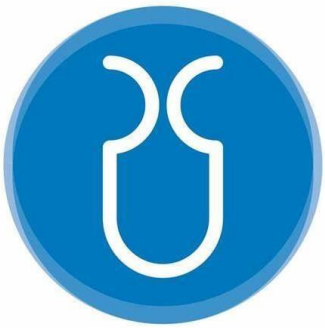


UNIVERSIDAD DEL AZUAY

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN HIDROSANITARIA

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL SECTOR CEBOLLAR 3.2 NORTE A TRAVÉS DE UN MODELO HIDRÁULICO PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES OPERATIVAS DEL SISTEMA.

Autor:

Ing. Henry Miguel Calle Moscoso

Director:

Ing. Fabián Eduardo Cazar Almache

CUENCA - ECUADOR

Año 2023

DEDICATORIA

A mis hijos Ana Paula y José Miguel
por ser mi mayor inspiración en el
desarrollo de este estudio, siendo
el pilar fundamental de mi vida
y mi motivación diaria.

AGRADECIMIENTO

Ha sido un camino largo de recorrer con mucho esfuerzo, agradezco a mis maestros y director por la confianza, esfuerzo y empeño para formarnos como profesionales capaces y confiables.

RESUMEN

Este trabajo desarrolla la modelación, calibración y validación del sector de distribución de agua potable del sector Cebollar 3.2 Norte de la ciudad de Cuenca perteneciente al sistema Tomebamba. Se realizó la modelación inicial con información de catastros de redes, altimetría, consumos y elementos hidráulicos. Posteriormente, se utilizaron como parámetros principales de calibración la población actual obtenida a partir de los usuarios registrados (19228hab), micromedición (40l/s) y registros de presiones en los nueve subsectores. Para la validación, se compararon los resultados de datos de presiones entre los obtenidos del modelo calibrado y presiones registradas en ETAPA EP. Se obtuvo un modelo calibrado y validado, con resultados de presiones aceptables dentro de los rangos establecidos en el AWWA y coeficientes de rugosidad ajustados, en donde finalmente fue posible determinar las vulnerabilidades del sector en cuanto a velocidades y pérdidas de carga.

Palabras clave: distribución, caudales, modelo hidráulico, presiones, micromedición, calibración, validación.

ABSTRACT

This work develops the modeling, calibration, and validation of the drinking water distribution of the Cebollar 3.2 North sector of the city of Cuenca belonging to the Tomebamba system. The initial modeling was carried out with information from network, altimetry, consumption, and hydraulic elements. Subsequently, the real population obtained from registered users (19228hab), micro-measurement (40l/s) and pressure records in the nine subsectors were used as main calibration parameters. For validation, the pressure data results are compared between those obtained from the calibrated model and pressures registered in ETAPA EP. A calibrated and validated model was obtained, with acceptable pressure results within the ranges established in the AWWA and adjusted roughness coefficients where it was finally possible to determine the vulnerabilities of the sector in how many speeds and load losses.

Keywords: distribution, flows, hydraulic model, pressures, micro-measurement, calibration, validation

Translated by:

Firmado electrónicamente por:
HENRY MIGUEL CALLE MOSCOSO

Henry Calle

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
Dpto. Idiomas

ÍNDICE

1. INTRODUCCION 1
1.1 Antecedentes 1
1.2 Justificación 1
1.3 Hipótesis 2
1.4 Objetivos 2
1.4.1 Objetivo General 2
1.4.2 Objetivos Específicos 2
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 3
2.1 Definiciones generales 3
2.1.1 Agua Potable 3
2.1.2 Tanque de reserva y ubicación 3
2.1.3 Configuración de una red de distribución 5
2.1.4 Distribución por gravedad 5
2.1.5 Redes de distribución por varias mallas 6
2.1.6 Elementos de una red de distribución 6
2.1.7 Diámetros y vida útil 7
2.2 Disposiciones generales 8
2.2.1 Área de estudio 8
2.2.2 Población actual 9
2.2.3 Población futura 12
2.2.4 Nivel de servicio 12
2.2.5 Definición del consumo actual 13
2.2.6 Dotación del sector a futuro 13
2.2.7 Índice de pérdidas 17
2.3 Disposiciones específicas 19
2.3.1 Conexiones domiciliarias 19
2.3.2 Presión estática y dinámica 20
2.3.3 Pérdidas de carga 20
2.3.4 Velocidades admisibles 22
2.4 Conceptos de hidráulica 23
2.4.1 Principios hidráulicos 23
2.4.2 Conservación de masa y energía 23
2.4.3 Gradientes de hidráulica y de energía 24
2.4.4 Pérdidas de fricción y menores 25

3. MATERIALES Y METODOS 31
3.1 Aspectos generales de la zona de red de distribución 31
3.2 Infraestructura existente 32
3.3 Criterios para modelar 33
3.4 Modelación en periodo extendido 36
3.5 Error RMSE 37
4. MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE ANÁLISIS 38
4.1 Modelo inicial 38
4.1.1 Suministro de catastro de redes de tubería 38
4.1.2 Suministro de altimetría 39
4.1.3 Suministro de consumos 40
4.1.4 Suministro de elementos hidráulicos. 41
4.2 Resultados de modelo inicial 42
4.2.1 Identificación de problemas 42
4.2.2 Presiones del modelo inicial 43
4.2.3 Velocidades del modelo inicial 44
4.2.4 Pérdida de carga del modelo inicial 45
4.3 Calibración del Modelo Hidráulico 46
4.3.1 Parámetros de ajuste 46
4.3.2 Subsectorización del manual de operación 46
4.3.3 Presiones medidas 47
4.3.4 Micromedición 53
4.3.5 Macromedición 54
4.3.6 Ajuste de consumos 55
4.4 Resultados de la calibración 55
4.4.1 Presiones como resultado de la calibración 56
4.5 Validación del Modelo Hidráulico 59
5. EVALUACION DE RESULTADOS LA RED DE DISTRIBUCION 61
5.1 Análisis de la red de distribución en la actualidad 61
5.1.1 Análisis de velocidades 61
5.1.2 Análisis por pérdidas de carga 62
5.1.3 Análisis de presiones 64
5.1.4 Determinación de vulnerabilidades 65
5.1.5 Simulación de mejoras 67
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 69
6.1 Conclusiones 69

6.2 Recomendaciones 70
7. BIBLIOGRAFÍA 71
8. ANEXOS 74
8.1. Manual de Operación del Sector 3.2 Norte 74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Vista en planta de la reserva RC7 4

Ilustración 2. Área de servicio Cebollar 3.2 Norte 8

Ilustración 3. Densidades de Población en Sistemas de Información Geográfica 9

Ilustración 4. Catastro de usuarios. 11

Ilustración 5. Curva de variación de demanda 15

Ilustración 6. Presiones registradas en el sector Cebollar 3.2 Norte 18

Ilustración 7. Sensor de presión instalado 19

Ilustración 8. Variación de velocidad versus pérdidas en las tuberías 22

Ilustración 9. Conservación de la masa 24

Ilustración 10. Conservación de la energía 25

Ilustración 11. Imagen satelital de la ubicación del estudio 31

Ilustración 12. Tabla climática de la ciudad de Cuenca. 32

Ilustración 13. Catastro de redes de distribución. 32

Ilustración 14. Catastro de redes entregado por ETAPA EP. 39

Ilustración 15. Generación MDT del sector Cebollar 3.2 Norte 40

Ilustración 16. Representación de asignación de consumos 41

Ilustración 17. Simbología del catastro de agua potable 41

Ilustración 18. SIG de los elementos hidráulicos. 42

Ilustración 19. Modelo Inicial 43

Ilustración 20. Presiones del Modelo Inicial 44

Ilustración 21. Velocidades del modelo inicial 45

Ilustración 22. Pérdidas de carga del Modelo Inicial 45

Ilustración 23. Subsectorización del Cebollar .3.2 Norte 47

Ilustración 24. Puntos de mediciones de presión 48

Ilustración 25. Dispositivo electrónico para registro de presiones. 48

Ilustración 26. Curva de presiones del Subsector 1 49

Ilustración 27. Curva de presiones del Subsector 2 50

Ilustración 28. Curva de presiones del Subsector 3 50

Ilustración 29. Curva de presiones del Subsector 4 51

Ilustración 30. Curva de presiones del Subsector 5 51

Ilustración 31. Curva de presiones del Subsector 6 52

Ilustración 32. Curva de presiones del Subsector 7 52

Ilustración 33. Curva de presiones del Subsector 8 53

Ilustración 34. Patrón de consumo 55

Ilustración 35. Representación de la calibración simultánea en el modelo. 56

Ilustración 36. Línea de correlación (00:00) 57

Ilustración 37. Línea de correlación (10:00) 58

Ilustración 38. Línea de correlación (10:00) 58

Ilustración 39. Presiones para validación 60

Ilustración 40. Simulación de velocidades a las 00:00 61

Ilustración 41. Simulación de velocidades a las 10:00 62

Ilustración 42. Simulación de velocidades a las 13:00 62

Ilustración 43. Simulación de pérdidas de carga a las 00:00 63

Ilustración 44. Simulación de pérdidas de cargas a las 10:00 63

Ilustración 45. Simulación de pérdidas de cargas a las 13:00 63

Ilustración 46. Simulación de presiones a las 00:00 64

Ilustración 47. Simulación de presiones a las 10:00 64

Ilustración 48. Simulación de presiones a las 13:00 65

Ilustración 49. Presiones registradas a las 13:00 66

Ilustración 50. Velocidades a las 13:00 66

Ilustración 51. Pérdidas de carga a las 13:00 67

Ilustración 52. Pérdidas de carga a las 13:00 67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de la reserva Cebollar 3.2 Norte 4
Tabla 2. Área del sector Cebollar 3.2 Norte 8
Tabla 3. Proyección de Población mediante Planes Maestros III 10
Tabla 4. Población por catastro de usuarios 2023 11
Tabla 5. Tabla de crecimiento poblacional por quinquenios 12
Tabla 6. Proyección de la poblacion al 2050 12
Tabla 7. Consumo actual residencial Cebollar 3.2 Norte 13
Tabla 8. Dotación para sector urbano del Cantón Cuenca, III Etapa de los Planes Maestros ... 13
Tabla 9. Variación de Demanda Horaria 14
Tabla 10. Caudales de diseño para estructuras hidráulicas 16
Tabla 11. Consumos al 2050 17
Tabla 12. Índice de Agua no Contabilizada 2007-2017 17
Tabla 13. Valores para el coeficiente C, Norma CO 10.07-601 20
Tabla 14. Valores del Coeficiente C, ETAPA EP 21
Tabla 15. Velocidad máxima en tuberías para redes de distribución 22
Tabla 16. Coeficientes K para puntos singulares. 29
Tabla 17. Resumen del catastro. 33
Tabla 18. Criterios para la calibración según propósito del modelo. 36
Tabla 19. Resumen de presiones medidas en campo. 53
Tabla 20. Porcentaje de caudal no registrado 54
Tabla 21. Porcentaje de agua no contabilizada 54
Tabla 22. Consumo corregido 55
Tabla 23. Resultados de presiones calibradas a las 00:00 56
Tabla 24. Resultados de presiones calibradas a las 10:00 57
Tabla 25. Resultados de presiones calibradas a las 13:00 58
Tabla 26. Coeficientes de rugosidad ajustados 59
Tabla 27. Validación de presiones 59

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Los modelos hidráulicos son herramientas eficientes de apoyo al momento de tomar decisiones para la gestión oportuna de las redes de distribución de agua. Este estudio presenta el desarrollo de un modelo hidráulico para el sector Cebollar 3.2 Norte de la ciudad de Cuenca, la cual es una zona céntrica muy conocida, que contiene características variables en cuanto al tipo de consumo (comercial, residencial) y que posee alrededor de 5903 usuarios de agua activos e inactivos, en su mayoría relacionados con instalaciones de uso residencial.

Para el desarrollo del presente estudio, se identificaron previamente las principales obras de infraestructura construidas dentro del sector de distribución Cebollar 3.2 Norte tales como: ubicación del tanque de reserva, conducción, planimetría, catastro de redes y de usuarios, así como los consumos de agua por día y por mes. El análisis de esta información es prioritario porque definirá la operación hidráulica del sistema.

De lo expuesto, es importante señalar que el modelo hidráulico de este sector de estudio pertenece a uno de los sistemas más importantes de la ciudad, el Sistema Tomebamba, el cual fue establecido por la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca, ETAPA EP, en donde el propósito es el de evaluar y mejorar el funcionamiento hidráulico de las redes de distribución.

1.2 Justificación

Los modelos hidráulicos de redes de distribución de agua son herramientas eficientes de apoyo a la toma de decisiones para el desarrollo de varios escenarios de gestión para mejorar la eficiencia y confiabilidad de las redes existentes y diseñar otras nuevas. (Kara et al., 2016)

Además, un modelo hidráulico satisface los requerimientos en cuanto a la similitud geométrica y en donde el éxito de las predicciones, dependerá de la determinación o estimación precisa de los parámetros de entrada y estudios de calibración y verificación de modelos.

Por lo tanto, desarrollar este estudio nos permitirá simular diferentes escenarios que ocurren en una red de distribución de agua sin necesidad de una experimentación física, es importante mencionar que el nivel de detalle está fuertemente relacionado con el objetivo que el modelo intenta alcanzar. Es importante mencionar que, para lograr el éxito en la ejecución de este trabajo, se requiere de un criterio basado en conocimientos de la norma vigente de nuestro medio y experiencia en la discriminación de procedimientos en cuanto a diseño de redes de agua potable.

1.3 Hipótesis

Los modelos hidráulicos, resuelven conocidas ecuaciones para calcular los principales parámetros hidráulicos; como el flujo, tasa, velocidad y presión del agua, en diferentes puntos de la red de distribución agua potable y los resultados se muestran en tablas o gráficas que luego podrán ser utilizadas por personal de ETAPA EP, para tomar decisiones en cuanto a operación y mantenimiento del sector.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Establecer un modelo para simular el comportamiento hidráulico cercano a la realidad de las redes de distribución del Sector Cebollar 3.2 Norte.

1.4.2 Objetivos Específicos

Crear un modelo hidráulico de la zona de estudio a través de la herramienta computacional en base a los datos proporcionados por la ETAPA EP.

Calibrar el modelo hidráulico utilizando las mediciones de parámetros de campo en las redes de distribución.

Determinar las vulnerabilidades operativas del sector de distribución.

Determinar un régimen de presiones adecuadas para el óptimo funcionamiento y proponer el refuerzo del sistema de distribución.

Deducir las conclusiones de la investigación y recomendaciones

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Definiciones generales

2.1.1 Agua Potable

Es el agua cuyas características físicas, químicas microbiológicas han sido tratadas a fin de garantizar su aptitud para consumo humano, esta definición aplica para los sistemas de abastecimiento públicos y privados a través de redes de distribución y tanqueros, la cual debe cumplir con los requisitos que se establecen, en cuanto a características físicas, sustancias inorgánicas y radiactivas, entre otras. (INEN, 2014)

Sin embargo, el agua potable segura es esencial para la salud humana; sin embargo, con el cambio climático global, la urbanización y la industrialización, la calidad del agua potable se puede ver amenazada por numerosos factores naturales y antropogénicos. (Han et al., 2022)

2.1.2 Tanque de reserva y ubicación

Los tanques de almacenamiento juegan un papel básico dentro de un sistema de distribución de agua, desde el punto de vista económico, así como su operación hidráulica dentro de un sistema.

Un tanque de reserva debe cumplir tres propósitos fundamentales:

- Compensar las variaciones de consumos producidos durante un día.
- Mantener las presiones de servicio en la red de distribución.
- Mantener almacenada cierta cantidad de agua para situaciones de emergencia, como incendios, daños en las redes, etc.

La ubicación de la reserva está determinada principalmente por la necesidad y conveniencia de mantener presiones en la red dentro de los límites de servicio. Estas presiones están limitadas por normas, dentro de rangos que puedan garantizar par las condiciones más desfavorables de una dinámica mínima y una dinámica máxima, no superior a un determinado valor que haría impráctica su utilización en las instalaciones domiciliarias.

La máxima presión que estaría permisible en los sistemas de distribución es de 70 m.c.a. En cualquier caso, será de tal clase que resista el peligro de falla de presión máxima a la cual estará sujeta.

Siendo las presiones de servicio requeridas una determinante de la ubicación, ésta necesariamente está influenciada por la topografía y por las zonas de mayor consumo. De allí, si consideramos una situación ideal de una zona totalmente plana y con gastos de consumo homogéneos la ubicación ideal del tanque sería en el centro de la localidad, con lo cual logramos una distribución con menores pérdidas de carga. Zonas de mayor consumo provocarán desplazamiento del centro de gravedad y, por lo tanto, la mejor y conveniente ubicación del tanque por razones de distribución. Indudablemente que la existencia de colinas y zonas altas en el área a urbanizar será un aspecto de consideración para lograr la mejor ubicación del tanque que satisfaga los rangos de presión prestablecidos (Arocha Ravelo Simón, 1980).

Por tratarse de una condición de análisis particular, las normas admiten estos rangos de presiones máximos y mínimos sean satisfechos para el nivel medio del estanque (Arocha Ravelo Simón, 1980).

El sector Cebollar 3.2. Norte, es abastecido a gravedad por la reserva denominada RC7 ubicada en la planta de tratamiento de “El Cebollar”.

Tabla 1. Datos de la reserva Cebollar 3.2 Norte

Sector de abastecimiento	Código Tanque	Capacidad (m^3)	Cota Fondo (m)	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
Cebollar 3.2 Norte	RC7	1500	2640	720287	9680676

Fuente: (Autor, 2023)

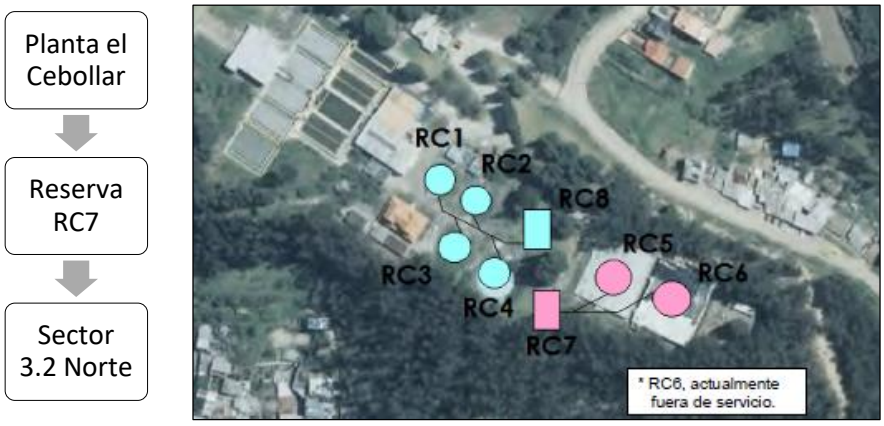


Ilustración 1. Vista en planta de la reserva RC7
Fuente: (Autor, 2023)

2.1.3 Configuración de una red de distribución

Las redes malladas están constituidas por matrices de distribución, de las tuberías principales, tuberías secundarias y ramales abiertos. Las tuberías principales constituirán las mallas, cuyos tramos se definirán por los nodos que lo comprenden.

Para ello se define un nodo en base a lo siguiente:

- Intersección de dos tuberías
- Todo punto de alimentación
- Tramos no mayores de 500 a 600m

Para la configuración de las mallas mediante las tuberías principales se tomará en cuenta el posible desarrollo de las ciudades; así un desarrollo en zonas planas induce a proyectar mallas exteriores, en cambio en zonas que tienen limitaciones de expansión, ya sea por condiciones topográficas o de difícil desarrollo urbanístico, conduce a proyectar mallas internas previendo el desarrollo vertical o de alta densidad de estos sectores.

Cuando por razones topográficas las presiones de servicio en el sistema de distribución sean muy altas, resulta mejor dividir la zona en varias zonas de presión (alta, media y baja), las cuales pueden ser interconectadas mediante válvulas reguladoras, estaciones reductoras de presión o tanques de almacenamiento.

2.1.4 Distribución por gravedad

Cuando las condiciones topográficas obliguen a separar el sistema de distribución en más de una red, la interconexión entre ellas puede ser hecha a través de válvulas reguladoras o por estaciones reductoras de presión, como es el caso del sector Cebollar 3.2 Note.

En todo caso, cada red debe tener por lo menos dos puntos de alimentación. De manera que, la demanda de cada nudo dependerá de la zonificación densidad y homogeneidad de la zona a servir. Es importante mencionar que, si no existen diferencias notables en la zona a servir en cuanto a densidad de población y de zonificación, puede estimarse una repartición del consumo por la mitad a cada nudo de alimentación, o proporcional al número de nudos de consumo. Caso contrario, puede hacerse una distribución acorde a las zonas de mayor demanda en los consumos.

De todas maneras, para este estudio, se requiere hacer un análisis de los puntos de demanda.

2.1.5 Redes de distribución por varias mallas

Se considera una red de varias mallas, a una que está constituida por tuberías que tienen la forma de circuitos cerrados o anillos. La red cerrada puede aplicarse en poblaciones concentradas y semi-concentradas mediante redes totalmente interconectadas o redes parcialmente interconectadas.

La red puede estar compuesta por una red de tuberías principales y una red de tuberías secundarias.

El sector Cebollar 3.2 Norte, está conformado por varias mallas, o circuitos, por lo que se la considerará de una red anillada.

2.1.6 Elementos de una red de distribución

La red de distribución del sector Cebollar 3.2 Norte, contempla el uso de válvulas de seccionamiento ubicadas de manera que se realiza una subsectorización; lo cual, en momentos de emergencia, permite realizar labores de operación y mantenimiento sin afectar los demás sub sectores.

Las válvulas utilizadas normalmente dentro de esta zona son: de control y de seccionamiento.

Las válvulas de control son del tipo:

- Válvulas de admisión o expulsión de aire (ventosas): Estas válvulas son utilizadas para la admisión y expulsión de aire en los procesos de vaciado y llenado de las tuberías de la red de distribución.
- Válvulas reguladoras de presión: Estas válvulas son utilizadas para regular o reducir la presión en la red de distribución de agua potable.
- Válvulas anti retornó: Ubicadas en las tuberías de las redes de distribución de agua potable que estén localizadas aguas abajo por ejemplo las mismas que evitan el retroceso del agua.
- Válvulas de alivio: Estas válvulas protegen a las tuberías de las sobre presiones causados por fenómenos como el golpe de ariete.

Las válvulas de seccionamiento son de tipo:

- Válvulas de compuerta
- Válvulas mariposa
- Válvulas de bola

Las válvulas de aire son utilizadas en los puntos altos de la red de distribución deben instalarse dispositivos de entrada y salida de aire.

Las válvulas de purga se ubican en los puntos bajos de la red, en los puntos bajos de sifones invertidos, y en puntos muertos en caso de que estos existan, al momento de instalarse estas válvulas de purga se deben considerar las obras necesarias para su adecuado drenaje.

Las estaciones reductoras de presión son comúnmente instaladas en sistemas de agua potable para reducir y controlar las presiones de una zona, a niveles específicos, independientemente de las variaciones de presión y caudal aguas arriba.

Los hidrantes en una red de distribución de agua potable, debe garantizar que se instalen entre 200 m y 300 m, sobre una vereda o espacio verde, cabe mencionar que la red distribución de agua potable de la ciudad de Cuenca no contempla una red específica para control de incendios. Sin embargo, se contempla para el diseño de las redes como un consumo adicional.

2.1.7 Diámetros y vida útil

Las redes de distribución tienen limitaciones en cuanto a presiones de servicio, en donde se establece un valor mínimo de presión de acuerdo a la importancia y el desarrollo de la ciudad, así como una presión máxima, la cual esta imitada por razones de utilización en las viviendas sin provocar incomodidades por excesiva presión y daños en las instalaciones domiciliarias. Sin embargo, debemos admitir que de acuerdo al consumo de la red se producirán variaciones de la presión en el transcurso de un día, por lo que establecer una presión mínima determinará para una condición crítica, considerar que ese valor sea satisfecho para el medio de un tanque de reserva. (Mian et al., 2023)

En redes de distribución de los sistemas de abastecimiento de agua urbana, normalmente se exige un diámetro mínimo de 63 mm PVC. Sin embargo, para casos puntuales o especiales o en ramales de poca importancia si se pueden emplear tramos de 32 mm PVC, en zonas de alta densidad inclusive de debe considerar un diámetro de mínimo 90 mm PVC.

- Tuberías principales: Son las tuberías de mayor diámetro que llevan una cantidad de agua y son la principal fuente de abastecimiento de una red de distribución.
- Tuberías secundarias: Estos son ramales que refuerzan las tuberías principales y ayudan a la distribución equitativa del caudal.
- Tuberías menores: Constituyen las mallas de relleno entre tuberías arteriales.

2.2 Disposiciones generales

2.2.1 Área de estudio

En la siguiente figura se puede apreciar el área de servicio del sector Cebollar 3.2 Norte, que fue proporcionado por la Empresa ETAPA EP.

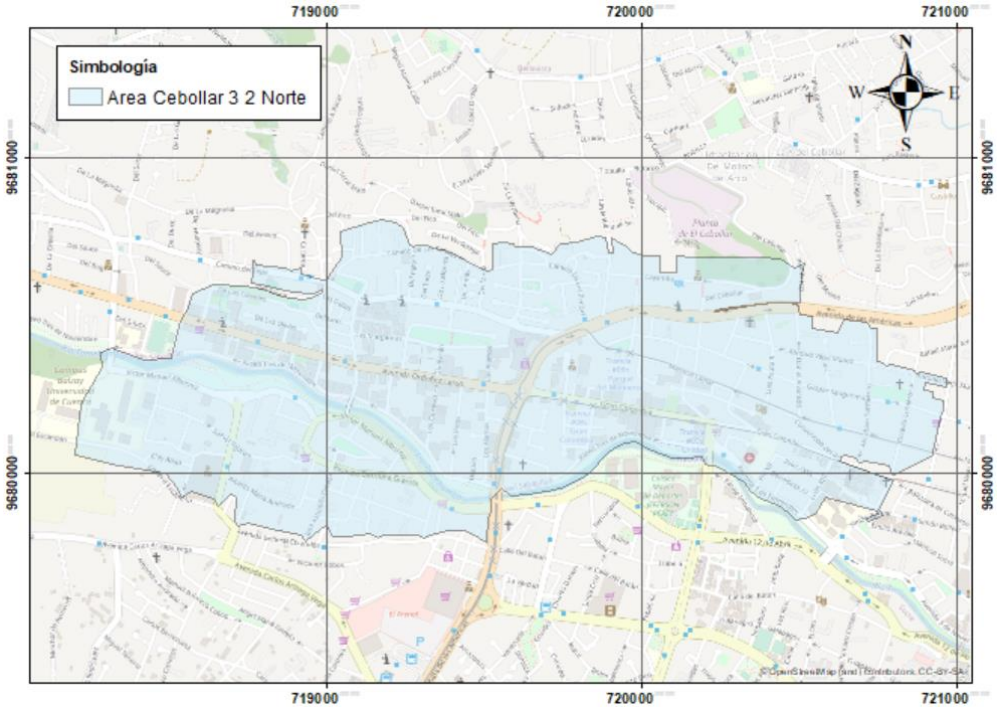


Ilustración 2. Área de servicio Cebollar 3.2 Norte
Fuente: (Autor, 2023)

Tabla 2. Área del sector Cebollar 3.2 Norte

Sector de abastecimiento	Área (ha)
Cebollar 3.2 Norte	182,47

Fuente: (Autor, 2023)

2.2.2 Población actual

Planes Maestros

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del estudio de población realizados mediante la Tercera Fase de los Planes Maestros con horizonte al año 2050; y cuyo propósito fue estimar una distribución espacial de la población, en donde se determinaron las densidades de población para el área urbana, en este caso se obtendrá para el sector Cebollar 3.2 Norte, es importante mencionar que dentro de esta Tercera Fase, también se consideraron los límites establecidos por el PDOT para expansión de la mancha urbana.

Adicional a lo anterior, ETAPA EP., cuenta con la información de distribución poblacional de las densidades de población hasta el año 2050, mediante un “Shapefile” a nivel de polígonos para la totalidad de parroquias del cantón Cuenca. En la siguiente figura se muestra la interfaz de los datos de densidad de población.

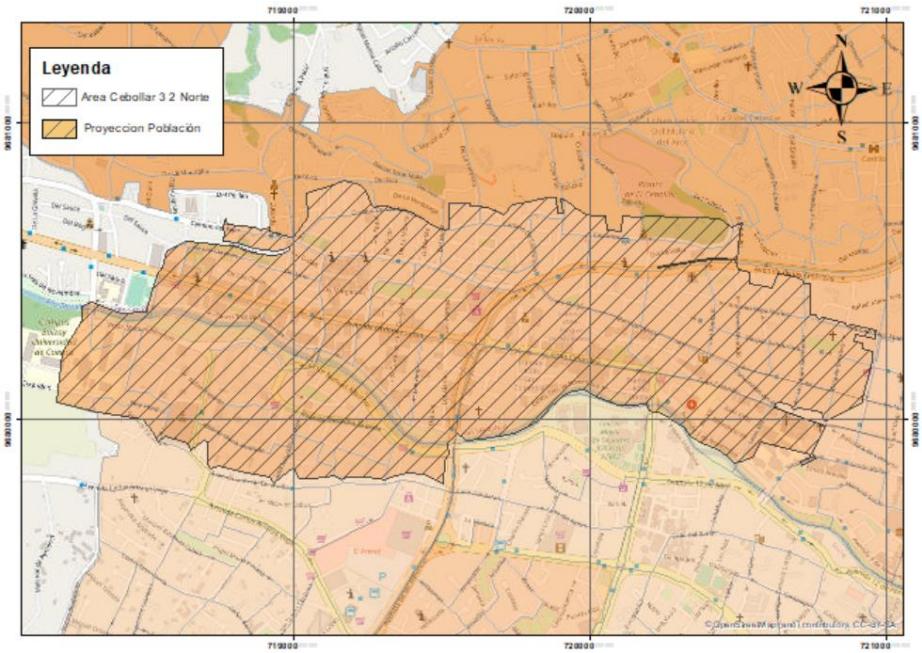


Ilustración 3. Densidades de Población en Sistemas de Información Geográfica
Fuente: (Autor, 2023)

Con la finalidad de obtener la distribución poblacional a nivel del sector Cebollar 3.2 Norte, se tomó como base la información geográfica mencionada anteriormente y se la intersecó con el área de la zona de servicio, para lo cual se siguió el siguiente proceso:

Una vez realizada la intersección, el resultado de la operación dará como resultado un polígono de la zona de servicio y sus respectivos sectores con las densidades de población incluidas.

A este nuevo polígono se realiza la operación de calcular las áreas, sobre todo para las que están incluidas en los límites de las zonas y sectores.

Finalmente se calcula la población con las áreas calculadas en el numeral anterior, con esto obtenemos la población para el sector requerido. Cabe señalar que la población actual obtenida es la estimada al 2023.

Como resultado del procedimiento antes descrito a continuación se muestran las tablas con la población resultante para cada uno de los sectores y sistemas:

Tabla 3. Proyección de Población mediante Planes Maestros III

Sector de abastecimiento	Población 2023 (hab)
Cebollar 3.2 Norte	19228

Fuente: Fuente: (Autor, 2023)

Catastro de usuarios de ETAPA EP

Es importante analizar el comportamiento de la población debido a que en caso de que se requiera proyectarla, es necesario comparar la población actual respecto a lo obtenido en la Tabla 3.

Para ello se utilizó el catastro de usuarios del sector Cebollar 3.2 Norte, que dispone el departamento de Control de Operaciones de ETAPA EP., en donde su base de datos proporciona la siguiente información:

- Ubicación georreferenciada del usuario.
- Consumo mensual
- Tipo de consumo (Comercial, residencial, para construcción e industrial)

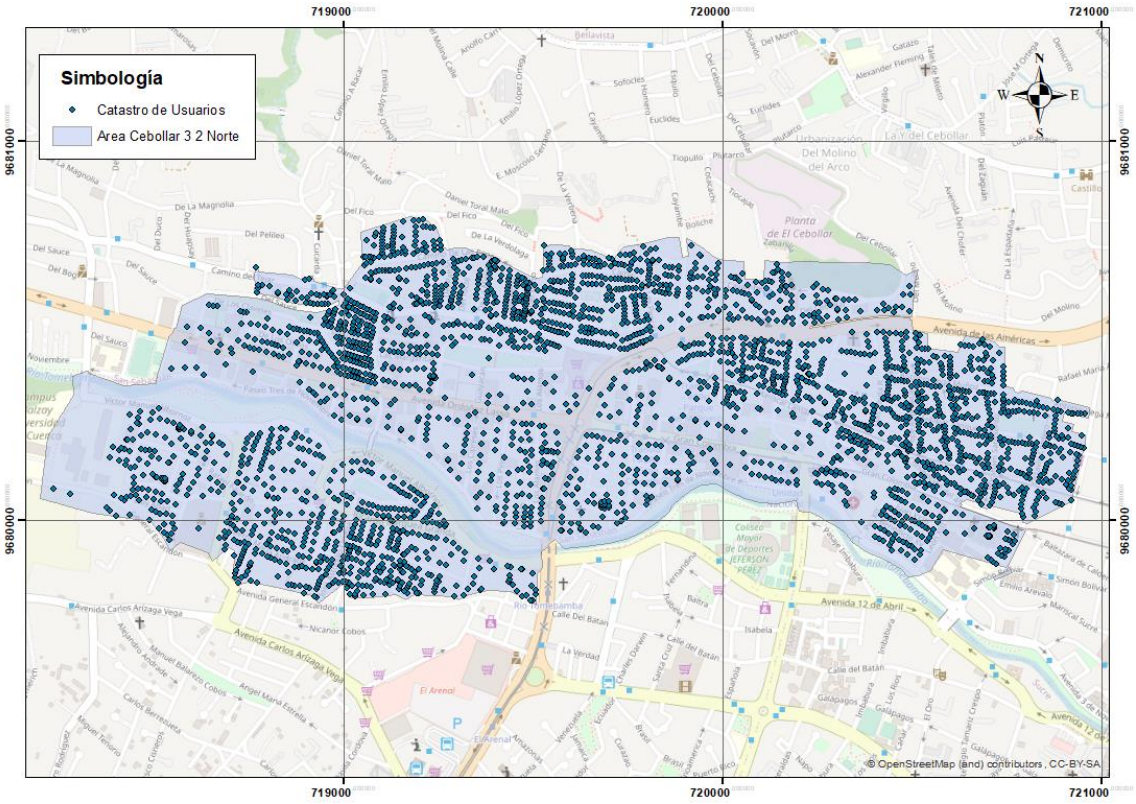


Ilustración 4. Catastro de usuarios.

Fuente: (CONTROL DE OPERACIONES (ETAPA EP), 2023)

Para analizar la información correctamente, se tomó el criterio de únicamente tomar los usuarios que tengan en sus propiedades la etiqueta de “Residencial”, posteriormente a los usuarios que se encuentran catastrados con consumo de 0 m^3/mes, se les asigno el consumo promedio mensual del sector para el último año (2022), mismo que fue obtenido de la información analizada dando como resultado un volumen de 17.15 m3/mes, lo cual ha permitido trabajar con gastos de consumo de todos los usuarios con tarifa residencial catastrados. Finalmente, se considera el número de habitantes por vivienda, el valor de 3.61 (CONTROL DE OPERACIONES (ETAPA EP), 2015).

Tabla 4. Población por catastro de usuarios 2023

Sector de abastecimiento	No. Usuarios	Población Año 2023
Cebollar 3.2 Norte	5889	21260

Fuente: (Autor, 2023)

Analizando los resultados entre la Tabla 3 y la Tabla 4, se puede ver que no existe mayor diferencia entre las poblaciones al 2023. Por lo tanto, es criterio de este estudio, tomar la

población obtenida de la Tabla 4 como población actual servida del sector Cebollar 3.2 Norte, es decir 21260 habitantes. Esta información es base para obtener un modelo real del sector.

2.2.3 Población futura

En base a los antes descrito, se procede a proyectar la población definida por el catastro de usuarios y la tasa de crecimiento del sector correspondiente, de acuerdo al estudio de población de ETAPA EP (Paguay Recalde (ETAPA EP), 2020). Se considera que el Cebollar 3.2 Norte es un sector consolidado, por lo tanto, sería un sector de una zona urbana con una tasa de crecimiento baja.

Tabla 5. Tabla de crecimiento poblacional por quinquenios

Cebollar 3.2 Norte	Tc 2020 - 2025	Tc 2025 - 2030	Tc 2030 - 2035	Tc 2035 - 2040	Tc 2040 - 2045	Tc 2045 - 2050
	1.791%	1.511%	1.269%	1.011%	0.727%	0.442%

Fuente: (Paguay Recalde (ETAPA EP), 2020)

Para la evaluación del sector en un futuro, mediante escenarios del modelo hidráulico, se cree conveniente proyectar la población al 2050, esto nos guiará hacia un posible comportamiento de las redes en cuanto a consumos y posibles vulnerabilidades.

Tabla 6. Proyección de la poblacion al 2050

Población Año 2023	Tc 2045 - 2050	Población Año 2050
18708	0.442%	21354

Fuente: (Autor, 2023)

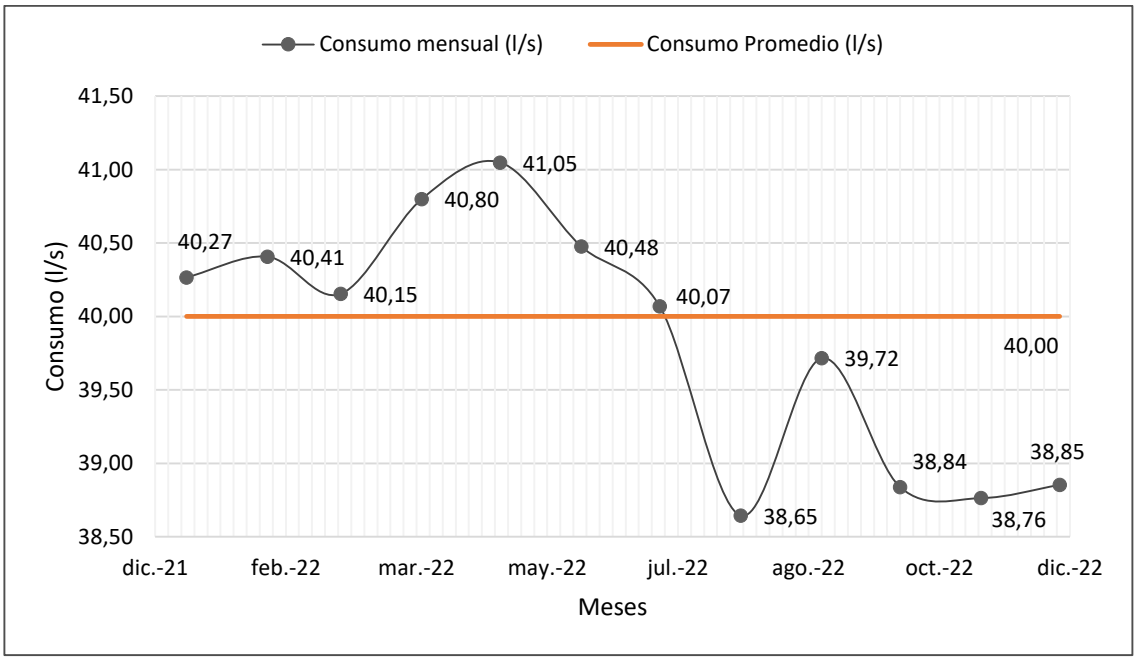
2.2.4 Nivel de servicio

La cobertura del servicio de agua potable en la zona consolidada del cantón Cuenca se vio incrementada desde el 85,1% en el año 2007, hasta el 97,8% en el 2016, de acuerdo con los datos brindados por el DAIAS, cual considera que esta cobertura irá aumentando con los años, hasta alcanzar el 99%. Es importante señalar que los datos de cobertura se han tomado de los sistemas que abarcan la mayor área, siendo estos los correspondientes a Tomebamba y Machángara

2.2.5 Definición del consumo actual

En base a la información de los usuarios (medidores), por un año, se posible determinar un consumo actual para el sector Cebollar 3.2 Norte.

Tabla 7. Consumo actual residencial Cebollar 3.2 Norte



Fuente: (Autor, 2023)

Cabe mencionar que este valor estimado promedio de 40l/s, es el que se modelará como consumo residencial del sector, adicionalmente se deben considerar las pérdidas de la red, consumos comerciales e industriales y consumos especiales como los de construcción.

2.2.6 Dotación del sector a futuro

En los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la ciudad de Cuenca III ETAPA, se definió la dotación para los sectores urbano y rural del Cantón Cuenca, misma que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 8. Dotación para sector urbano del Cantón Cuenca, III Etapa de los Planes Maestros

Año	Residencial	Comercial	Industrial	Especial	Total Tasa Consumo	Pérdida	Dotación
	(l/hab-d)	(l/hab-d)	(l/hab-d)	(l/hab-d)	(l/hab-d)	(%)	(l/hab-d)
2020	178	17	4	12	210	30%	300
2025	173	16	4	11	205	28%	285
2030	169	16	4	11	199	26%	269

2035	165	15	4	11	195	24%	257
2040	161	15	4	11	190	22%	244
2045	157	15	3	10	185	20%	231
2050	153	14	3	10	180	20%	225

Fuente: (Paguay Recalde (ETAPA EP), 2020)

Para la estimación de la demanda del sistema de agua, se toma la proyección de la población al año 2050. (Tabla 6) y a partir de eso, se debe considerar lo siguiente:

Caudales de diseño

Factores de consumo máximo diario y máximo horario

Estos factores son imprescindibles para definir los caudales máximo diario y máximo horario, de acuerdo a los Planes Maestros III de la Ciudad de Cuenca; se definieron patrones de consumo en base al comportamiento de algunos centros de reserva, los cuales son los siguientes:

Factor máximo diario

$$K_1 = K_{MD} = 1.30 \quad (1)$$

Factor máximo horario

$$K_{MH} = 1.307 \quad (2)$$

$$K_2 = K_{MD} * K_{MH} = 1.70 \quad (3)$$

Además de los factores de consumo, es importante considerar la curva de variación horaria, la cual también fue definida en el estudio denominado: “ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA Y OPTIMIZACIÓN DE LAS REDES DE LOS SISTEMAS TOMEBAMBA, MACHANGARA, YANUNCAY Y CULEBRILLAS” (Abad Sarmiento (ETAPA EP), 2018) .

Tabla 9. Variación de Demanda Horaria

HORA	VARIACIÓN	HORA	VARIACIÓN
0	0,64	13	1,25
1	0,59	14	1,27
2	0,57	15	1,19
3	0,57	16	1,12
4	0,58	17	1,09
5	0,66	18	1,09
6	1,00	19	1,07
7	1,18	20	1,04
8	1,24	21	0,98

9	1,31	22	0,88
10	1,34	23	0,74
11	1,34	24	0,64
12	1,27		

Fuente: (Abad Sarmiento (ETAPA EP), 2018)

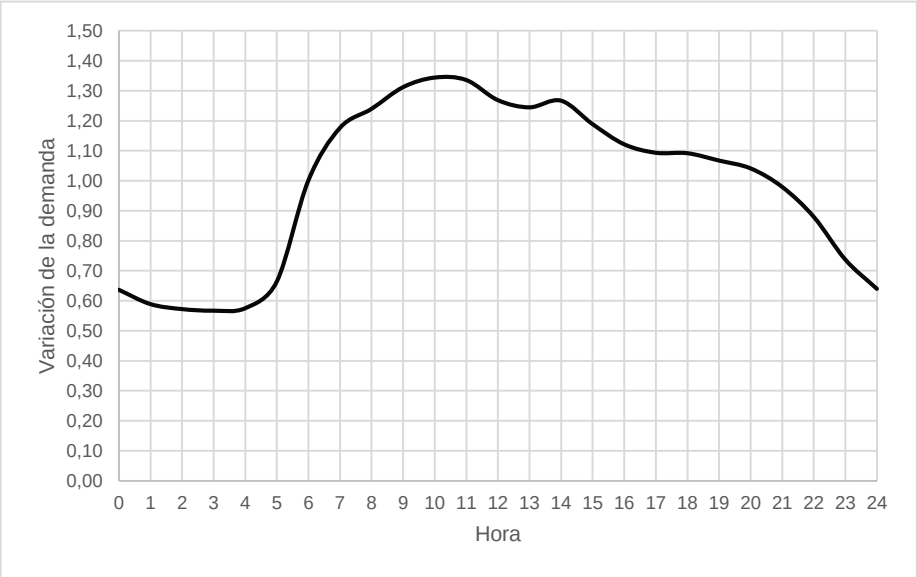


Ilustración 5. Curva de variación de demanda

Fuente:(Abad Sarmiento (ETAPA EP), 2018)

Se obtuvieron mediciones de caudal a la salida del tanque, en donde este conjunto de datos obtenidos se utilizó para preparar patrones de consumo aplicables al sector.

Caudal medio diario

Este caudal representa el consumo promedio de los usuarios del sistema a lo largo del año, se obtiene por medio de la siguiente expresión.

$$q = \frac{D * Pd}{86400} \quad (4)$$

En donde *q* es el caudal medio diario, Pd corresponde a población de diseño y D es la dotación bruta, se debe considerar el índice de pérdidas.

Caudal máximo diario

Este caudal constituye el caudal en el día de mayor consumo del año. El caudal máximo diario se obtiene de multiplicar el caudal medio diario por un factor K1

$$QMD = K_1 * q \quad (5)$$

En donde *QMD* corresponde al caudal máximo diario, q es el caudal medio diario y *K1* es el factor del día de máximo consumo (*K1=1.3*)

Caudal máximo horario

Este valor representa la hora de mayor consumo en el día de mayor demanda del año, viene definido por la siguiente expresión:

$$QMH = K_2 * q \quad (6)$$

En donde *QMH* es el caudal máximo horario, *q* corresponde al caudal medio diario y K2: factor máximo horario (K2=1.70)

Caudales de diseño para estructuras

La Norma CO 10.07-601 establece los caudales de diseño para las diferentes estructuras hidráulicas, misma que se representa en la siguiente tabla:

Tabla 10. Caudales de diseño para estructuras hidráulicas

	Subterránea	**Superficial**
Captación	QMD + 5%	QMD + 20%
Conducción	QMD + 5 %	QMD + 10%
Planta de Tratamiento	QMD + 10%	QMD + 10%
Redes de Distribución	QMH + INC	QMH + INC

Fuente: (Normas Para Estudio y Diseño de Sistemas de Agua Potable y Disposición de Aguas Residuales Para Poblaciones Mayores a 1000 Habitantes – CO 10.07 – 601, 1992)**.**

Caudales de diseño para estructuras al año 2050

Uno de los escenarios dentro de este estudio, es analizar el comportamiento de las redes una vez calibrado el modelo, al año 2050, que es la frontera de proyección de los Planes Maestros.

Tabla 11. Consumos al 2050

Dotación (l/hab*día)	Población 2050 (Hab)	k1	k2	Caudal medio diario q (l/s)	Caudal máximo diario QMD (l/s)	Caudal máximo horario QMH (l/s)	Incendio (l/s)	Caudal Red de Distribución 2050 (l/s)
225	21354	1,3	1,7	55,61	72,29	94,54	10	**104,54**

Fuente: (Autor, 2023)

2.2.7 Índice de pérdidas

Además de los problemas de calidad del agua y pérdidas económicas, las fugas en las redes de tuberías son un peligro para la seguridad pública. La detección temprana de fugas de agua en las redes de tuberías es crucial para implementar contramedidas que reduzcan los daños estructurales y las pérdidas de agua. El método de recopilación de datos basado en sensores instalados en redes de tuberías ha ganado mucha atención debido a su potencial de aplicación en sistemas de monitoreo en tiempo real para la detección de fugas. Sin embargo, muchos modelos se desarrollaron a partir de datos recopilados de simulaciones, pruebas de ingeniería o experimentos de campo, y pocos se han validado utilizando datos de redes reales. (Cugueró-Escofet et al., 2015)

El índice de pérdidas viene dado por el agua no contabilizada ANC, que es la diferencia entre el agua producida y el agua facturada, en lo Estudios de la III Etapa de los Planes Maestro de la Ciudad de Cuenca se realizó los estudios y el análisis de estos valores, obteniéndose:

Tabla 12. Índice de Agua no Contabilizada 2007-2017

AÑO	SISTEMA TOMEBAMBA
2007	31%
2008	31%
2009	29%
2010	30%
2011	31%
2012	28%
2013	26%
2014	29%
2015	27%
2016	25%
2017	28%

Fuente: (Abad Sarmiento (ETAPA EP), 2018)

En este estudio señala: “Por otro lado, ETAPA EP dispone de un programa permanente de reducción del agua no contabilizada y control de pérdidas dentro de la institución que opera a un alto nivel de gestión lo cual permite la evaluación y toma de decisiones ágiles y efectivas para producir resultados que permanezcan en el tiempo, lo cual se demuestra en la curva histórica del IANC, sin embargo de ello, obtener reducciones de pérdidas bajo el 20% representan altas inversiones frente a la reducción de uno o dos puntos porcentuales; con lo indicado, las pérdidas físicas se considerarán 20% con una tendencia a recuperación, hasta el año 2050.”

Además, desde el año 2018, ETAPA EP., implementó el programa de monitoreo de presiones del Sistema Tomebamba, el cual consiste en 12 sensores de presión instalados en los 12 sectores pertenecientes a dicho sistema, con el objetivo de detectar fugas o determinar el comportamiento de las presiones al momento de una rotura de tubería. Para este estudio, se considerará la base de datos recopilada en el sector Cebollar 3.2 Norte, la misma que contiene el registro de presiones durante todo el día cada cinco minutos, estos datos son útiles como parte de la información para validar el modelo hidráulico del sector.

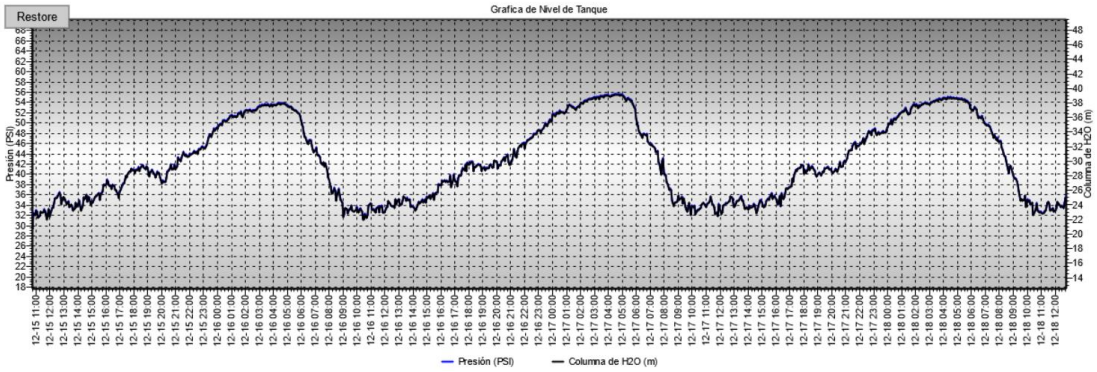


Ilustración 6. Curva de Control de Presiones de Salida de Tanques del Sistema Tomebamba – Sistema SCADA (ETAPA EP)
Fuente: (CONTROL DE OPERACIONES (ETAPA EP), 2022)

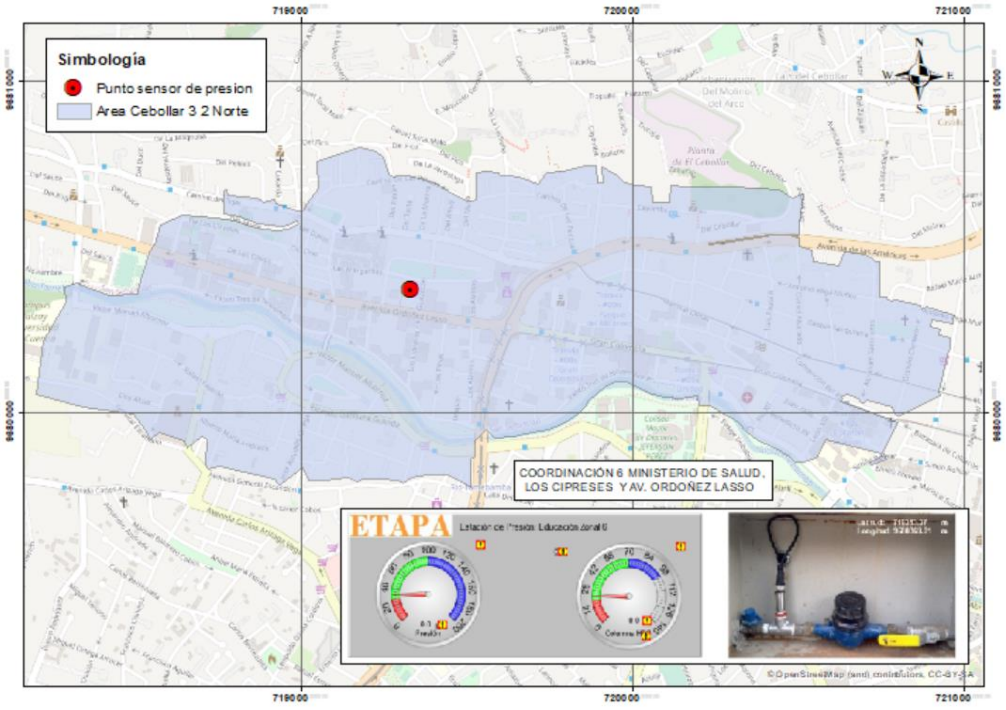


Ilustración 7. Sensor de presión instalado
Fuente: (Autor, 2023)

2.3 Disposiciones específicas

2.3.1 Conexiones domiciliarias

Se entiende por conexión domiciliaria de agua potable a los elementos que sirven para conectar la matriz (tubería principal) ubicada en la vía hasta el medidor. Es el conjunto de accesorios que sirven para acoplar la toma de incorporación a la tubería matriz, se les utilizará para matrices de PVC de diámetros de 32 hasta 355 mm y en tuberías de asbesto cemento (AC) y hierro fundido (HF). (Acueductos y alcantarillados sanitarios, 2019)

En el sector Cebollar 3.2 Norte, cuenta con 5903 conexiones domiciliarias, según la base de datos, los medidores se encuentran instalados desde el año 2002, y existen conexiones de tipo:

- Residencial
- Comercial
- Construcción
- Industrial

2.3.2 Presión estática y dinámica

La Norma CO 10.07-601 recomienda:

Una presión mínima de 10 m.c.a. En los puntos y condiciones más desfavorables de la red. Para el caso de proyectos en los que el abastecimiento se realiza a través de grifos públicos, esta presión podrá ser reducida a 5m.c.a.

La presión estática máxima, no deberá, en lo posible, ser mayor a 70 m.c.a. y presión máxima dinámica, 50 m.c.a.

2.3.3 Pérdidas de carga

Para el cálculo de tuberías a presión, se propone el empleo de la fórmula experimental de Hazen-Williams para la obtención de pérdidas de carga, y viene dada por la expresión:

$$hf = \frac{10.674 * L * Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} \quad (7)$$

En dónde, hf corresponde al valor de la pérdida de carga, C es el coeficiente de Hazen Williams, Q es igual al Caudal en m^3/s, D es el diámetro en metros y L es la longitud en metros.

El coeficiente C depende del material de la tubería, la Norma CO 10.07-601, recomienda los siguientes valores:

Tabla 13. Valores para el coeficiente C, Norma CO 10.07-601

Material de Tubería	Coeficiente C
Acero Corrugado	60
Acero Galvanizado	125
Asbesto - Cemento	140
Cobre	130
PVC	140
Hormigón Liso	140
Hormigón Ordinario	140
Hierro Fundido Nuevo	140
Hierro Fundido Viejo	140

Fuente: (Normas Para Estudio y Diseño de Sistemas de Agua Potable y Disposición de Aguas Residuales Para Poblaciones Mayores a 1000 Habitantes – CO 10.07 – 601, 1992)

En los estudios de la II de los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la Ciudad de Cuenca se recomienda la utilización de los siguientes valores para el coeficiente C.

Tabla 14. Valores del Coeficiente C, ETAPA EP

Material de Tubería	Tubería		Valor adoptado
	Nueva	Usada	
Hierro dúctil	140	135	130
PVC	150	125	130*
Acero Soldado	120	90	110
Acero con Revestimiento	140	135	130

Fuente: (TYPSA, 2004)

Para el presente estudio se utilizarán los valores recomendados por la Empresa ETAPA EP, considerando que para tuberías de distribución de PVC (*) se utilizara un valor de C=130 (esto debido al efecto que causa la perforación a la tubería el momento de realizar la instalación domiciliar).

Pérdidas de carga unitarias

Las pérdidas de carga unitaria, no constituye un criterio general de diseño, por la variedad de posibilidades que existe para la utilización y/o disposición de la energía hidráulica, en este sentido es fundamental el criterio del proyectista para que el diseño y/o evaluación tenga un equilibrio entre la parte técnica y económica.

Por lo antes expuesto es necesario adoptar el criterio de pérdidas de carga unitaria en las tuberías, y definir en función de las características del sistema (energía hidráulica disponible), un rango que permita relacionar la capacidad de las tuberías en función del diámetro.

En la siguiente gráfica se observa la relación de la velocidad en las tuberías versus las pérdidas que se generan es estas.

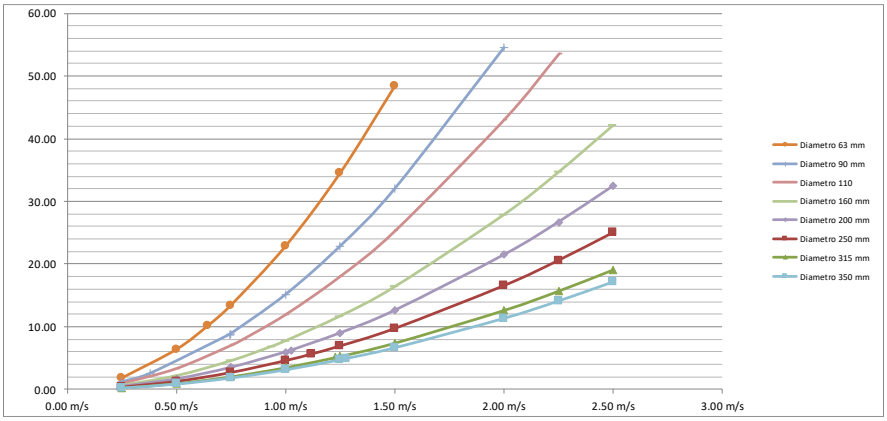


Ilustración 8. Variación de velocidad versus pérdidas en las tuberías
Fuente: (Ortiz Correa (ETAPA), 2023)

Analizando la gráfica y en función de las características de este estudio, trabajaremos en un rango de pérdidas unitarias entre 7 m/Km a 15 m/Km. para los diferentes diámetros, debiendo indicar que las velocidades de diseño varían de manera muy importante en el rango establecido para los diferentes diámetros.

2.3.4 Velocidades admisibles

Velocidad máxima admisible en redes de distribución

La velocidad máxima estará limitada por los diámetros utilizados, el caudal y las pérdidas unitarias que se produzcan en las mismas, debiendo considerar que un diseño óptimo debe aprovechar al máximo la carga estática disponible. En el siguiente cuadro se presentan valores recomendados en función del tipo de material de la tubería.

Tabla 15. Velocidad máxima en tuberías para redes de distribución

Materiales de las paredes	Velocidad máxima (m/s)
Hormigón Simple o Armado	4,5 - 5,0
Hierro Fundido - Hierro Dúctil	4,0 - 5,0
Asbesto Cemento	4,5 - 5,0
Acero	4,0 -5,0
Cerámica Vitrificada	4,0 - 5,0
Plástico	4,5

Fuente: (Normas Para Estudio y Diseño de Sistemas de Agua Potable y Disposición de Aguas Residuales Para Poblaciones Mayores a 1000 Habitantes – CO 10.07 – 601, 1992)

Velocidad mínima admisible en redes de distribución

La velocidad mínima viene condicionada por la necesidad de que no se produzca la sedimentación de partículas en suspensión en las tuberías. Este valor dependerá, además, de

las características de auto limpieza, de la calidad del agua y de la magnitud de los fenómenos hidráulicos que se produzcan en la tubería. La Norma CO 10.07 601, no recomienda valores mínimos para este parámetro.

2.4 Conceptos de hidráulica

2.4.1 Principios hidráulicos

La Hidráulica es la ciencia y técnica que trata de las leyes que rigen el comportamiento y el movimiento de los líquidos, y de los problemas que provoca su utilización. Estudia las propiedades, leyes y efectos de los líquidos en reposo o en movimiento.(González, 2008)

También es una es una de las principales ramas de la Ingeniería Civil que trata los problemas relacionados con la utilización y el manejo de los fluidos, principalmente el agua. Esta disciplina se avoca, en general, a la solución de problemas tales como, el flujo de líquidos en tuberías, ríos y canales y a las fuerzas desarrolladas por líquidos confinados en depósitos naturales, tales como lagos, lagunas, estuarios, etc., o artificiales, como tanques, pilas y vasos de almacenamiento, en general (Pérez Morales, 2010).

El desarrollo de la hidráulica se ha basado principalmente en los conocimientos empíricos transmitidos a través de generaciones y en la aplicación sistemática de ciencias, principalmente Matemáticas y Física. Una de estas ciencias, es la Mecánica de los Fluidos, que proporciona las bases teóricas en que descansa la hidráulica (Pérez Morales, 2010).

Tres principios fundamentales se aplican para analizar el flujo de fluidos: conservación de la masa, conservación de la energía y conservación del momentum o cantidad de movimiento.

2.4.2 Conservación de masa y energía

A partir de la cual se establece la ecuación de continuidad para una vena líquida a lo largo del conducto.

$$Q = VA = V_1A_1 = V_2A_2 = \cdots V_NA_N \tag{8}$$

En donde Q corresponde a caudal, VA a velocidad media del flujo, A es el área de la sección transversal del flujo. La masa dentro de un sistema permanece constante en el tiempo.

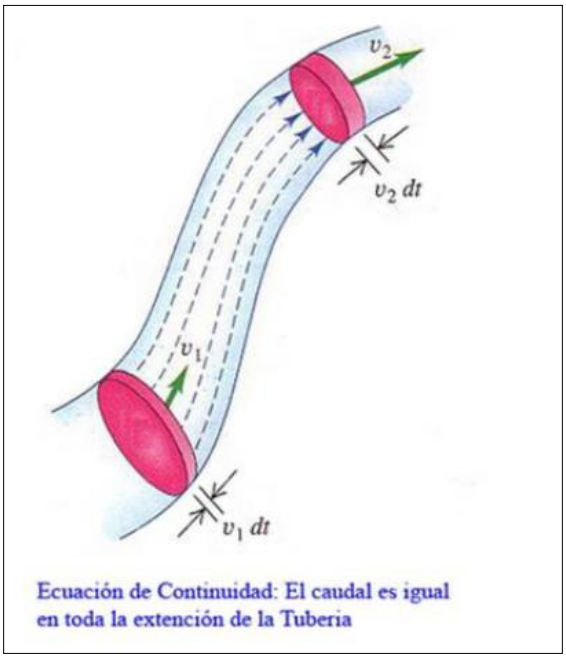


Ilustración 9. Conservación de la masa
Fuente: (García Sánchez, n.d.)

2.4.3 Gradientes de hidráulica y de energía

A partir de la cual se establece la ecuación de la energía que tiene en cuenta las pérdidas de energía que se producen por el desplazamiento de un fluido de un punto a otro a lo largo de un conducto.

La ecuación de la energía es una ampliación de la ecuación original de Bernoulli, la que no contempla pérdidas de energía y se restringe a fluidos no viscosos con flujo permanente e incompresible, es decir a fluidos ideales. (Guevara A, 1997)

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} \quad (9)$$

La ecuación de la energía se aplica siguiendo una línea de corriente y en forma general se puede escribir de la siguiente manera:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{{V_1}^2}{2g} \pm H = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{{V_2}^2}{2g} + \sum hp_{1-2} \quad (10)$$

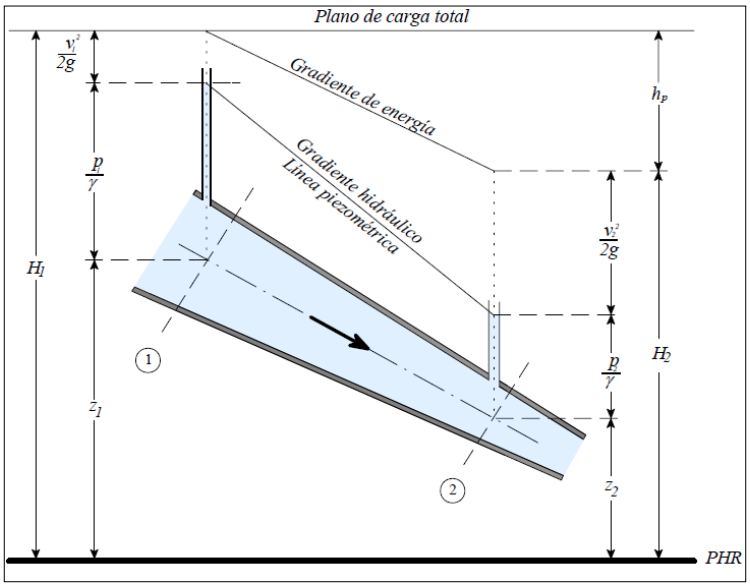


Ilustración 10. Conservación de la energía
Fuente: (Guevara A, 1997)

Donde PHR es el Plano Horizontal de Referencia, H1 es la energía total en el punto 1, H2 es la energía total en el punto 2, Z corresponde a la energía de posición por unidad de peso o cabeza de posición, P/γ es la energía de presión por unidad de peso o cabeza de presión o altura piezométrica, γ es Peso específico del fluido.

En fluidos líquidos el peso específico se considera constante, $\frac{V^2}{2g}$ corresponde a la energía cinética por unidad de peso o cabeza de velocidad, y $\sum hp$ corresponde a las pérdidas por unidad de peso entre dos puntos, α es el coeficiente de variación de la velocidad en la sección transversal o coeficiente de Coriolis. Usualmente se considera constante, pero puede variar de una sección transversal a otra especialmente en ríos.

2.4.4 Pérdidas de fricción y menores

Los problemas de flujos reales se resuelven basándose en datos experimentales por métodos semi empíricos. Dentro de los conductos cerrados existen dos tipos de flujo: Laminar y Turbulento, los mismo que se describen a continuación:

Flujo Laminar

En el flujo laminar el movimiento del fluido se desarrolla en laminas siendo un movimiento perfectamente ordenado en el que calla lamina tiene una velocidad de avance característica y todas ellas se mueven en la misma dirección y sentido que el flujo.

En este flujo, las pérdidas de carga se producen por efectos viscosos, entendiéndose tales efectos como los que provocan los esfuerzos cortantes entre laminas, es decir, los debidos a rozamientos internos entre laminas del fluido. Serán importantes los cálculos de distribución de velocidades, distribución de esfuerzos cortantes, caudal, pérdidas de carga, velocidades máxima y media. El flujo laminar viene determinado por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular.

El Régimen de flujo depende del número de Reynolds, el mismo que constituye un número adimensional que viene dado por el cociente de las fuerzas de inercia respecto de las fuerzas viscosas.

Para tuberías circulares:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{vD}{\upsilon} \tag{11}$$

Donde v es la velocidad media de la tubería, D es el diámetro de la tubería en metros, μ es la viscosidad absoluta o dinámica en kg/m2, υ es la viscosidad cinemática en m2/s y ρ es la densidad del fluido en UTM/m^3 o kg/m^3 (Antonio & Aldama, 1997; Velásquez, 2010).

Experimentalmente se demuestra que:

0 < Re ≤ 2000	Régimen laminar
2000 < Re < 4000	Régimen transitorio
4000 ≥ Re	Régimen turbulento

Flujo Turbulento

En el flujo turbulento el movimiento de los grupos moleculares es aleatorio y desordenado. Este flujo presenta una velocidad neta de avance en la dirección y sentido del flujo. Las pérdidas de carga se producen por el efecto del rozamiento entre partículas (viscosidad), y por el intercambio de la cantidad de movimiento (turbulencia) de tal forma que cuanto más turbulento es el flujo menor importancia relativa tiene la viscosidad. Su cálculo es muy complicado, basándose en la experimentación (Antonio & Aldama, 1997).

Pérdidas por fricción

Estas pérdidas se producen por la interacción del flujo con las paredes internas del conducto que lo transporta. Este tipo de pérdidas siempre tratarán de frenar el flujo y es producida por la acción de un esfuerzo cortante en las paredes internas de la tubería y va en dirección opuesta al movimiento del fluido. La magnitud de este esfuerzo depende de la rugosidad absoluta del material de la tubería.

Las principales ecuaciones que se utilizan para el cálculo de perdidas por fricción en tubería son:

Ecuación de Hazen Williams

Ecuación desarrollada por G.S. Willians y A. H. Hazen en 1906, es una ecuación netamente empírica y su forma original se presenta a continuación:

$$v = 0.849 C_{HW} R^{0.63} S^{0.54} \quad (12)$$

Donde v es la velocidad media de la tubería, R es el radio hidráulico de la tubería, S es la pendiente de fricción y C_{HW} es el coeficiente de rugosidad de Hazen Williams.

Reemplazando R por D/4 (Radio hidráulico de una tubería trabajando a sección llena) y S por hf/L, se obtiene una expresión para las pérdidas de energía por fricción:

$$hf = \frac{10.674 * L * Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} \quad (13)$$

En dónde, hf corresponde al valor de la pérdida de carga, C es el coeficiente de Hazen Williams, Q es igual al Caudal en m^3/s, D es el diámetro en metros y L es la longitud en metros.

El coeficiente de Hazen-Willians es una medida de la rugosidad relativa de la tubería; este se determinó experimentalmente en función del tubo, del flujo y del fluido (agua) utilizando materiales ni muy lisos ni muy rugosos de la época. De esta manera se han obtenido valores para los diferentes materiales utilizados para elaborar tuberías.

Debido a la naturaleza empírica de esta ecuación, su aplicación debe estar controlada por las siguientes limitaciones (Velásquez, 2010):

- El fluido debe ser agua a temperaturas normales.
- El diámetro de la tubería debe ser mayor o igual a 50 mm (2 pulgadas).
- La velocidad en las tuberías debe ser menor a 3m/s (10 pies/segundo).

Ecuación de Darcy-Weisbach

Ecuación desarrollada por Henry Darcy y Julius Weisbach en 1845, es una ecuación físicamente basada y tiene la siguiente forma:

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

Donde hf es la pérdida por fricción en metros, f es el factor de fricción de Darcy, L es la longitud de la tubería en metros, D es el diámetro de la tubería en metros, v es la velocidad media en la tubería en metros y g es la aceleración de la gravedad en m/s2 (9.8 m/s2) (Velásquez, 2010).

Factor de fricción de Darcy

El factor de fricción f es adimensional y varía de acuerdo a los parámetros de la tubería (rugosidad y diámetro) y del tipo de flujo (número de Reynolds).

Para flujos Laminares

Como consecuencia de la Ley de Poiseuille, f se relaciona con el número de Reynolds (Re) como:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (15)$$

Donde Re corresponde al número de Reynolds.

Para flujo en Transición y Turbulento

Para un número de Reynolds 2000<Re<4000, se considera que el fluido presenta régimen de flujo transicional. En la zona de transición, los valores de son inciertos, ya que el flujo se comporta de manera dual, laminar y turbulentamente, mostrando gran inestabilidad.

Para Re≥4000, en el régimen de flujo turbulento, muchos investigadores se han esforzado en calcular f tanto a partir de resultados de experimentos propios como de resultados obtenidos por otros investigadores. La ecuación de Colebrook-White es la más usada para calcular el factor de fricción en este tipo de régimen de flujo (Velásquez, 2010; Wikipedia, 2022a).

Pérdidas menores

Las pérdidas menores o pérdidas locales son pérdidas de carga debidas a elementos singulares de la tubería tales como codos, estrechamientos, válvulas, etc.

Las pérdidas locales se expresan como una fracción o un múltiplo de la llamada "altura de velocidad" de la forma:

$$h_l = K \frac{V^2}{2g} \quad (16)$$

Donde hf corresponde a la pérdida de carga local, V es la velocidad media antes o después del punto singular, conforme el caso y K es coeficiente determinado en forma empírica para cada tipo de punto singular.

A continuación, se presenta una tabla de los valores de K para los diferentes tipos de puntos singulares:

Tabla 16. Coeficientes K para puntos singulares.

Tipo de singularidad	*K*
Válvula de compuerta totalmente abierta	0,2

Válvula de compuerta mitad abierta	5,6
Curva de 90º	1,0
Curva de 45º	0,4
Válvula de pie	2,5
Emboque (entrada en una tubería)	0,5
Salida de una tubería	1,0
Ensanchamiento brusco	$(1-(D_1/D_2)^2)^2$
Reducción brusca de sección (Contracción)	$0,5(1-(D_1/D_2)^2)^2$

Fuente: (Autor, 2023)

En flujo completamente turbulento la constante de pérdida de singularidad K en ocasiones de determina a partir del producto del coeficiente de fricción f_T por la relación de la longitud equivalente L_e/D; ambos son factores adimensionales, f_T se determina por alguna de las ecuaciones del factor de fricción (Colebrook, Swamee y Jain, etc.), que han sido simplificadas para flujo muy turbulento, es decir para un valor alto del número de Reynolds y L_e/D corresponde a una relación adimensional propia del elemento o singularidad, este valor puede encontarse en diferentes tablas de la literatura técnica (Wikipedia, 2022b).

$$K = f_T \left(\frac{L_e}{D}\right) \tag{17}$$

CAPITULO 3

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Aspectos generales de la zona de red de distribución

El presente estudio se ubica en la provincia del Azuay, Cantón Cuenca y en la parroquia: San Sebastián, en la siguiente figura se puede apreciar el área de influencia del estudio en la imagen satelital del cantón Cuenca.

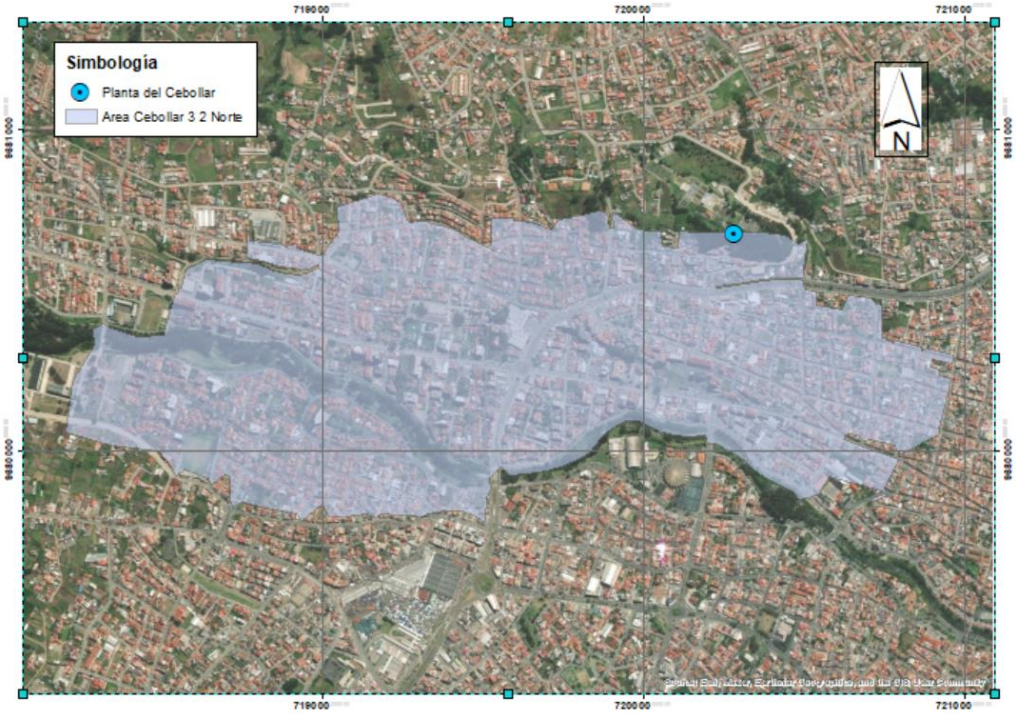


Ilustración 11. Imagen satelital de la ubicación del estudio
Fuente: (Autor, 2023)

Temperatura y precipitación

En la ciudad de Cuenca predomina el clima templado con temperaturas medias que oscilan entre los 10 °C y los 17 °C, en la siguiente figura se aprecia la distribución de la temperatura en un año.

La precipitación en la ciudad de Cuenca se ha identificado como bimodal, con picos de precipitación en los periodos marzo - mayo y octubre - noviembre, la época seca se da en el

periodo junio – septiembre, las precipitaciones son: máxima 1800 mm, media 900 mm y mínima 760 mm.

En la siguiente tabla se aprecia la distribución de la temperatura en un año, así como observar las precipitaciones máximas, medias y mínimas para la ciudad de Cuenca.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	13	13.1	13	12.8	12.5	11.3	10.9	11.1	12.2	13	13.5	13.1
Temperatura min. (°C)	10.1	10.3	10.2	10	9.6	8.5	7.9	7.6	8.3	9.5	10.1	10.1
Temperatura máx. (°C)	16.7	16.8	16.6	16.4	16	14.9	14.6	15.3	16.6	17.2	17.6	16.9
Precipitación (mm)	158	184	190	166	110	89	84	63	69	138	181	180
Humedad(%)	85%	86%	86%	86%	86%	87%	86%	83%	79%	82%	82%	85%
Días lluviosos (días)	18	18	20	20	18	15	14	11	12	17	17	18
Horas de sol (horas)	4.6	4.2	4.4	4.5	4.4	3.8	3.7	4.6	5.6	5.4	5.3	4.8

Ilustración 12. Tabla climática de la ciudad de Cuenca.
Fuente: (Autor, 2023)

3.2 Infraestructura existente

De forma general, y en base a los catastros actualizados disponibles en ETAPA EP., la red de distribución del sector Cebollar 3.2 Norte, tiene una longitud de 42505,09 m como se representa en la siguiente figura. Las tuberías de 250mm, 150 mm de PVC y 400 de HD, salen desde la reserva que se mencionó en el numeral 2.1.2; para posteriormente ser distribuidas al sector de estudio.

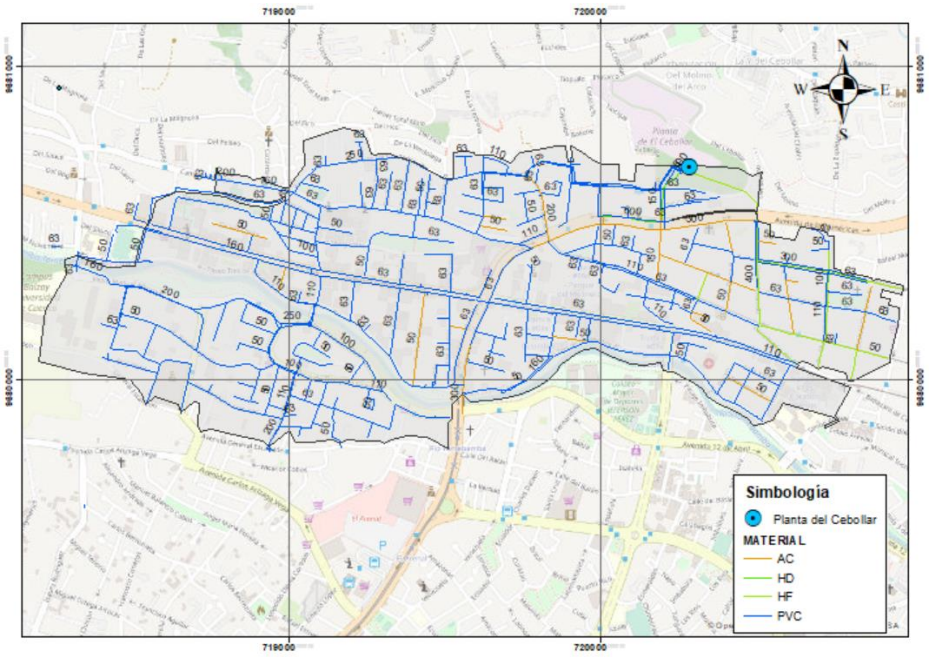


Ilustración 13. Catastro de redes de distribución.
Fuente: (Autor, 2023)

De la figura anterior se desprende la siguiente información:

Tabla 17. Resumen del catastro.

Material	Longitud (m)	Porcentaje (%)
PVC	35920,19	84,51%
HD	2744,16	6,46%
AC	3840,73	9,04%

Fuente: (Autor, 2023)

3.3 Criterios para modelar

El éxito de las predicciones del modelo hidráulico depende sobre determinación y la estimación precisa de parámetros de entrada y estudios de calibración y verificación de modelos. Como resultado de estas simulaciones se pueden extraer algunas conclusiones que se utilizarán en la planificación y gestión de las redes de distribución. El éxito de tales decisiones depende en gran medida de la precisión del modelo.

El modelo hidráulico se ha construido usando la herramienta de cálculo hidráulico WaterGEMS, la misma que se constituye como un software de modelación y diseño que realiza cálculos basados en el Método de Algoritmos Genéticos; este método realiza una iteración eficiente brindando resultados en un menor tiempo y cumpliendo con las condiciones hidráulicas introducidas, además de optimizar el costo de los proyectos al generar diámetros más convenientes para la implementación de los sistemas de agua potable (De la Cruz Rojas, 2020).

Implementar un modelo hidráulico o analizar la infraestructura existente es un proceso que partes de condiciones iniciales que deben ser calibrada, ya que las mismas varían con el tiempo.

El proceso se resume en dos etapas:

- Construcción del modelo
- Calibración del modelo

Construcción del modelo

Para la construcción del modelo se deben tener en cuenta las siguientes fases:

a) Determinación del objetivo del modelo:

Es necesario conocer los objetivos que el modelo ayudará a resolver para saber escoger el tipo de modelo a implementar.

El objetivo del modelo de la presente tesis es realizar la simulación del comportamiento de la red de distribución de agua potable del sector cebollar 3.2 norte para el análisis de vulnerabilidades operativas del sistema.

b) Recopilación de información:

Consiste en la recopilación de información precisa y confiable de todos los elementos que constituyen el sistema; en esta recopilación se deben revisar los planos de infraestructura de la red existente, complementándolos con la información proporcionada por el organismo operador, así como la información que se obtiene en el campo.

c) Topología y trazado de la red:

En este campo de define la forma en la que están conectados todos los elementos de la red de distribución, ya sea red mallada o red ramificada, para definirlos en el modelo.

d) Esqueletización de la red:

Consiste en simplificar o depurar los datos que no son muy relevantes para la obtención de los objetivos del modelo, de manera que tengamos un esquema de red simplificado y útil.

El proceso de Esqueletización consiste en simplificar el tamaño de un modelo hidráulico de una red de distribución de agua potable sin afectar el comportamiento hidráulico del mismo. Este comportamiento hidráulico, se mide cuantitativamente mediante la comparación de las presiones de los nudos, pues es la variable que busca modelarse adecuadamente, respetando los caudales de consumo de cada nudo (Saldarriaga et al., 2010).

e) Cálculo de demanda y asignación de consumos:

La demanda es una de los parámetros más relevantes en la simulación de una red de distribución, ya que tiene gran incidencia en la respuesta del modelo. Por lo tanto, se deben tener claras las respuestas a las siguientes preguntas: ¿Cuánta agua se va a usar?, ¿Dónde están

localizados los puntos de consumo?, ¿Cómo varía el consumo en función del tiempo? (De la Cruz Rojas, 2020).

Para la presente tesis se ha considerado la información de consumo real de usuarios de la red de distribución analizada, insumo proporcionado por el prestador del servicio del sector (ETAPA EP), dicha información consta de datos de consumo mensual georreferenciados (UTM WGS84 Z17S) desde enero de 2022 hasta enero de 2023, haciendo posible la determinación del consumo promedio de agua potable del sector a través de un análisis aritmético.

f) Integrar los componentes no físicos de la red:

Estos componentes corresponden a las curvas de comportamiento (curvas características de rendimiento, de cubicación o de pérdidas en válvulas de propósito general), curvas de modulación o patrones (Demanda de nudos) y leyes de control del sistema (controlan el estado de líneas o consignas según una combinación de situaciones que pueda darse en la red) (Alcaraz, 2006).

Calibración del modelo

Es el proceso de ajustar los parámetros del modelo de manera que este sea lo más cercano a la realidad posible. Cabe resaltar que nunca será 100% preciso, debido a las simplificaciones, las suposiciones iniciales y las limitaciones del modelo usado.

La recolección de datos en la red puede darse de manera directa para parámetros como las curvas características y bombas, pero existen algunos difíciles de medir como la rugosidad, las pérdidas localizadas o las demandas en los nodos que se determinan de manera indirecta, por lo que agregan incertidumbre al modelo.

Este proceso se puede dividir en dos fases: La primera consiste en comprobar que el modelo entrega resultados razonables y la segunda en ajustar los parámetros para que los resultados se asemejen al comportamiento real (De la Cruz Rojas, 2020).

La recolección de los datos de calibración proporciona información que permite evaluar los resultados preliminares del modelo hidráulico, éstos últimos obtenidos a partir de simulaciones que utilicen las estimaciones iniciales de los parámetros básicos de la red. Los datos de calibración pueden ser recolectados mediante:

- Pruebas de campo realizadas en hidrantes o puntos de ensayo para obtener datos de caudal y presión, requeridas para calibrar modelos de análisis en régimen estacionario.

- Datos de telemetría (SCADA) correspondientes a series de tiempo para caudales, presiones, y niveles de tanques; necesarias para calibrar modelos de análisis en período extendido.

- Datos referentes a pruebas con trazadores químicos conservativos o no conservativos, utilizados determinar el tiempo de viaje entre dos puntos de la red de distribución (Rondán, 2016).

La AWWA (AWWA- ECAC, 1999) propone algunos criterios para la calibración de presiones de acuerdo al uso que tendrá el modelo hidráulico, el nivel de detalle requerido, el tipo de simulación y la precisión requerida de las mediciones, con los cuales se podrá establecer un rango de aceptación del procedimiento de calibración realizado de acuerdo al objetivo de la modelación hidráulica.

El objetivo o propósito del modelo hidráulico de la presente tesis tiene fines operativos para la red de distribución, buscando como resultado un modelo operativo del sistema.

La siguiente tabla establece criterios para la calibración según el propósito del modelo.

Tabla 18. Criterios para la calibración según propósito del modelo.

Propósito	Error de presión aceptado m	Datos dentro del criterio %
Planificación	3.5	100
Diseño	1.4	90
Operación	1.4	90

Fuente: (Serpa, 2022)

3.4 Modelación en periodo extendido (EPS)

Una simulación en período extendido tiene en cuenta la variación del consumo de agua a través del tiempo y las condiciones de control operativo, también variables en el tiempo (Ariana, 2016).

Los modelos dinámicos simulan el comportamiento de la red a lo largo del tiempo. Entre estos deben distinguirse los modelos inerciales y los no inerciales (o cuasiestáticos); siendo este último tipo de modelo el que se conoce como simulación en período extendido (Rondán, 2016).

Para la modelación en periodo extendido se ha utilizado la curva de variación de consumo horario del Sector 3.2, información obtenida de (Abad Sarmiento (ETAPA EP), 2018)**.**

3.5 Error RMSE

Una vez calibrado el modelo se realiza una comparación de los resultados de la simulación predicha y los datos observados o medidos en campo, la cantidad de error que hay entre los dos conjuntos de datos se mide a través del error cuadrático medio (RMSE), también conocido como la raíz de la desviación cuadrática media entre dos indicadores (el simulado y el observado); del resultado de este parámetro se puede verificar el éxito de la calibración del régimen de simulación utilizado (EPS).

Los valores más bajos de RMSE indican un mejor ajuste. RMSE es una buena medida de la precisión con que el modelo predice la respuesta, y es el criterio más importante para ajustar si el propósito principal del modelo es la predicción. Un modelo predictivo perfecto (un modelo predictivo hipotético que siempre predeciría el valor esperado exacto) tendría un valor de raíz de error cuadrado medio de 0.

Se puede mejorar el RMSE añadiendo más factores de influencia en la fuente de datos de formación del modelo hidráulico.

CAPÍTULO 4

4. MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE ANÁLISIS

4.1 Modelo inicial

Es el primer escenario que se desarrolla en el software para poder encontrar los problemas que presenta en la actualidad el sector distribución. Este escenario (Medidores2023) es el punto de partida para las simulaciones posteriores y el cual depende directamente de la precisión de los datos de partida.

Sin embargo, es necesario considerar que, para un correcto análisis de la información de las infraestructuras con respecto a elevaciones y consumos, y sumado al componente espacial, es imprescindible la aplicación de un adecuado Sistema de Información Geográfica (SIG). Este sistema nos permitirá, relacionar datos geográficos con otros datos alfanuméricos, a través de una interfaz gráfica. Además, se debe disponer de una cartografía urbana con información de calles o estructuras de importancia.

Adicionalmente, para el desarrollo del modelo es importante establecer el nivel de detalle que se le debe exigir al mismo, esto dependerá del uso que se le va a dar al modelo, así como la precisión de los datos de entrada, los cuáles se basan en los siguientes componentes:

- Catastro de tuberías.
- Curvas de nivel.
- Consumos en base a micromedición.

4.1.1 Suministro de catastro de redes de tubería

El suministro de esta información es una parte fundamental del modelo, debido a que, durante la digitalización, es el elemento que contiene información combinada gráfica y temática. Las tuberías son las líneas que dentro del modelo transportan el agua de características uniformes y sin derivaciones ni aportes distintos de las acometidas.

Para el desarrollo de un modelo hidráulico inicial, es necesario contar con la totalidad de los datos de una red de agua potable. La base de datos del SIG de tuberías contiene los siguientes datos cartográficos:

- Coordenada inicial
- Coordenada final
- Material
- Diámetro

Los extremos de cada tubería, serán los nodos, los cuáles almacenarán los resultados del software que se aplicara para el desarrollo del modelo. Cada línea dentro del SIG (tuberías) debe estar conectada a dos líneas, las cuales deben estar orientadas, es decir, una línea de llegada y otra de salida. Se comprobó el correcto enlace de las tuberías y que todos los campos requeridos estén completos.

Como se indicó anteriormente, durante este proceso de digitalización garantizó la inclusión de la información contenida de los catastros en formato CAD a la base de datos SIG.

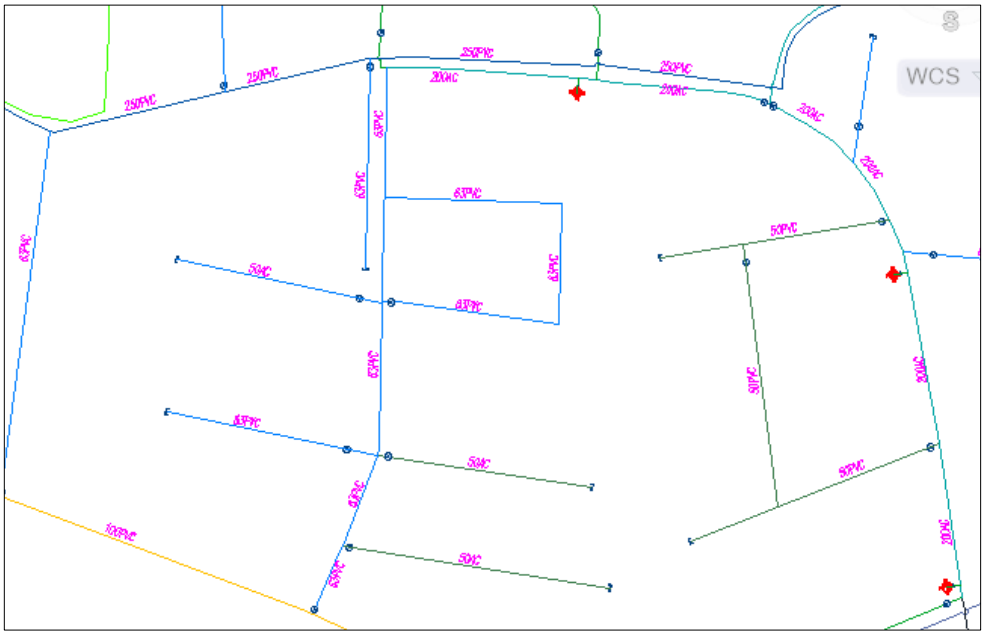


Ilustración 14. Catastro de redes entregado por ETAPA EP.
Fuente: (Autor, 2023)

4.1.2 Suministro de altimetría

ETAPA EP., proporcionó las curvas de nivel del sector, la cual es una forma gráfica de encontrar esta información sobre las cotas del terreno. Posteriormente para obtener las cotas de cada nodo en nuestra red, fue necesario la elaborar un modelo digital del terreno (MDT), en base a un proceso de interpolación. Este MDT permitirá, por parte del software de modelación, la

interpolación y asignación de la altimetría sobre el nivel del mar, a cada uno de los elementos hidráulicos de la red.

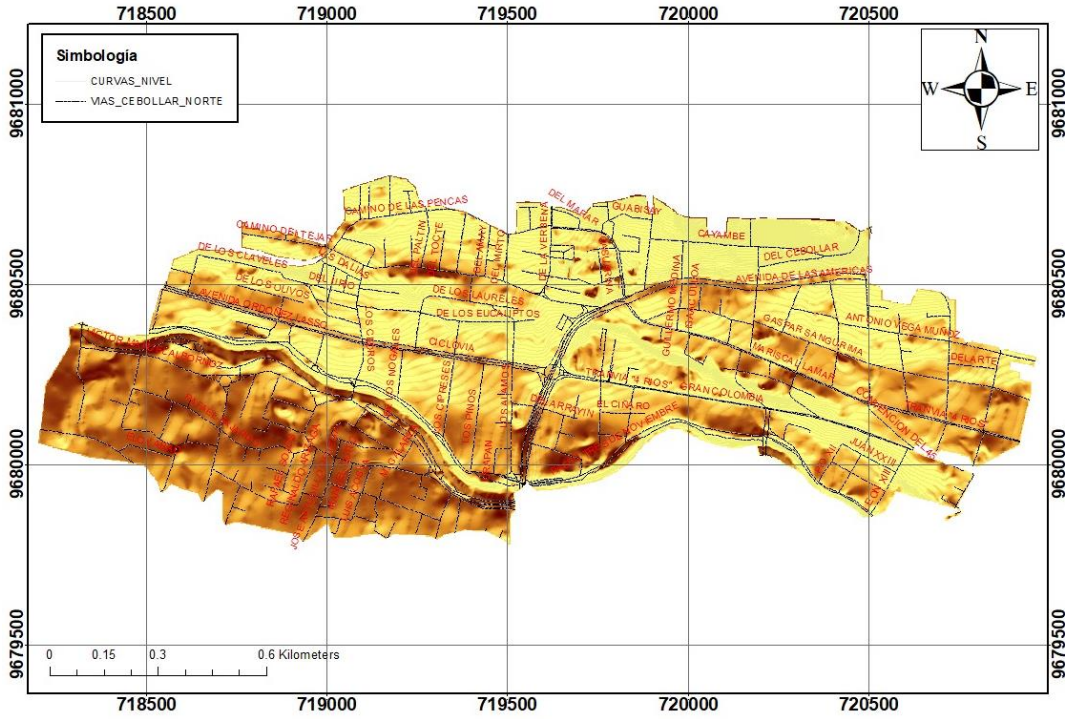


Ilustración 15. Generación MDT del sector Cebollar 3.2 Norte
Fuente: (Autor, 2023)

4.1.3 Suministro de consumos

Para nuestro estudio, los nudos se definen como los puntos de la red en los cuales se unen dos o más tuberías, y dentro de nuestro sistema hidráulico, los consumos estarán concentrados en los nudos. Por otro lado, para el desarrollo correcto modelo inicial es muy importante asignar los consumos de agua potable a lo largo de la red de distribución, considerando que fue diseñada para satisfacer la misma, sin olvidar que uno de los objetivos del modelo hidráulico es analizar las redes en su estado actual y predecir el funcionamiento de la misma en escenarios futuros.

Para esto, se considera que los nudos tendrán un caudal conocido, en donde anteriormente se obtuvo un caudal correspondiente al estado actual (numeral 2.2.5), el cual fue calculado mediante información de micromedición de los usuarios. Es decir, se dispone de un SIG de medidores con su consumo correspondiente, los cuales tienen que ser distribuidos a los nudos generados por las mallas de las tuberías del sector, en donde finalmente cada nudo contendrá información del consumo requerido para satisfacer la demanda actual.

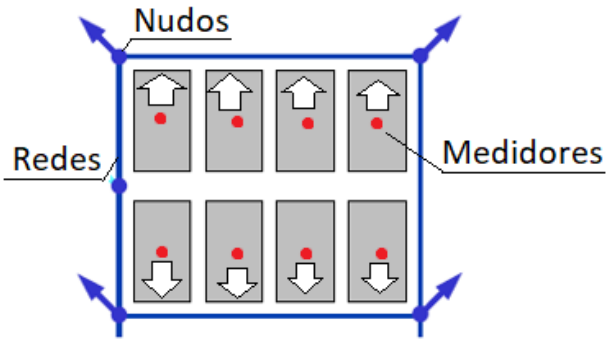


Ilustración 16. Representación de asignación de consumos
Fuente: (Autor, 2023)

4.1.4 Suministro de elementos hidráulicos.

Es importante elaborar un SIG de cada uno de los elementos hidráulicos del sector, los cuales constan dentro del catastro de redes, en donde se pudo identificar los siguientes:

- Estaciones reductoras de presión
- Hidrantes
- Válvulas de aire
- Válvulas de operación/control
- Válvulas de purga

	Válvula de purga
	Válvula de aire
	Hidrante
	Válvula de control y seccionamiento
	Tapón
	Estación reductora de presión
	Válvula de operación (subsectorización)
	Tanque de reserva

Ilustración 17. Simbología del catastro de agua potable
Fuente: (Autor, 2023)

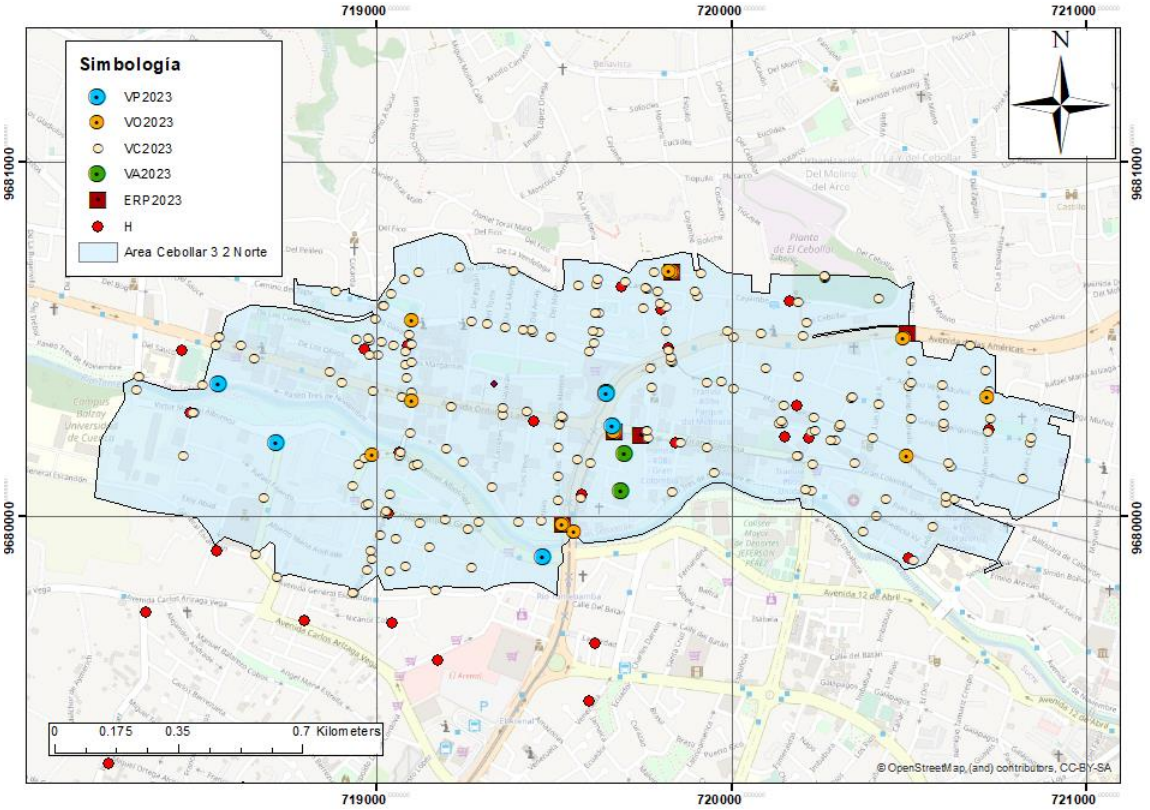


Ilustración 18. SIG de los elementos hidráulicos.
Fuente: (Autor, 2023)

4.2 Resultados de modelo inicial

4.2.1 Identificación de problemas

Una vez realizado el modelo inicial fue necesario realizar una verificación de la información, debido a que se detectaron algunos errores en el proceso de la elaboración del modelo dentro del software y que podrían afectar los resultados del mismo. A continuación, se detalla una lista de lo que se debería tener en cuenta para el desarrollo de futuros modelos hidráulicos:

- Verificar que todas las bases de datos estén en el mismo sistema de unidades, en este caso ETAPA EP., trabaja con el Sistema Internacional de Unidades (SI) y el Sistema de referencia de coordenadas geográficas (UTM WGS84 17S).
- Las curvas de nivel proporcionadas por ETAPA EP., en algunas zonas carece de precisión, por lo que estos puntos serán de análisis al momento de la calibración del modelo; considerando adicionalmente que no existe información sobre la profundidad de las tuberías instaladas.
- El catastro de las redes de distribución que fue entregado por ETAPA EP., en formato CAD, es un catastro que, si bien está actualizado, fue necesario revisar las

propiedades en cuanto a diámetro y material, los cuáles deben estar completos y coherentes. Adicionalmente, se revisó que todos los tramos de tuberías estén unidos, puesto que se detectaron tramos de tuberías aislados en donde únicamente faltaba la conexión a la red principal. No se dispone de la antigüedad o el año de instalación de las redes de este sector en un 50%.

- Se desconoce del valor real de los coeficientes de rugosidad de las tuberías, por lo que únicamente se asignaron los proporcionados en la Tabla 13.
- Se verifica que estén correctamente asignados los consumos a cada nudo de la red de distribución y que la suma total sea el obtenido en el numeral 2.2.5.
- Se revisa que todos los elementos hidráulicos (válvulas, hidrantes, etc.), estén debidamente enlazados y cumpliendo la función que fue asignada dentro del catastro.

Mediante esta verificación fue posible decir que nuestro modelo inicial se encuentra adecuadamente georreferenciado y que cuenta con la asignación correcta de cotas, materiales y diámetros de tuberías, demandas en los nudos, así como la visualización de los diferentes elementos hidráulicos.

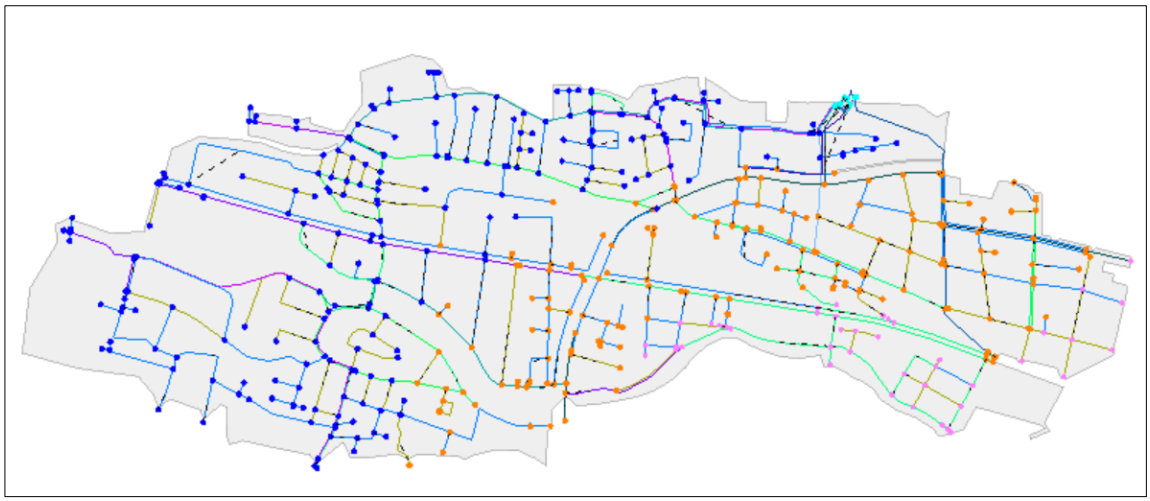


Ilustración 19. Modelo Inicial
Fuente: (Autor, 2023)

4.2.2 Presiones del modelo inicial

Al finalizar el modelo inicial, se procede a chequear los resultados en cuanto a presiones, obteniéndose los siguientes resultados:

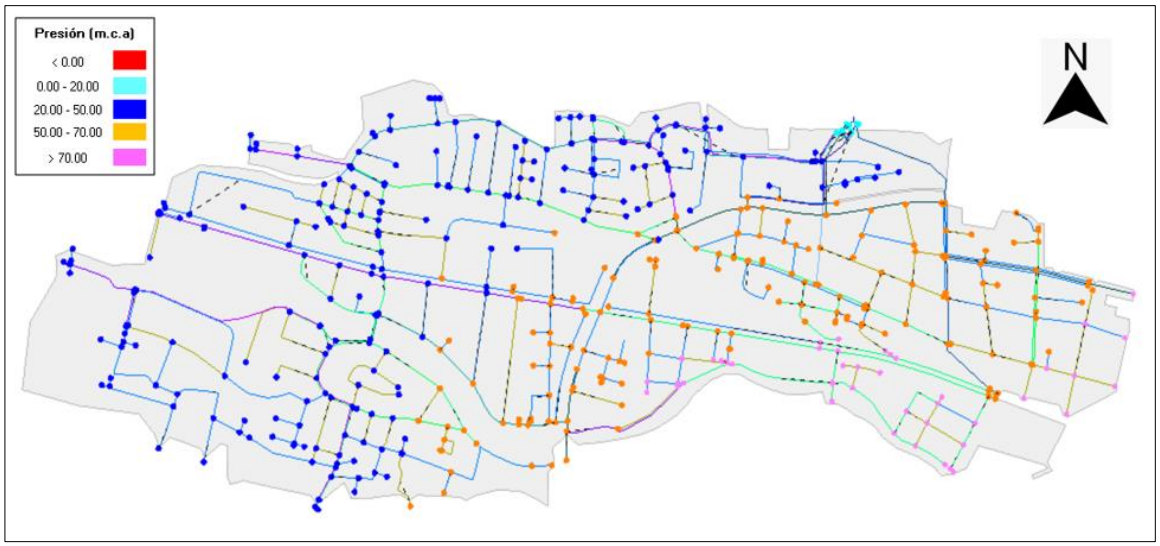


Ilustración 20. Presiones del Modelo Inicial
Fuente: (Autor, 2023)

- Todos los nudos de la red, marcan presiones positivas
- El rango de presiones obtenido varía entre 23 y 83 m.c.a
- Existe una zona que marca presiones de 1 a 6 m.c.a, la cual corresponde a los nudos de la salida de la PTAP del Cebollar.
- Todas las válvulas de control y operación se encuentras activas o abiertas.
- Las estaciones reductoras de presión están iniciadas con una presión de salida de 20 m.c.a.
- Se comprueba que la suma de los caudales de los nudos de como resultado el calculado en el numeral 2.2.5
- El 49% de las presiones están en el rango de 20 a 50 m.c.a, y el 38% de las presiones se encuentra en el rango de 50 a 70 m.c.a.

4.2.3 Velocidades del modelo inicial

En cuanto a los resultados de las velocidades tenemos lo siguiente:

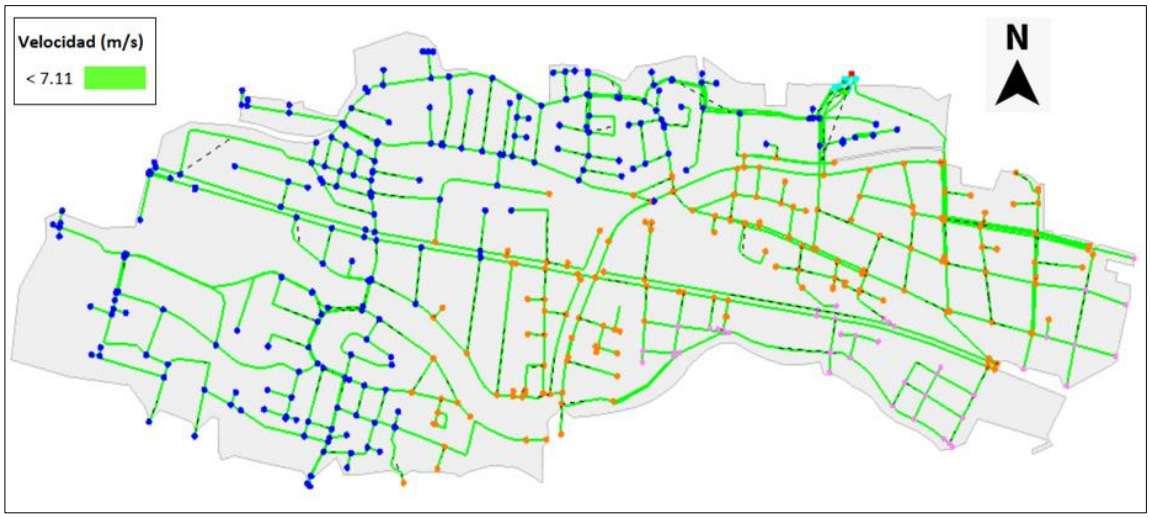


Ilustración 21. Velocidades del modelo inicial
Fuente: (Autor, 2023)

- Las velocidades en su mayoría son menores a 7.11m/s, lo que recomienda la norma descrita en el numeral 2.3.4, es que la velocidad máxima admisible se aproxime a 4,5 o 5 m/s, por lo que habría que chequear en la calibración si este factor se altera o se mantiene.

4.2.4 Pérdida de carga del modelo inicial

En cuanto a pérdidas de carga se puede apreciar que todos los valores están por debajo del límite permitido, como no existe variación de consumo aun, no es posible detectar fallas en la red.

Ilustración 22. Pérdidas de carga del Modelo Inicial
Fuente: (Autor, 2023)

4.3 Calibración del Modelo Hidráulico

Una vez realizado el proceso anterior, es necesario realizar una calibración del modelo, hasta llegar a un modelo que se pueda aceptar como fiable. Para llegar a esto, la calibración consistirá en ajustar los valores de parámetros del modelo con incertidumbre a partir de la comparación de resultados medidos y calculados por el modelo. Para nuestro estudio, la calibración será enfocada principalmente en las presiones y ajuste de los caudales.

Se usará la capacidad del software para realizar el mayor número de iteraciones y cambios que favorezcan acercarse rápidamente al objetivo de este estudio.

4.3.1 Parámetros de ajuste

Es importante indicar que, para la calibración de las redes de distribución, se utilizaron mediciones de presiones en puntos específicos, así como se tomó en cuenta la subsectorización de la zona, a su vez se evaluaron los reportes de la macromedición del tanque de reserva que abastece a todo el sector 3.2, para finalmente poder realizar un ajuste real de los consumos.

Existen parámetros que no fueron posibles tomar mediciones, como los coeficientes de rugosidad de las tuberías. Sin embargo, éste será el parámetro que varíe para que logren ajustarse las demás medidas.

4.3.2 Subsectorización del manual de operación

La zona Cebollar 3.2 Norte, se divide en ocho subsectores mediante válvulas de control/operación, también existen subsectores afectados con ERP (Estación Reductora de Presión), con la finalidad de eliminar las sobrepresiones de operación existentes, estos son: Sector 1, ubicada en la Av. de las Américas y Calle del Molino (P. de salida 28mca.); Sector 2, ubicada en la calle Gran Colombia y Av. de las Américas (P. de salida 24mca.); Sectores 5 y 6 por la, ubicada en la calle del Guabisay y Camino de las Pencas (P. de salida 28mca.) y sectores 7, 8 y 9, ubicada en la calle Paseo 3 de Noviembre y Av. de las Américas (P. de salida 52.76 psi.).

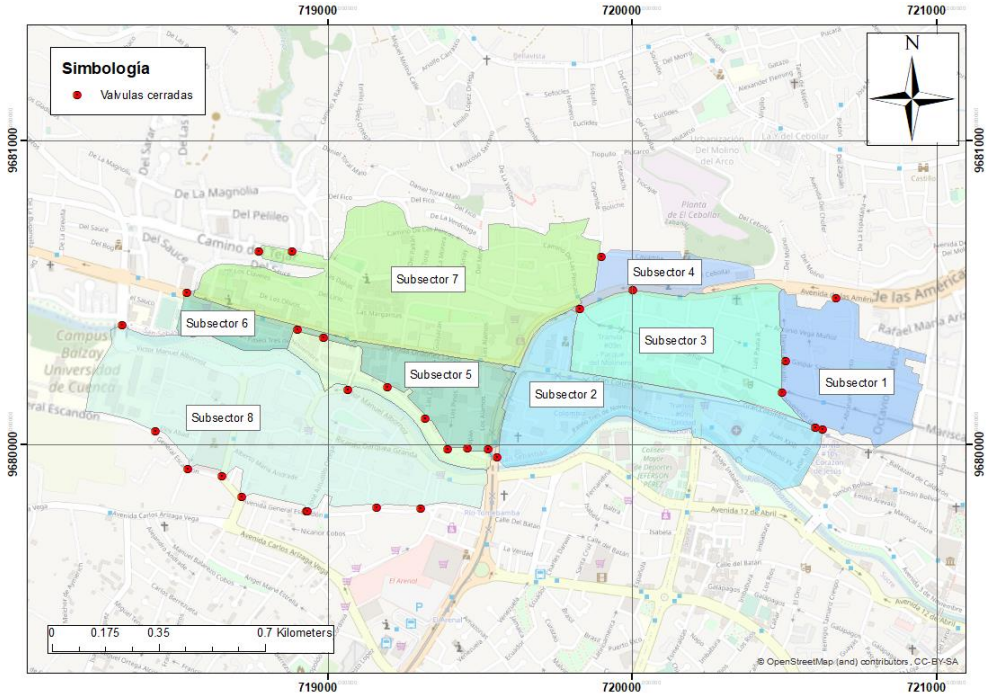


Ilustración 23. Subsectorización del Cebollar .3.2 Norte
Fuente: (Autor, 2023)

Se procedió a calibrar cada válvula dentro del software en donde se encuentra nuestro modelo, siguiendo el manual de operación del sector 3.2 Norte (Anexo 1). Es decir, se cerraron las válvulas que indica dicho manual, así como en cada estación reductora de presión, se inició con las presiones de salida que se indicaron anteriormente, esto es de vital importancia, pues con esto se regularán las presiones aguas abajo y se seguirá el flujo del caudal correo por el efecto de cierre de las válvulas.

4.3.3 Presiones medidas

Las mediciones de presión fueron tomadas en puntos estratégicos de la red de distribución, la elección para colocar el equipo de medición, está en base a la subsectorización establecida en el numeral anterior, del cual se desprenden ocho puntos de presión.

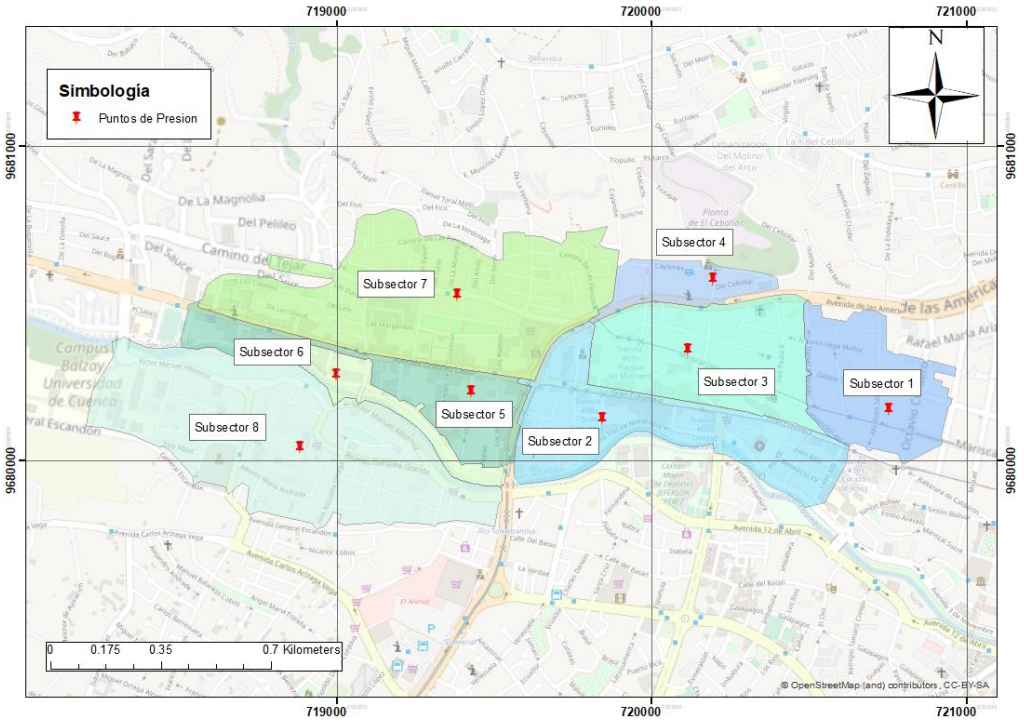


Ilustración 24. Puntos de mediciones de presión
Fuente: (Autor, 2023)

Para la toma de presiones se utilizó un dispositivo electrónico (Dickson pr325 Presión Logger), en donde su función es almacenar datos de presión (datalogger) para un periodo determinado de tiempo. Para este estudio se registraron datos de presión cada cinco minutos en el lapso de un día (no fin de semana).

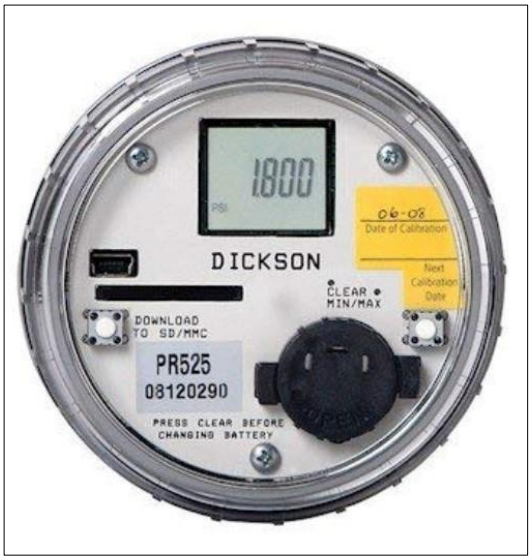


Ilustración 25. Dispositivo electrónico para registro de presiones.
Fuente: (Autor, 2023)

A continuación, se indica el comportamiento de las presiones en todos los subsectores, a partir de estas gráficas es posible determinar tres estados en los cuáles calibraremos nuestra red:

- Periodo nocturno (23:00 a 05:00)
- Periodo de mayor consumo en el día (9:00 a 18:00)
- Periodo de menor consumo en el día (18:00 a 23:00 y 05:00 a 9:00)

Subsector 1 (Calle Francisco Paredes y Av. Mariscal Lamar)

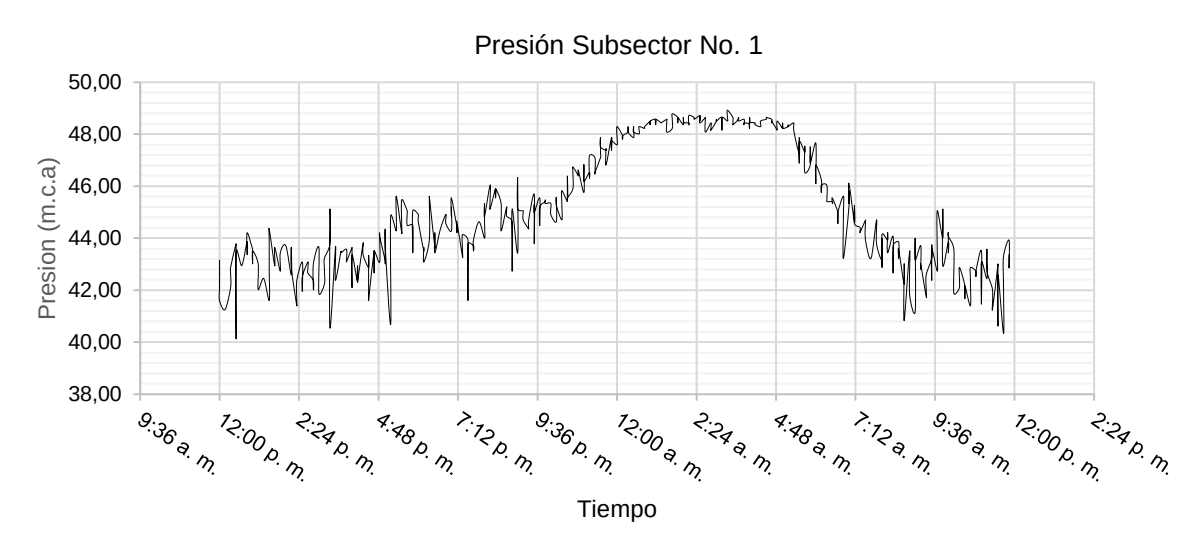


Ilustración 26. Curva de presiones del Subsector 1
Fuente: (Autor, 2023)

Subsector 2 (Calle de Los Manzaneros y calle El Cañaro)

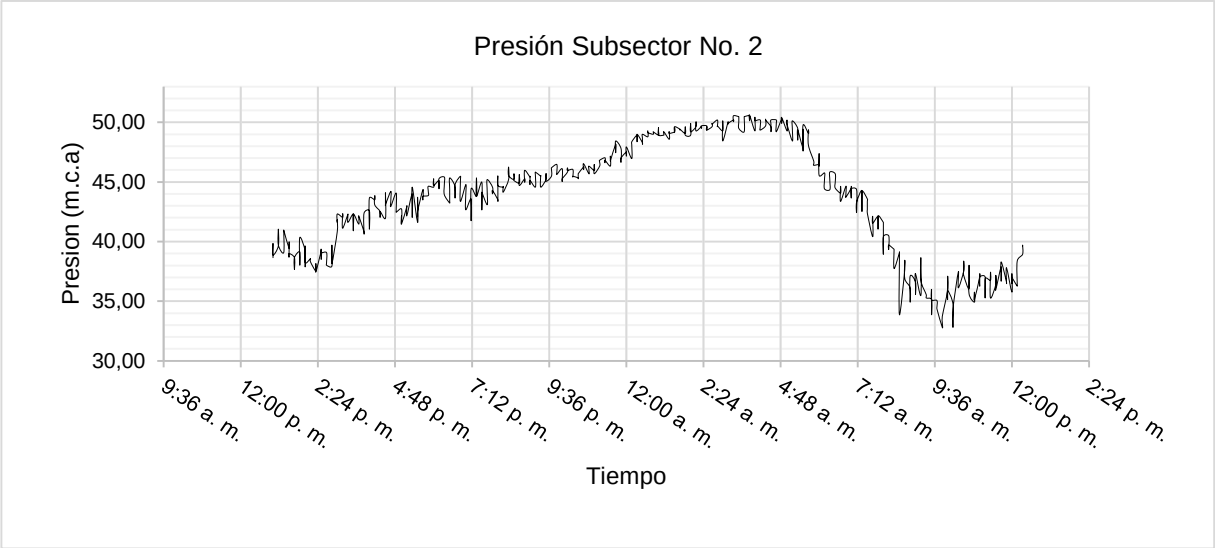


Ilustración 27. Curva de presiones del Subsector 2
Fuente: (Autor, 2023)

Subsector 3 (Av. Mariscal Lamar y Octavio Cordero)

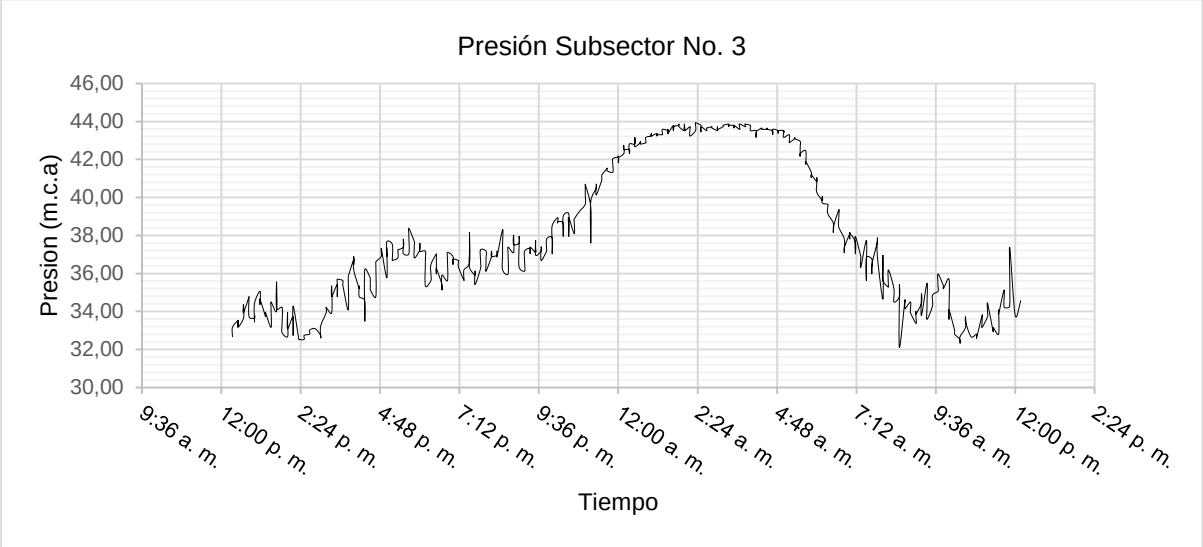


Ilustración 28. Curva de presiones del Subsector 3
Fuente: (Autor, 2023)

Subsector 4 (Calle Tinajillas y Av. De las Américas)

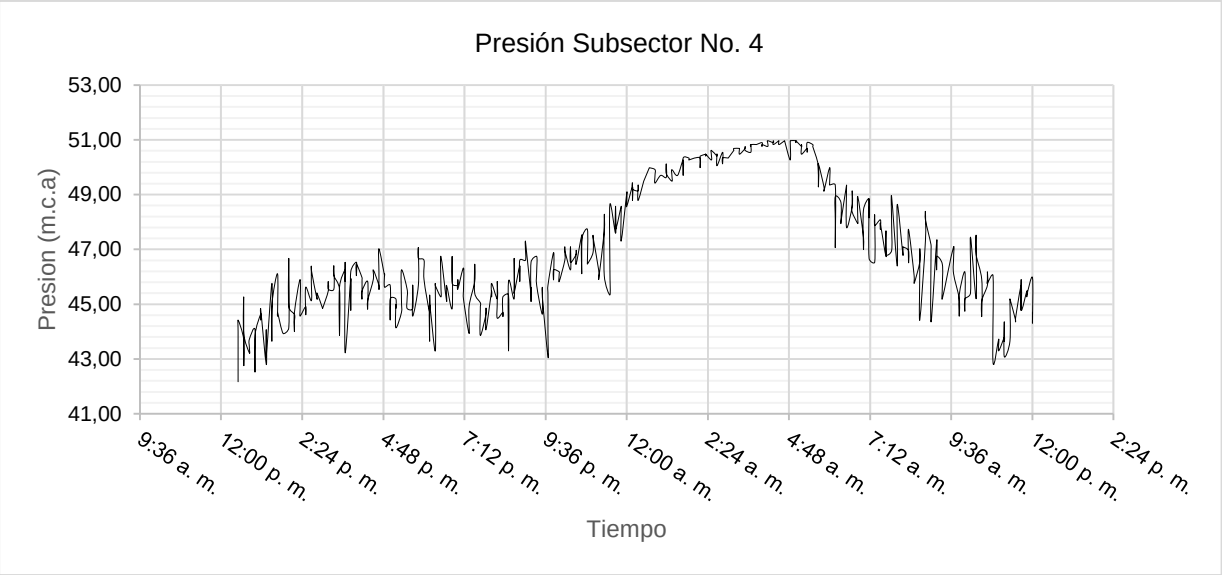


Ilustración 29. Curva de presiones del Subsector 4
Fuente: (Autor, 2023)

Subsector 5 (Calle Camino del Tejar y calle de La Morera)

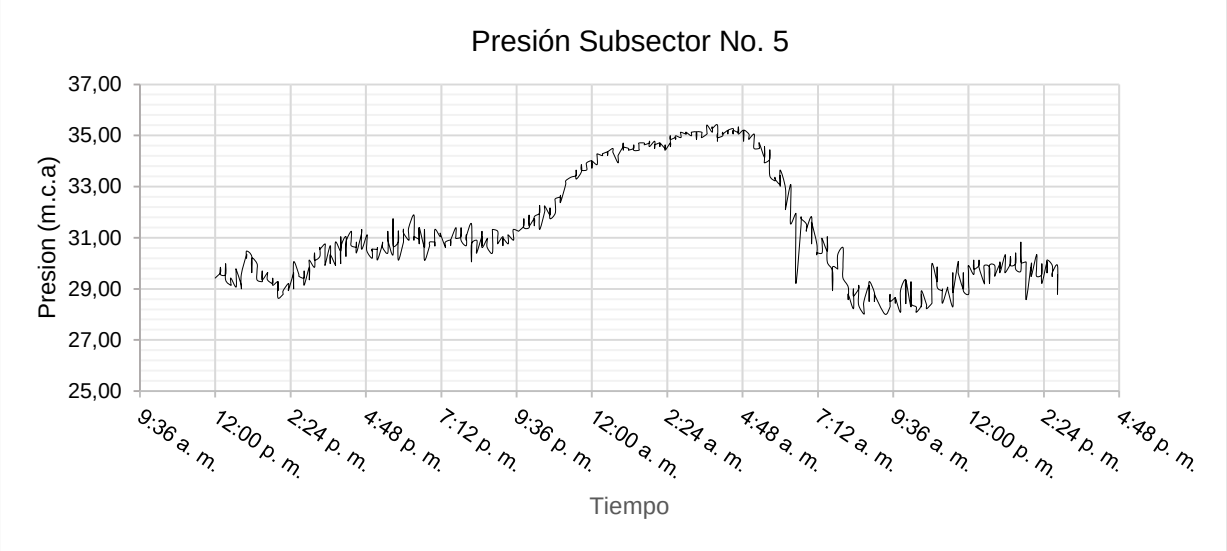


Ilustración 30. Curva de presiones del Subsector 5
Fuente: (Autor, 2023)

Subsector 6 (Av. Paseo 3 de noviembre y Av. Ordoñez Lasso)

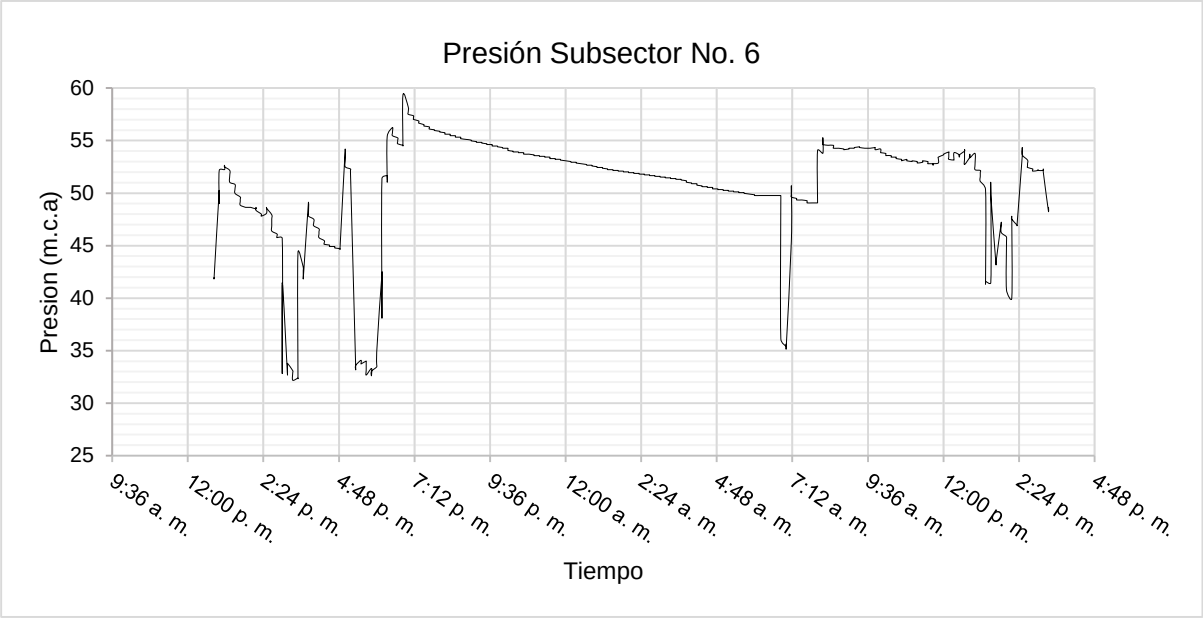


Ilustración 31. Curva de presiones del Subsector 6
Fuente: (Autor, 2023)

Subsector 7 (Av. Ordoñez Lasso y calle Los Pinos)

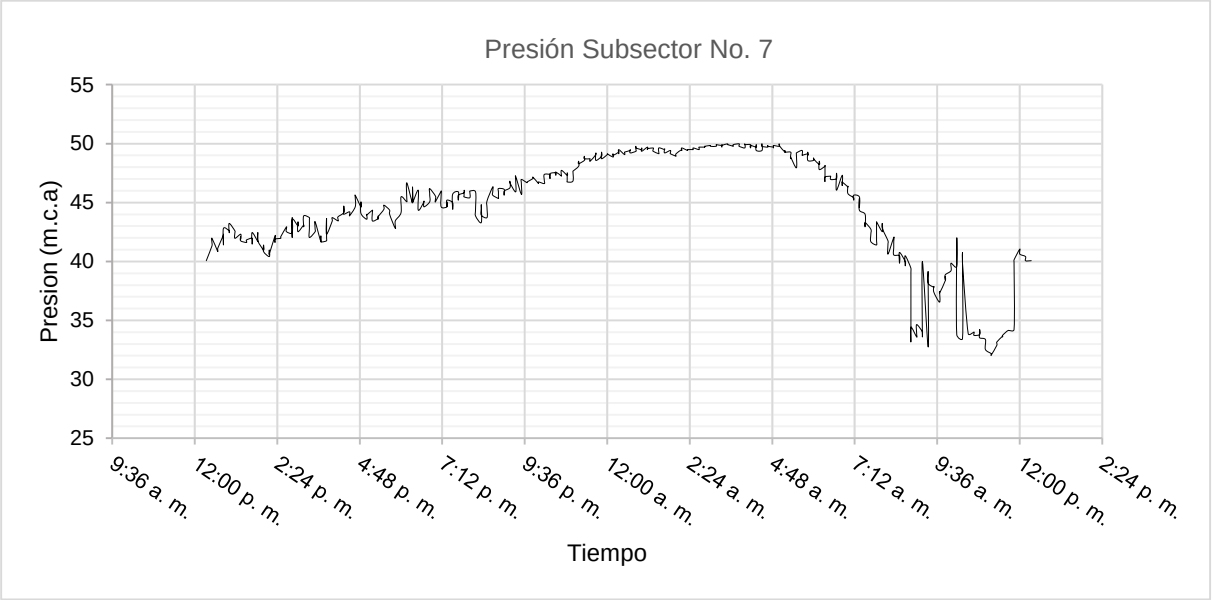


Ilustración 32. Curva de presiones del Subsector 7
Fuente: (Autor, 2023)

Subsector 8 (Calle Reinaldo Arízaga y calle Ricardo Darquea)

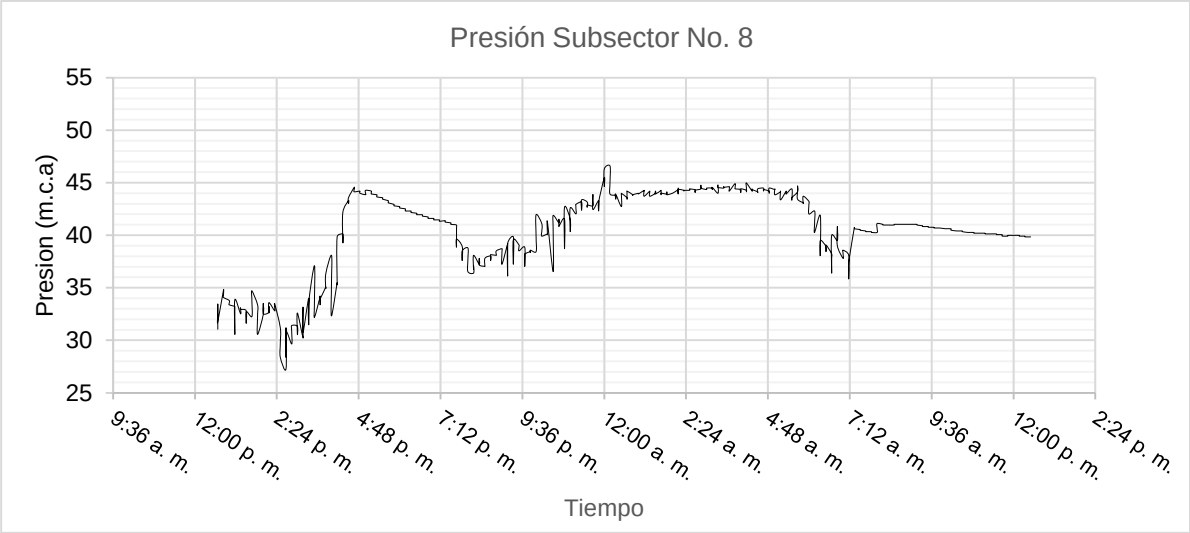


Ilustración 33. Curva de presiones del Subsector 8
Fuente: (Autor, 2023)

Una vez tomados todos los valores de presión, se depura esta información, para luego procesar los datos que definirán los tres estados principales del comportamiento de las presiones en un día, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 19. Resumen de presiones medidas en campo.

PRESIONES MEDIDAS (MCA)								
HORA	**Subsector 1**	**Subsector 2**	**Subsector 3**	**Subsector 4**	**Subsector 5**	**Subsector 6**	**Subsector 7**	**Subsector 8**
0:00	48.65	49.63	43.37	50.48	34.92	53.22	49.70	44.82
10:00	47.10	45.13	39.28	47.66	35.52	47.25	44.14	39.14
13:00	42.45	37.17	33.86	43.23	29.29	41.32	41.46	32.81

Fuente: (Autor, 2023)

Se puede observar en la tabla anterior, que los valores de las presiones en la noche aumentan debido a que el consumo disminuye, pero en las horas de la mañana empiezan a disminuir porque el consumo aumenta en horas “pico”, llegando al nivel mínimo de presión al medio día hasta las 16:00 aproximadamente.

4.3.4 Micromedición

ETAPA EP., dispone los registros de los usuarios, así como la lectura de medidores mes a mes, cada base de datos SIG, contiene información relativa al consumo expresado en m³/mes,

esta información es procesada para obtener el volumen total del sector “facturado”, se puede observar en la Tabla 20, los valores de la micromedición para el sector 3.2

4.3.5 Macromedición

La macromedición del sector 3.2 se mide en la Planta de El Cebollar de manera integral conjuntamente con los subsectores 3.2 Sur, 3.2. Centro y 3.2 Norte, por lo que, no se disponen de mediciones de cada uno por separado, es importante mencionar que se intentó colocar un medidor de caudal a la salida del tanque RC7 o en la línea de distribución principal, de la zona de nuestro estudio. Sin embargo, por las condiciones de las tuberías y el equipo de medición, facilitado por la ETAPA EP., no fue posible calibrar adecuadamente esta herramienta, por lo que dicha información no sería útil, para el desarrollo de nuestra investigación.

Por otro lado, consideraremos los valores correspondientes al índice de agua no contabilizada del sector Cebollar 3.2 Total, el cual es calculado mediante la micromedición y los usuarios efectivos durante un año, esta información fue proporcionada por el DAIAS, al obtener este índice de agua no contabilizada se podrían ajustar los caudales finales de nuestro sector.

Tabla 20. Porcentaje de caudal no registrado

Descripción	ene-22	feb-22	mar-22	abr-22	may-22	jun-22	jul-22	ago-22	sep-22	oct-22	nov-22	dic-22
Micromedición (m³/mes)	422666,0	425551,0	425975,0	433190,0	435514,0	430187,0	428254,0	409799,0	421840,0	412994,0	414708,0	414412,0
Macromedición (m³/mes)	774618,6	750428,8	777484,0	800350,6	783434,7	758876,9	689532,6	717830,7	703733,2	-	705827,0	695461,4
Usuarios efectivos (u)	23032,0	23136,0	23136,0	23219,0	23304,0	23376,0	23432,0	22354,0	23471,0	23498,0	23538,0	23578,0
Caudal no registrado (m³/mes)	351952,6	324877,8	351509,0	367160,6	347920,7	328689,9	261278,6	308031,7	-	-	291119,0	281049,4
Caudal no registrado (%)	**45,4%**	**43,3%**	**45,2%**	**45,9%**	**44,4%**	**43,3%**	**37,9%**	**42,9%**	-	-	**41,2%**	**40,4%**

Fuente: (Autor, 2023)

Se puede observar en la Tabla 20, el alto porcentaje de caudal no registrado como parte de la micromedición en el sector Cebollar 3.2 Total, por lo que se procede a obtener un promedio de estos valores, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 21. Porcentaje de agua no contabilizada

Caudal no registrado (%)
43,3%

Fuente: (ETAPA EP., 2023)

Este valor del 43,3% lo usaremos para nuestra zona Cebollar 3.2 Norte.

4.3.6 Ajuste de consumos

Una vez realizados los cálculos y consideraciones anteriores, se procede a realizar el ajuste de consumos para nuestro sector, es decir que en la actualidad no se encuentra distribuido los 40,0 l/s descritos en el numeral 2.2.5, al contrario, existe un porcentaje de agua no contabilizada del 43,3% que se encuentra en las redes pero que no es posible detectar en que parte de las redes se "pierde" este consumo, por lo que es de nuestro criterio afectar a nuestro consumo actual "facturado" de 40,0 l/s por el índice de pérdidas obtenido y volver a repartir en los nudos de las redes del Cebollar 3.2 Norte, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 22. Consumo corregido

Consumo actual (l/s)	Agua no contabilizada (%)	Consumo actual corregido (l/s)
40,00	43%	57,31

Fuente: (Autor, 2023)

Posteriormente, se procede a distribuir en nuestro software de modelación, este consumo corregido de 57,31l/s, de manera proporcional a nuestro primer consumo actual.

Finalmente se procede a cargar en el software de modelación la curva de consumo establecida en el numeral 2.2.6.

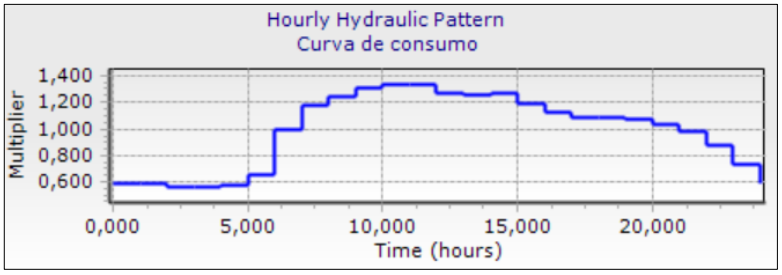


Ilustración 34. Patrón de consumo
Fuente: (Autor, 2023)

4.4 Resultados de la calibración

Es importante mencionar que para lograr calibrar del modelo hidráulico inicial a un modelo que represente un valor aceptable de error en cuanto a valores medidos contra valores calculados, requirió de:

- Varias revisiones a la información proporcionada (catastros, consumos elevados en ciertos puntos de la red, cotas, válvulas)

- Uso de las herramientas del software para el desarrollo del modelo, el cual es el utilizado por la ETAPA EP.

- Para la aplicación del uso del manual de operación con respecto al estado de las válvulas (abierto/cerrado), fue necesario coordinar directamente con el personal del Departamento de Control de Fugas, para definir en el catastro a que red exacta pertenece la válvula a permanecer cerrada o abierta, debido a que en el manual se explica de manera general la ubicación de las mismas.

- Variaciones del coeficiente de las pérdidas menores de las válvulas del modelo, las cuáles fueron necesarias ajustar hasta alcanzar presiones que reduzcan nuestro margen de error.

4.4.1 Presiones como resultado de la calibración

Se calibró simultáneamente el modelo hidráulico para los tres periodos descritos en la tabla 17, obteniéndose los siguientes resultados:

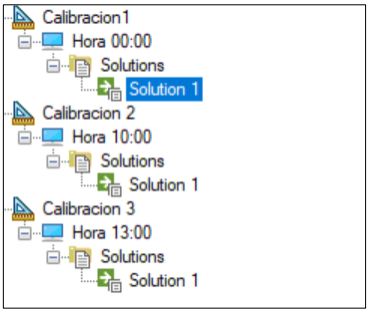


Ilustración 35. Representación de la calibración simultánea en el modelo.
Fuente: (Software de modelación, 2023)

Resultados de simulación a las 00:00

Tabla 23. Resultados de presiones calibradas a las 00:00

HORA 00:00	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	RMSE (m.c.a)
Presión observada (m.c.a)	48,65	49,63	43,37	50,48	34,92	53,22	49,7	44,82	
Presión simulada (m.c.a)	46,91	49,25	43,59	51,87	33,58	53,07	49,99	46,75	**1,16**
Diferencia (m.c.a)	1,74	0,38	-0,22	-1,39	1,34	0,15	-0,29	-1,93	

Fuente: (Autor, 2023)

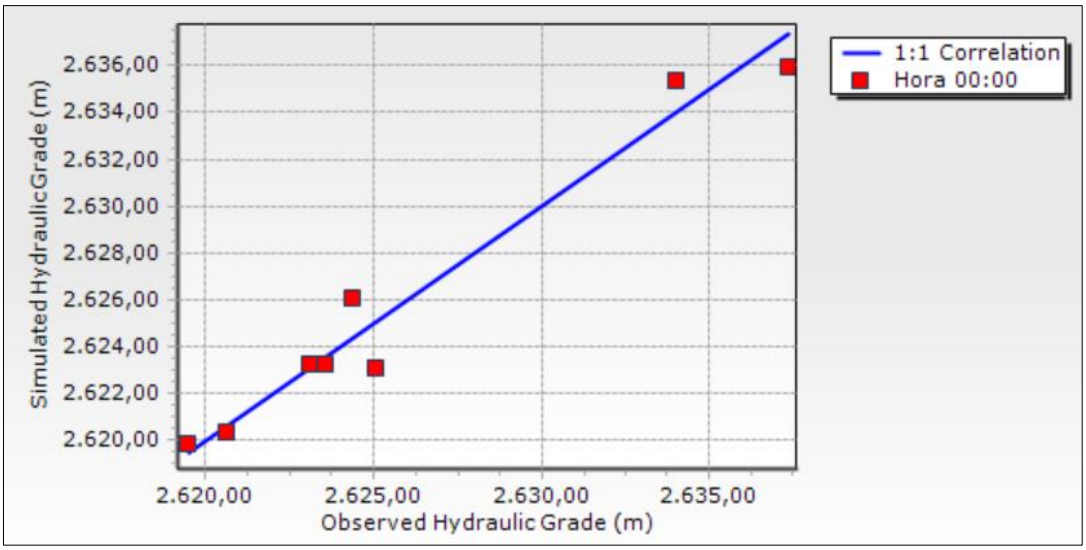


Ilustración 36. Línea de correlación (00:00)
Fuente: (Software de modelación, 2023)

Resultados de simulación a las 10:00

Tabla 24. Resultados de presiones calibradas a las 10:00

HORA 10:00	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	RMSE (m.c.a)
Presión observada (m.c.a)	47,10	45,13	39,28	47,66	35,52	47,25	44,14	39,14	
Presión simulada (m.c.a)	47,47	42,66	39,18	46,25	35,08	47,65	45,34	41,00	**1,63**
Diferencia (m.c.a)	-0,37	2,47	0,10	1,41	0,44	-0,40	-1,20	-1,86	

Fuente: (Autor, 2023)

Ilustración 37. Línea de correlación (10:00)
Fuente: (Software de modelación, 2023)

Resultados de simulación a las 13:00

Tabla 25. Resultados de presiones calibradas a las 13:00

HORA 13:00	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	RMSE (m.c.a)
Presión observada (m.c.a)	42,45	37,17	33,86	43,23	29,29	41,32	41,46	32,81	
Presión simulada (m.c.a)	43,65	40,13	33,72	45,05	30,77	42,44	39,56	32,78	**1,74**
Diferencia (m.c.a)	1,20	2,96	-0,14	1,82	1,48	1,12	-1,90	-0,03	

Fuente: (Autor, 2023)

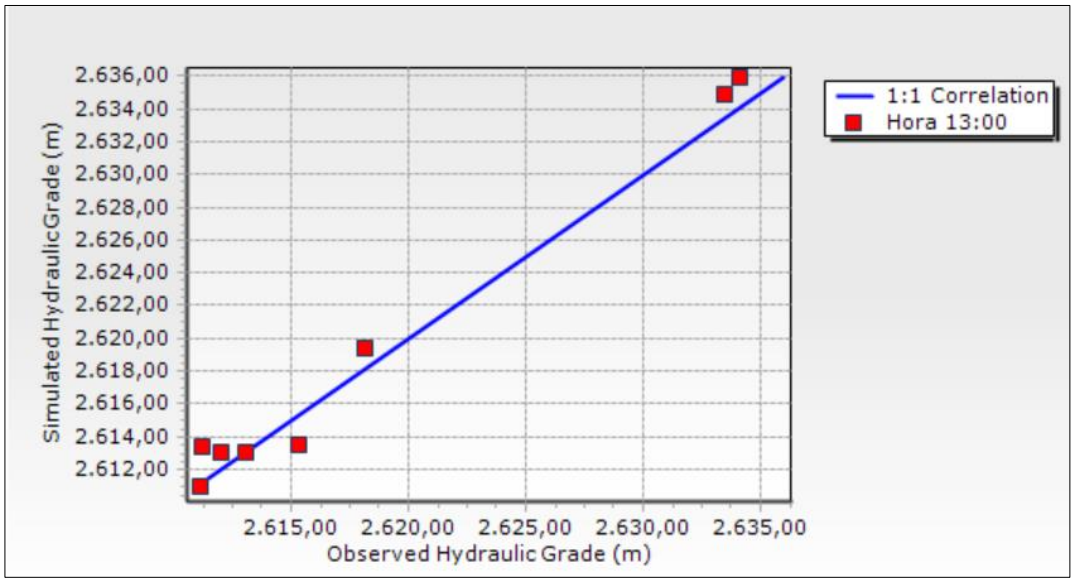


Ilustración 38. Línea de correlación (10:00)
Fuente: (Software de modelación, 2023)

De los gráficos anteriores, se puede indicar que existe mayor aproximación a la simulación del periodo nocturno, lo cual puede ser a que la curva de consumo tiende a ser continua por la noche y por lo tanto el comportamiento de las presiones se mantiene estables.

El error cuadrático de cada simulación para los distintos periodos es aceptable de acuerdo a lo establecido en el numeral 3.3, es decir los valores están cercanos a 1.4 metros de error para el propósito operativo del modelo.

A continuación, se indican los coeficientes de rugosidad a los que se adaptaron lo tres tipos de materiales para alcanzar esta calibración, en donde se puede indicar que disminuyeron, lo cual es lo esperado debido a su uso.

Tabla 26. Coeficientes de rugosidad ajustados

Material	Coeficiente de rugosidad	
	Inicial	Ajustado
PVC	130	95
AC	140	103
HD	130	93

Fuente: (Autor, 2023)

4.5 Validación del Modelo Hidráulico

Una vez calibrado el modelo hidráulico, es necesario demostrar que el modelo refleja el comportamiento real de las redes de distribución. Por lo que se procede a la validación del mismo, para lo cual utilizaremos presiones que dispone el Departamento de Control de Operaciones, de ETAPA EP., estas presiones fueron obtenidas mediante un manómetro, y se dispone de este registro porque se atienden solicitudes de información de infraestructura y presiones, lo cual se utiliza para el diseño de redes, estudios hidrosanitarios y estudios contra incendios, es importante indicar que el personal al tomar presiones, registra la hora.

Se considera importante indicar que la comprobación del modelo se lleva con parámetros diferentes a los de calibración, lo cual estaría garantizando su funcionalidad.

Tabla 27. Validación de presiones

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
	Hora 11:30	Hora 13:30	Hora 14:00	Hora 12:30
Presión observada (m.c.a)	31.00	30.00	40.00	32.00
Presión simulada (m.c.a)	29.45	31.44	38.50	31.56
Diferencia (m.c.a)	1.55	-1.44	1.50	0.44

Fuente: (Autor, 2023)

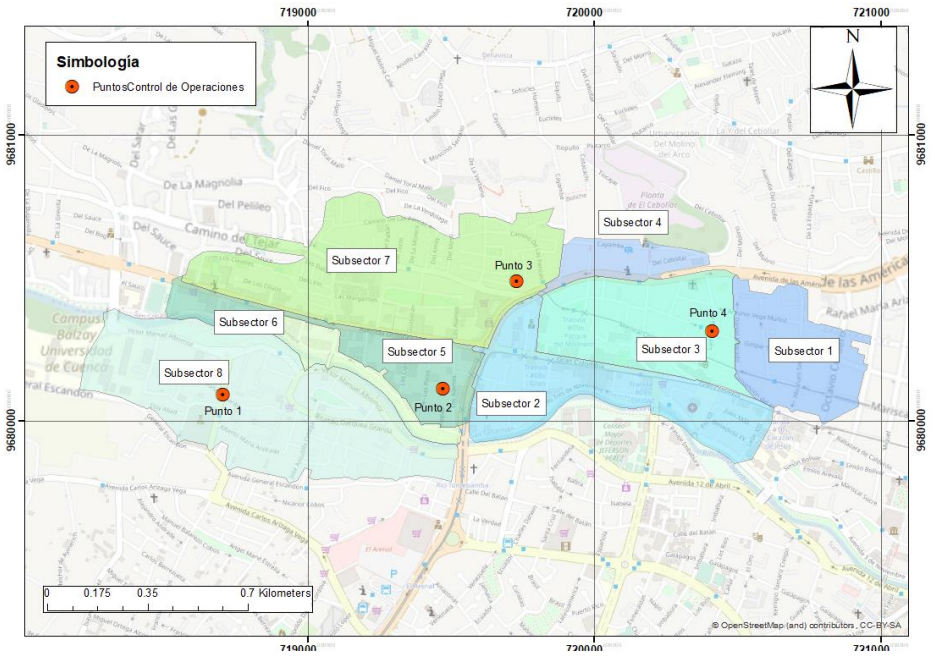


Ilustración 39. Presiones para validación
Fuente: (Autor, 2023)

CAPÍTULO 5

5. EVALUACION DE RESULTADOS LA RED DE DISTRIBUCION

5.1 Análisis de la red de distribución en la actualidad

Una vez calibrado y validado nuestro modelo hidráulico, se procede a realizar el análisis de la actual situación del sector Cebollar 3.2 Norte, con el fin de determinar las vulnerabilidades del mismo y poder sugerir posibles soluciones para mejorar la operatividad de las redes de distribución, esta valoración se basa en evaluar: velocidades, pérdidas de carga y presiones.

5.1.1 Análisis de velocidades

En las ilustraciones 39, 40 y 41, se indica las variaciones de las velocidades dentro de la simulación del período extendido. Se puede observar que las velocidades en su mayoría son menores a 0.5m/s y se identifican tres zonas, en donde las velocidades aumentan en las horas de mayor consumo, con valores mayores a 4,5m/s, las cuales estarían fuera del rango permitido.

Es importante mencionar que el 60% de las redes indica una velocidad menor a 0,1m/s, por lo que podría estar ocasionando sedimentación por la falta de velocidad para auto lavado, como se indicó en el numeral 2.3.4

Ilustración 40. Simulación de velocidades a las 00:00
Fuente: (Autor, 2023)

Ilustración 41. Simulación de velocidades a las 10:00
Fuente: (Autor, 2023)

Ilustración 42. Simulación de velocidades a las 13:00
Fuente: (Autor, 2023)

5.1.2 Análisis por pérdidas de carga

Analizando la gráfica del numeral 2.3.3, consideramos trabajar en un rango de pérdidas unitarias entre 7 m/Km a 15 m/Km. para los diferentes diámetros, se puede decir que la mayoría está dentro de los rangos establecidos, con pérdidas menores a 5m/km, en las redes de diámetro de 63mm PVC lo que da como resultado presiones aceptables en el sistema. Se identifica que a medida de mayor consumo incrementan las pérdidas, como se puede ver en la ilustración 44.

Ilustración 43. Simulación de pérdidas de carga a las 00:00
Fuente: (Autor, 2023)

Ilustración 44. Simulación de pérdidas de cargas a las 10:00
Fuente: (Autor, 2023)

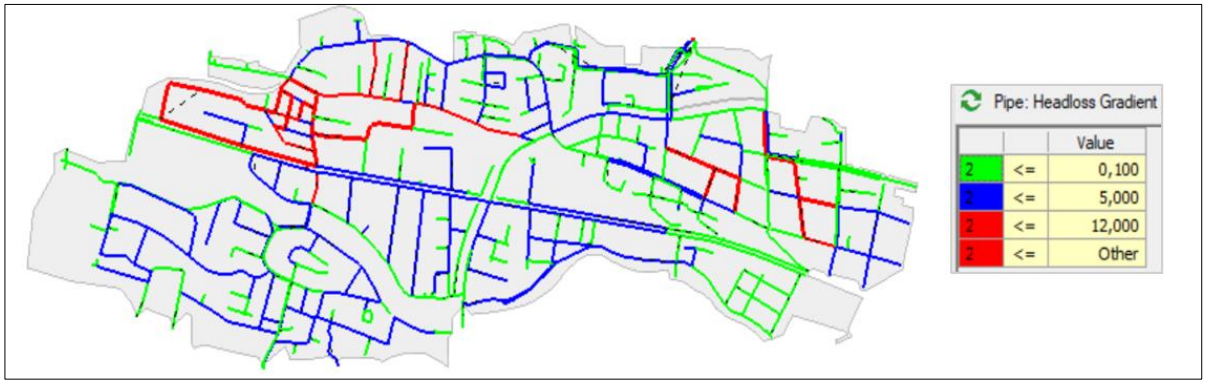


Ilustración 45. Simulación de pérdidas de cargas a las 13:00
Fuente: (Autor, 2023)

5.1.3 Análisis de presiones

Se puede observar que las presiones en la noche son elevadas y que en la hora de mayor consumo las presiones disminuyen, pero ninguna registra una presión menor a los 10 m.c.a. Sin embargo, existen zonas específicas en donde se registran valores cercanos a 10 m.c.a, en el periodo de mayor consumo (Campus Balzay de la Universidad de Cuenca) las cuales a corresponden al sub sector 8, en ningún momento del día se registran sobre presiones y esto se debe a que las Estaciones Reductoras de Presión, se encuentran operativas y calibradas de acuerdo a las necesidades del sector.

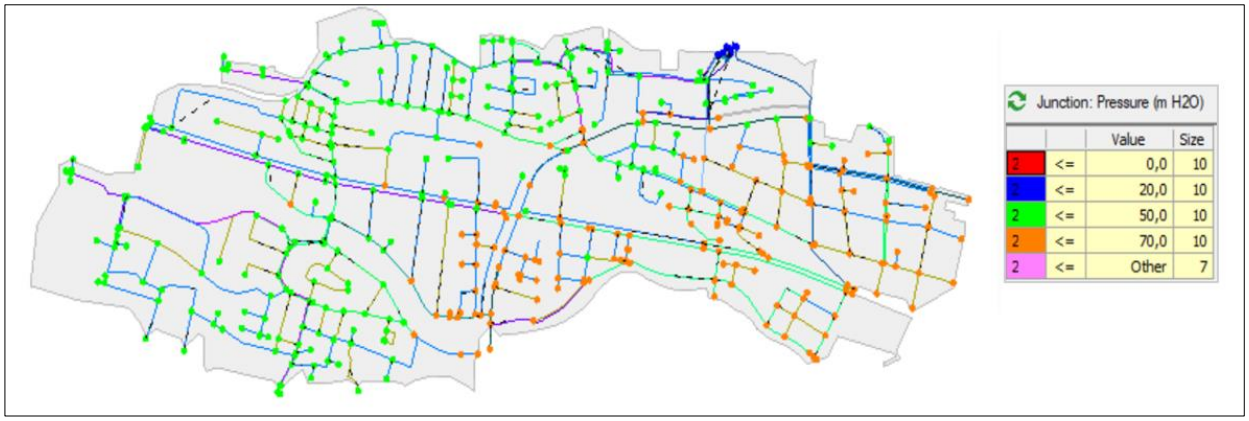


Ilustración 46. Simulación de presiones a las 00:00
Fuente: (Autor, 2023)

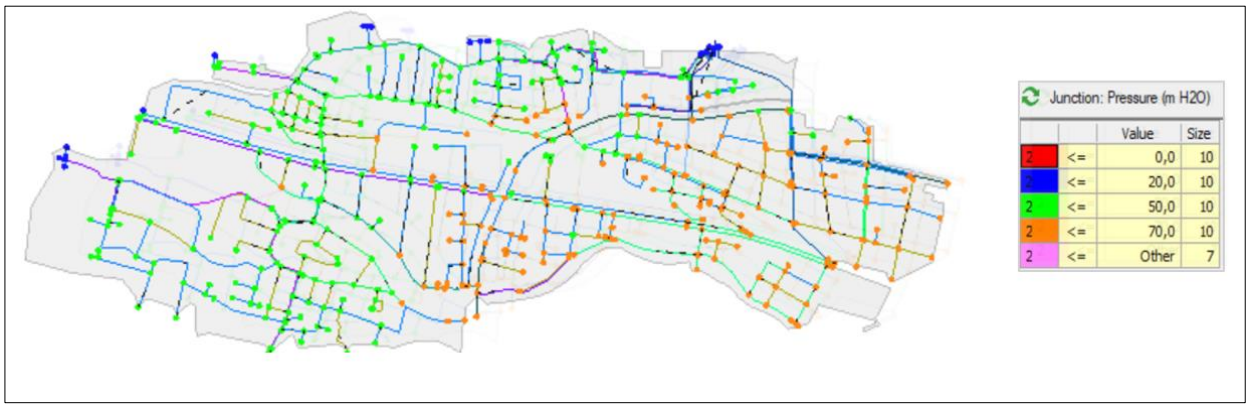


Ilustración 47. Simulación de presiones a las 10:00
Fuente: (Autor, 2023)

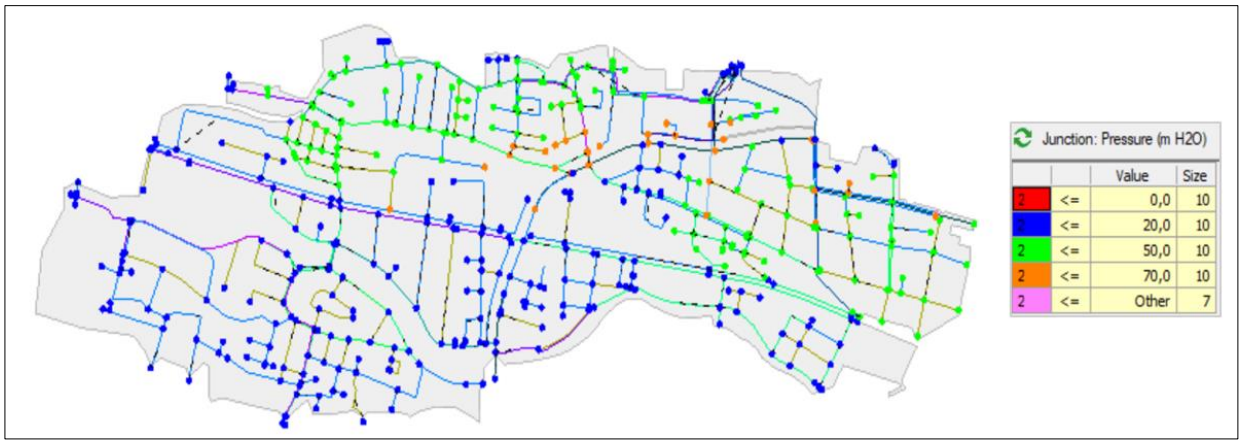


Ilustración 48. Simulación de presiones a las 13:00
Fuente: (Autor, 2023)

5.1.4 Determinación de vulnerabilidades

Se han determinado zonas sensibles, dependiendo de las deficiencias en cuanto a velocidades, presiones y pérdidas de carga.

Presiones

En las zonas señaladas de la ilustración 48, se identifican valores de presiones muy cercanas a 10 m.c.a, y una posible causa puede ser la distancia entre el Tanque de Reserva y los puntos frontera del sector, considerando que existen aproximadamente 40 m de diferencia entre cotas.

En cuanto a las sobre presiones, no existen zonas que estén sobre los 70 m.c.a. Sin embargo, los subsectores 1,2 y 3 (Ilustración 45) si se presentan presiones muy cercanas al máximo permitido, por lo que se podrían evaluar la ERP ubicada en la Av. De las Américas y calle Daniel Alvarado, sobre todo en horas de la noche, debido a que se podría generar una sobre presión y ocasionar roturas de matrices, especialmente donde se presentan tuberías de asbesto cemento.

No se registran presiones negativas, eso quiere decir que el modelo esta funcionado correctamente.

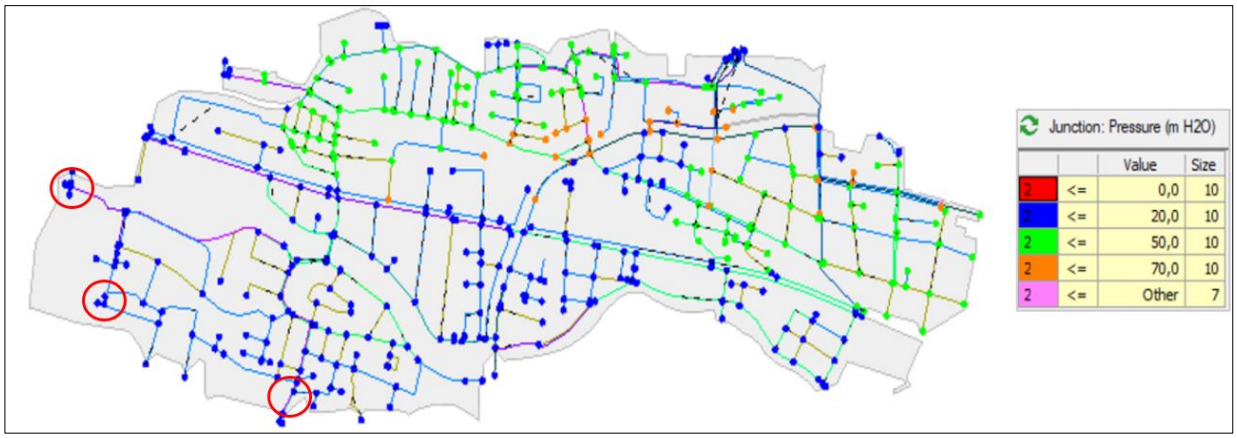


Ilustración 49. Presiones registradas a las 13:00
Fuente: (Autor, 2023)

Velocidades

Se registran velocidades altas en las zonas presentadas a continuación, sobre todo en tramos de tubería de asbesto cemento, lo que podría ocasionar un desgaste más acelerado. Se recomendaría la sustitución de estos tramos por PVC.

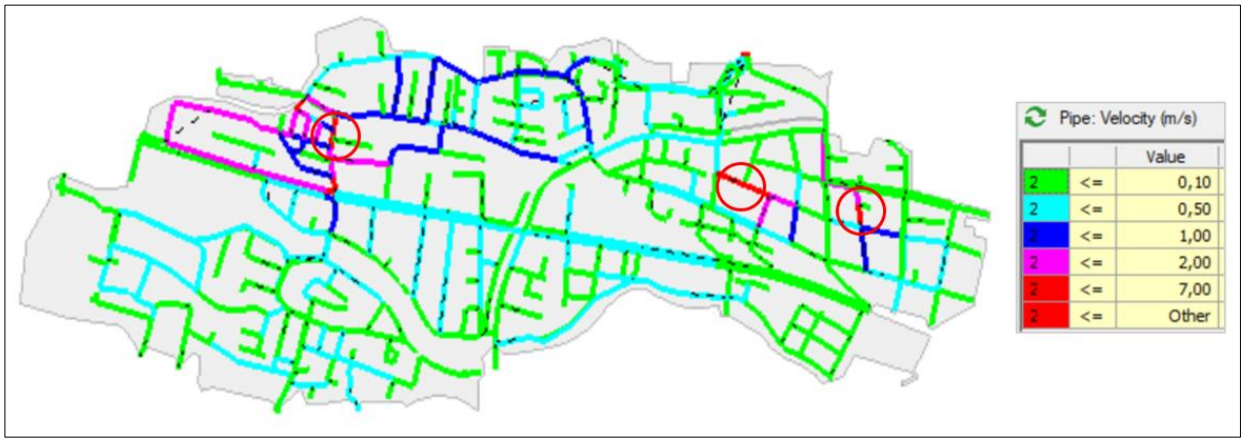


Ilustración 50. Velocidades a las 13:00
Fuente: (Autor, 2023)

Pérdidas de carga

Se identifican las siguientes zonas en donde las pérdidas de carga están sobre el límite permitido, siendo tramos de tuberías de 100 mm en la parte norte - oeste y tramos de tuberías de 50 mm de AC, la parte norte este, se sugiere aumentar el diámetro y el cambio de material de tubería respectivamente.

Ilustración 51. Pérdidas de carga a las 13:00
Fuente: (Autor, 2023)

5.1.5 Simulación de mejoras

Se procede a aumentar el diámetro de las redes que se encuentra la calle de Los Claveles y Camino del Tejar, entre la Av. Ordoñez Lasso, Av. de las Américas y Av. Gran Colombia, el cual actualmente es de 100mm pero al ser tramo principal, se recomienda aumentar el diámetro a 160 mm de PVC, debido a que la interconexión sería de 300mm a 160mm y no de 300 a 100mm como es actualmente, de ésta manera mejora notablemente las pérdidas de carga en la zonas que se presentaban problemas.

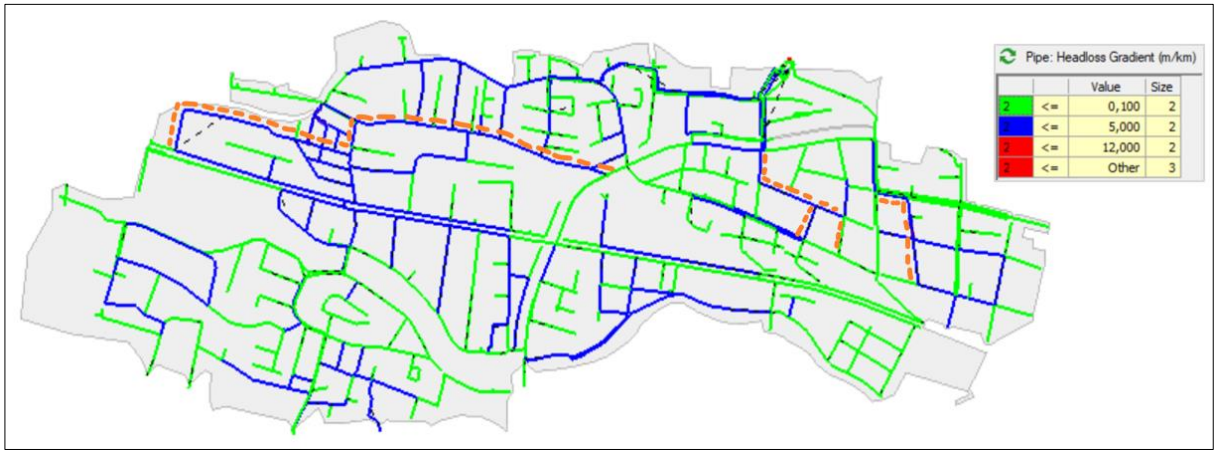


Ilustración 52. Pérdidas de carga a las 13:00
Fuente: (Autor, 2023)

También se sustituyeron los tramos de tuberías de la Calle Escultor Ayabaca entre Antonio Vega Muñoz Y Mariscal Lamar, por tuberías de 63 mm en PVC, de igual manera se identifican mejores resultados en el periodo de máximo consumo.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En este estudio se presentó la aplicación de un modelo hidráulico de un sector de red de distribución de agua de unos de los sistemas más importantes de la ciudad (Sistema Tomebamba), en donde los usuarios presentan demandas elevadas de agua y un perfil de consumo esperado. Además, el modelo se encuentra sobre niveles regulares topográficos, es decir que es una zona que no presenta mayor variación de elevaciones, lo cual facilitó la gestión de presiones del sector. Se monitoreó el consumo de agua por un día y estos perfiles sirvieron para comprobar el perfil de consumo proporcionado por ETAPA EP., el cual se utilizó como patrón.

Se puede decir que la ejecución de este trabajo de tesis, está basado primero en la gestión técnica de la información proporcionada, luego en la discriminación de los criterios iniciales y finalmente en la integración de los recursos disponibles, lo cual facilitará la concepción al momento de desarrollar un modelo hidráulico.

Se realizó una comparación entre los criterios de la empresa ETAPA EP., con los establecidos en la norma vigente en nuestro país, en donde por los mejores acercamientos a la situación actual, predominaron los establecidos por Planes Maestros de la Empresa.

Se calibró y validó el modelo hidráulico del sector, en donde se identificó una buena correlación de presiones entre valores medidos y simulados, y como parte de este proceso se obtuvieron nuevas rugosidades de las tuberías.

El modelo presentado es bastante flexible con respecto a la asignación de consumos mediante un SIG, por lo que puede ser adaptado a diferentes necesidades futuras de evaluación.

Se establecieron las zonas en donde el sector puede presentar deficiencias en cuanto a pérdidas de carga y que está directamente relacionado con el diámetro de la tubería, por lo que se recomendó la sustitución de estos tramos, por diámetros mayores.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda la constante actualización de los elementos hidráulicos, principalmente de la instalación de válvulas de operación, debido a que éstas influenciarían directamente en el comportamiento del flujo de las redes de distribución en el modelo.

Es indispensable el apoyo de un SIG para la actualización de un modelo hidráulico debido a que ETAPA EP., maneja grandes bases de datos con respecto a los usuarios, áreas de cobertura, etc. Por lo tanto, una vez enlazado este SIG con el software de modelación, la actualización se vuelve sencilla.

Se recomienda realizar una campaña de macromedición específicamente para este sector, si bien se realizó con datos proporcionados por ETAPA EP, es necesario verificar el porcentaje de fugas obtenido en este estudio.

Se sugiere utilizar este modelo, en el departamento de agua potable de ETAPA EP., para realizar evaluaciones con respecto a eventos de operación o mantenimiento que puedan suceder dentro de este sector. (Sustituciones de tramos de tuberías, cortes de agua, fuera de servicio de una ERP, etc.)

Es recomendable complementar el modelo hidráulico, considerando el comportamiento de los niveles reales del tanque, debido a que se dispone de información mediante SCADA, con lo que se podría valorar la curva de consumo aplicada y ajustar el mismo.

Se recomienda valorar los subsectores 1, 2 y 3, mediante una ERP automatizada, debido a que estos presentan presiones elevadas en la noche, se podría programar para que las presiones se disminuyan al menos unos 10 m.c.a, en estos subsectores, obligando a que el consumo sea menor durante este periodo y evitando sobre presiones que pueden desencadenar roturas de tuberías y mejorando el porcentaje de fugas.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abad Sarmiento (ETAPA EP), D. (2018). *CONSULTORÍA: "ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA Y OPTIMIZACIÓN DE LAS REDES DE LOS SISTEMAS TOMEBAMBA, MACHANGARA, YANUNCAY Y CULEBRILLAS" - ETAPA EP - PLANES MAESTROS III*.

Acueductos y alcantarillados sanitarios, empresa N. (2019). *Apéndice 11: Guía Técnica para la Instalación de las Conexiones Domiciliares y Micro Mediodres*. 32.

Alcaraz, M. del M. G. (2006). *MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS A PRESIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS*.

Antonio, J., & Aldama, F. D. A. (1997). *Carga En Tuberias*. 41–46.

Ariana, R. (2016). *Guía de Uso WaterCAD en español*. 1–23.

Arocha Ravelo Simón. (1980). *Abastecimientos de Agua, Teoría y Diseño. 1era Edición*.

AWWA- ECAC, E. C. A. C. (1999). *"Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling." Proceeding of Informatic Management and Technology Conference*.

CONTROL DE OPERACIONES (ETAPA EP). (2015). *Informe de Caudales de Regulación para el Sistema Tomebamba*.

CONTROL DE OPERACIONES (ETAPA EP). (2022). *INFORMES SCADA - SISTEMA TOMEBAMBA - ETAPA EP*.

CONTROL DE OPERACIONES (ETAPA EP). (2023). *INFORME DE CATASTRO DE USUARIOS DEL SECTOR CEBOLLAR 3.2 NORTE.*

Cugueró-Escofet, M. A., Puig, V., Quevedo, J., & Blesa, J. (2015). Optimal Pressure Sensor Placement for Leak Localisation Using a Relaxed Isolation Index: Application to the Barcelona Water Network ★ ★This work has been partially funded by the Spanish Ministry of Science and Technology through the Project ECOCIS (Ref. D. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(21), 1108–1113. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.675

De la Cruz Rojas, A. R. (2020). *Watergems frente al diseño convencional de redes de agua para la ciudad de Querecotillo*. 1–160.

García Sánchez, A. (n.d.). *Dinámica de Fluidos - Tema 2: Ecuaciónes de Conservación*.

Gonzalez, R. (2008). *Hidraúlica Básica*. 1–22.

Guevara A. (1997). *M. E. Guevara A. INTRODUCCIÓN 1*. 1–23.

Han, X., Liu, X., Gao, D., Ma, B., Gao, X., & Cheng, M. (2022). Costs and benefits of the development methods of drinking water quality index: A systematic review. *Ecological Indicators*, *144*(June), 109501. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109501

INEN. (2014). Agua Potable. Requisitos. Nte Inen 1108. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, *5*, 1–10.

Kara, S., Ethem Karadirek, I., Muhammetoglu, A., & Muhammetoglu, H. (2016). Hydraulic Modeling of a Water Distribution Network in a Tourism Area with Highly Varying Characteristics. *Procedia Engineering*, *162*, 521–529. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.096

Mian, H. R., Hu, G., Hewage, K., Rodriguez, M. J., & Sadiq, R. (2023). Drinking water management strategies for distribution networks: An integrated performance assessment framework. *Journal of Environmental Management*, *325*, 116537. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116537

Ortiz Correa (ETAPA), G. B. (2023). *CONSULTORÍA: "Estudios Geológico – Geotécnico – Hidráulico - Electromecánico y Estructural para los elementos de abastecimiento de agua potable del sistema Culebrillas y Machángara del Cantón Cuenca" - EVALUACIÓN Y DISEÑO HIDRAULICO – FASE I*.

Paguay Recalde (ETAPA EP), J. (2020). *CONSULTORÍA: ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS PARA EL CANTÓN CUENCA, PLANES MAESTROS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO, III FASE - INFORME FINAL - ETAPA EP - PLANES MAESTROS III*.

Pérez Morales, B. (2010). APUNTES DE "HIDRÁULICA BÁSICA." *Hidraulica Básica*, 91. http://hidraulica.umich.mx/bperez/HIDRAULICA-BASICA.pdf

Rondán, E. (2016). Estado del arte de la calibración de modelos hidráulicos. Modelado de fugas con Epanet. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería*, 57–70. https://idus.us.es/handle/11441/47948

Saldarriaga, J. G., Nieto, L., Ochoa, S., Córdoba, R., & García, S. (2010). Esqueletización en redes de distribución utilizando los conceptos de resiliencia y potencia unitaria. In *XIX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*.

Normas para Estudio y Diseño de Sistemas de Agua Potable y Disposición de Aguas Residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes – CO 10.07 – 601, (1992).

Serpa, E. A. (2022). Universidad Del Azuay Departamento De Posgrados. *Universidad Del Azuay*, 175. http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7226/1/13172.pdf

TYPSA. (2004). *Estudios y Diseños Finales de los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la Ciudad de Cuenca (Ecuador). II ETAPA*.

Velásquez, L. (2010). *Diseño de un Banco de Pruebas para la Medición de Pérdidas por Fricción en Tuberías Fluyendo a Presión*.

Wikipedia. (2022a). *Ecuación de Darcy-Weisbach*. https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuación_de_Darcy-Weisbach

Wikipedia. (2022b). *Pérdida de carga*. https://es.wikipedia.org/wiki/Pérdida_de_carga#Pérdidas_de_carga_localizadas

8. ANEXOS

8.1. Manual de Operación del Sector 3.2 Norte

ETAPA-EP

SECTORIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN SISTEMA TOMEBAMBA

MANUAL DE OPERACIÓN DE SUBSECTORIZACIÓN

DAIAS

DEPARTAMENTO DE ASEGURAMIENTO DE INGRESOS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO

MANUAL DE OPERACIÓN DEL SUBSECTOR: R3.2.3 NORTE
LÍMITES Y VALVULERIA DE OPERACIÓN

SUBSECTOR: R3.2.3 NORTE

Comprende la zona norte del sector R3.2, entre los límites: Norte: Sector R2.2; Sur: Sector R3.2 (2) Centro y Sector R4B2; Este: Sectores R3.1 y Sector R4A y Oeste: Sectores San Joaquín Bajo y San Miguel de Putushi.

Es abastecido desde la reserva ubicada en la planta de El Cebollar (2636 msnm), con una capacidad de 9500m3, considerando las cotas máximas y mínimas del sector, que son: 2602 msnm y 2551 msnm respectivamente, y la presencia de las E.R.P., se tendrán presiones estáticas que variarán desde los 48 psi (34 mca) hasta los 120 psi (85 mca) como máxima.

Existen subsectores afectados con E.R.P. (Estacion Reductora de Presión), con la finalidad de eliminar las sobrepresiones de operación existentes, estos son: sector 01 por la E.R.P-1, ubicacada en la Av. de las Américas y Calle del Molino (presión de salida 40 psi.); sector 02 por la E.R.P-2, ubicada en la calle Gran Colombia y Av. de las Américas (presión de salida 35 psi.); sectores 05 y 06 por la E.R.P-3 , ubicada en la calle del Guabisay y Camino de las Pencas (presión de salida 40 psi.) y sectores 07, 08 y 09 por la E.R.P-4, ubicada en la calle Paseo 3 de Noviembre y Av. de las Américas (presión de salida 75 psi.).

El sector consta de 5130 instalaciones, de las cuales 4622 son residenciales, 417 comerciales, 72 construcciones,18 instalaciones especiales y 1 gratuito.

En el cuadro a continuación se pueden ver las longitudes de tubería en metros lineales, clasificadas por diámetros y materiales:

CLASIFICACIÓN DE LA TUBERÍA DE DISTRIBUCIÓN (km de red)

Cuadro Nº 1

MATERIAL	DIÁMETRO TUBERÍA (km)							ALIMENTACIONES (km)				TOTAL (km)
	50-63	100-110	150-160	200.00	250.00	300/315	400+	250.00	300/315	500.00	600.00	
PVC	20.68	7.88	3.53	1.56	2.28	0.23	0.64	0.03	0.16	0.66	0.70	45.52
AC	2.20		0.17	0.50		1.52						
HD/HF	0.62	0.29				0.47	1.11			0.29		
TOTAL	23.50	8.17	3.70	2.06	2.28	2.22	1.75	0.03	0.16	0.94	0.70	

Fuente: Catastros de redes: SOAS, DAIAS (Julio- 2019).

OPERACIÓN DEL SECTOR.

En Plano adjunto se muestran los 8 subsectores en los cuales se ha dividido al subsector 3.2.(3) Norte, en el cuadro siguiente se pueden ver las válvulas con las cuales se puede operar cada subsector, sin interferir en lo posible con los restantes, a fin de optimizar las tareas de mantenimiento:

SUBSECTOR	VÁLVULAS A MANTENER CERRADAS	Ø MATRIZ	VÁLVULAS DE OPERACIÓN	Ø MATRIZ
1*	C1 - Av. de las Américas y Abraham Sarmiento (Bypass)	63 PVC	1a. Daniel Alvarado y Av. de Las Américas (Bypass)	63 PVC
	C2 - Convención del 45 y Calle Gran Colombia	400 PVC	1b. Abraham Sarmiento y Antonio Vega Muñoz	110 PVC
	C3 - Convención del 45 y Calle Gran Colombia (Bypass)	110 PVC		
	C4 - Mariscal Lamar y Convención del 45	110 PVC		
	C5 - Sangurima y Daniel Alvarado	63 PVC		
2	C3 -Convención del 45 y Calle Gran Colombia (Bypass)	110 PVC	2.Ordóñez Lasso y Av. de Las Américas	160 PVC
	C6 -Av. 3 de Noviembre y Av. de Las Américas	160 PVC		
3	C5- Sangurima y Daniel Alvarado	110 PVC	3. Av. De Las Américas y Daniel Alvarado	300 AC
	C4- Mariscal Lamar y Convención del 45	110 PVC		
	C7 -Mariscal Lamar y Av. de Las Américas	300 PVC		
	C8 - Av. de Las Américas y Guillermo Medina (Bypass)	300 PVC		
4	C8 - Av. de Las Américas y Guillermo Medina (Bypass)	300 PVC	4. Cayambe y Tinajillas	
	C7 - Mariscal Lamar y Av. de Las Américas	300 PVC		110 PVC
	C9 - Gloria Pesantez Bermúdez y Cayambe	63 PVC		
5	C10- Av.Ordoñez Lasso y Los Cedros (Bay-pas)	160 PVC	5. Calle del Guabisay y De las Pencas (ERP)	250 PVC
	C11 - Camino del Tejar y Calle sin nombre	200 PVC		
	C12 - Camino del Tejar y Del Pellico	63 PVC		
6**	C13- Los Cedros y Víctor M. Albornoz (Puente Puertas del Sol)	110 PVC	6. Av. de Las Américas y Paseo 3 de Noviembre	250 PVC
	C14 - Paseo 3 de Noviembre y Av. Ordóñez Lasso	110 PVC		
	C15 - Jacaranda y Av. Ordóñez Lasso	50 AC		
	C16 - De Los Nogales y Paseo 3 de Noviembre	63 PVC		
	C17 - Los Cipreses y Paseo 3 de Noviembre	63 PVC		
	C18 - Los Pinos y Paseo 3 de Noviembre	50 AC		
	C19 - Urapán y Paseo 3 de Noviembre	63 AC		
7***	C15 - Jacaranda y Av. Ordóñez Lasso	50 AC	7. Los Cedros y Av. Ordóñez Lasso	110 PVC
	C14- Paseo 3 de Noviembre y Av. Ordóñez Lasso	110 PVC		
	C20- Av. Ordóñez Lasso y De la Higuerilla	160 PVC		

FECHA ÚLTIMA REVISIÓN:	Jul-19	REALIZADO:	Arq. Gabriela Cedillo
LUGAR:	DAIAS	REVISADO:	Ing. Pablo Muñoz B.
VERSIÓN:	1	ENTREGADO:	04-sep-20

7***	C21- Av. Ordóñez Lasso y De la Higuerilla	63 PVC		
	C22- De la Higuerilla y Av. Ordóñez Lasso	160 PVC		
	C10- Av Ordoñez Lasso y Los Cedros (Bay-pas)	160 PVC		
	C23- Av.Américas y Paseo 3 de Noviembre	63 PVC		
	C19- Urapán y Paseo 3 de Noviembre	63 PVC		
	C18- Los Pinos y Paseo 3 de Noviembre	50 AC		
	C17- Los Cipreses y Paseo 3 de Noviembre	63 AC		
	C16- De Los Nogales y Paseo 3 de Noviembre	63 AC		
8	C13 - Los Cedros y Víctor M. Albornoz (Puente Puertas del Sol)	110 PVC	8. Víctor Manuel Albornoz y Ricardo Darquea	250 PVC
	C24 - Víctor Manuel Albornoz y Av. General Escandón	63 PVC		
	C25 - Tomás Alvarado y Av. General Escandón	50 PVC		
	C26 - José Astudillo y Av. General Escandón	110 PVC		
	C27 - José Astudillo y Av. General Escandón	200 PVC		
	C28 - Francisco Martínez y Av. General Escandón	50 PVC		
	C29 - Daniel Muñoz y Av. General Escandón	63 PVC		
	C30 - Ramona Cordero León y Av. General Escandón	63 PVC		
	C31 - Eloy Abad y Av. General Escandón	63 PVC		
	C32 - De los Cerezos y Paseo 3 de Noviembre	63 PVC		

NOTAS.

* Tubería de 400HF permanece con presión, para suspensión se deberá cerrar en planta.

** Al suspender el subsector 06 se suspende simultaneamente los subsectores 2, 7 y 8

*** Al suspender el subsector 07 se suspende simultaneamente el subsector 2.

* La tubería de 400HF de salida desde la planta de El Cebollar y que se dirige en sentido norte sur por la calle Daniel Alvarado desde la Av. De Las Américas hasta la calle Convencion del 45, y que se deriva en una tubería de 300HF en sentido este oeste, por la calle Antonio Vega Muñoz desde la calle Daniel Alavarado hasta el centro de la ciudad, al cerrar el subsector 01, esta tubería continua con servicio ya que es considerada de alimentación, razón por la cual no efecta al subsector al momento de manipular las válvulas de operación.

* Para un vaciado mas rápido de cada subsector, se puede descargar la red mediante desfogues e hidrantes, los cuales se encuentran también indicados en el plano, se deberá tener cuidado de utilizarlos necesariamente también durante el llenado de las tuberías para facilitar la extracción de aire.

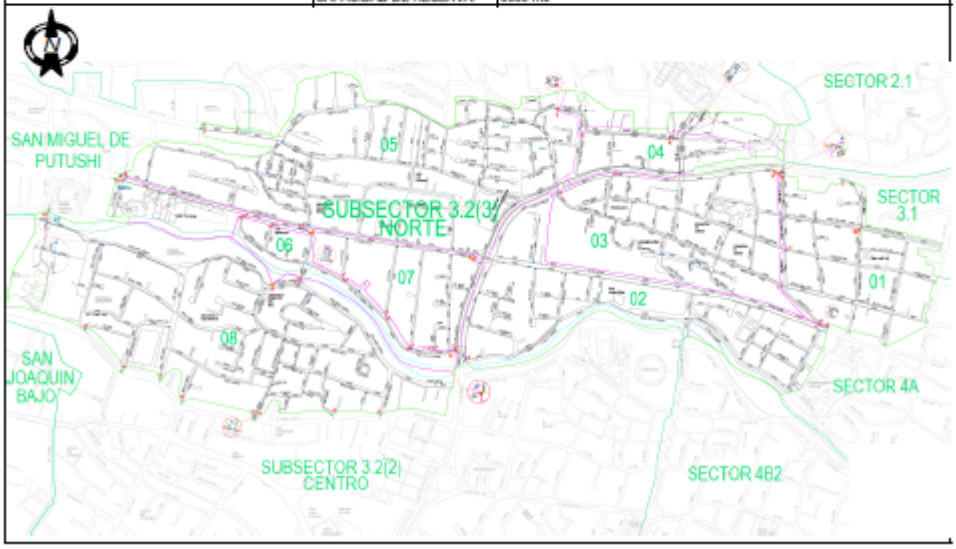
* Si al intentar cortar el servicio a uno de los subsectores, este no seca, será necesario revisar que todas las válvulas que constan como "mantener cerradas" en el cuadro anterior, lo estén realmente en campo.

* Cada vez que el servicio se suspenda, se deberá notificar al Centro de Control, de igual manera cuando se reintegre el servicio al (los) subsector (es).

* Cualquier cambio que se requiera implementar en la operación actual del sector, se deberá comunicar o sugerir al ingeniero responsable de la operación y mantenimiento para su estudio y posible implementación.

* En caso de problemas de falta de agua o presiones bajas excesivas en los subsectores afectados con reducción de presiones, se deberá verificar primeramente antes de intervenir en la red que los filtros ubicados en las ERP no estén colmatados; si persiste el problema se deberá verificar adicionalmente que los las válvulas límite de estos subsectores se encuentren cerradas.

ESQUEMA DEL SECTOR: 3.2.3 (NORTE)	ABASTECIMIENTO:	Planta del Cebollar
	COTA	2836 msnm.
	CAPACIDAD DE RESERVA:	9500 m3



FECHA ÚLTIMA REVISIÓN:	jul-19	REALIZADO:	Arq. Gabriela Cedillo
LUGAR:	DAJAS	REVISADO:	Ing. Pablo Muñoz B.
VERSIÓN:	1	ENTREGADO:	04-sep-20