque de regulación), minimizando los volúmenes para almacenamiento y combate contra incendios. La capacidad del almacenamiento es obtenida combinando razonablemente los tres propósitos anteriores.

En este caso, se tomaron los puntos de los tanques de almacenamiento con la ayuda del GPS y se ubicaron las 4 esquinas de su construcción para conocer sus dimensiones. Su ubicación se puede apreciar en la Figura 26.

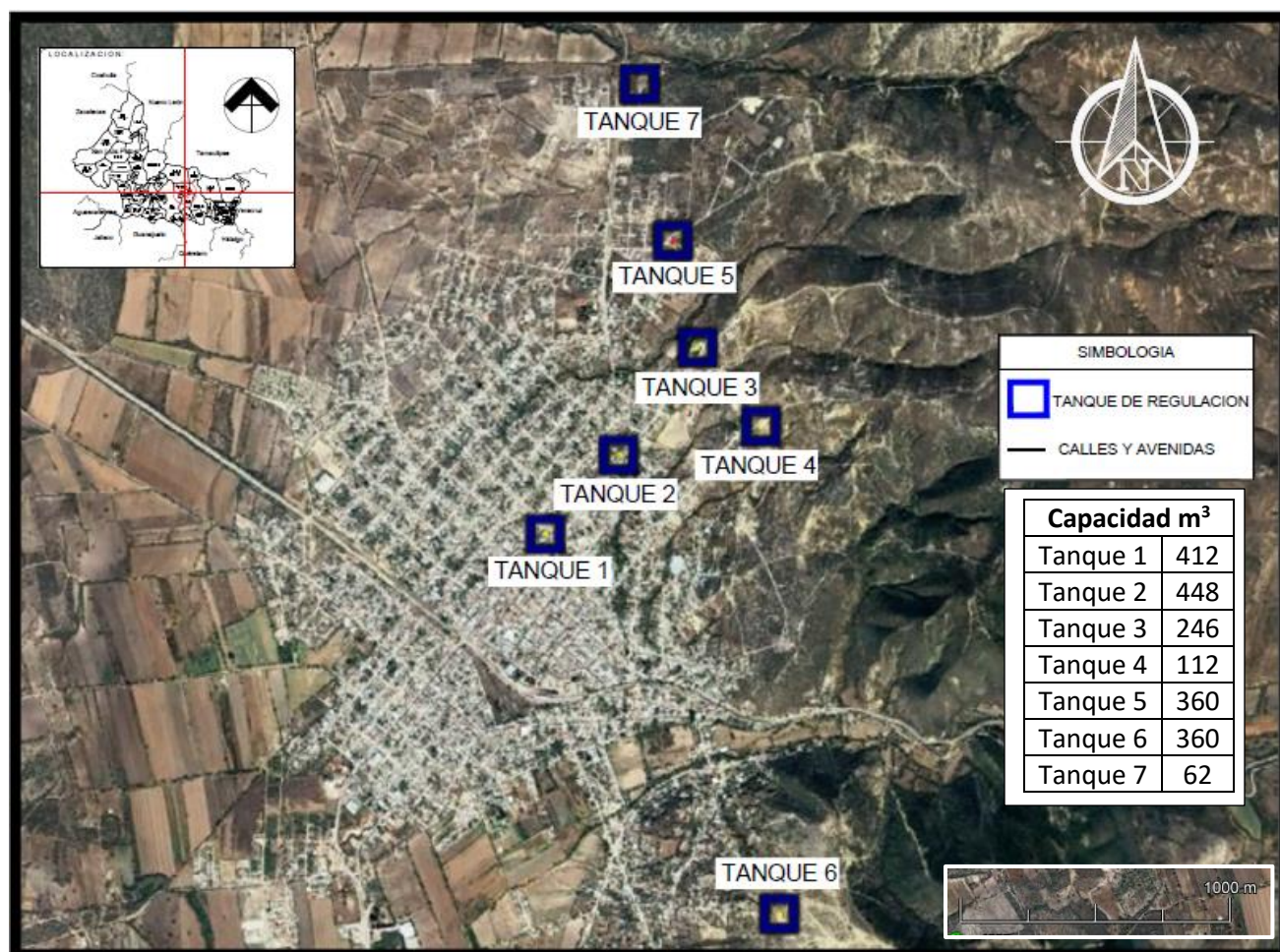


Figura 26. Ubicación de tanques de almacenamiento.

Las características de los tanques de almacenamiento se muestran a continuación.

Las condiciones actuales del Tanque 1 se aprecian de la Figura 27 y sus dimensiones en la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones Tanque 1

Tanque de almacenamiento 1		
Largo	12.6	m
Ancho	12.6	m
Alto	2.60	m
Volumen	412.77	m ³



Figura 27. Tanque 1.

En la Figura 28 se muestra el Tanque 2 y en la Tabla 4 sus dimensiones.

Tabla 4. Dimensiones Tanque 2.

Tanque de almacenamiento 2		
Largo	13	m
Ancho	13	m
Alto	2.65	m
Volumen	447.85	m ³



Figura 28. Tanque 2.

En la Figura 29 se observan las condiciones del Tanque 3 y en la Tabla 5 sus dimensiones.

Tabla 5. Dimensiones Tanque 3

Tanque de almacenamiento 3		
Largo	12.8	m
Ancho	12.8	m
Alto	1.50	m
Elevación	1265.55	msnm
Volumen	245.76	m ³



Figura 29. Tanque 3.

En la Figura 30 y en la Tabla 4 se pueden apreciar las características del Tanque 4.

Tabla 6. Dimensiones Tanque 4.

Tanque de almacenamiento 4		
Largo	6.7	m
Ancho	6.7	m
Alto	2.5	m
Elevación	1284.06	msnm
Volumen	112.225	m ³



Figura 30. Tanque 4.

Las dimensiones del Tanque 5 se muestran en la Tabla 7 y en la Figura 31 se muestra una fotografía de su condición actual.

Tabla 7. Dimensiones Tanque 5.

Tanque de almacenamiento 5		
Largo	12	m
Ancho	12	m
Alto	2.5	m
Elevación	1270.77	msnm
Volumen	360	m ³



Figura 31. Tanque 5.

En la Tabla 8 se registraron las dimensiones del Tanque 6, en la Figura 32 se observa el Tanque.

Tabla 8. Dimensiones Tanque 6.

Tanque de almacenamiento 6		
Largo	12	m
Ancho	12	m
Alto	2.5	m
Elevación	1267.79	msnm
Volumen	360	m ³



Figura 32. Tanque 6.

En la Tabla 9 se registraron los datos para el Tanque 7 y en la Figura 33 se muestra su condición actual.

Tabla 9. Dimensiones Tanque 7

Tanque de almacenamiento 7		
Largo	5	m
Ancho	5	m
Alto	2.5	m
Elevación	1257.425	msnm
Volumen	62.5	m ³



Figura 33. Tanque 7.

3.2.3 Toma de presiones

La carga hidráulica que actúa en un punto de una tubería se define por la diferencia entre la cota piezométrica en este punto y la cota del centro de la tubería. En redes de distribución es común manejar las presiones con relación al nivel de la calle en vez de referirlas al centro del tubo. En este caso se les llama cargas disponibles o libres y se calculan para los cruceros de las tuberías. Entender cómo se define y calcula la presión hidráulica es crucial para el diseño y análisis de sistemas de tuberías y otros sistemas hidráulicos (SIAPA , 2014).

Usar la carga hidráulica para calibrar una red de agua potable es esencial porque es uno de los indicadores más directos del comportamiento hidráulico real de la red ya que muestra cómo está funcionando realmente en un momento específico. Si la presión es baja, puede haber problemas de demanda, obstrucciones, fugas o mal dimensionamiento. Los modelos (como los de EPANET) calculan presiones teóricas basadas en datos como longitudes de tuberías, diámetros, rugosidad, consumos, etc. Al comparar estas presiones simuladas con las medidas, puedes saber si el modelo está bien ajustado o necesita correcciones. Diferencias grandes entre la presión real y la simulada pueden indicar errores como: válvulas cerradas que deberían estar abiertas, pérdidas de carga no contempladas, consumos mal estimados y fugas o conexiones sin registro. Ajustar el modelo para que las presiones simuladas se alineen con las medidas mejora su precisión predictiva, lo que es crucial para: diseñar nuevas ampliaciones, planificar sectores de presión, evaluar eficiencia energética en bombeo (Rossman, 2000).

Es común manejar diferentes presiones por lo tanto se identificarán con el uso de un manómetro (Figura 34) las presiones en las tuberías secundarias y tomas domiciliarias zonificando la red de distribución.



Figura 34. Manómetro empleado para toma de presiones.

4. Modelación numérica de la red de agua potable.

En los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas para resolver algunos de los problemas que se presentan en los sistemas de distribución de agua. Una de ellas ha despertado interés recientemente por su enorme importancia: la tecnología de los modelos de simulación matemática o modelación numérica. El uso de modelos matemáticos para el análisis de sistemas de distribución de agua potable fue propuesto por vez primera por Hardy Cross en 1936. Desde entonces, los métodos de solución empleados en los modelos han evolucionado del análisis del caudal en redes desarrollado por él, hecho a mano, hasta el desarrollo y extensión de modelos hidráulicos de redes para computadoras en las décadas de los setenta y ochenta, y la posterior aparición de los modelos de calidad del agua en redes de distribución, a finales de la década de los ochenta. (CONAGUA, 2019).

La modelación numérica de una red de agua potable es una herramienta para el diseño, análisis y gestión de sistemas de distribución de agua. Esta técnica permite simular el comportamiento de la red bajo diferentes condiciones operativas y escenarios de demanda, facilitando la toma de decisiones informadas y la optimización del sistema.

A continuación, se describen los pasos principales y las herramientas utilizadas en la modelación numérica de redes de agua potable (EPA United States Environmental Protection Agency, 2024) (Zivkovic & Jovicic, 2021).

1. Recopilación de Datos:

- Topografía: Información sobre la elevación y el terreno.
- Infraestructura: Datos sobre tuberías, válvulas, bombas, tanques y otros componentes del sistema.
- Demanda de Agua: Datos históricos y proyectados sobre el consumo de agua.

2. Desarrollo del Modelo:

- Software: Utilización de programas especializados, en este caso se eligió EPANET.
- Red de Tuberías: Creación de un modelo digital que represente la red de distribución, incluyendo nodos, enlaces, y componentes hidráulicos.
- Parámetros: Asignación de parámetros como diámetros de tubería, coeficientes de fricción y alturas de tanques.

3. Calibración:

- Comparación del modelo con datos reales de operación para ajustar los parámetros y asegurar la precisión del modelo.

4. Simulación:

- Escenarios Operativos: Simulación de diferentes condiciones de operación, como variaciones en la demanda, fallos en componentes, y cambios en la presión.

- Análisis de Resultados: Evaluación de parámetros clave como presiones, velocidades de flujo, y calidad del agua.

5. Optimización y Toma de Decisiones:

- Identificación de problemas.
- Planificación de mejoras.
- Evaluación de estrategias de operación y mantenimiento.

En el capítulo 3 se realizó la recolección de datos, a continuación, se describirán los siguientes pasos.

4.1 Población

La población es uno de los factores más importantes en el diseño y mantenimiento de una red de distribución de agua potable, ya que de ella depende directamente la demanda de agua que el sistema deberá satisfacer. El caudal de diseño se calcula generalmente con base en la población y un consumo per cápita. Se debe considerar el crecimiento futuro (proyección a 20, 25 o 30 años) para que la red no quede subdimensionada. La población no se distribuye uniformemente, por lo tanto, es importante identificar: zonas de alta densidad, zonas industriales y comerciales y zonas rurales o de baja demanda. Esto afecta el diámetro de tuberías, ubicación de válvulas, tanques, etc. El tamaño de la población también influye en el número de tanques de almacenamiento, la capacidad de bombeo y la necesidad de válvulas reguladoras y estaciones de bombeo. La población no solo define cuánto y dónde se usa el agua, sino también cómo se mantiene la red. Afecta la planificación, la ejecución y el control del mantenimiento para asegurar un servicio continuo, seguro y de calidad (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua , 2015).

4.1.1 Población de proyecto para el año 1966

La población de un proyecto en el contexto de redes de agua potable, nos referimos a la cantidad de personas que serán atendidas o beneficiadas por el sistema, tanto en el presente como a futuro. Este dato es fundamental para dimensionar correctamente toda la infraestructura. A continuación, se muestran la tabla con los datos que se registraron en 1966 (Tabla 10).

Tabla 10. Datos del proyecto de 1996.

Datos año 1966		
Población	12461	hab
Población de proyecto	20,000	hab
Dotación	200	l/h/d
Gasto medio	46.3	lps
Gasto máximo diario	55.6	lps
Gasto máximo horario	83.4	lps
CVD	1.2	
CVH	1.5	

Posteriormente, se realizaron los cálculos necesarios para conocer el incremento de la población y como modificarían estos valores los parámetros los resultados se muestran en las Tablas 11 y 12.

Tabla 11. Incremento de la población.

Periodo	Año	Habitantes	Incremento	Años	Incremento/año	% de Incremento
0	1990	14582	0	0	0	0
1	1995	14117	-465	5	-93	-3.188
2	2000	14738	621	5	124.2	4.398
3	2005	14458	-280	5	-56	-1.899
4	2010	15469	1011	5	202.2	6.992
5	2020	15341	-128	10	-12.8	-0.827
				Σ	164.6	5.475

Tabla 12. Parámetros calculados al 2020.

Incremento anual	32.92	
% de incremento anual	0.183	
Dotación	200	l/h/D
Población de proyecto	17085.76	
Q medio	39.551	
Gasto máximo diario	55.371	
Gasto máximo horario	61.304	
Gasto específico	0.00122608	L/s/m

4.2 Elaboración del modelo digital de la red de distribución.

La red de agua potable se trazó en Google Earth. Google Earth es un sistema de información geográfica que permite visualizar múltiple cartografía, basado en imágenes satelitales y además permite la creación de entidades de puntos líneas y polígonos, contando también con la posibilidad de crear mapas (Google Earth, 2025). Para transferir el archivo de Google Earth a EPANET, es necesario emplear varios programas. En primer lugar el archivo se exporta a Global Mapper, que es una aplicación de sistema de información geográfica (SIG) potente y asequible que combina una gama completa de soluciones de software para el procesamiento de datos espaciales y proporciona acceso a una serie de formatos utilizados en el mundo del CAD, SIG y la ingeniería (GeoIl Energy International, s.f.), en este paso se debe seleccionar las coordenadas geográficas y la zona correcta, el archivo se guardará en formato DWG y se podrá trabajar en AutoCAD. El siguiente paso es exportar el archivo de AutoCAD a EpaCAD, EpaCAD es un programa gratuito que permite convertir de forma sencilla un fichero que contenga una red de AutoCAD, en un fichero interpretable por EPANET (software gratuito más extendido para la simulación de redes hidráulicas a presión). En este proceso, EpaCAD es capaz de reconocer de forma automática las principales propiedades de los elementos, facilitando en gran medida el trabajo necesario para generar

una red (Universidad Politécnica de Valencia, 2022), EpaCAD guarda el archivo en un formato compatible con EPANET, a continuación, el archivo se puede abrir en EPANET.

La red se trazó por sectores, en la Figura 35 se muestra el sector 1 en EPANET.

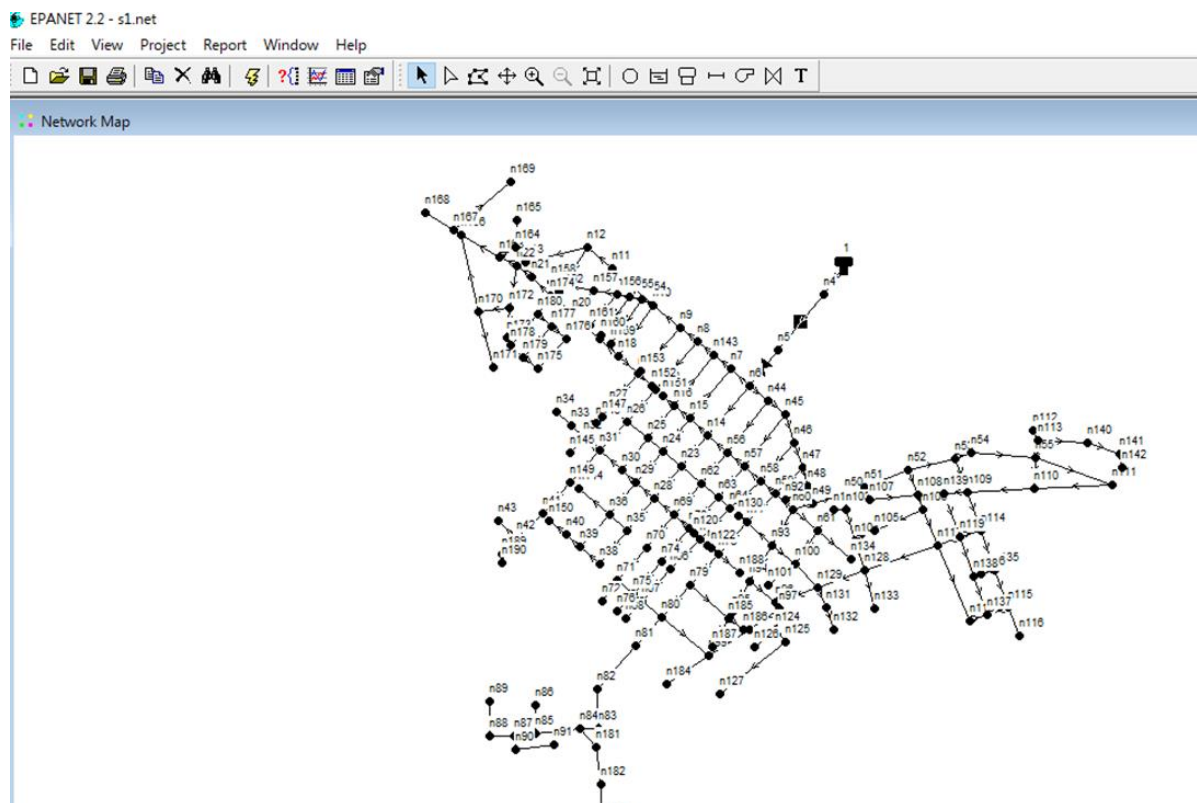


Figura 35. Sector 1 en EPANET.

EPANET es un software libre, desarrollado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de tuberías a presión. Está diseñado para el uso con sistemas de distribución de agua potable, aunque en general puede ser utilizado para el análisis de cualquier fluido no compresible con flujo a presión (EPANET, 2012).

EPANET permite seguir la evolución del flujo del agua en las conducciones, de la presión en los nudos de demanda, del nivel del agua en los depósitos y de la concentración de cualquier sustancia a través del sistema de distribución durante un periodo prolongado de simulación. Además de las concentraciones, permite también determinar los tiempos de permanencia del agua en la red y su procedencia desde los distintos puntos de alimentación (EPANET, 2012).

El programa permite realizar análisis hidráulicos de redes de tuberías a partir de las características físicas de las tuberías y dinámicas de los nudos (consumos) para obtener la presión y los caudales en nodos y tuberías respectivamente. Adicionalmente, EPANET permite el análisis de calidad de agua a través del cual es posible determinar el tiempo de viaje del fluido desde las fuentes (depósitos y embalses), hasta los nodos del sistema (EPANET, 2012).

Entre los elementos que puede simular el programa se encuentran fundamentalmente tuberías, nodos, depósitos, embalses y adicionalmente permite utilizar elementos más complejos como bombas y válvulas.

4.3 Asignación de caudal de demanda a cada nodo

Los programas para el cálculo de redes de distribución de agua potable, como EPANET, se basa en un modelo de cálculo, conformado por nodos y tramos sobre los cuales se define la “carga” del modelo en la forma de demanda de agua. En EPANET, asignar correctamente la demanda a los nodos es crucial porque la precisión de las simulaciones hidráulicas depende de la exactitud con que las demandas reflejan el consumo real de agua, ayuda a dimensionar adecuadamente las tuberías, bombas y tanques en la red de distribución y permite planificar el crecimiento futuro y realizar mejoras en la infraestructura existente (Azazkhan, 2022).

En esta sección se describe detalladamente el procedimiento utilizado para asignar el gasto de salida a los nodos de la red de agua potable, utilizando datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en formato SHP correspondientes al censo del 2020.

4.3.1 Recolección de Datos

Se inició la investigación adquiriendo los datos de AGEB del INEGI en formato SHP, los cuales contienen información sobre la distribución de la población por manzana en el área de estudio. Estos datos fueron fundamentales para la asignación de población a los nodos de la red de agua potable. De acuerdo con el INEGI, una AGEB urbana es un área geográfica ocupada por conjuntos de manzanas perfectamente delimitadas y son asignadas al interior de las localidades urbanas, que corresponden a aquellas localidades con población mayor o igual que 2,500 habitantes o cabeceras municipales.

4.3.2 Preparación de Datos

Los datos obtenidos del INEGI se importaron y se procesaron utilizando programas de cómputo SIG (Sistemas de Información Geográfica) como ARCMAP. Durante este proceso, se verificó la integridad de los datos y se realizaron los ajustes necesarios para garantizar su coherencia y compatibilidad con el análisis posterior.

4.3.3 Generación de Polígonos de Thiessen

Se identificaron los nodos de intersección de la red de agua potable existente y se generaron los polígonos de Thiessen utilizando herramientas de análisis espacial disponibles en el software SIG. Estos polígonos delimitaron el área de influencia de cada nodo en términos de población.

Los polígonos de Thiessen dividen un área en regiones basadas en la proximidad a un conjunto de puntos de referencia, como los nodos de la red de agua potable en nuestro caso, los puntos se unen entre sí y se proyectan mediatrices entre los segmentos de unión siendo dichas mediatrices los lados de los polígonos resultantes, a cada nodo le corresponderá un área de influencia. Cada polígono representa el área más cercana a un

nodo en particular, lo que nos permite asignar de manera precisa la población a cada nodo de la red (Figura 36).

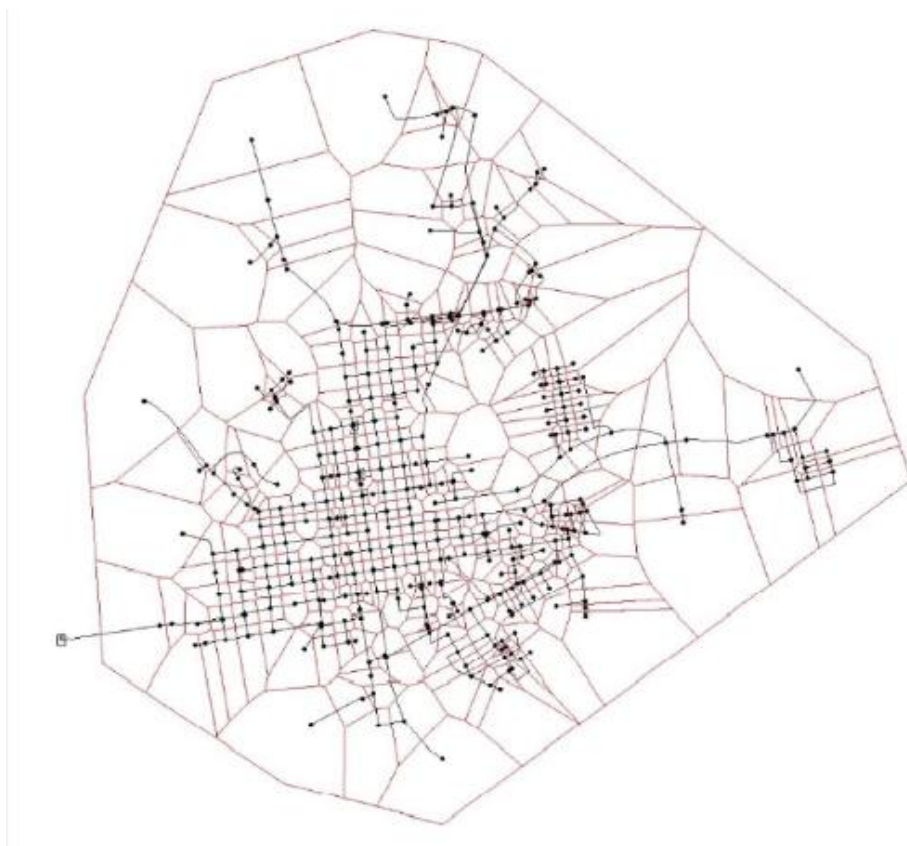


Figura 36. Polígonos de Thiessen que delimitan las áreas de servicio para cada nodo.

4.3.4 Asignación de población a nodos

Se procedió a realizar la intersección entre los polígonos de Thiessen y los datos de población por manzana del censo del 2020. Este paso permitió asignar la población de cada manzana a los nodos de la red en función de su área de influencia geográfica. Posteriormente, se calculó la población total asignada a cada nodo sumando las poblaciones de todas las manzanas dentro de su área de influencia.

4.3.5 Asignación de caudal a nodos

La población asignada a cada nodo se convirtió en una demanda de agua estimada utilizando factores de conversión adecuados. Estos factores tuvieron en cuenta el consumo promedio de agua por habitante, así como otras variables relevantes para la estimación precisa del gasto de salida en litros por segundo.

4.3.6 Cálculo del caudal de salida

El gasto de salida (o caudal de salida) en un nodo se refiere al flujo de agua que sale de ese punto de la red, ya sea hacia los usuarios, hacia otro tramo de red o a una descarga. El valor calculado de gasto de salida se asignó a cada nodo de la red de agua potable, representando así la demanda estimada de agua en litros por segundo en cada punto de intersección de la red.

4.4 Asignación de parámetros en EPANET

Asignar parámetros en EPANET es una parte crucial del proceso de modelación de redes de agua potable. Los parámetros asignados en este caso fueron los siguientes (United States Environmental Protection Agency , 2024):

Elevación: Define la altura del nodo sobre el nivel del mar. La elevación afecta las presiones en el sistema.

Demanda Base: La cantidad de agua que se espera que el nodo consuma, expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo.

Longitud: La distancia entre dos nodos conectados por la tubería.

Diámetro: El diámetro interno de la tubería.

Coeficiente de Rugosidad: Valor que representa la resistencia al flujo dentro de la tubería, el coeficiente empleado fue el de Manning para los distintos tipos de materiales de las tuberías.

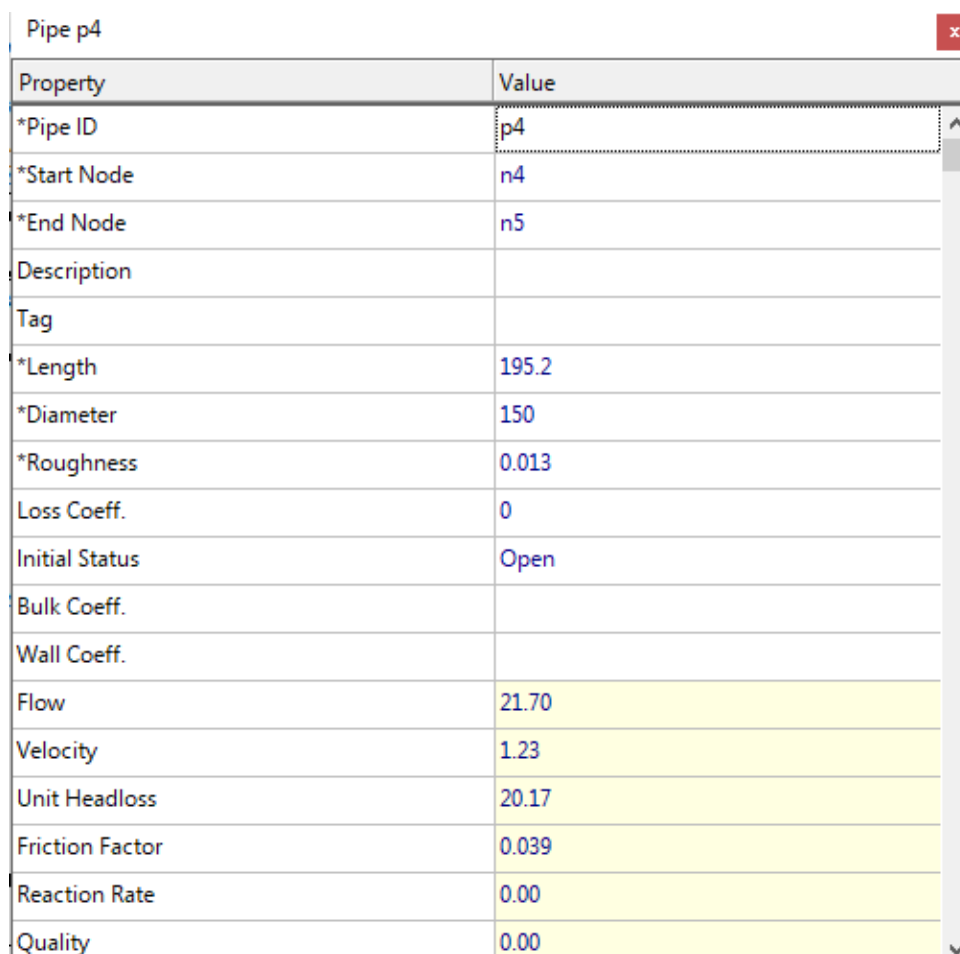
Estado: Indica si la tubería está abierta, cerrada, o con válvula reguladora.

Elevación del Fondo: La elevación de la base del tanque o reservorio.

Altura Inicial, Mínima y Máxima del Agua: Define los niveles de agua dentro del tanque.

Dimensiones de los tanques: Para conocer el volumen total y las variaciones en el nivel de agua.

En la Figura 36 se muestra un ejemplo de los valores que se ingresan a EPANET.



Property	Value
*Pipe ID	p4
*Start Node	n4
*End Node	n5
Description	
Tag	
*Length	195.2
*Diameter	150
*Roughness	0.013
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	21.70
Velocity	1.23
Unit Headloss	20.17
Friction Factor	0.039
Reaction Rate	0.00
Quality	0.00

Figura 37. Asignación de parámetros en EPANET.

4.5. Calibración de la red de distribución de agua potable en EPANET

La calibración es el proceso en el que se realizan ajustes en los parámetros del modelo para conseguir que el modelo reproduzca las mediciones observadas a un grado razonable de precisión.

La calibración de una red de agua potable en EPANET es un proceso crucial para ajustar el modelo hidráulico y que refleje con mayor exactitud las condiciones reales de la red. En este caso se realizó la calibración para cada uno de los sectores de la red.

Para llevar a cabo este proceso se parte de la simulación hidráulica inicial para obtener presiones, caudales y niveles en los distintos nodos y tuberías. Estos resultados servirán como referencia para la calibración. El primer paso es comparar los resultados obtenidos en la simulación con los datos reales de campo (presiones y caudales). Es importante revisar los puntos donde hay mayores discrepancias. Sin importar la causa, no se podrá pasar a un ajuste fino del modelo hasta que sus resultados, comparados con las mediciones en la red de distribución, no tengan una diferencia razonable, esto es, menor a 20% de error. La única forma de tratar adecuadamente estos errores es revisar los datos asociados con el modelo y compararlos con los datos de campo, para así asegurarse de la precisión del modelo.

Es útil hacer un análisis de sensibilidad del modelo para identificar el origen de los errores observados. El análisis de sensibilidad consiste en variar los parámetros del modelo con distintos valores, y con ello medir el efecto asociado. Examinando estos resultados, se puede empezar a identificar qué parámetros tienen un impacto más significativo en los resultados del modelo. El siguiente paso fue ajustar los parámetros para reducir las diferencias entre el modelo y la realidad, los ajustes se realizan de forma manual para cada tramo de la red. Los parámetros ajustados fueron los siguientes:

- **Coefficiente de rugosidad:** La rugosidad de las tuberías afecta las pérdidas por fricción, lo que impacta en los caudales y presiones. Es necesario ajustar este valor para coincidir mejor con los datos reales.

- **Condiciones de operación:** Es importante asegurarse de que las bombas, válvulas y reservorios estén operando bajo las mismas condiciones que en el campo. En este caso se agregaron válvulas de TCV (válvulas de control variable) simulando que se encontraban totalmente abiertas en los lugares que se obtuvo en el censo de la red para mantener un flujo constante o regular la presión.
- **Diámetros de tuberías:** El diámetro de las tuberías se ajustó hasta encontrar el diámetro efectivo al cual opera realmente la red.

Después de ajustar los parámetros, se ejecuta de nuevo la simulación y se comparan los resultados, se repite este proceso de ajuste y simulación hasta obtener una tolerancia aceptable, es decir, que las diferencias entre los resultados del modelo y los datos reales sean mínimas.

Los criterios mencionados son solo una referencia auxiliaren el proceso de simulación y calibración. Sin embargo, determinar si un modelo está calibrado dependerá, entre otras cosas, de:

- El tipo de modelo implementado.
- Los objetivos planteados para el modelo.
- La confiabilidad de los datos alimentados al modelo.
- La cantidad de mediciones disponibles para realizar la calibración.
- La precisión de los equipos utilizados para las mediciones de campo.
- El tamaño de la red de distribución.

4.6 Validación de presiones.

La validación de presiones es un proceso técnico que se utiliza para garantizar que los valores de consumo (demanda) de agua estimados o medidos sean precisos y estén

alineados con las condiciones reales de un sistema hidráulico. Este proceso es fundamental en la gestión eficiente del recurso hídrico, ya que ayuda a identificar inconsistencias, optimizar el uso del agua y garantizar el correcto diseño y operación de las infraestructuras hidráulicas. Las presiones tomadas en campo permiten corregir los valores y obtener resultados más precisos (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua , 2015).

Se llevaron a cabo múltiples etapas de validación para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto incluyó la comparación de los datos obtenidos con fuentes adicionales de información y la revisión de los procedimientos utilizados en cada etapa del análisis.

5. Resultados y propuestas de optimización

La mejora de las redes de abastecimiento se vuelve una necesidad prioritaria para los organismos operadores y las autoridades municipales. A través de un análisis de la infraestructura existente, el uso de herramientas de modelación hidráulica y la implementación de estrategias técnicas y operativas, es posible mejorar el desempeño del sistema, reducir pérdidas, garantizar una distribución equitativa del agua y asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

A continuación, se analizan los resultados obtenidos y se proponen medidas y acciones orientadas a la mejora del funcionamiento de la red de abastecimiento de agua potable, con base en diagnósticos técnicos, análisis de datos hidráulicos y criterios de eficiencia operativa. Estas propuestas buscan no solo resolver problemáticas actuales, sino también preparar la infraestructura para responder adecuadamente a las necesidades futuras.

5.1 Resultados de la simulación numérica por sector

5.1.1 Sector 1

El Sector 1 se ubica en la zona Sur de la cabecera municipal y representa el 31.4% del área total de cobertura del servicio. En esta zona el agua se suministra a la población de manera constante por tandeo (como en el resto de los sectores) y generalmente los habitantes perciben que la presión que reciben es buena (en comparación con otros sectores). A continuación, la Figura 38 muestra la representación del Sector en EPANET, la Tabla 13 los resultados obtenidos mediante la modelación en el programa de cómputo.

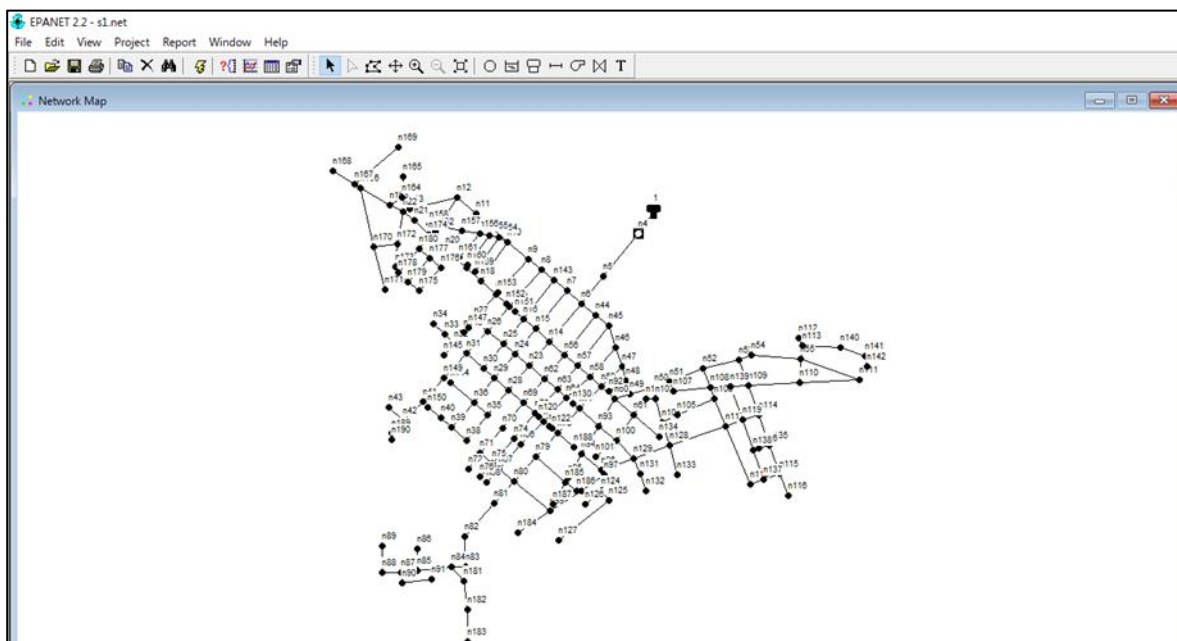


Figura 38. Sector 1, EPANET.

Tabla 13. Presiones EPANET Sector 1

Sector 1	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm ²
n4	1201.11	0	1219.49	1.63
n5	1193.69	0	1215.55	1.98
n6	1189.00	0.19	1213.11	1.76
n7	1190.00	0.25	1205.65	0.92

Continuación Tabla 13				
Sector 1	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm ²
n8	1185.57	0.22	1205.53	1.35
n9	1185.14	0.32	1205.06	1.28
n10	1185.03	0.24	1204.48	1.27
n11	1185.75	0.27	1204.45	1.20
n12	1193.90	0.25	1204.45	0.39
n13	1189.57	0.06	1204.44	0.82
n14	1190.95	0.24	1208.59	1.03
n15	1189.00	0.24	1206.21	1.06
n16	1186.46	0.2	1205.85	1.27
n17	1173.08	0.06	1202.31	2.16
n18	1167.34	0.08	1202.33	2.69
n19	1167.44	0.02	1202.15	2.61
n20	1176.48	0.09	1201.91	1.61
n21	1185.48	0.07	1200.29	0.58
n22	1188.11	0.03	1199.75	0.26
n23	1188.84	0.22	1207.72	1.14
n24	1189.00	0.21	1206.07	1.05
n25	1188.83	0.2	1205.82	0.97
n26	1185.11	0.15	1205.39	1.28
n27	1173.98	0.08	1202.31	2.07
n28	1189.00	0.16	1207.13	1.06
n29	1192.31	0.2	1206.02	0.68
n30	1195.31	0.28	1205.63	0.32
n31	1196.91	0.17	1205.38	0.10
n32	1186.92	0.06	1205.34	1.10
n33	1162.99	0.04	1205.34	3.48
n34	1138.53	0	1205.34	5.92
n35	1185.67	0.14	1206.64	1.35
n36	1187.71	0.37	1205.91	1.13
n37	1181.65	0.15	1206.29	1.73
n38	1184.60	0.17	1205.94	1.43
n39	1187.35	0.16	1205.89	1.15
n40	1191.65	0.06	1205.35	0.63
n41	1191.00	0.02	1205.35	0.69
n42	1193.77	0.01	1205.35	0.42
n43	1193.10	0.15	1212.98	1.33
n44	1195.95	0.1	1212.88	1.04
n45	1195.65	0.18	1212.78	1.06

Continuación Tabla 13				
Sector 1	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm²
n46	1196.00	0.15	1212.72	1.02
n47	1197.60	0.09	1212.68	0.86
n48	1199.00	0.08	1212.64	0.71
n49	1200.00	0.04	1212.57	0.61
n50	1198.14	0.07	1212.53	0.79
n51	1191.00	0.11	1212.49	1.42
n52	1191.45	0.11	1212.47	1.29
n53	1190.00	0.10	1212.46	1.43
n54	1189.13	0.14	1212.46	1.51
n55	1192.37	0.26	1209.95	0.97
n56	1193.63	0.22	1210.79	0.90
n57	1195.13	0.19	1211.67	0.83
n58	1197.61	0.15	1212.15	0.70
n59	1198.38	0.15	1212.6	0.75
n60	1196.43	0.21	1212.49	0.73
n61	1190.42	0.21	1209.06	1.04
n62	1191.38	0.16	1209.7	0.99
n63	1192.56	0.08	1211.45	0.91
n64	1183.87	0.04	1211.28	1.73
n65	1182.77	0.17	1211.23	1.41
n66	1176.56	0.11	1211.21	1.06
n67	1174.54	0.05	1211.21	1.26
n68	1187.81	0.14	1208.46	1.23
n69	1183.45	0.17	1208.36	1.29
n70	1179.25	0.14	1208.32	0.88
n71	1178.00	0.09	1208.32	0.99
n72	1184.46	0.09	1208.85	1.57
n73	1185.84	0.18	1208.75	0.65
n74	1177.31	0.14	1208.72	1.01
n75	1175.57	0.07	1208.72	1.17
n76	1193.78	0.18	1211.82	1.05
n77	1181.80	0.09	1210.9	1.10
n78	1179.29	0.22	1210.35	0.70
n79	1174.21	0.18	1210.31	1.17
n80	1171.77	0.03	1210.31	1.41
n81	1169.79	0	1210.31	1.61
n82	1162.00	0	1210.31	2.39
n83	1160.00	0	1210.31	2.59

Continuación Tabla 13				
Sector 1	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm²
n84	1157.73	0	1210.31	2.82
n85	1156.91	0	1210.31	2.90
n86	1156.36	0	1210.31	2.95
n87	1155.90	0	1210.31	3.00
n88	1155.00	0	1210.31	3.09
n89	1156.30	0	1210.31	2.96
n90	1156.98	0	1210.31	2.89
n91	1198.27	0.12	1212.67	0.79
n92	1192.06	0.25	1212.56	1.31
n93	1172.14	0.08	1212.55	3.28
n94	1187.00	0.10	1212.55	1.80
n95	1174.49	0.10	1210.63	0.81
n96	1171.62	0.14	1210.36	1.09
n97	1169.47	0.10	1210.33	1.34
n98	1160.10	0.17	1210.31	2.33
n99	1186.84	0.19	1212.49	1.24
n100	1181.36	0.11	1212.49	1.76
n101	1200.00	0.06	1212.49	0.49
n102	1200.00	0.04	1212.39	0.52
n103	1189.72	0.12	1212.04	1.46
n104	1191.91	0.2	1212.04	1.23
n105	1186.34	0.2	1212.06	1.78
n106	1197.94	0.09	1212.38	0.77
n107	1189.21	0.14	1212.22	1.59
n108	1187.36	0.29	1212.22	1.45
n109	1188.03	0.13	1212.4	1.60
n110	1187.66	0.03	1212.45	1.65
n111	1191.34	0	1212.41	1.28
n112	1189.72	0.10	1212.41	1.44
n113	1170.28	0.21	1211.96	1.50
n114	1162.58	0.05	1211.93	1.09
n115	1138.70	0	1211.93	3.47
n116	1184.62	0.19	1211.95	0.08
n117	1143.09	0.06	1211.93	3.07
n118	1181.13	0.22	1211.96	0.42
n119	1184.70	0.11	1211.27	1.65
n120	1185.71	0.05	1211.27	1.54
n121	1182.71	0.05	1210.9	1.01

Continuación Tabla 13				
Sector 1	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	M	lps	Msnm	kg/cm²
n122	1172.59	0.10	1209.19	0.88
n123	1158.44	0.16	1209.12	2.07
n124	1170.20	0.46	1209.08	1.11
n125	1154.00	0.32	1208.96	2.02
n126	1178.27	0.11	1211.82	2.20
n127	1176.91	0.20	1210.82	1.27
n128	1193.37	0.09	1211.82	1.09
n129	1169.11	0.14	1210.8	1.86
n130	1157.57	0.06	1210.8	2.99
n131	1156.00	0.07	1211.82	4.40
n132	1181.51	0.15	1212.48	2.14
n133	1136.03	0.03	1211.93	3.80
n134	1135.01	0.09	1211.93	3.86
n135	1162.10	0.13	1211.93	1.14
n136	1141.44	0.19	1211.93	3.23
n137	1187.84	0.24	1212.17	1.38
n138	1193.00	0.14	1212.41	1.11
n139	1193.00	0.08	1212.41	1.11
n140	1188.87	0.08	1212.41	1.52
n141	1186.00	0.26	1205.59	1.32
n142	1191.70	0.23	1205.82	0.72
n143	1197.49	0	1205.34	0.04
n144	1179.54	0.08	1205.33	1.81
n145	1172.95	0.06	1205.32	2.47
n146	1180.00	0.08	1205.43	1.82
n147	1193.30	0.08	1205.36	0.46
n148	1190.26	0.07	1205.89	0.86
n149	1182.60	0.18	1205.84	1.65
n150	1178.15	0.08	1202.31	1.65
n151	1173.93	0.22	1205.06	2.40
n152	1170.40	0.17	1203.66	2.43
n153	1174.00	0.19	1203.01	1.91
n154	1177.54	0.24	1202.53	1.49
n155	1182.96	0.28	1202.07	0.95
n156	1186.63	0.18	1202.05	0.58
n157	1164.59	0.16	1203.61	3.00
n158	1168.52	0.10	1203	2.45
n159	1172.52	0.18	1202.51	1.99

Continuación Tabla 13				
Sector 1	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	M	kg/cm²
n160	1183.75	0.13	1204.41	1.40
n161	1187.45	0.14	1199.59	0.30
n162	1194.20	0.02	1199.58	0.25
n163	1194.65	0.11	1199.57	0.25
n164	1180.53	0.12	1199.51	0.97
n165	1179.02	0.04	1199.51	1.12
n166	1170.75	0	1199.51	1.95
n167	1184.00	0.06	1199.5	0.63
n168	1167.69	0.14	1199.51	2.18
n169	1153.95	0.04	1199.51	3.56
n170	1174.38	0.11	1199.55	1.52
n171	1165.47	0.06	1199.54	2.41
n172	1181.57	0.02	1201.2	1.06
n173	1157.05	0.06	1201.1	3.42
n174	1169.33	0.04	1201.1	2.23
n175	1172.99	0.05	1201.1	1.87
n176	1163.68	0.03	1201.1	2.79
n177	1160.78	0.08	1201.1	3.05
n178	1175.31	0.05	1201.12	1.67
n179	1158.51	0	1210.31	2.74
n180	1155.00	0	1210.31	3.09
n181	1153.85	0	1210.31	3.20
n182	1157.50	0	1210.31	2.59
n183	1172.71	0.14	1209.87	0.65
n184	1175.10	0.11	1209.86	0.41
n185	1172.06	0.24	1209.87	0.71
n186	1181.29	0.13	1210.88	1.04
n187	1162.56	0.01	1205.35	4.27
n188	1174.31	0	1205.35	3.09
Tank 1	1221.00	-21.7	1223	2

Los criterios de la CONAGUA establecen (CONAGUA, 2015) :

- Presión mínima en zonas urbanas: $\approx 1.5 \text{ kg/cm}^2$
- Presión mínima en zonas rurales: $\approx 1.0 \text{ kg/cm}^2$
- Presión recomendable de operación $\approx 1.5 \text{ a } 4.0 \text{ kg/cm}^2$

En la Tabla 13 se observa lo siguiente:

Presiones bajas ($< 0.5 \text{ kg/cm}^2$): Detectadas en nodos como n30, n31, n116, n118, n161–163. Estas presiones son insuficientes para un servicio adecuado, especialmente en edificaciones de más de una planta.

Presiones adecuadas ($1.0 - 3.0 \text{ kg/cm}^2$): La mayor parte de los nodos (ej. n6–n20, n23–n40, n61–n80, n99–n120) se encuentran en este rango.

Presiones excesivas ($> 3.0 \text{ kg/cm}^2$): Observadas en nodos ubicados en cotas bajas, como n33, n34, n82–n90, n93, n115, n117, n130–n134, n136, n169, n173–n177, n187–n188. Estas condiciones incrementan el riesgo de fugas, roturas de tuberías y pérdidas de agua.

El valor -21.7 L/s indica que el Tank 1 está alimentando la red con ese caudal neto. El tanque no tiene presión negativa. La demanda negativa simplemente representa que es un punto de aporte al sistema, no de consumo (Rossman, 2000).

En la Tabla 14 una comparación de las presiones obtenidas en campo vs las obtenidas de EPANET. El análisis de estos resultados, así como los de los demás porcentajes de error de los otros sectores se encuentran en la discusión.

Tabla 14. Presión de campo vs EPANET, Sector 1.

Sector 1			
ID	Presión de campo (kg/cm^2)	Presión EPANET (kg/cm^2)	% de error
n15	1.8	1.06	4.61
n31	0.5	1.11	80.00
n40	0.9	1.16	30.00
n70	0.9	1.29	2.22

5.1.2 Sector 2

El Sector 2 se ubica en la zona centro de la cabecera municipal y representa el 24.9% del total del área, este es el Sector de mayor demanda y también el de mayor problemática debido a dos factores importantes, es la zona más antigua de la cabecera municipal y en ella se desarrolla el comercio. En la Figura 39 se observa el Sector en EPANET, en la Tabla 15 los resultados obtenidos mediante EPANET.

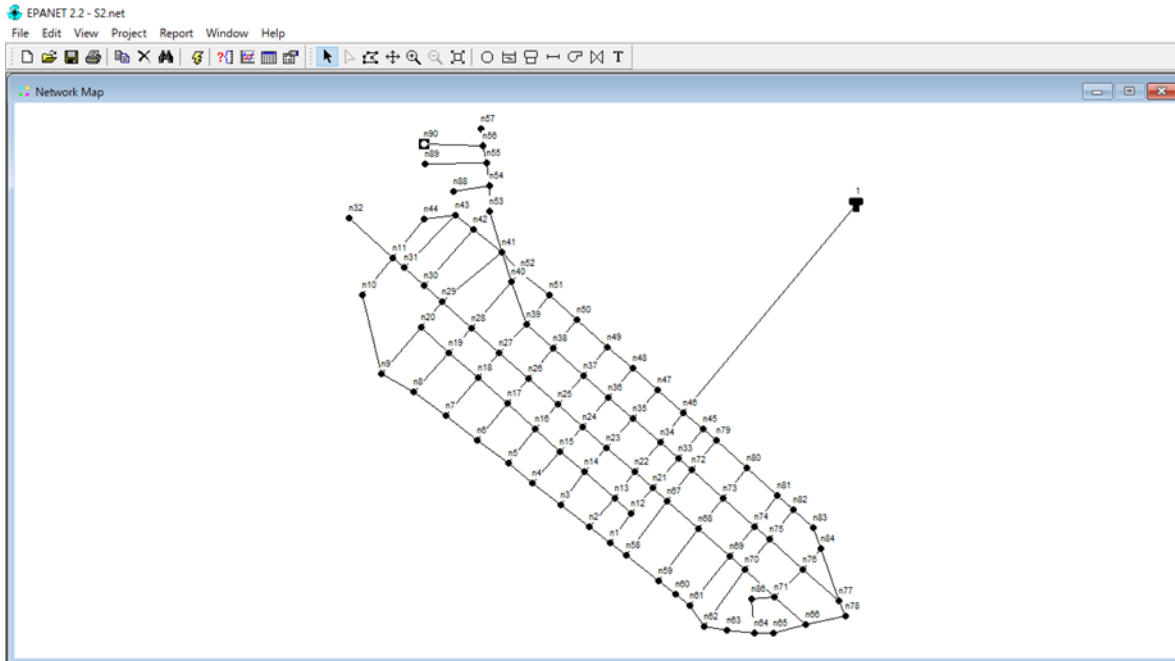


Figura 39. Sector 2, EPANET.

Tabla 15. Presiones EPANET Sector 2.

SECTOR 2	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm ²
n90	1191.75	0.11	1265.01	1.08
n89	1192.99	0.17	1265.07	0.95
n88	1198.25	0.23	1265.29	0.45
n87	1202.09	0.11	1270.07	1.38
n86	1194.71	0.19	1270.31	2.90
n85	1198.08	0.15	1270.34	2.61
n84	1203.36	0.18	1270.37	2.33
n83	1206.00	0.2	1270.4	2.20

Continuación Tabla 15				
SECTOR 2	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm²
n82	1211.35	0.2	1270.46	1.85
n81	1208.15	0.13	1270.55	0.85
n80	1191.65	0.04	1270.27	0.49
n79	1190.00	0.18	1270.28	3.18
n78	1196.48	0.3	1270.2	2.15
n77	1203.00	0.24	1270.18	1.61
n76	1204.88	0.19	1270.18	1.50
n75	1209.76	0.23	1270.22	1.01
n74	1205.43	0.18	1270.32	1.90
n73	1200.88	0.18	1270.09	1.57
n72	1202.89	0.13	1270	1.43
n71	1203.51	0.2	1269.99	1.54
n70	1205.74	0.36	1270.02	1.34
n69	1202.48	0.21	1270.07	1.67
n68	1191.50	0.16	1270.14	2.53
n67	1196.00	0.12	1270.09	1.98
n66	1197.35	0.05	1270.06	1.83
n65	1198.16	0.08	1270.02	1.72
n64	1196.41	0.01	1269.99	1.88
n63	1197.84	0.07	1269.96	1.69
n62	1197.70	0.13	1269.92	1.63
n61	1197.35	0.18	1269.89	1.61
n60	1194.00	0.54	1269.8	1.78
n59	1200.93	0.14	1265.04	0.16
n58	1202.00	0.19	1265.04	0.06
n56	1202.86	0.07	1265.33	0.01
n57	1203.07	0.11	1265.11	0.07
n55	1201.38	0.08	1265.84	0.22
n54	1205.18	0.15	1267.12	0.15
n53	1205.00	0.22	1267.66	0.38
n52	1203.93	0.21	1268.56	0.21
n51	1203.78	0.24	1270.27	2.86
n50	1206.84	0.23	1270.35	2.60
n49	1205.54	0.19	1270.48	2.79

Continuación Tabla 15				
SECTOR 2	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm²
n48	1205.29	0.14	1270.7	2.89
n47	1206.82	0.16	1270.61	2.72
n46	1194.55	0.30	1266.16	0.40
n45	1199.00	0.18	1266.21	0.01
n44	1197.78	0.29	1266.33	0.24
n43	1200.12	0.18	1266.81	0.47
n42	1203.25	0.36	1267.12	0.23
n41	1201.95	0.39	1267.64	0.58
n40	1199.47	0.31	1268.3	0.83
n39	1199.00	0.32	1269.55	1.25
n38	1199.52	0.29	1269.8	1.20
n37	1200.89	0.24	1270.24	1.66
n36	1202.61	0.14	1270.59	2.81
n35	1205.00	0.15	1270.41	2.18
n34	1181.25	0	1266.19	1.72
n33	1188.18	0.15	1266.21	1.07
n32	1187.91	0.19	1266.35	1.18
n31	1189.59	0.27	1266.78	1.13
n30	1194.63	0.47	1267.25	0.94
n29	1197.00	0.43	1267.64	0.81
n28	1198.33	0.33	1268.28	0.87
n27	1196.21	0.24	1269.07	1.22
n26	1195.55	0.25	1269.4	1.41
n25	1197.52	0.23	1269.88	1.48
n24	1199.53	0.12	1270.53	2.66
n22	1185.61	0.16	1266.87	1.52
n23	1201.77	0.07	1270.1	1.47
n21	1190.62	0.33	1267.16	1.09
n20	1192.51	0.37	1267.64	1.06
n19	1193.77	0.3	1268.47	1.31
n18	1191.85	0.26	1269.07	1.64
n17	1191.59	0.27	1269.4	1.80
n16	1192.63	0.25	1269.62	1.80
n15	1195.60	0.19	1269.83	1.71

Continuación Tabla 15				
SECTOR 2	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	m	kg/cm²
n14	1199.95	0.20	1269.83	1.28
n13	1188.71	0.35	1266.19	0.98
n12	1180.21	0.10	1266.36	1.83
n11	1176.93	0.09	1266.86	2.22
n10	1183.00	0.18	1267.16	1.69
n9	1185.96	0.14	1267.72	1.62
n8	1182.12	0.11	1269.13	2.61
n7	1188.27	0.15	1269.23	2.02
n6	1188.75	0.24	1269.39	2.08
n5	1191.22	0.28	1269.54	1.89
n4	1191.80	0.29	1269.68	1.88
n3	1193.98	0.17	1269.76	1.74
Tank 1	1271.07	-17.79	1272.57	0

Existen nodos con presiones críticas ($<0.5 \text{ kg/cm}^2$), lo que compromete el servicio en algunas zonas altas del sector. La mayoría de los nodos opera entre 1 y 2.5 kg/cm^2 , lo cual es adecuado para un servicio urbano. Algunos nodos en cotas bajas alcanzan presiones elevadas ($>3 \text{ kg/cm}^2$), lo que implica riesgo de fugas o daños en tuberías antiguas. El Tanque aporta caudal suficiente para mantener presiones positivas en el sistema, aunque con deficiencias en zonas críticas.

En la Tabla 16 se encuentra la comparación de resultados de campo vs EPANET donde se aprecia una diferencia significativa que puede ser atribuida a diversos factores que serán mencionados más adelante.

Tabla 16. Presión de campo vs EPANET, Sector 2.

Sector 2			
ID	Presión de campo (kg/cm ²)	Presión EPANET (kg/cm ²)	% de error
n20	1.8	1.52	40.56
n23	0.8	1.48	83.75
n27	0.8	0.81	52.50
n33	0.8	2.18	33.75
n52	0	0.15	40.00
n80	0.2	1.85	96.00
n82	0.5	2.33	70.00

5.1.3 Sector 3

El Sector 3 se ubica en la zona norte de la cabecera municipal, representa el 28.6% del área total y al igual que el Sector 2 cuenta con una gran problemática de abastecimiento, el servicio en esta área es irregular, algunas viviendas incluso no lo reciben. En la Figura 40 se muestra el Sector 3 representado en EPANET.

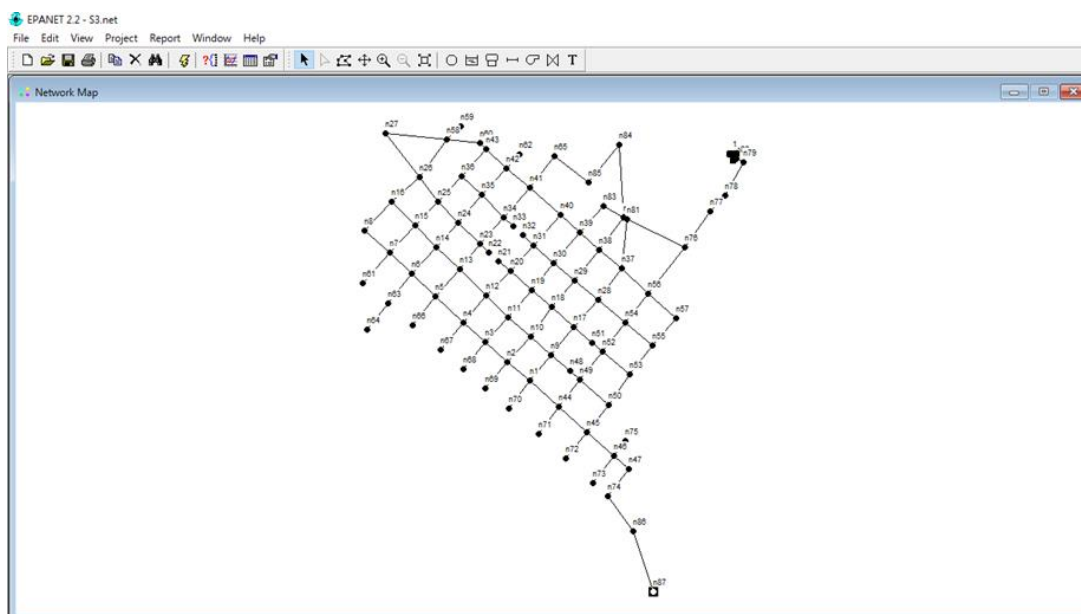


Figura 40. Sector 3, EPANET.

A continuación (Tabla 17) se muestran los resultados obtenidos para el Sector 3.

Tabla 17. Presiones EPANET Sector 3

Sector 3	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	Msnm	lps	m	kg/cm²
n87	1191.34	0	1245.86	2.32
n86	1194.61	0	1245.86	1.99
n85	1233.27	0.22	1257.07	0.97
n84	1240.71	0.36	1256.76	0.50
n83	1230.38	0.2	1259.28	0.96
n82	1238.85	0.17	1259.59	1.07
n81	1239.98	0.33	1259.65	1.00
n80	1272.70	0	1266.69	0.97
n79	1272.86	0	1266.28	1.03
n78	1263.03	0	1264.3	1.12
n77	1258.16	0.33	1263.11	1.26
n76	1248.59	0.22	1260.85	2.10
n75	1208.17	0.37	1249.78	2.67
n74	1203.36	0	1245.86	3.29
n73	1206.00	0	1249.91	3.42
n72	1211.35	0	1253.75	3.35
n71	1208.15	0	1255.86	3.66
n70	1205.29	0	1256.93	2.07
n69	1205.54	0	1257.48	1.05
n68	1206.84	0	1258.1	3.71
n67	1203.78	0	1257.62	3.41
n66	1203.93	0.19	1257.52	0.99
n65	1231.78	0.14	1257.77	3.40
n64	1201.95	0	14122.13	1.25
n63	1205.00	0	1257.48	1.41
n62	1230.00	0.09	1257.25	1.68
n61	1205.18	0	1257.21	1.70
n60	1226.97	0.12	1257.16	2.07
n59	1225.33	0	1257.17	2.27
n58	1222.65	0	1257.17	2.10
n57	1230.01	0	1259.27	2.47

Continuación Tabla 17				
Sector 3	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	Msnm	lps	m	kg/cm ²
n56	1233.00	0.16	1260.4	2.17
n55	1222.58	0.36	1258.15	2.27
n54	1225.93	0.23	1258.34	2.55
n53	1217.03	0.51	1257.11	2.50
n52	1220.66	0.25	1257.25	2.58
n51	1219.66	0.26	1257.32	1.00
n50	1212.62	0.35	1256.1	1.16
n49	1215.09	0.28	1256.45	2.14
n48	1214.39	0.24	1256.61	2.39
n46	1207.01	0.25	1249.91	1.27
n45	1210.98	0.4	1253.75	1.23
n44	1210.96	0.5	1255.86	1.16
n43	1226.89	0.14	1257.17	1.32
n42	1227.15	0.18	1257.26	1.43
n41	1229.51	0.25	1257.79	1.45
n40	1231.17	0.28	1258.33	1.77
n39	1232.49	0.27	1258.84	1.85
n38	1232.03	0.34	1259.09	2.18
n37	1233.44	0.31	1259.48	0.94
n36	1221.76	0.2	1257.17	2.04
n35	1221.37	0.2	1257.26	1.61
n34	1219.52	0.18	1257.65	1.60
n33	1221.96	0.12	1257.64	1.90
n32	1222.32	0.11	1258.22	2.15
n31	1226.71	0.23	1258.23	2.80
n30	1229.53	0.31	1258.49	2.04
n29	1226.37	0.27	1258.38	2.24
n28	1224.46	0.28	1258.35	2.38
n27	1211.37	0	1257.17	2.24
n26	1218.99	0.14	1257.17	2.86
n25	1217.13	0.2	1257.18	2.58
n24	1216.04	0.25	1257.27	2.00
n23	1218.62	0.19	1257.56	1.73

Continuación Tabla 17				
Sector 3	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	Msnm	lps	m	kg/cm ²
n22	1212.38	0.13	1257.55	2.24
n21	1216.61	0.16	1258.09	2.37
n20	1222.44	0.2	1258.10	2.65
n19	1225.55	0.33	1258.26	2.54
n18	1220.40	0.3	1257.9	2.58
n17	1219.00	0.26	1257.58	2.82
n16	1212.94	0.11	1257.18	2.42
n15	1214.07	0.22	1257.20	2.39
n14	1214.00	0.32	1257.3	2.58
n13	1212.76	0.28	1257.55	2.67
n12	1217.56	0.34	1257.80	3.35
n11	1218.76	0.36	1258.13	3.03
n10	1216.00	0.31	1257.59	3.11
n9	1214.51	0.22	1257.11	3.10
n8	1205.64	0.04	1257.19	2.99
n7	1208.83	0.25	1257.21	2.71
n6	1208.00	0.43	1257.48	2.85
n5	1209.00	0.29	1257.54	2.82
n4	1210.50	0.29	1257.62	4.70
n3	1213.21	0.44	1258.10	4.47
n2	1211.25	0.49	1257.48	4.61
n1	1210.00	0.38	1256.93	4.68
Tank 1	1265.55	-19.04	1266.86	1.30

El rango de presiones va desde ≈ 0.5 kg/cm² (n84, n81, n66), estos nodos están en las zonas más altas (1238–1241 msnm), donde la energía disponible no es suficiente, hasta valores muy altos de 4.7 kg/cm² (n4, n1, n2, n3), estos nodos están en cotas bajas (≈ 1210 – 1216 m), recibiendo presiones excesivas en comparación con los otros provocando desigualdad en el servicio. En la Tabla 18 se muestra una comparación de los valores obtenidos en campo y los que se obtuvieron con la simulación de EPANET.

Tabla 18. Presión de campo vs EPANET, Sector 3

Sector 3			
ID	Presión de campo (kg/cm ²)	Presión EPANET (kg/cm ²)	% de error
n37	0.3	1.45	88.40
n66	1.8	2.07	44.94
n76	1.2	0.97	76.25
n83	0.5	1.76	92.00
n84	0.9	0.50	43.67

5.1.4 Sector 4

El Sector 4 se ubica en la parte Este de la cabecera municipal, representa el 8.1 % del área total. En la Figura 41 se muestra el Sector en EPANET.

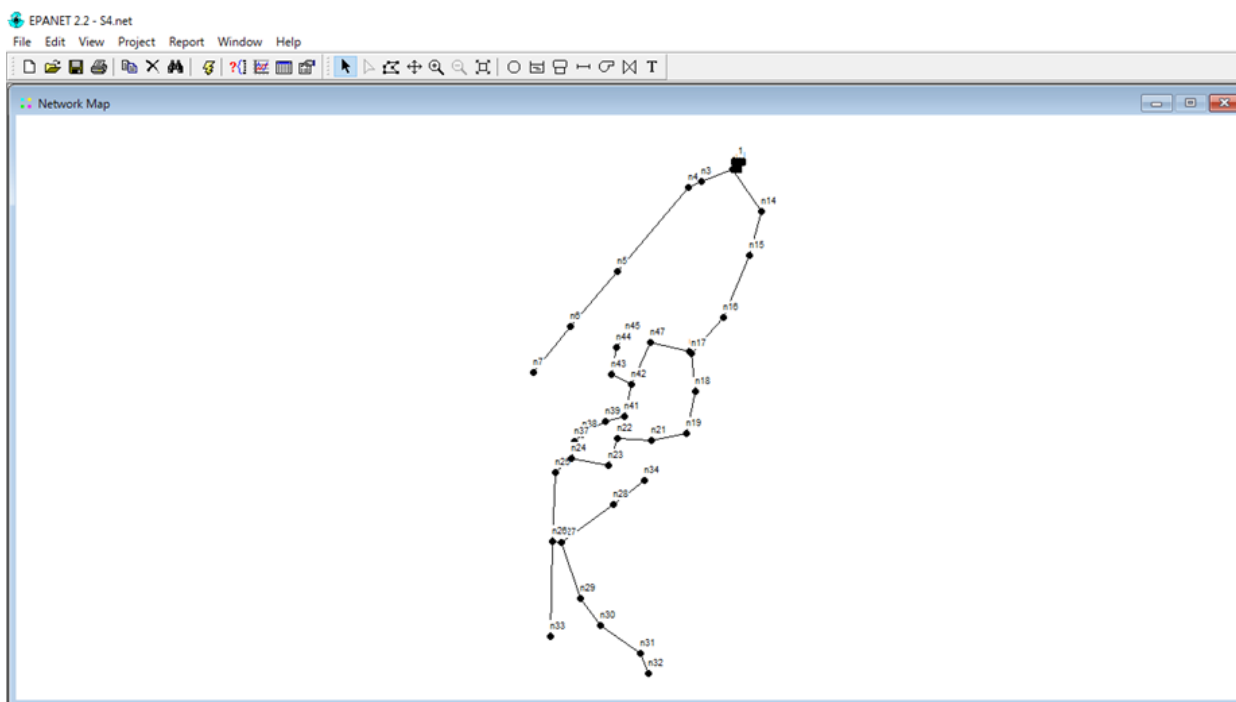


Figura 41. Sector 4, EPANET.

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos de la simulación.

Tabla 19. Presiones EPANET Sector 4.

Sector 4	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	Msnm	lps	m	kg/cm²
n48	1246.00	0.02	1279.6	2.31
n47	1240.72	0.09	1279.57	1.50
n45	1229.62	0.05	1279.54	1.73
n44	1227.25	0.07	1279.54	1.97
n43	1223.71	0.06	1279.54	2.34
n42	1229.94	0.07	1279.55	1.80
n41	1222.72	0.03	1279.55	2.17
n40	1217.66	0.02	1279.55	2.27
n39	1217.63	0.03	1275.8	2.27
n38	1212.80	0.05	1275.8	2.24
n37	1212.23	0.1	1275.8	2.28
n34	1236.96	0.1	1274.2	0.12
n33	1192.06	0.31	1274.2	1.94
n32	1196.53	0	1273.99	1.60
n31	1200.17	0.16	1273.99	1.24
n30	1198.90	0.32	1273.99	1.37
n29	1198.81	0.27	1274.06	1.39
n28	1222.75	0.18	1274.2	0.32
n27	1201.73	0.18	1274.22	1.15
n26	1200.14	0.35	1274.24	2.27
n25	1207.51	0.39	1275.32	2.07
n24	1209.99	0.08	1275.81	2.06
n23	1224.40	0.13	1276.87	0.99
n22	1224.56	0.06	1277.21	1.16
n21	1242.71	0.08	1277.63	0.56
n19	1243.00	0.04	1278.51	2.24
n18	1245.00	0.04	1279.09	2.25
n17	1246.00	0.01	1279.6	2.34
n16	1246.50	0.03	1279.8	2.52
n15	1247.00	0.1	1280.09	2.50
n14	1278.00	0.01	1280.3	0.11

Continuación Tabla 19				
Sector 4	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	Msnm	lps	m	kg/cm ²
n7	1219.00	0.22	1276.57	1.32
n6	1232.44	0.43	1276.62	1.25
n5	1249.49	0.44	1277.11	1.75
n4	1260.00	0.2	1279.23	1.09
n3	1265.80	0.02	1279.61	0.90
n2	1279.00	0	1280.54	0.04
n1	1280.00	0	1285.47	2.35
Tank 1	1284.06	-4.71	1286.06	0

Se identifican nodos con presiones críticas muy bajas ($<1.0 \text{ kg/cm}^2$), esto indica zonas con riesgo de desabasto y problemas de servicio en horas pico. Estos nodos corresponden a elevaciones altas o cercanas al límite del tanque. El tanque es la fuente principal de carga hidráulica, pero su nivel apenas supera a los nodos más altos, lo que explica las presiones insuficientes. En la Tabla 20 se muestra la diferencia entre la presión de campo y la de EPANET.

Tabla 20. Presión de campo vs EPANET, Sector 4.

Sector 4			
ID	Presión de campo (kg/cm ²)	Presión EPANET (kg/cm ²)	% de error
n4	0.6	1.29	82.83
n22	1.6	1.16	27.13
n34	0.8	0.12	49.25
n47	0.8	2.50	88.25

5.1.5 Sector 5

Este sector se ubica al Norte de la cabecera municipal y representa el 1.6% del área de cobertura total. El Sector es uno de los más recientes de la zona, con tuberías de PEAD, a diferencia de lo demás sectores. En la Figura 42 se observa el sector representado en EPANET.

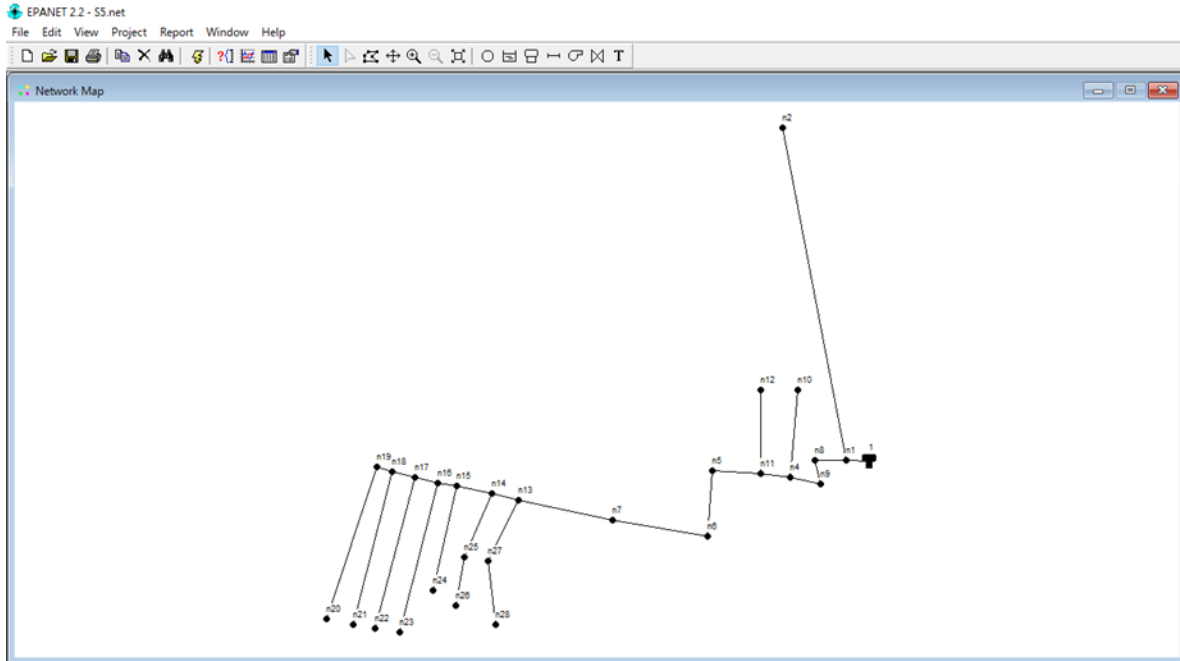


Figura 42. Sector 5, EPANET.

En la Tabla 21 los valores obtenidos del programa de cómputo.

Tabla 21. Presiones EPANET Sector 5

Sector 5	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	Lps	m	kg/cm ²
n1	1266.10	0	1272.57	0.46
n2	1257.00	0	1272.57	1.37
n4	1255.52	0.02	1269.90	1.25
n5	1266.83	0.02	1268.03	0.12
n6	1258.33	0.02	1266.65	0.65
n7	1239.10	0.01	1264.74	2.38

Continuación Tabla 21				
Sector 4	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	Lps	m	kg/cm²
n8	1260.75	0.04	1271.75	0.92
n9	1260.83	0	1271.13	0.84
n10	1266.17	0.01	1269.90	0.19
n11	1249.70	0.03	1268.88	1.73
n12	1254.29	0.12	1268.85	1.27
n13	1223.92	0.07	1262.89	2.74
n14	1220.25	0.03	1262.67	2.57
n15	1213.54	0.02	1262.42	2.80
n18	1207.65	0.04	1262.32	3.22
n19	1206.22	0.02	1262.32	3.37
n20	1210.00	0.01	1262.32	2.99
n21	1214.32	0.04	1262.31	1.51
n22	1217.32	0.09	1262.30	2.06
n23	1220.00	0	1262.37	2.06
n24	1222.78	0.19	1262.32	1.70
n25	1223.81	0.07	1262.65	2.17
n26	1225.90	0.05	1262.65	1.96
n27	1227.16	0.11	1262.85	1.14
n28	1229.00	0.03	1262.85	2.23
Tank 1	1270.77	-1.13	1272.58	0

El Sector 5 presenta un comportamiento similar a los anteriores ya que mientras los nodos más bajos (n13–n20, elevaciones entre 1206–1220 m) tienen presiones elevadas (2.5–3.3 kg/cm²), los nodos más altos (n1, n5, n8, n9, n10) tienen presiones insuficientes (<1.0 kg/cm²). Aunque la red satisface las demandas actuales, no garantiza continuidad ni calidad en nodos de mayor cota. El sistema es dependiente del nivel del tanque, en condiciones de bajo nivel, las presiones críticas se agravarían.

En la Tabla 22 se presenta la comparación de resultados de campo y en EPANET.

Tabla 22. Presión de campo vs EPANET, Sector 5.

Sector 5			
ID	Presión de campo (kg/cm ²)	Presión EPANET (kg/cm ²)	% de error
n6	0.4	0.65	62.75
n12	0.8	1.27	59.38
n21	0.9	2.51	68.56
n27	0.7	2.41	87.71

5.1.6 Sector 6

Este se ubica en la zona Sur y representa el 4.8% del área total. En la Figura 43 se muestra el sector en EPANET. En la Tabla 23 se encuentran los resultados obtenidos de la simulación en EPANET.

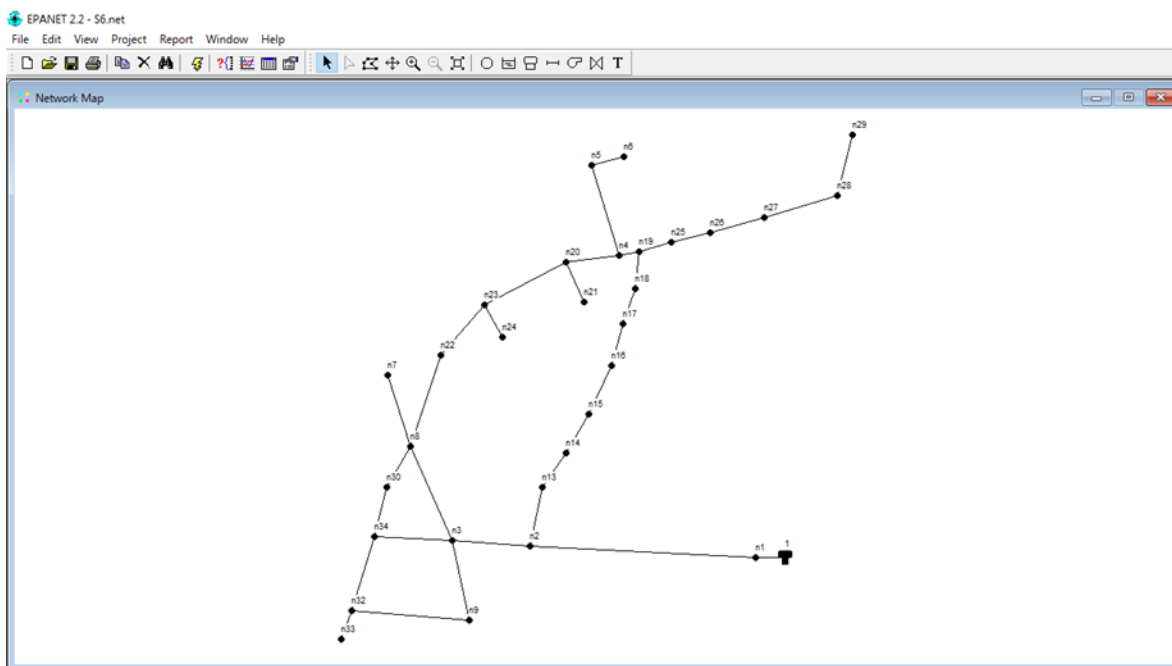


Figura 43. Sector 6, EPANET.

Tabla 23. Presiones EPANET Sector 6.

Sector 6	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	msnm	lps	M	kg/cm ²
n1	1267.77	0	1277.55	1.87
n2	1161.00	0.24	1271.04	2.20
n3	1147.22	0.21	1270.79	2.31
n4	1188.23	0.06	1264	1.21
n5	1188.00	0.04	1263.7	1.08
n6	1187.87	0.27	1263.62	1.37
n7	1138.94	0.07	1267.63	1.66
n8	1134.72	0.29	1267.63	2.09
n9	1145.00	0.07	1270.77	2.44
n14	1161.25	0.18	1267.04	0.81
n15	1160.90	0.18	1266.2	0.64
n16	1159.00	0.14	1265.62	0.39
n17	1157.23	0.1	1265.35	0.57
n18	1144.74	0.08	1265.22	0.71
n19	1139.05	0.04	1263.98	0.70
n20	1134.74	0.06	1264.18	1.41
n21	1152.92	0.15	1264.17	0.81
n22	1161.57	0.1	1265.99	1.77
n23	1184.91	0.05	1265.11	1.56
n24	1144.82	0.17	1265.1	0.78
n25	1186.51	0.06	1263.84	0.59
n26	1141.59	0.11	1263.72	0.53
n27	1142.00	0.16	1263.66	0.54
n28	1142.50	0.06	1263.64	0.47
n29	1145.75	0.08	1263.64	0.42
n30	1134.26	0	1267.63	2.13
n31	1136.62	0.04	1267.63	1.89
n32	1133.70	0.01	1267.63	2.19
n33	1133.70	0.01	1267.63	2.19
n34	1136.62	0.06	1270.78	3.33
Tank 1	1267.79	-3.35	1277.79	0

El Sector 6 presenta una fuerte deficiencia en la presión: más de la mitad de los nodos tienen valores $<1.0 \text{ kg/cm}^2$. El problema está asociado a pérdidas de carga importantes en zonas bajas y medias, posiblemente por: diámetros insuficientes de tubería, altas pérdidas por fricción, lejanía hidráulica respecto al tanque lo que genera un desequilibrio hidráulico.

La Tabla 24 muestra la comparación de resultados entre EPANET y los de campo.

Tabla 24. Presión de campo vs EPANET, Sector 6.

Sector 6			
ID	Presión de campo (kg/cm ²)	Presión EPANET (kg/cm ²)	% de error
n5	0.4	1.28	80.00
n19	0.2	0.71	76.75
n26	0.2	0.53	166.00

5.1.7 Sector 7

Este sector es el de menor tamaño, representa el 0.3 % y se ubica al Norte de la cabecera municipal. Al igual que el 5 es uno de los más recientes (alrededor de 10 años). En la Figura 44 se observa el sector en EPANET.

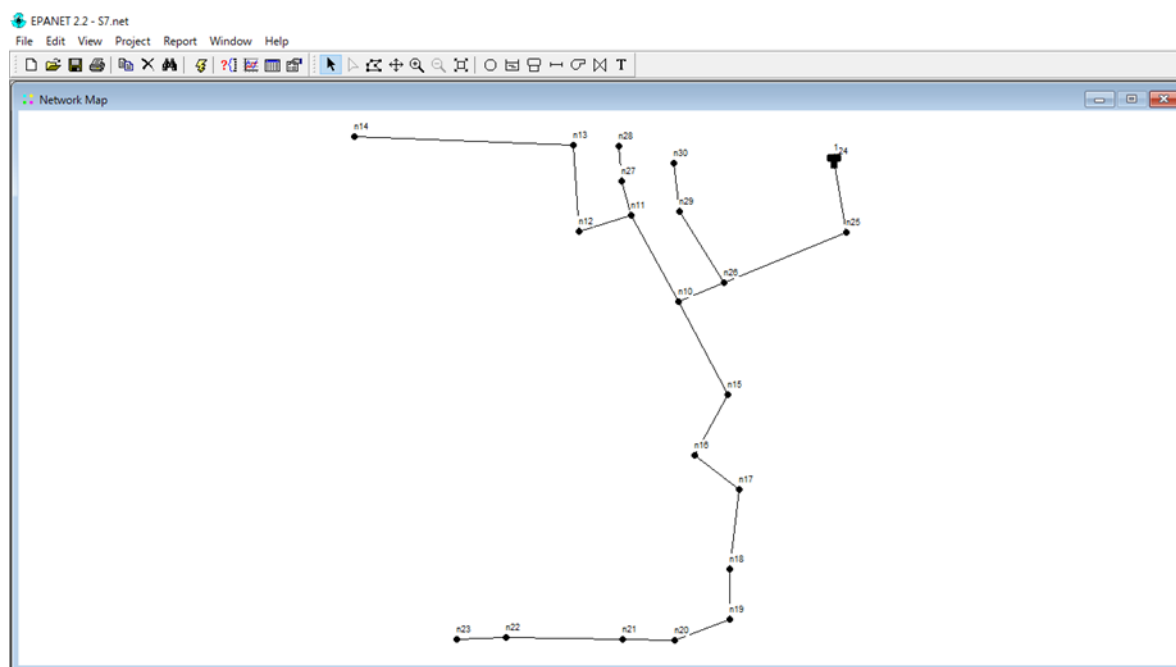


Figura 44. Sector 7, EPANET.

En la Tabla 25 los resultados obtenidos mediante la simulación y en la Tabla 26 la comparación con los resultados de campo.

Tabla 25. Presiones EPANET Sector 7

Sector 7	Elevación	Demanda	Altura	Presión
ID Nodo	Msnm	lps	m	kg/cm²
n30	1241.77	0	1267.23	1.54
n29	1241.64	0.02	1267.23	1.56
n28	1235.76	0.02	1267.16	1.05
n27	1236.68	0.02	1267.16	1.96
n26	1243.94	0.01	1267.23	1.33
n25	1250.75	0	1267.36	0.65
n24	1256.63	0	1267.42	0.07
n23	1233.56	0.01	1267.14	2.25
n22	1237.17	0	1267.14	1.89
n21	1235.58	0.01	1267.14	2.05
n20	1236.75	0.04	1267.14	1.93
n19	1228.80	0	1267.14	1.43
n18	1226.67	0.02	1267.14	2.94
n17	1237.58	0	1267.15	1.86
n16	1229.53	0.01	1267.15	2.67
n15	1234.05	0.01	1267.16	2.23
n14	1229.50	0	1267.15	2.67
n13	1231.21	0.04	1267.15	2.50
n12	1231.80	0.01	1267.15	1.35
n11	1236.84	0.02	1267.16	1.95
n10	1239.64	0.02	1267.18	1.69
Tank 1	1257.42	-0.22	1267.42	0

Los valores de presión varían entre 0.071 kg/cm² (n24) y 2.949 kg/cm² (n18). En este sector, casi todos los nodos están dentro del rango, excepto n24 (0.071 kg/cm²) y n25 (0.652 kg/cm², límite bajo), lo que indica deficiencia de presión en la zona alta cercana al tanque. En caso de disminución del nivel en el tanque o mayor demanda, la zona alta podría quedar sin suministro.

En la Tabla 26 se muestra la comparación de los resultados de campo y EPANET.

Tabla 26. Presión de campo vs EPANET, Sector 7.

Sector 7			
ID	Presión de campo (kg/cm²)	Presión EPANET (kg/cm²)	% de error
n12	0.6	2.45	93.14
n19	0.7	2.73	79.25
n28	0.5	2.05	76.5

5.1.8 Representación gráfica de resultados por sector.

La Figura 45 muestra algunos de los puntos en los que se tomó la presión de campo, los cuales fueron empleados para realizar una comparación con los valores obtenidos de EPANET.

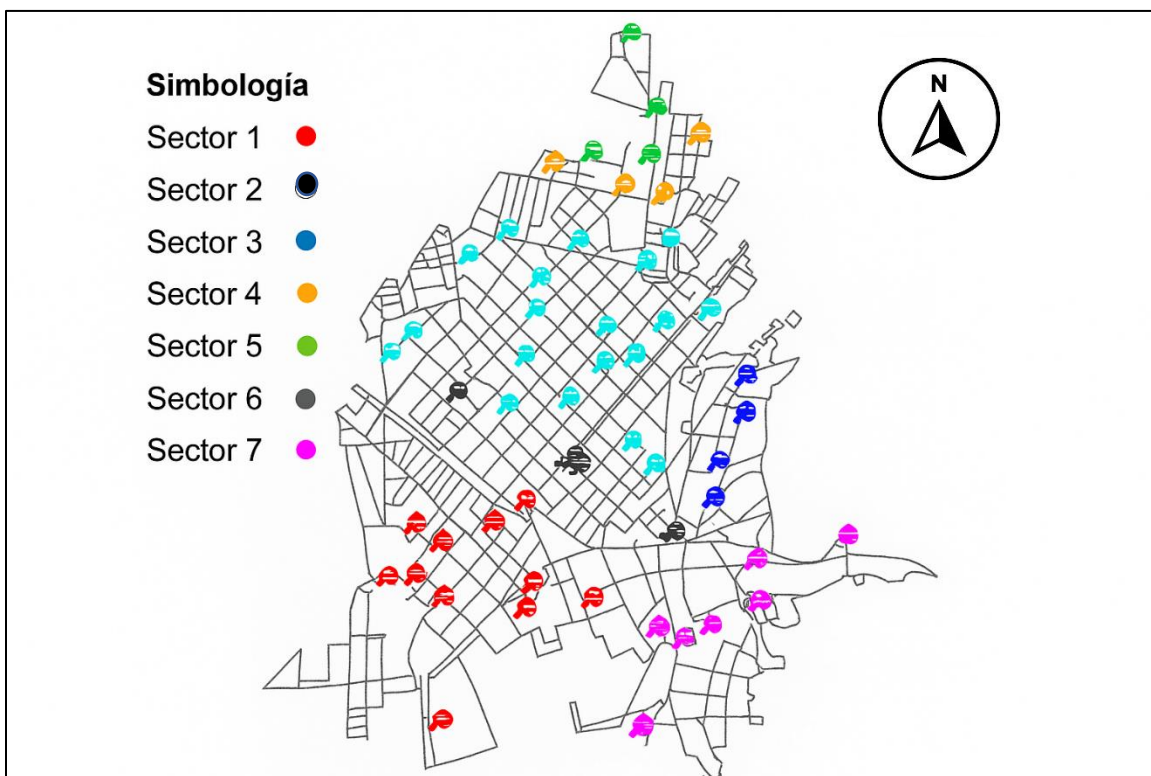


Figura 45. Representación gráfica de presiones en AUTOCAD.

5.2 Discusión de resultados

A continuación, se discuten los principales resultados obtenidos durante esta investigación. El principal hallazgo encontrado al llevar a cabo la simulación con EPANET fue que las presiones de campo en algunos casos presentan un porcentaje de error considerable con las que se obtuvieron con el programa de cómputo. Los nodos que tienen errores menores al 5% indican una calibración precisa (EPANET sugiere errores por debajo del 10–15%), el error medio (30%), aún aceptable en condiciones reales de operación y el error elevado (80%), evidencia un punto problemático, esto puede ser ocasionado por distintos factores los cuales se mencionan a continuación.

La alta demanda: Durante periodos de alta demanda de agua, como en la temporada de calor la presión puede disminuir debido a la mayor extracción de agua. La mayor demanda se registra en la zona centro (Sector 2) debido a que en esta área cuentan con un mayor número de habitantes y a que es aquí donde se lleva a cabo el comercio y donde se localizan la mayor cantidad de instituciones educativas de la cabecera municipal.

Nivel de tanques de almacenamiento: Si los niveles de los tanques de almacenamiento de agua son bajos, puede haber una disminución en la presión, aunado a que es necesario conocer si los tanques cuentan con el volumen necesario para abastecer los sectores (Ludwigson, 2020). En este caso se realizaron los cálculos necesarios para conocer si en cada uno de los sectores el tanque de almacenamiento posee el volumen apropiado. En base a los resultados obtenidos se sabe que todos los sectores cumplen con un tanque adecuado para las necesidades de la población a la que abastecen.

Problemas con las tuberías: Tuberías obsoletas o con diámetros insuficientes para manejar el flujo requerido pueden causar pérdidas de presión significativas. La cabecera municipal cuenta con distintos diámetros de tuberías, sin embargo, desde la introducción del sistema de abastecimiento de agua potable al municipio no se les da dado ninguna clase de mantenimiento ni se ha evaluado la posibilidad de realizar cambios en ellas.

La acumulación de sedimentos, minerales y otros depósitos dentro de las tuberías puede reducir el diámetro efectivo de la misma, restringiendo así el flujo y disminuyendo la presión y el caudal (Banks, McCrary, & Schnoor, 2019). La antigüedad de las tuberías también puede ser un factor importante para que se generen pérdidas de agua debido a fugas o roturas. Cuando una tubería es muy antigua, el coeficiente de rugosidad aumenta debido al deterioro interno de sus paredes. Con el paso del tiempo se producen fenómenos como: corrosión interna, incrustaciones minerales (carbonatos, óxidos y sedimentos), acumulación de biopelículas y depósitos. Y el desgaste y deformaciones de la superficie interna. Estas condiciones generan una mayor resistencia al flujo del agua, provocando pérdidas de carga más elevadas y, en consecuencia, menores presiones disponibles en la red. Por ello, si las presiones simuladas son mayores que las medidas en campo, una posible explicación es que las tuberías reales tengan una rugosidad superior a la considerada en el modelo, produciendo pérdidas de carga más altas que las calculadas por EPANET (American Water Works Association, 2013).

Válvulas y reguladores de presión: Las válvulas de control de presión mal ajustadas o reguladores defectuosos pueden afectar negativamente la presión. Las válvulas de control de la zona de estudio se encuentran en las mismas condiciones que las tuberías, sin mantenimiento y con gran acumulación sedimentos que en algunos casos incluso fue imposible tener acceso a ellas para registrar sus mediciones.

Los principales problemas que esto puede ocasionar son: incrementar la incidencia de fugas en la red, lo que no solo desperdicia agua, sino que también aumenta los costos operativos y un suministro de agua inadecuado, especialmente en las zonas más alejadas o en momentos de alta demanda. Las fluctuaciones de presión también pueden acelerar el desgaste de las tuberías y conexiones, llevando a un mayor número de averías y la necesidad de reparaciones frecuentes (R. B. McDonald, 2016).

Expansión del sistema sin actualización: La expansión del sistema de distribución de agua potable sin una actualización adecuada puede tener varias consecuencias negativas, tanto para la infraestructura como para la calidad del servicio (Rahman & Vanier, 2019). El

crecimiento de la población ha sobrecargado el sistema existente, y este no tiene la capacidad de manejar el aumento de demanda lo que puede llevar a una baja presión en el suministro de agua, especialmente en las áreas más alejadas de la fuente de abastecimiento, por otro lado, también puede generar una distribución desigual del agua, con algunas áreas recibiendo un servicio adecuado mientras que otras no. Esto genera un descontento entre los usuarios y problemas sociales y económicos. Aunque inicialmente pueda parecer más económico expandir sin actualizar, los costos a largo plazo pueden ser significativamente mayores debido a la necesidad constante de reparaciones, reemplazos de emergencia y manejo de problemas de calidad del agua. Los resultados demuestran que la expansión sin actualizaciones puede comprometer seriamente la eficiencia y la calidad del servicio de agua potable. La disminución en la presión y el aumento de fugas son indicativos de una infraestructura sobrecargada y obsoleta. Además, la calidad del agua se ve comprometida, poniendo en riesgo la salud de los residentes (Lopez A., 2024).

Durante la campaña de toma de presiones se detectó que gran parte de la población cuenta con bombas presurizadoras en sus domicilios conectadas a la línea principal de abastecimiento. Las bombas presurizadoras son dispositivos utilizados para aumentar la presión del agua en sistemas de abastecimiento, especialmente en situaciones donde la presión proporcionada por la red de suministro es insuficiente para las necesidades del usuario, como en este caso (Escolero, Kralish, Martínez, & Perevochtchikova, 2016). Estas garantizan una presión de agua constante y adecuada. Las bombas presurizadoras pueden afectar la presión en la red de abastecimiento si no se usan correctamente. En algunas zonas, las autoridades pueden regular su uso para evitar que la red se vea afectada negativamente, cada municipio puede tener sus propias normativas respecto al uso de bombas presurizadoras. Es importante consultar las regulaciones locales para asegurarse de cumplir con los requisitos específicos. En algunos casos, puede ser necesario obtener permisos o autorizaciones de la autoridad local de agua antes de su instalación (Darweesh, 2018).

Otro de los principales problemas detectados es el material de fabricación la mayor parte de las tuberías (50%). Las tuberías de asbesto han sido utilizadas ampliamente en sistemas de distribución de agua potable debido a su resistencia y durabilidad. Sin embargo, con el tiempo, se han identificado varios problemas y riesgos asociados con su uso. El asbesto es un material fibroso que puede liberar partículas al aire cuando se deteriora. La inhalación de fibras de asbesto puede causar graves problemas de salud, aunque el riesgo principal está asociado con la inhalación, hay preocupación sobre la posible liberación de fibras en el agua potable cuando las tuberías se deterioran (Peña-Castro, Montero-Acosta, & Saba, 2023). Con el paso del tiempo, las tuberías de asbesto-cemento pueden volverse frágiles y propensas a romperse. Esto puede resultar en fugas, pérdida de presión (lo cual se observa en la mayoría de las mediciones tomadas en campo para los 7 sectores ya que solo 5 de los 30 puntos cumplen con la presión ideal para proporcionar un buen servicio) y costos elevados de mantenimiento y reparación.

Finalmente, la intervención del ayuntamiento en la gestión del agua en la zona conurbada del municipio ha contribuido a la falta de conocimiento en la operación del sistema de abastecimiento de agua potable, aunque el organismo operador APASCAR se descentralizó del ayuntamiento en el 2018, este continúa cambiando al personal cada que hay cambio de administración, en la mayoría de los casos el personal nuevo carece de conocimiento acerca de la operación del sistema aunado a que en caso de que se genere algún tipo de información por parte del nuevo personal esta no se comparte con la siguiente administración.

Es importante mencionar que no existe ningún problema con las principales fuentes de abastecimiento (pozo 1 y 2) ya que en base a la información recabada y a los cálculos realizados se sabe que diariamente se extraen $4,450 \text{ m}^3$ de agua y para proveer a toda la población de la cabecera municipal son necesarios 2730 m^3 lo que resulta en un excedente de 1720 m^3 que seguramente se pierden en fugas que existen en el sistema (esto puede ser comprobado mediante la variación que existe entre los valores de presión registrados en campo y los obtenidos de la simulación de EPANET), aunado a que aunque se extrae más

del volumen necesario de agua para abastecer a la población no todos los habitantes reciben agua diariamente ni el volumen que les corresponde.

Durante el desarrollo del proyecto se presentaron diversas limitantes que dificultaron la obtención de información en campo. Entre las principales se encontró el acceso restringido a los domicilios para la medición de presiones, ya que los horarios autorizados por los usuarios no siempre coincidían con las condiciones operativas requeridas para el estudio. Asimismo, se observó que la presión del agua varía significativamente a lo largo del periodo de abastecimiento, registrándose valores más elevados al inicio del suministro y menores al acercarse el término del mismo. Adicionalmente, se identificaron dificultades para localizar y acceder a las cajas de válvulas de la red, debido a que muchas de ellas se encuentran parcial o totalmente enterradas, presentan obstrucciones o han dejado de ser visibles por su antigüedad. En algunos casos, incluso se desconoce su ubicación exacta por la falta de registros actualizados, lo que complicó las actividades del censo de la infraestructura hidráulica.

5.3 Propuestas de mejora

Una red de abastecimiento de agua potable con baja presión requiere una combinación de mejoras tecnológicas, operativas y de gestión para lograr su optimización (Khoury & Osman, 2022).

La principal propuesta es el reemplazo de tuberías que han llegado al fin de su vida útil, es necesario sustituir aquellas que presenten desgaste o daño significativo, en este caso se asume que la mayoría se encuentran en esta situación ya que cuentan con una antigüedad mayor a 50 años aunado a que, como se observa en los resultados las presiones en campo son muy bajas en comparación con las que genera EPANET. El ayuntamiento debe considerar invertir en la modernización de la infraestructura existente con materiales y tecnologías avanzadas, para ello debe estimar los costos asociados al reemplazo,

incluyendo materiales, mano de obra, y posibles interrupciones del servicio, crear un presupuesto y asegurar la financiación adecuada. Se debe planificar el corte temporal del suministro de agua y la redirección del flujo para minimizar las interrupciones. Al realizar los cambios se deberán actualizar los planos de la red con la información de las nuevas instalaciones para futuras referencias.

La siguiente propuesta es implementar un programa de detección y reparación de fugas, este será una inversión que puede ofrecer grandes beneficios en términos de eficiencia operativa, conservación de recursos y satisfacción del cliente. Con una planificación adecuada, el uso de tecnología avanzada y un enfoque en la mejora continua, el programa puede tener un impacto significativo en la gestión del agua potable ya que su principal objetivo es minimizar las pérdidas (White & Davis, 2018). Para llevar a cabo este programa es necesario realizar una evaluación inicial para identificar las áreas más propensas a fugas y aquellas que en campo registraron las presiones más bajas, utilizando datos históricos de mantenimiento y consumo. Posteriormente se deben adquirir equipos de detección de fugas, como correladores acústicos, geófonos, cámaras de inspección y sensores de presión y formar al personal técnico en el uso de estos equipos y en las prácticas para la reparación de fugas. A sí mismo, será necesario establecer un calendario de inspecciones regulares para cubrir toda la red de manera sistemática, enfocándose en áreas con antecedentes de fugas frecuentes o con infraestructuras más antiguas. Finalmente, se deben calcular los costos iniciales de adquisición de equipos y formación, así como los costos operativos continuos y evaluar el ahorro potencial en costos de agua y mantenimiento como resultado de la reducción de fugas.

Se propone, en áreas críticas, considerar el aumento del diámetro de las tuberías para mejorar el flujo y la presión del agua. El aumento en el diámetro de las tuberías de una red de abastecimiento de agua potable es una solución eficaz para mejorar la presión y el flujo del agua, especialmente en áreas donde la demanda ha aumentado (como en el sector 2) o donde se experimentan problemas de baja presión, en este caso en la mayor parte de la cabecera municipal según los datos de campo (Mendoza & Torres, 2019). Para ello es

necesario realizar cálculos hidráulicos para determinar el diámetro óptimo de las nuevas tuberías, considerando factores como el caudal máximo esperado, la longitud de la tubería y las pérdidas de carga. Las tuberías de mayor diámetro suelen requerir menos mantenimiento debido a su mayor capacidad para manejar fluctuaciones en el flujo y la presión. Aunque la inversión inicial puede ser significativa, los costos operativos a largo plazo pueden reducirse debido a la mayor eficiencia y menor necesidad de reparaciones frecuentes. Incrementar el diámetro de las tuberías también prepara la red para futuros aumentos en la demanda y posibles expansiones.

Se sugiere también, el uso de válvulas para controlar y mantener una presión constante. En una red de abastecimiento de agua potable esta estrategia mejora la eficiencia operativa y garantizar un suministro de agua uniforme. Mantener una presión constante reduce el estrés en las tuberías y las conexiones, disminuyendo el riesgo de rupturas y fugas. La operación a presiones óptimas prolonga la vida útil de la infraestructura de la red. La regulación adecuada de la presión minimiza las interrupciones en el servicio debido a problemas de sobrepresión o baja presión y reduce el consumo energético de las bombas y otros equipos de la red.

Otra propuesta importante es realizar inspecciones regulares. Se sugiere establecer un calendario de actividades para detectar y solucionar problemas antes de que se agraven. El objetivo principal será verificar el estado de las tuberías para identificar posibles fugas, corrosión o daños que puedan afectar la calidad del agua o provocar pérdidas, inspeccionar los tanques de almacenamiento y comprobar el funcionamiento correcto de las bombas y válvulas para asegurar un flujo constante y adecuado de agua.

Igualmente es importante formar al personal en las mejores prácticas de mantenimiento y operación de la red, por lo que se propone un programa de formación integral y continuo, de este modo el personal estará mejor preparado para mantener y operar eficientemente la red de abastecimiento de agua potable, garantizando así un suministro seguro y de alta calidad para la población (Huang & Jhonson, 2017). En primer lugar, se deben evaluar las habilidades actuales del personal para determinar las áreas que requieren más atención,

así como identificar las competencias y conocimientos necesarios para las tareas específicas de mantenimiento y operación. Posteriormente se diseña un plan de formación que incluya tanto teoría como práctica y se deberán contratar instructores con experiencia y conocimiento en el mantenimiento y operación de redes de abastecimiento de agua. Se sugiere también que el personal no sea relevado cada que el ayuntamiento cambia de administración para que así adquieran la experiencia necesaria y poder eliminar el problema de gobernanza que existe.

Para finalizar, se propone promover el uso eficiente del agua entre los usuarios a través de campañas de sensibilización ya que el organismo operador no realiza este tipo de actividades y es necesario asegurarse de que el agua que recibe la población sea utilizada de manera eficaz. Las campañas de sensibilización pueden ser una herramienta para educar a la población y fomentar prácticas de ahorro de agua. Durante estas campañas se pueden proporcionar consejos prácticos y sencillos para ahorrar agua, como arreglar fugas, instalar dispositivos de bajo flujo, usar electrodomésticos eficientes y practicar riego inteligente en jardines.

5.4 Propuesta de sectorización hidráulica

La siguiente propuesta es una sugerencia para estudios posteriores.

El sector independiente deberá cumplir con las siguientes características (AWWA, 2016):

- Delimitación física mediante válvulas de seccionamiento.
- Una sola entrada de agua al sector.
- Uso doméstico.
- Problemas recurrentes de baja presión.
- Número de habitantes representativo de la población total.
- Instalación de un macromedidor.

Se recomienda seleccionar un sector con una población aproximadamente al 10–20 % de la población total abastecida por uno de los tanques (en este caso el sector 4 cumple con este criterio).

El sector estaría conformado por:

- Una tubería principal de alimentación.
- Válvulas de aislamiento en todos los puntos de interconexión con el resto de la red.
- Un macromedidor.
- Registro de caudales de entrada.

Una vez establecido el sector se deberá:

1. Medir continuamente el caudal de entrada.
2. Determinar el consumo de los usuarios.
3. Calcular el balance hídrico:

$$\text{Pérdidas} = \text{Volumen de entrada} - \text{Volumen consumido}$$

Beneficios esperados:

- Identificación de fugas.
- Mejora de presiones en viviendas con deficiencias de servicio.
- Obtención de datos para recalibrar el modelo hidráulico de EPANET.
- Disminución de los errores de simulación actualmente observados.
- Base para expandir la sectorización al resto de la cabecera municipal.

Debido a que la red presenta porcentajes de error elevados y problemas de presión generalizados, se recomienda plantear una sectorización gradual. Los resultados obtenidos permitirán validar el modelo hidráulico y servirán como base para dividir posteriormente la red completa de la cabecera municipal en varios sectores hidráulicos independientes.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos durante el análisis confirman la validez de la hipótesis planteada. El uso de un programa de cómputo especializado para la evaluación del sistema de abastecimiento de agua potable demostró ser una herramienta eficaz para realizar un análisis del desempeño de la red. A través de la simulación digital fue posible identificar de manera oportuna diversas deficiencias operativas y estructurales, lo que facilita la propuesta de mejoras para la mejora de la gestión de los recursos hídricos y la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento, la ampliación y la sostenibilidad del sistema.

La red de abastecimiento de agua potable de la cabecera municipal enfrenta desafíos significativos debido a su antigüedad y falta de mantenimiento. Sin embargo, con una inversión adecuada en modernización y un enfoque proactivo en el mantenimiento, es posible mejorar significativamente la eficiencia, fiabilidad y sostenibilidad del sistema de suministro de agua. Es importante que las autoridades y el organismo operador trabajen en conjunto para implementar las recomendaciones y asegurar un suministro de agua potable seguro y constante para todos los residentes.

Este estudio subraya la importancia de planificar expansiones de sistemas de distribución de agua potable con actualizaciones adecuadas de la infraestructura. Se recomienda implementar estrategias de modernización, como la sustitución de tuberías y la mejora de la gestión del sistema mediante tecnologías avanzadas de monitoreo y control.

Las variaciones en la presión del agua son comunes en diferentes partes de la red, afectando especialmente a las áreas más alejadas del punto de abastecimiento principal. Las bajas presiones en ciertas zonas hacen que el suministro de agua sea intermitente y poco fiable, impactando negativamente en la calidad de vida de los residentes y en la operatividad de negocios y servicios locales. La falta de un programa de mantenimiento regular ha empeorado los problemas de la red ya que las reparaciones se realizan de manera reactiva, solo cuando ocurren fallas significativas.

La ausencia de modernización tecnológica impide la implementación de soluciones más eficientes y sostenibles que podrían mejorar el rendimiento de la red.

Se recomienda un plan a largo plazo para el reemplazo gradual de las tuberías y componentes obsoletos, utilizando materiales modernos y más duraderos.

El presente trabajo de investigación constituye una base para el desarrollo de estudios posteriores relacionados con el sistema de abastecimiento de agua potable. Previamente, no se contaba con información técnica suficiente sobre el funcionamiento hidráulico de la red, ni con planos actualizados que permitieran conocer su configuración. Asimismo, existe un desconocimiento significativo respecto a las características físicas de la infraestructura, particularmente en lo referente a los diámetros de la mayoría de los tramos de tubería. Esta falta de información representa una limitante para la adecuada gestión, operación y planificación del sistema, por lo que los resultados obtenidos en este estudio aportan elementos técnicos valiosos para futuras investigaciones, procesos de actualización de información y acciones de mejora de la red de distribución.

Referencias

- American Water Works Association. (2013). STEEL WATER-STORAGE TANKS. In *AWWA MANUAL* (pp. 67-61).
- American Water Works Association. (2019). Retrieved from Design and Operation of Water Distribution Systems (M32): <https://store.awwa.org/AWWA-C514-15-Air-Valve-and-Vent-Inflow-Preventer-Assemblies-for-Potable-Water-Distribution-System-an>
- Anaya Ortega R., R. L. (2018). *Efemérides de Cárdenas, S.L.P.* . Cárdenas, S.L.P.
- APASCAR. (2018). *Descripción general del sistema de abastecimiento de agua potable*. Cárdenas, S.L.P.
- APASCAR. (2019). *Informe de resultados*. Cárdenas, S.L.P.
- Arreguín, F. I.-Y.-P. (2010). Modelación de redes de agua potable con enfoques determinísticos y estocásticos. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 119-136.
- AWWA. (2016). *Manual M36: Water Audits and Loss Control Programs*.
- Azazkhan, U. M. (2022). Design & Analysis of Water Distribution Network Using Epanet 2.0 & Loop 4.0 - A CaseStudy of Narangi Village. *Springer Nature*, 671-684.
- Banks, M., McCrary, K., & Schnoor, J. (2019). "A Review of Water Distribution System Monitoring and Leak Detection". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 45.
- Cabrera-Béjar, J. A. (2012). Modelación de redes de distribución de agua con suministro intermitente. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 05-25.
- Chuquín Nelson, C. D. (2018). Modelación Matemática del Sistema Hidráulico de la Red de Agua Potable de la Ciudad de Riobamba. *Revista Perfiles*, 1(19), 37-49.

- CONAGUA. (2015). Retrieved from Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 4, Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>
- CONAGUA. (2017). Retrieved from LEY DE AGUAS NACIONALES Y SU REGLAMENTO: <http://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGJ-1-17.pdf>
- CONAGUA. (2019, Febrero 02). Retrieved from Biblioteca Digital de MAPAS. Manual de Agua Potable,: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro13.pdf>
- Darweesh, M. (2018). Assessment of variable speed pumps in water distribution systems considering water leakage and transient operations. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 99-108.
- DroneDeploy. (n.d.). *DroneDeploy: Drone Mapping Software. Drone Mapping App*. Retrieved from <https://www.dronedeploy.com/>
- Dueñas, J. M. (2019). *Topografía y Geodesia*.
- EPA United States Environmental Protection Agency. (2024, Mayo). Retrieved from EPANET Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- EPANET. (2012). *Manual de usuario*. Retrieved from https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/EPANET_Manual_Usuario.pdf
- Escolero, O., Kralish, S., Martínez, S., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Scielo*.
- Fragoso Sandoval, L. R. (2016). La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(2), 29-43.

García, E. (2024). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Mexico: UNAM, Instituto de Geografía.

GeoOil Energy International. (n.d.).
<https://www.geoilenergy.com/es/software/geosoluciones/global-mapper>.
Retrieved from Global Mapper:
<https://www.geoilenergy.com/es/software/geosoluciones/global-mapper>

GNSS Solutions . (2012). *Manual de referencia*. Retrieved from
https://www.ecomexico.net/proyectos/soporte/ASHTECH%20-%20SPECTRA/GNSS/manuals/GNSSolutions_RM_F_es.pdf

Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2012). Retrieved from Monografía Municipal de Cárdenas:
https://cefimslp.gob.mx/monografias_municipales/2012/cardenas/files/assets/downloads/publication.pdf

Gobierno municipal de Cárdenas, San Luis Potosí. (2018). Retrieved from Nuestro municipio:
<http://www.cardenas-slp.gob.mx/2015-2018/nuestromunicipio.html>

González-Villarreal, F. A.-D. (2016). Percepciones, actitudes y conductas respecto al servicio de agua potable en la Ciudad de México / Perceptions, Attitudes, and Behaviors towards the Water Supply System of the Mexico City. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(6), 41-56.

Google Earth. (2025). Retrieved from <https://portal.edu.gva.es/appsedu/es/google-earth/#::~:~:text=Google%20Earth%20es%20un%20sistema,la%20posibilidad%20de%20crear%20mapas>.

Granados Zafra, Y. (s.f.). *Manual para el postproceso de imágenes obtenidas a partir de una aeronave tripulada remotamente (drone) en los softwares Agisoft photoscan y PIX4D*. Retrieved from Universidad Distrital Francisco José de Caldas.:

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/14055/ZafraGranadosYesidRomairoAnexo-1.pdf?sequence=2>

- H. Congreso del Estado de San Luis Potosí, Instituto de Investigaciones Legislativas. (2022). *LXIII Legislatura, H. CONGRESO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ*. Retrieved from Ley de aguas para el estado de San Luis Potosí: https://congresosanluis.gob.mx/sites/default/files/unpload/legislacion/leyes/2022/05/Ley_de_Aguas_para_el_Estado_de_San_Luis_Potosi_26_Mayo_2022.pdf
- Haut, B. &. (2007). Analysis of the water supply system of the city of Apamea, using Computational Fluid Dynamics. Hydraulic system in the north-eastern area of the city, in the Byzantine period. *Journal of Archaeological Science*, 34(3), 415-427.
- Huang, L. C., & Jhonson, D. R. (2017). Smart Monitoring Technologies for Urban Water Supply Networks. *Environmental Science & Technology*, 12655-12664.
- INEGI. (2002). Retrieved from Síntesis geográfica del Estado de San Luis Potosí: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224240/702825224240_1.pdf
- INEGI. (2008). *Geografía y medio ambiente*. Retrieved from Red Geodésica Nacional Activa: https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa/#documentacion
- INEGI. (2020). *Censo de población y vivienda*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* . (2015). Retrieved from Manual de diseño de redes de distribución de agua potable: <https://www.imta.gob.mx/images/pdf/informes-anauales/informe2015/Informe-de-resultados-IMTA-2015.pdf>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. (2012). Retrieved from Guía para el diseño hidráulico de sistemas de distribución de agua potable:

https://www.imta.gob.mx/images/pdf/informes-anuales/informe2012/5_1_Informe_anual_IMTA_2012.pdf

- J. Muranho, A. F. (2012). WaterNetGen: an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing. *Water Science & Technology: Water Supply*, 12, 117-123.
- Khoury, A. K., & Osman, M. S. (2022). Optimizing the Design of Water Distribution Networks: A Review. . *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Lopez A., M. C. (2024). Consecuencias de la Expansión de Sistemas de Distribución de Agua Potable sin Actualizaciones Adecuadas. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 123-136.
- López Jiménez, E. (2017, Mayo 1). *Instituto Politécnico Nacional*. Retrieved from GENERALIDADES DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT's): <https://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/708-cyt-numero-60/1378-generalidades-de-los-vehiculos-aereos-no-tripulados-vant-s>
- Lopez, G. T. (2012). *La sectorización en la optimización hidráulica de redes de distribución de agua potable*. Retrieved from Instituto Politécnico Nacional: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/11374/370.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ludwigson, M. (2020). *Tanques de almacenamiento de agua*. Retrieved from www.SunCam.com
- Mays, L. W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill.
- Mendoza, M. G., & Torres, R. L. (2019). Impact of Aging Infrastructure on the Efficiency of Urban Water Supply Systems. *Journal of Infrastructure Systems*.
- Monografías de los Municipios de México*. (2012). Retrieved from Cárdenas, San Luis Potosí: https://cefimslp.gob.mx/monografias_municipales/2012/cardenas/files/assets/basic-html/page1.html

- Morelos Raúl A., R. H. (2017). Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad mexicana con EPANET. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(2), 120 – 132.
- Organizacion de las Naciones Unidas. (2023). Retrieved from El agua y el desarrollo sostenible: <https://www.un.org/es/observances/water-day>
- Organización Panamericana de la Salud. (2003). Retrieved from Manual de Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable.: <https://www.paho.org/es/documentos/manual-diseno-sistemas-abastecimiento-agua-potable>
- Peña-Castro, M., Montero-Acosta, M., & Saba, M. (2023). A critical review of asbestos concentrations in water and air, according to exposure sources. *Science Direct*.
- Píriz, R. (n.d.). *La sincronización utilizando satélites de navegación*. Retrieved from <http://gmv.com/media/blog/espacio/la-sincronizacion-utilizando-satelites-de-navegacion>
- Plan municipal de desarrollo, Cárdenas S.L.P. (2019). Retrieved from https://www.cardenas-slp.gob.mx/2018-2021/images/LEYES-Y-REGLAMENTOS/Cardenas_Plan_Municipal_2018-2021_19-FEB-2019_OK.pdf
- R. B. McDonald, A. C. (2016). "Maintenance and Operation of Pressure Regulating Valves in Water Distribution Systems". *Journal of Water Resources Management*.
- Rahman, A., & Vanier, D. J. (2019). *Asset Management Practices in Urban Water Supply Systems*.
- Rahman, A., & Vanier, D. J. (2019). Asset Management Practices in Urban Water Supply Systems: A Comprehensive Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*,.

- Rahman, A., & Vanier, J. (2019). Asset Management Practices in Urban Water Supply Systems: A Comprehensive Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Rossman, L. (2000). *EPANET 2 Users manual*. Cincinnati, OH.
- Sánchez Tapiero, D. I. (2021). SIG aplicado a la optimización del tiempo de diseño en redes de distribución de agua potable. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(1), 68-80.
- SIAPA . (2014). *Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Sistemas de Agua Potable. Cap.2 Sistemas de agua potable*.
- Sunela, M. I. (2015). Real Time Water Supply System Hydraulic and Quality Modeling – A Case Study. *Procedia Engineering*, 119, 744-752. Retrieved from <https://doi.org.creativaplan.uslp.mx/10.1016/j.proeng.2015.08.928>
- United States Environmental Protection Agency . (2024, Mayo). *Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems*. Retrieved from <https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/>
- Universidad Politécnica de Valencia. (2022). *EPACAD*. Retrieved from <https://epacad.com/epacad-es.php>
- Vekemans, O. &. (2017). Hydraulic analysis of the water supply system of the Roman city of Perge. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 16, 322–329. Retrieved from <https://doi.org.creativaplan.uslp.mx/10.1016/j.jasrep.2017.09.08>
- Villareal, F. G. (2020, Junio). *Publicación digital de la red de agua de la UNAM*. Retrieved from Retos de la infraestructura hidráulica: <https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero11.pdf>
- Walski, T. M. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Waterbury, CT: Haestad Press.

White, & Davis. (2018). Pressure Management in Water Distribution Systems: Techniques and Benefits. *Journal of Hydraulic Engineering*.

WIKIPEDIA. (2022). *Google Earth*. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/Google_Earth

Zivkovic, D., & Jovicic, J. (2021). Modeling and Simulation of Urban Water Supply Systems. *Urban Water Journal*, 127-139.

Anexos

En el 2019 se realizaron los últimos análisis para evaluar la calidad del agua de los pozos, los resultados se muestran a continuación (APASCAR, 2019).

Pozo	Temp. °C	Oxígeno Disuelto (%)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad (µs/cm)	pH	ORP (mv)	Alcalinidad total (mg/L)	Alcalinidad en campo (mg/L)
Pozo 1	23.8	53	4.6	757	6.75	147	264	260.8
Pozo 2	23.1	47	4.3	969	6.92	47	296	256.0
Pozo 3	23.8	36	3.1	982	6.8	155	322	310.4

Pozo	Dureza total (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Nitritos (mg/L)	Fluoruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Fosfatos (mg/L)
Pozo 1	231.8	13.6	<0.004	0.43	23.4	29.8	0.79
Pozo 2	343.7	29.3	<0.004	0.36	79.8	47.6	0.19
Pozo 3	331.7	30.6	<0.004	0.46	38.0	33.8	0.39

Pozo	Coliformes totales (NMP/100mL)	Coliformes fecales (NMP/100mL)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)
Pozo 1	ND	ND	67.3	19.0	42.7	5.5	8.9	11.3
Pozo 2	ND	ND	89.5	24.9	44.0	3.8	ND	5.3
Pozo 3	ND	ND	104.1	16.9	52.7	3.7	1.1	4.3

Pozo	Al (µg/L)	Zn (mg/L)	Cu (µg/L)	Ni (µg/L)	Ba (mg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	As (µg/L)	Pb (µg/L)
Pozo 1	8.5	0.30	19.3	ND	<0.05	0.9	0.4	0.5	26.9
Pozo 2	17.3	0.26	10.2	8.3	<0.05	1.2	1.0	0.7	15.7
Pozo 3	26.2	0.35	ND	20.4	0.18	1.5	0.7	1.5	17.8

Los valores se comparan con la NOM-127-SSA-1997 la cual establece los límites máximos permisibles para agua de uso y consumo humano. Los valores marcados en azul no cumplen con la norma.

Los métodos analíticos utilizados para determinar la calidad del agua se muestran a continuación.

Parámetro	Método
Medición en campo: pH, temperatura, conductividad, ORP	Medidor portátil (Conductronic pH15) Medidor de conductividad (Conductronic PC18) Medidor portátil (Conductronic pH25)
Medición en campo: oxígeno disuelto	Medidor portátil (Conductronic Ox25)
Medición en campo: cloro libre residual	Medidor portátil. Método DPD (HANNA Instruments H1 701)
Nitratos	Método de Ion Selectivo (medidor de pH Orion) con buffer de alta fuerza iónica y método espectrofotométrico UV-Vis
Nitritos	Método colorimétrico con ácido sulfanílico (Espectrofotómetro UV-Vis Thermo Elemental)
Sulfatos	Método turbidimétrico con cloruro de bario (Espectrofotómetro UV-Vis Thermo Elemental)
Cloruros	Método argentométrico con cloruro de plata
Fluoruros	Potenciómetro con electrodo de ion selectivo con buffer de alta fuerza iónica TISAB (medidor de pH Orion)
Alcalinidad	Laboratorio: Titulación potenciométrica (medidor de pH Orion) Campo: Titulación potenciométrica con titulador HACH y HCl 0.08 N
Dureza (Total de Ca y Mg)	Titulación complejométrica con EDTA
Arsénico, Cadmio, Plomo, Cromo, Hierro, Manganeseo, Cobre y Níquel	Espectrofotometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito (Varian SpectrAA 220Z)
Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Zinc y Bario	Espectrofotometría de Absorción atómica de Flama (Varian SpectrAA 220FS) o Espectroscopia ICP óptica (Thermo elemental)
Coliformes totales y Coliformes Fecales.	Método del número más probable/ 100mL