



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo
**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELIZACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE
AGUA POTABLE DE LA COMUNIDAD DE RUMIHURCO DEL
CANTÓN AZOGUES, PROVINCIA DEL CAÑAR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: MISHALL ALEXANDRA ARICHÁBALA CORONEL,
JONNATHAN MARTIN MINCHALA ANGULO**

**DIRECTOR: ING. CRISTIAN ARTURO VINTIMILLA ULLOA,
MSC.**

AZOGUES - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo
**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELIZACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE
AGUA POTABLE DE LA COMUNIDAD DE RUMIHURCO DEL
CANTÓN AZOGUES, PROVINCIA DEL CAÑAR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: MISHHELL ALEXANDRA ARICHÁBALA CORONEL,
JONNATHAN MARTIN MINCHALA ANGULO**

**DIRECTOR: ING. CRISTIAN ARTURO VINTIMILLA ULLOA,
MSC.**

AZOGUES - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Mishell Alexandra Arichábala Coronel portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0302478300. Declaro ser el autor de la obra: “**Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.**”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 24 de febrero de 2023

F: 

Mishell Alexandra Arichábala Coronel

C.I. 0302478300

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Jonnathan Martin Minchala Angulo portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0302711221. Declaro ser el autor de la obra: “**Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.**”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 24 de febrero de 2023

F:

Jonnathan Martin Minchala Angulo

C.I. 0302711221

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Ing. Cristian Arturo Vintimilla Ulloa, MSc.

DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.”**, realizado por: **Mishell Alexandra Arichábala Coronel, Jonnathan Martin Minchala Angulo**, con documentos de identidad: **0302478300, 0302711221**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** ha sido asesorado, orientado, revisado y supervisado durante su ejecución, bajo mi tutoría en todo el proceso, por lo que certifico que el presente documento, fue desarrollado siguiendo los parámetros del método científico, se sujeta a las normas éticas de investigación que exige la Universidad Católica de Cuenca, por lo que está expedito para su presentación y sustentación ante el respectivo tribunal.

Azogues, 24 de febrero de 2023



ING. CRISTIAN ARTURO VINTIMILLA ULLOA, MSc.

0105001564

DIRECTOR

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación principalmente a **Dios**, por permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi formación personal. A mi hija **Valentina** quien ha sido mi motor para alcanzar esta meta. A mis padres **Nanci** y **Joel**, a mis hermanas **Gisela** y **Katerine** por ser un apoyo incondicional en esta trayectoria, por impulsarme a conseguir mis objetivos y enseñarme que incluso las tareas más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez. A mi tía **Maria Elisa** que pese a ya no formar parte de mi vida físicamente fue quien me enseñó con su sabiduría y paciencia a ser quien soy hoy en día, a no rendirme, a trabajar y alcanzar mis sueños.

Mishell Arichábala

Esta tesis está dedicada a mi **Dios** por darme la fuerza y sabiduría para culminar mi objetivo. A mi padre **Jacinto**, quién mediante su esfuerzo y dedicación me permitió cumplir un sueño más. También está dedicado a mi madre **María** (+), quien, aunque no está físicamente presente, sus enseñanzas siguen guiándome día a día. A mis hijos **Demian** y **Thiago**, para que cada una de mis metas alcanzadas les quede como ejemplo. A mi pareja **Tannya**, por impulsarme a ser mejor persona cada día. Y, finalmente quiero dedicarlo a mis compañeros de clases, que en los momentos más difíciles, me han extendido su mano.

Jonnathan Minchala

Agradecimiento

En primer lugar agradecemos a **Dios** por bendecirnos y guiarnos a lo largo de nuestro camino, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad.

Agradecemos a nuestras familias que siempre nos han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos nuestros objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño nos han impulsado siempre a perseguir nuestras metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades.

Le agradecemos profundamente a nuestro tutor **Ing. Cristian Vintimilla MSc.** por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiésemos podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, lo llevaremos grabado para siempre en nuestra memoria para nuestro futuro profesional.

Por último agradecemos a la **Universidad Católica de Cuenca** campus **Azogues** que nos ha exigido tanto, pero al mismo tiempo nos ha permitido obtener nuestro tan ansiado título. Agradecemos a cada directivo por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender conocimientos.

Mishell Alexandra, Jonnathan Minchala.

Resumen

Un sistema de abastecimiento de agua potable está constituido por elementos de captación, conducción, almacenamiento y distribución, su diseño parte de modelos matemáticos, siendo estos los que rigen su construcción, sin embargo, una vez ya establecido en campo, los parámetros hidráulicos varían respecto al diseño, generando inconvenientes en su estudio y análisis. Debido a esto, se debe llevar a cabo una modelización física, la cual permita simular su comportamiento bajo situaciones reales.

Como se conoce, un modelo físico calibrado es una herramienta que facilita el análisis de un prototipo real a partir de su construcción e implementación, haciendo uso de las leyes de semejanza, partiendo de ello, se diseñó un modelo físico de la red de abastecimiento de la comunidad de *Rumihurco* con sus escalas respectivas, cumpliendo así con estas similitudes para una correcta representación, permitiendo observar el funcionamiento real, cumpliendo en su mayoría con las especificaciones de *“La norma urbana para diseño de agua potable”*.

Además, al modelo calibrado se le aplicó tres escenarios, en el primero se propuso un cambio en la carga hidráulica del tanque conservando el resto de parámetros de acuerdo a la calibración, obteniendo una pérdida de presiones en todos los nodos. Para los dos escenarios restantes se ejecutaron cambios en las demandas de ciertos nodos, de este modo se incrementó las presiones, a excepción de las tuberías cercanas al tanque de distribución, en donde se mantuvieron semejantes al modelo calibrado.

Palabras clave: Leyes de semejanza, modelo físico, presión, prototipo, Rumihurco

Abstract

A drinking water supply system comprises elements of catchment, conduction, storage, and distribution; its design is based on mathematical models that rule its construction. However, once established in the field, the hydraulic parameters vary concerning the design, generating inconveniences in its study and analysis. Because of this, physical modeling must be conducted, allowing for the simulation of its behavior under real situations.

As it is known, a calibrated physical model is a tool that facilitates the analysis of a real prototype from its construction and implementation using the laws of similarity. Based on this, a physical model of the community of *Rumihurco* supply network was designed with its respective scales, thus complying with these similarities for a correct representation, allowing to observe its proper operation, mainly according to the specifications of *“The urban standard for drinking water design”*.

In addition, three scenarios were applied to the calibrated model; in the first one, a change in the hydraulic load of the tank was proposed, keeping the rest of the parameters in accordance with the calibration, obtaining a loss of pressure in all the nodes. For the other two scenarios, changes were made in the demands of specific nodes, thus increasing the pressures, except for the pipes near the distribution tank, which remained similar to the calibrated model.

Keywords: Similarity laws, physical model, pressure, prototype, Rumihurco

Índice general

1. Introducción	16
1.1. Planteamiento del problema	17
1.1.1. Formulación del problema	17
1.1.2. Delimitación del problema	17
1.2. Descripción de la zona de estudio	18
1.3. Justificación	18
1.4. Objetivos	19
1.4.1. Objetivo general	19
1.4.2. Objetivos específicos	19
2. Marco Teórico	20
2.1. Conceptos generales	20
2.1.1. Flujo en tuberías	20
2.1.2. Ecuación de continuidad	21
2.1.3. Principio de Bernoulli	21
2.1.4. Ecuación General de la Energía	22
2.1.5. Pérdida de cargas en tuberías	23
2.2. Sistemas de abastecimiento de agua potable	24
2.2.1. Definición y características de los sistemas de abastecimiento de agua potable	24
2.2.2. Diseño de los sistemas de abastecimiento	25
2.3. Modelos hidráulicos	28
2.3.1. Clasificación general de los modelos hidráulicos	28
2.3.2. Limitaciones y ventajas entre un modelo matemático y uno físico.	29
2.4. Leyes de semejanza hidráulica	30
2.5. Relaciones de escalas	32
2.6. Construcción y operación de modelos físicos	33
2.6.1. Componentes de un modelo hidráulico	33
2.6.2. Construcción y operación de un modelo físico	33
2.7. Calibración de modelos físicos	34

2.7.1. Calibración	35
2.7.2. Errores presentados en los modelos hidráulicos	36
2.7.3. Criterios de valoración para la calibración de modelos hidráulicos	37
3. Metodología	38
3.1. Modelo matemático del sistema de abastecimiento de la Comunidad de Rumihurco	38
3.1.1. Proyección poblacional	38
3.1.2. Caudal de diseño de la red de abastecimiento de la comunidad Rumihurco.	41
3.1.3. Tramo seleccionado.	43
3.1.4. Parámetros hidráulicos del modelo matemático.	44
3.2. Prototipo del sistema de abastecimiento de la comunidad de Rumihurco	44
3.3. Modelo físico del sistema de abastecimiento de la comunidad de Ru- mihurco	45
3.3.1. Escalas del modelo físico	45
3.3.2. Presupuesto para la construcción del modelo físico.	46
3.3.3. Construcción del modelo físico	48
3.4. Calibración del modelo físico.	49
3.5. Escenarios hidráulicos en el modelo físico.	59
4. Análisis de Resultados	63
4.1. Escenario 1 del modelo físico	63
4.2. Escenario 2 del modelo físico	66
4.3. Escenario 3 del modelo físico	69
5. Conclusiones	72
6. Bibliografía	74
7. Anexos	76

Índice de tablas

2.1. Características de flujo y escalas de semejanza [5]	32
2.2. Criterios prácticos de presiones para la calibración de modelos hidráulicos. [14]	37
3.1. Evolución Inter-Censal [12]	38
3.2. Cálculo de proyecciones poblacionales por el método estadísticos línea recta. (Autores)	39
3.3. Cálculo de proyecciones poblacionales por el método estadísticos curva exponencial. (Autores)	40
3.4. Cálculo de proyecciones poblacionales por el método estadísticos curva potencial. (Autores)	40
3.5. Errores porcentuales de métodos estadísticos. (Autores)	41
3.6. Cálculo de la proyección aproximada para el año 2022. (Autores) . . .	41
3.7. Resumen de parámetros para la obtención del caudal de abastecimiento de la red. (Autores)	43
3.8. Velocidades, caudales y presiones del sistema. (Autores)	44
3.9. Presiones recolectadas en campo del prototipo. (Autores)	45
3.10. Velocidades, caudales y presiones del prototipo. (Autores)	45
3.11. Factores de escala longitudinal para el Tramo de la red. (Autores) . .	46
3.12. Escala cinemática para el Tramo de la red. (Autores)	46
3.13. Presupuesto de materiales del sistema. (Autores)	47
3.13. (Continuación) Presupuesto de materiales del sistema. (Autores) . . .	48
3.14. Elevación de nodos del modelo físico. (Autores)	48
3.14. (Continuación) Elevación de nodos del modelo físico. (Autores)	49
3.15. Resultados de presiones para la calibración del modelo físico. (Autores)	51
3.15. (Continuación) Resultados de presiones para la calibración del modelo físico. (Autores)	52
3.15. (Continuación) Resultados de presiones para la calibración del modelo físico. (Autores)	53
3.16. Escala dinámica para el tramo de la red. (Autores)	54
3.17. Velocidades, caudales y presiones del modelo físico calibrado. (Autores)	54

3.18. Variación de presiones del modelo físico leyes de semejanza y el modelo físico calibrado. (Autores)	54
3.19. Porcentaje de variación de las presiones del modelo Físico de leyes de semejanza con respecto al construido. (Autores)	55
3.20. Valores de presiones del prototipo respecto al error porcentual. (Autores)	56
4.1. Variación de presiones del escenario 1 y el modelo físico calibrado. (Autores)	64
4.2. Variación de presiones del escenario 2 y el modelo físico calibrado. (Autores)	67
4.3. Variación de presiones del escenario 3 y el modelo físico calibrado. (Autores)	70
7.1. Caudales de diseño de la red de abastecimiento para cada nodo del tramo seleccionado. (Autores)	77
7.2. Datos obtenidos en la simulación 1 para calibración del modelo físico. (Autores)	86
7.3. Datos obtenidos en la simulación 2 para calibración del modelo físico. (Autores)	87
7.4. Datos obtenidos en la simulación 3 para calibración del modelo físico. (Autores)	87
7.5. Datos obtenidos en la simulación 4 para calibración del modelo físico. (Autores)	88
7.6. Datos obtenidos en la simulación 5 para calibración del modelo físico. (Autores)	88
7.7. Datos obtenidos en la simulación 1 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	89
7.8. Datos obtenidos en la simulación 2 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	89
7.9. Datos obtenidos en la simulación 3 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	90
7.10. Datos obtenidos en la simulación 4 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	90
7.11. Datos obtenidos en la simulación 5 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	91
7.12. Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	91
7.12. (Continuación) Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	92
7.12. (Continuación) Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)	93

7.12. (Continuación) <i>Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)</i>	94
7.13. <i>Datos obtenidos en la simulación 1 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	94
7.14. <i>Datos obtenidos en la simulación 2 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	94
7.15. <i>Datos obtenidos en la simulación 3 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	95
7.16. <i>Datos obtenidos en la simulación 4 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	95
7.17. <i>Datos obtenidos en la simulación 5 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	96
7.18. <i>Resultados de presiones para el Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	97
7.18. (Continuación) <i>Resultados de presiones para el Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	98
7.18. (Continuación) <i>Resultados de presiones para el Escenario 2 del modelo físico. (Autores)</i>	99
7.19. <i>Datos obtenidos en la simulación 1 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	99
7.20. <i>Datos obtenidos en la simulación 2 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	100
7.21. <i>Datos obtenidos en la simulación 3 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	100
7.22. <i>Datos obtenidos en la simulación 4 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	101
7.23. <i>Datos obtenidos en la simulación 5 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	101
7.24. <i>Resultados de presiones para el Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	102
7.24. (Continuación) <i>Resultados de presiones para el Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	103
7.24. (Continuación) <i>Resultados de presiones para el Escenario 3 del modelo físico. (Autores)</i>	104

Índice de figuras

1.1. <i>Mapa de ubicación. (Autores)</i>	18
2.1. <i>Esquematación de la ecuación de continuidad. Adaptado de Sotelo [17]</i>	21
2.2. <i>Semejanza geométrica. Adaptado de Alpade [5]</i>	30
2.3. <i>Semejanza cinemática. Adaptado de Aldape [5]</i>	31
2.4. <i>Semejanza dinámica. Adaptado de Aldape [5]</i>	31
3.1. <i>Métodos estadísticos de la población real. (Autores)</i>	39
3.2. <i>Área de influencia.(Autores)</i>	42
3.3. <i>Calibración del recipiente.(Autores)</i>	50
3.4. <i>Variación de presiones del modelo físico basado en las leyes de semejanza respecto al modelo físico construido.(Autores)</i>	55
3.5. <i>Presiones del prototipo, modelo matemático y modelo calibrado.(Autores)</i>	57
3.6. <i>Variación porcentual de presiones del modelo físico calibrado respecto al prototipo.(Autores)</i>	57
3.7. <i>Variación porcentual de presiones del modelo matemático respecto al prototipo.(Autores)</i>	58
3.8. <i>Variación porcentual de presiones del modelo calibrado respecto al modelo matemático.(Autores)</i>	59
3.9. <i>Escenario 1 del modelo físico.(Autores)</i>	60
3.10. <i>Escenario 2 del modelo físico.(Autores)</i>	61
3.11. <i>Escenario 3 del modelo físico.(Autores)</i>	62
4.1. <i>Presiones del escenario 1 de cada nodo. (Autores)</i>	63
4.2. <i>Variación porcentual de presiones del Escenario 1 respecto al modelo físico calibrado en cada nodo.(Autores)</i>	64
4.3. <i>Comparación de presiones del prototipo escenario 1 respecto al modelo físico calibrado.(Autores)</i>	65
4.4. <i>Presiones del prototipo basado en el escenario uno y porcentaje de variación respecto al modelo físico y prototipo.(Autores)</i>	65
4.5. <i>Presiones del escenario 2 de cada nodo. (Autores)</i>	66

4.6.	<i>Variación porcentual de presiones del Escenario 2 respecto al modelo físico calibrado en cada nodo.(Autores)</i>	67
4.7.	<i>Comparación de presiones del prototipo escenario 2 respecto al modelo físico calibrado.(Autores)</i>	68
4.8.	<i>Presiones del prototipo basado en el escenario dos y porcentaje de variación respecto al modelo físico y prototipo.(Autores)</i>	68
4.9.	<i>Presiones del escenario 3 de cada nodo. (Autores)</i>	69
4.10.	<i>Variación porcentual de presiones del Escenario 3 respecto al modelo físico calibrado en cada nodo.(Autores)</i>	70
4.11.	<i>Comparación de presiones del prototipo escenario 3 respecto al modelo físico calibrado.(Autores)</i>	71
4.12.	<i>Presiones del prototipo basado en el escenario tres y porcentaje de variación respecto al modelo físico y prototipo.(Autores)</i>	71
7.1.	<i>Red de distribución de agua para la parroquia Javier Loyola.(Autores)</i>	76
7.2.	<i>Tramo escogido y áreas de influencia para cada nodo.(Autores)</i>	77
7.3.	<i>Tramo seleccionado de la red con las características de cada elemento.(Autores)</i>	78
7.4.	<i>Plano del modelo físico del tramo seleccionado.(Autores)</i>	79
7.5.	<i>Soportes de la red. (Autores)</i>	80
7.6.	<i>Abrazaderas - Soporte - Red.(Autores)</i>	80
7.7.	<i>Tramos del sistema.(Autores)</i>	81
7.8.	<i>Calibración de la caneca.(Autores)</i>	81
7.9.	<i>Construcción del modelo.(Autores)</i>	82
7.10.	<i>Conexión tanque - caneca - sistema.(Autores)</i>	82
7.11.	<i>Conexión caneca - sistema.(Autores)</i>	83
7.12.	<i>Puntos de control de nodos.(Autores)</i>	83
7.13.	<i>Nivelación de nodos del modelo.(Autores)</i>	84
7.14.	<i>Medición de caudales del sistema.(Autores)</i>	84
7.15.	<i>Piezómetro.(Autores)</i>	85
7.16.	<i>Medición de presiones en el modelo.(Autores)</i>	86

Sección 1

Introducción

En la actualidad, los modelos numéricos y matemáticos de una obra hidráulica son los que rigen su diseño y construcción, sin embargo, *La Empresa Pública Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Ambiental (EMAPAL-EP)*, no cuenta con una modelización física que represente el comportamiento real del prototipo. En la comunidad de *Rumihurco*, al no tener un modelo físico que simule las condiciones reales del sistema, impide verificar su funcionamiento real, ocasionando que su red sea susceptible a presentar inconvenientes en el suministro de agua y posteriormente genere daños.

Debido a esto, la implementación de un modelo físico complementa el análisis de los modelos matemáticos y estadísticos, mediante el uso de variables físicas e hidráulicas a escala reducida facilita el manejo y su accesibilidad en comparación a una obra real. Además, las simulaciones del modelo físico son continuas y de rápida ejecución, permitiendo visualizar el comportamiento de la red.

Para el desarrollo del modelo físico se realizará una revisión de estudios preliminares del diseño del prototipo, la cual definirá los parámetros hidráulicos del sistema y a su vez se determinará la escala que tendrá cada elemento. El modelo será montado en la Av. Tomás Sacoto, perteneciente al cantón *Biblián*, provincia del *Cañar*, el cual cuenta con un relieve no accidentado facilitando su construcción, sus simulaciones y verificación de variables mediante aparatos de medición.

El modelo calibrado del sistema de abastecimiento de agua no solo permitirá visualizar el comportamiento real, sino también servirá como apoyo a los análisis de la red, corroborando que el sistema suministre agua de manera óptima a sus usuarios, además, poder generar escenarios los cuales expresen la conducta de la red bajo diferentes situaciones.

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Formulación del problema

Hoy en día la modelización física sirve como herramienta complementaria para el estudio y análisis del comportamiento hidráulico de los sistemas de distribución. *La Empresa Pública Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Ambiental (EMAPAL-EP)* en la ciudad de *Azogues* solo cuenta con modelos matemáticos y numéricos en los cuales existe la incertidumbre si los sistemas construidos se ajustan a dichos prototipos, lo que ha generado que al momento de implementar cambios o ampliaciones en las redes de distribución de agua en campo, no exista la verificación que estas cumplan con los criterios de diseño.

Actualmente la comunidad *Rumihurco* de la parroquia *Javier Loyola* carece de un modelo físico que represente el comportamiento real del sistema de abastecimiento de la zona. Además de ello, la red tiende a presentar dificultades en otorgar un suministro totalmente eficiente a todos los usuarios.

Finalmente, al no contar con un modelo que permita simular las condiciones reales de caudales y presiones en escala reducida, ocasiona que se desconozca los problemas que presente el sistema, como por ejemplo: diámetros menores por incrustaciones, corrosión en tuberías, golpes de ariete, entre otros; produciendo que las tuberías sufran fatiga y posteriormente fallas en la red.

1.1.2. Delimitación del problema

El presente trabajo se orienta en desarrollar una modelización física a una escala apropiada del sistema de abastecimiento de la comunidad *Rumihurco* perteneciente a la parroquia *Javier Loyola*, el cual estará conformado por un tanque de distribución y de las principales redes de suministro de agua, por lo cual es indispensable cumplir con los principios hidráulicos de la conservación de masa y energía.

Al ser un modelo físico, deberá ser capaz de prever el comportamiento del prototipo en situaciones reales, a través de la observación de su funcionamiento, el cual abarcará las propiedades hidráulicas y físicas, para ello se empleará ecuaciones que guíen el proceso de estudio. La modelización debe cumplir con todos los parámetros de diseño planteados en los modelos matemáticos y numéricos, corroborando que los caudales, velocidades y presiones se asemejen a la realidad.

1.2. Descripción de la zona de estudio

El presente trabajo, al ser un estudio práctico, se desarrollará en la comunidad de *Rumihurco*, en el cual se analizará el sistema de abastecimiento de la zona. En la figura 1.1 se puede observar que la zona delimitada al norte con *Chuquipata*, al este con *Guarangos Grande*, al oeste con *La Dolorosa*, y al sur con *Chuquipata Centro*. Además, la red de distribución de agua potable del sector es responsable de suministrar servicio a las zonas: *Javier Loyola*, *Universidad Nacional de Educación (UNAE)* y sectores cercanos que se encuentran en desarrollo.

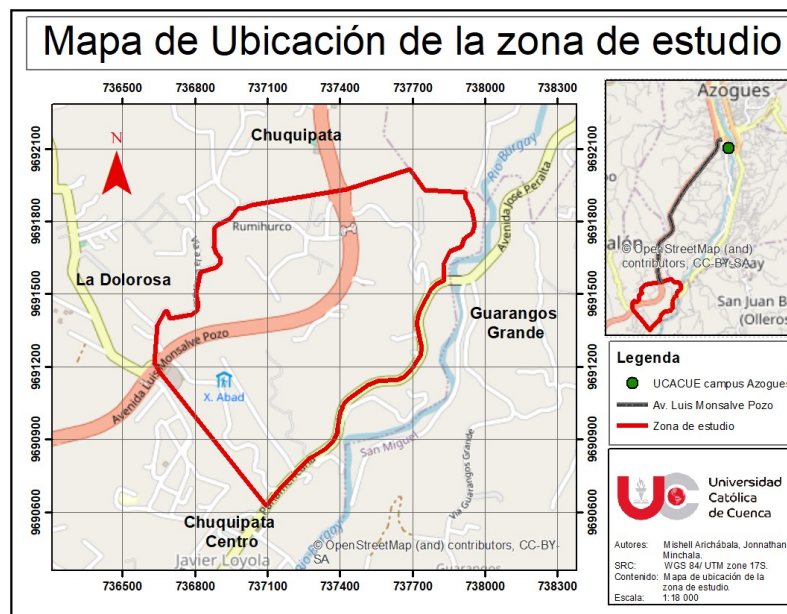


Figura 1.1: *Mapa de ubicación. (Autores)*

1.3. Justificación

El presente proyecto de titulación nace a partir de la necesidad de implementar un modelo que represente de manera física el comportamiento real del sistema de abastecimiento de la comunidad de *Rumihurco*, ya que este sector es vulnerable a poseer problemas en el suministro de agua, por ende es de suma importancia conocer, no solo de manera computacional, el funcionamiento de la red.

Las modelizaciones físicas se identifican por ser más accesibles y tener mayor facilidad de manejo en comparación con un sistema hidráulico real, de manera que los operadores presenten la capacidad de interpretar el comportamiento de la red, con la finalidad de desarrollar mejoras, cambios e implementaciones en el prototipo. Adicionalmente, se contará con un modelo en el cual se pueda verificar que todos los parámetros hidráulicos como caudales y presiones se asemejen al sistema construido en campo.

Finalmente, al implementar un modelo físico, los estudiantes de la *Universidad Católica de Cuenca* contarán con un método didáctico en la cual se ilustrará el proceso operativo que estos sistemas realizan en la vida diaria, complementando de manera óptima los conocimientos impartidos en las aulas de clase.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar un modelo físico del sistema de distribución de agua potable de la comunidad *Rumihurco* perteneciente a la parroquia *Javier Loyola*, mediante el empleo de variables físicas e hidráulicas a escala reducida que sirva de apoyo sobre los modelos matemáticos y numéricos en los cuales se basó la construcción de la red.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar las variables y parámetros hidráulicos de la red de distribución de agua de *Rumihurco*, a través de recopilación de información de estudios preliminares a la construcción del prototipo, para definir las dimensiones en escala reducida y especificar los recursos para la ejecución del modelo físico.
- Verificar que las presiones y caudales del modelo se asemejen a los criterios ingenieriles del prototipo real, por medio de la implementación de instrumentos de medición y simulaciones, a fin de obtener un modelo calibrado que permitan visualizar el comportamiento de la red.
- Implementar escenarios en el modelo físico, a través del ajuste de parámetros hidráulicos, con el propósito de observar el comportamiento del prototipo bajo diferentes situaciones.

Sección 2

Marco Teórico

2.1. Conceptos generales

2.1.1. Flujo en tuberías

El flujo en tuberías también conocido como flujo interno, se caracteriza por quedar completamente limitado por superficies solidas e impulsado principalmente a presión. Se basa en parámetros fundamentales que son: diámetros óptimos de las tuberías y pérdidas de carga. En las tuberías por lo general se presentan dos tipos de flujos: flujo laminar y flujo turbulento, varían dependiendo de la velocidad del fluido, el espacio por donde fluye y el tiempo [7].

El número de Reynolds Re es utilizado para conocer si el flujo es laminar o turbulento, depende de cuatro factores muy importantes que son: la viscosidad del fluido, el diámetro interno de la tubería, la densidad del fluido y la velocidad media del flujo (ver ecuación 2.1). Para identificar que tipo de flujo, se tiene que si $Re < 2000$ es considerado laminar, por otra parte si $Re > 4000$ es turbulento [3]. Además, si $2000 < Re < 4000$ se conoce como flujo de transición.

$$Re = \frac{\rho v_m D}{\mu} = \frac{v_m D}{\nu} \quad (2.1)$$

En donde, Re representa el número de Reynolds adimensional, ρ es la densidad del fluido m^3/s , v_m es la velocidad media del fluido en m/s , D es el diámetro de la tubería en m , μ es la viscosidad dinámica del fluido en $Kg/m.s$ y ν es la viscosidad cinemática del fluido en m^2/s [3].

El flujo laminar al poseer esfuerzos cortantes viscosos es ordenado y estable, este se produce cuando el fluido presenta una viscosidad alta o las velocidades son bajas [9]. En cambio en el flujo turbulento se origina un intercambio de cantidad

de movimiento de un fragmento de fluido a otro provocando que sus partículas se desplacen irregularmente [6]. La distribución de velocidades es más uniforme por medio del diámetro de la tubería, la mayoría de flujos que se encuentran en los casos reales en la ingeniería son turbulentos [3]. Según *Nikuradse* para determinar el factor de fricción en este tipo de flujo depende principalmente del diámetro y la rugosidad relativa de la tubería (ε/D), su cálculo parte mediante la razón del flujo y la variación de presiones.

2.1.2. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad es parte del principio de conservación de masas (ver figura 2.1), se rige en que el gasto del fluido no presenta cambios en toda la trayectoria (ver ecuación 2.2) [17]. Debido a que el caudal es el producto de la sección transversal de la tubería por la velocidad del fluido, indica que en dos puntos de una misma tubería cumple con la expresión 2.2. En donde, Q representa el caudal o gasto del sistema en m^3/s , los subíndices e y s son entrada y salida respectivamente, A es el área transversal de la tubería en m^2 y V es la velocidad del fluido en m/s .

$$A_e * V_s = A_s * V_e \quad (2.2)$$

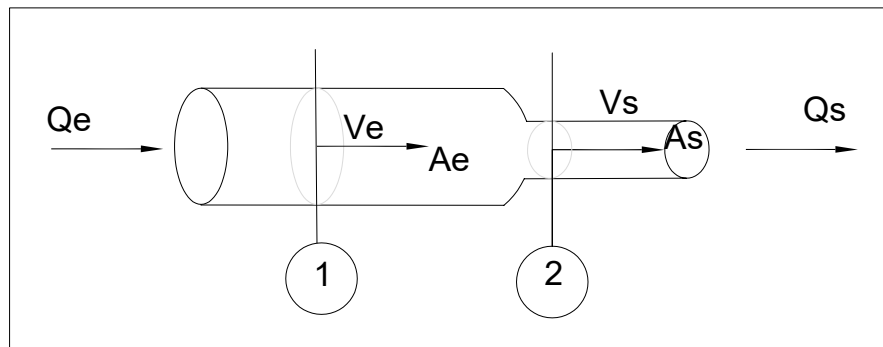


Figura 2.1: Esquemmatización de la ecuación de continuidad. *Adaptado de Sotelo [17]*

2.1.3. Principio de Bernoulli

La ecuación de *Bernoulli* se aplica para flujos estacionarios e incompresibles, representa una aproximación entre la velocidad, la elevación y la presión (ver ecuación 2.3). Se desprecia las fuerzas netas de fricción y los efectos viscosos debido a que son pequeños en relación a los efectos gravitacionales, inerciales y de presión [7]. En donde, Z representa la carga inicial del elevación (energía potencial), P/γ es la carga de presión estática, $V^2/2g$ es la carga de velocidad y la elevación requerida

para una caída libre sin fricción y H es la altura total, cada término está expresada en metro columna de agua (*m.c.a.*).

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = H \quad (2.3)$$

Al utilizar la ecuación de *Bernoulli* se debe tener cuidado, debido a que esta solo es aplicable secciones no viscosas del flujo, es decir, en zonas alejadas de las paredes sólidas, donde obedece los efectos combinados de la gravedad y la presión. La altura total H en la ecuación es constante en cualquier punto. Sin embargo en los procesos reales existen incrementos y pérdidas de energía que deben ser tomadas en cuenta [7].

Según *Cengel* [7], las limitaciones en el uso del Principio de *Bernoulli* son las siguientes:

- Flujo estacionario o permanente: no se puede utilizar en periodos donde exista cambios en el flujo, arranques o paros;
- Ningún trabajo en la flecha: no se aplica en tramos donde existan turbinas, bombas, ventiladores o cualquier otra máquina o impulsor, debido a que intervienen y cambian la línea de energía con las partículas del flujo;
- Flujo incompresible: se hace uso puesto que en los puntos de análisis el peso específico del fluido es el mismo;
- Transferencia de calor despreciable: no puede existir transferencia de calor dentro o fuera del fluido.

2.1.4. Ecuación General de la Energía

La primera ley de la termodinámica rige la ecuación general de la energía (ver ecuación 2.4), la cual expresa que la energía no se crea ni se destruye, solo se puede transformar, por ende se debe considerar toda energía en su análisis. Además, es un complemento de la ecuación de *Bernoulli*, debido que se tiene en cuenta la adición y pérdidas de energía que se generan en los procesos reales, se hace uso de instrumentos mecánicos como bombas y una serie de accesorios responsables de pérdidas por fricción y localizadas [7]. En donde, H_B representa el incremento de energía debido a máquinas mecánicas, $\sum h_f$ y $\sum h_L$ indican las sumatorias de pérdidas por fricción y localizadas respectivamente, cada término esta expresada en *m.c.a.*

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_B = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_f + \sum h_L \quad (2.4)$$

2.1.5. Pérdida de cargas en tuberías

Pérdidas por fricción o mayores

Se denomina pérdidas por fricción aquellas que se producen en la superficie de contacto del líquido con la capa límite del tubo, se presentan en flujo uniforme, generalmente en secciones contantes de tuberías, provocan descenso en la presión a lo largo del sistema (puntos de análisis). Para su determinación y análisis se ha empleado la ecuaciones *Darcy-Weisbach* y la ecuación de *Hazen-Williams* [16].

La ecuación de *Darcy-Weisbach* se expresa en función del líquido, la velocidad del fluido, el diámetro y longitud de la tubería y la rugosidad del material (ver ecuación 2.5). En donde, f representa el factor de fricción de pérdidas mayores, L longitud del conducto en m , D es el diámetro de la tubería en m , V la velocidad del fluido en m/s y g la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.5)$$

Saldarriaga [16] expresa que para deducir el factor de fricción de *Darcy-Weisbach* se hace uso de ecuaciones empíricas como: diagrama de *Moody*, ecuación de *Wood* y ecuación de *Barr*. La ecuación de *Hazen-Williams* es también utilizada en el análisis de pérdidas mayores (ver ecuación 2.6), su forma original empleada en sistema internacional es:

$$h_f = \frac{10.667}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.85} L \quad (2.6)$$

En donde, D representa el diámetro de las tuberías en m , Q el caudal en m^3/s , L es la longitud de las tuberías en m y C indica el coeficiente de *Hazen-Williams* este depende de la rugosidad del material. Según *Sotelo* [17], el coeficiente empleado para un material plástico PVC es de 150.

Pérdidas localizadas o menores

En un sistema de tuberías el líquido pasa mediante varios accesorios como: codos, uniones, ramificaciones tipo T, conexiones de entradas y salidas, ampliaciones, reducciones, válvulas y tramos de tuberías, provocando interrupciones en el flujo, generando pérdidas adicionales. Estas pérdidas son menores respecto a las que se generan por fricción (pérdidas mayores). Sin embargo, en algunos casos las pérdidas menores son más grandes que las de fricción [7]. Las pérdidas localizadas se expresan mediante el factor de pérdidas o factor de resistencia (ver ecuación 2.7). En donde, K_L representa el factor de resistencia de pérdidas menores adimensional, h_L son las pérdidas menores en m , V es la velocidad promedio de la tubería en m/s y g es la aceleración gravitacional en m/s^2 .

$$h_L = K * L * \frac{V^2}{2 * g} \quad (2.7)$$

2.2. Sistemas de abastecimiento de agua potable

2.2.1. Definición y características de los sistemas de abastecimiento de agua potable

Los sistemas de abastecimiento están conformados por fuentes, obras de captación, líneas de aducción, plantas de tratamiento, depósitos de almacenamiento, tuberías, instalaciones y diferentes accesorios responsables de distribuir el agua requerida para una determinada población y satisfacer sus necesidades, se clasifican de acuerdo a los usuarios (urbano o rural) [13]. Su objetivo principal es brindar agua en cantidad y calidad según las normativas y regulaciones vigentes [10]. Para el diseño hidráulico de cada elemento del sistema es fundamental una metodología jerárquica, donde cada tarea es precedida por otra [8].

La función principal de los tanques es recolectar agua en los ciclos en los cuales el suministro sea mayor a la demanda, con el objetivo de que en las etapas en los que el suministro sea menor que la demanda complete el déficit con el agua recolectada inicialmente, estos pueden ser cuadrados, rectangulares o circulares [2].

Las redes de distribución se constituyen por diferentes subsistemas (red principal y redes secundarias), tienen la función de brindar agua potable. Estas se unen al tanque de almacenamiento a través de una red llamada línea matriz, la cual se

encarga de suministrar en líquido vital a todos los puntos designados, su diseño depende de condiciones de operación (trazado, presiones, caudales) [2].

Las categorías generales de los sistemas de abastecimiento se clasifican considerando parámetros como: recursos hídricos dedicados al consumo humano, el uso y preservación de varios recursos hídricos, la coordinación y cooperación con los diferentes organismos usuarios del agua y las posibles extensiones en los planes regionales y naciones de desarrollo [1]. En la Tabla V.1 de las *“Normas para estudios y diseños de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes”* se expresan las diferentes clases de sistema de abastecimiento en relación de la confiabilidad del abastecimiento.

2.2.2. Diseño de los sistemas de abastecimiento

Según *La Secretaría del Agua* [1] para el diseño de los sistemas de abastecimiento se debe considerar primero calcular el periodo de vida útil, el cual hace referencia el lapso de tiempo en el cual estará en funcionamiento a toda su capacidad sin necesidad de hacer mejoras o ampliaciones en sus elementos. En la Tabla V.2 *“Normas para estudios y diseños de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes”* se aprecia la vida útil recomendada para los elementos de los sistemas de abastecimiento.

Es necesario la determinación de la cantidad de habitantes para el cual el diseño deberá abastecer en su periodo de vida útil [1]. *La norma urbana para estudios y diseños de sistemas de agua potable* recomienda hacer un análisis con al menos tres métodos (numéricos o estadísticos), los datos a utilizar se obtendrán del *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos* (INEC), o al realizar encuestas sanitarias a la población.

Según *López Cualla* [2] entre los métodos utilizados para las proyecciones de poblaciones, se emplean métodos estadísticos, los cuales sirven para completar valores históricos mediante ecuaciones de regresión para una curva lineal, potencial o exponencial, tomando en cuenta la relación de variables para cada uno. Estos se indican a continuación:

■ **Método línea recta o regresión lineal:**

$$y = a + bx \quad (2.8)$$

■ **Método curva exponencial ($a > 0$):**

$$y = ae^{bx} \quad (2.9)$$

■ **Método curva potencial ($a > 0$):**

$$y = ax^b \quad (2.10)$$

En las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10, el término y hace referencia a la población, x indica los años (tiempo), a y b resuelven el siguiente sistema de ecuaciones:

$$An + B \sum Xi = \sum Yi \quad (2.11)$$

$$A \sum Xi + B \sum Xi^2 = \sum XiYi \quad (2.12)$$

Donde n representa el número de censo disponibles. En estos métodos se emplea un coeficiente de correlación dado por la ecuación 2.13.

$$R^2 = \frac{A \sum Yi + B \sum XiYi + \frac{(\sum Yi)^2}{n}}{\sum (Yi)^2 - \frac{(\sum Yi)^2}{n}} \quad (2.13)$$

Estos métodos mencionados anteriormente son una aproximación a la realidad, deben ser adecuados y exactos para el diseño. Además permite calcular el error estimando, es decir, la sensibilidad para ajustar el método empleado (ver ecuación 2.15) [2].

$$Error_{verdadero} = valor_{verdadero} - valor_{aproximado} \quad (2.14)$$

$$E_r = \frac{\text{error}_{\text{verdadero}}}{\text{valor}_{\text{verdadero}}} \quad (2.15)$$

El consumo refiere al volumen de agua utilizada por persona durante un día, sus unidades son $(l/(hab * dia))$ [2]. Según Arocha [15] se clasifican en:

- Residencial: aseo, descarga de sanitarios y uso en viviendas,
- Comercial: centros comerciales, zonas destinadas ha actividades comerciales,
- Industrial: fábricas, necesariamente identificación y cuantificación adecuada,
- Institucional: instituciones del sector público,
- Educacional: escuelas, colegios y centros educativos.

Los factores principales que pueden afectar el consumo en los sistemas de agua potable son: el clima que presenta el sitio, la calidad de agua, las características socio-económicas de la población, la presencia de sistemas de alcantarillado, las mediciones y tarifas del agua potable [2].

La producción de agua requerida para satisfacer las necesidades de los habitantes y requerimientos adicionales se le conoce como dotación [1]. Para su análisis es necesario datos estadísticos de consumo previos y actuales, relación con poblaciones cercas y determinación de valores típicos de cada uso de agua. Sin embargo, si no se posee los datos de consumo necesario para establecer la dotación se hace uso de la Tabla V.3 Dotaciones recomendadas de la *Normas de diseño de agua potable*.

Caudal de diseño

El caudal destinado para el consumo no es el mismo, pues este varía con el tiempo [2]. Generalmente se emplean tres tipos de caudales:

- Caudal medio diario (Q_{med}), es el promedio de caudales de un año de registro [2]. Se determina con la ecuación 2.16 en la cual en el denominador se hace uso de la multiplicación indicada para que sus unidades se expresen en m^3/s . Donde, q representa la dotación definida en $l/(hab * dia)$ y N el número de habitantes de diseño en hab .

$$Q_{med} = \frac{q * N}{1000 * 86400} \quad (2.16)$$

- Caudal máximo diario ($Q_{max.dia}$), es el caudal máximo presentado en un día del año, es decir, el día más crítico de consumo, en el cual el caudal de diseño debe satisfacer esas demandas, se relaciona con el caudal medio diario (ver ecuación 2.17) [2]. Donde, $K_{max.dia}$ es un coeficiente de consumo máximo diario que varía en base a estudios realizados, la norma urbana para estudios y diseños de sistemas de agua potable recomienda valores de 1,3 - 1,5 [1].

$$Q_{max.dia} = K_{max.dia} * Q_{med} \quad (2.17)$$

- Caudal máximo horario ($Q_{max.hr}$), representa el caudal de la hora de máximo consumo en el día de mayor consumo [15]. Se determina mediante la ecuación 2.18. Donde $K_{max.hr}$ es el coeficiente de variación de consumo máximo horario, se determina con estudios similares al coeficiente de consumo máximo diario [1]. La norma urbana para estudios y diseños de sistemas de agua potable recomienda valores de 2,0 - 2,30.

$$Q_{max.hr} = K_{max.hr} * Q_{med} \quad (2.18)$$

Además, para el caudal de diseño se toma en cuenta las dotaciones adicionales (comerciales e institucionales) y protección contra incendios [1]. Para incendios que considera la Tabla V.4 de la *Norma de diseño de agua potable*. En la Tabla V.5 de la misma norma mencionada se observa los caudales de diseño recomendados para los diferentes elementos que constituyen los sistemas de agua.

2.3. Modelos hidráulicos

Los modelos hidráulicos tienen el objetivo de simular un proceso o una situación que se efectúa en una obra civil real para así conocer su comportamiento. Las principales características que ofrece un modelo hidráulico son: una visión general del comportamiento del modelo, menor tiempo de ejecución, costo reducido, buena recolección de información de datos, etc [11].

2.3.1. Clasificación general de los modelos hidráulicos

- **Modelo Matemático:** Son aquellos en los cuales aspiran resolver problemas hidráulicos a partir de soluciones matemáticas/numéricas, mediante el uso de ecuaciones con sus correspondientes condiciones iniciales [11].

- **Modelo Estadístico:** Para este modelo es necesario de un entendimiento alto en las condiciones y parámetros que rige un proceso ingenieril. En el modelo estadístico emplea otros métodos los cuales conducen hacia las ecuaciones utilizadas en el modelo matemático, para ello establece rangos y magnitudes entre el modelo y prototipo los cuales desempeñan la misma función que las ecuaciones y unidades de medida así como de las condiciones iniciales del problema [11].
- **Modelo Físico:** Es un modelo en el cual se puede representar el funcionamiento del prototipo de manera más analógica ya que emplea un fluido real para simular el comportamiento, a pesar de que las dimensiones o magnitudes son menores, estas se asemejan al real mediante escalas. Lo característico de estos modelos es que a pesar de no conocer con detalles las ecuaciones, estas son las mismas que el prototipo [11].

2.3.2. Limitaciones y ventajas entre un modelo matemático y uno físico.

Un modelo matemático, al ser algo intangible, posee una capacidad de almacenamiento dependiendo de la memoria que tenga la computadora; en cambio, un modelo físico su principal limitación es el espacio (tamaño) en donde se encontrará instalado. Del mismo modo la velocidad de análisis, de cálculo y resultados de un modelo matemático puede demorar más que uno físico. Para una modelización física la recolección de datos es manual, en cambio, un modelo matemático solo se debe ingresar los parámetros en los que trabajará dicho modelo y realizará la simulación.[4]

La principal ventaja que presenta un modelo matemático es el tiempo en su ejecución, del mismo modo se puede obtener mayor dominio de información en cálculos y permite observar, analizar y controlar variables hidráulicas como son la velocidad, presión, caudal, turbulencias, etc. En cambio la principal ventaja que posee un modelo físico es que al no estar limitado por cálculos ni emplear métodos numéricos, sus simulaciones se asemejarán al del prototipo, igualmente permite al operador encontrar fallas en el sistema hidráulico e incluso implementar mejoras en su diseño ya que en todo momento se podrá observar e interpretar los fenómenos hidráulicos que se presentarán en el modelo y por último permite modificar de manera rápida sus elementos hidráulicos [4].

2.4. Leyes de semejanza hidráulica

Un modelo físico al ser una representación reducida de un prototipo, debe tomarse en cuenta los conceptos a los que este se rige, así como también que efectos serán relevantes para realizar la modelización. A partir de ello un modelo físico debe ser capaz de reproducir las mismas magnitudes a cierta escala apropiada [5], dichas magnitudes son:

- **Geométricas:** Se llama semejanza geométrica si todas las dimensiones de longitud del prototipo son homólogas al modelo. Esta semejanza se refiere a que exista similitud en su forma más no en el comportamiento que poseerá. En la Figura 2.2 se puede observar que las longitudes horizontales y verticales del modelo y prototipo son homólogas ya que si se divide las longitudes del prototipo con respecto a las del modelo, estas poseen las mismas escalas geométricas [5].

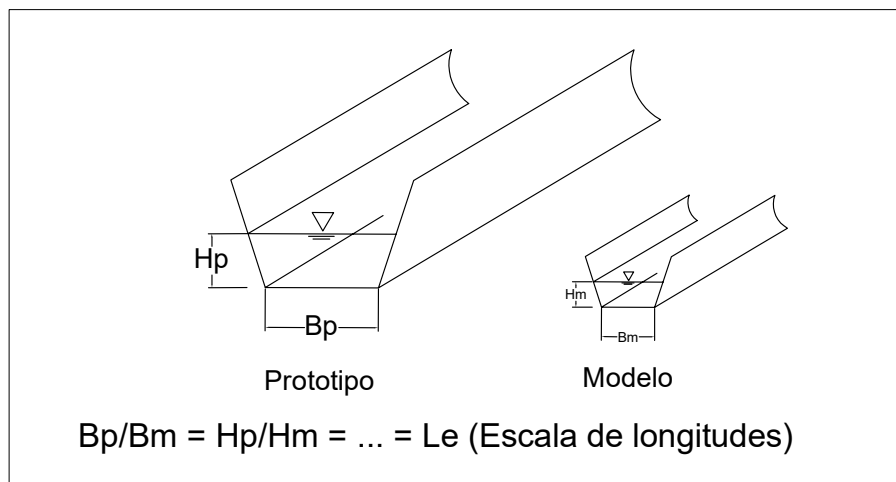


Figura 2.2: Semejanza geométrica. *Adaptado de Alpade [5]*

- **Cinemáticas:** Se dice que existe semejanza cinemática si las partículas del modelo se mueven homológamente igual que el prototipo, por lo tanto, los componentes de velocidad, caudal y tiempo son geoméricamente homólogos [5]. En la Figura 2.3 se observa que los componentes de velocidad del modelo y prototipo son semejantes ya que si se divide los componentes del prototipo con respecto a las del modelo, estas poseen las mismas escalas cinemáticamente.

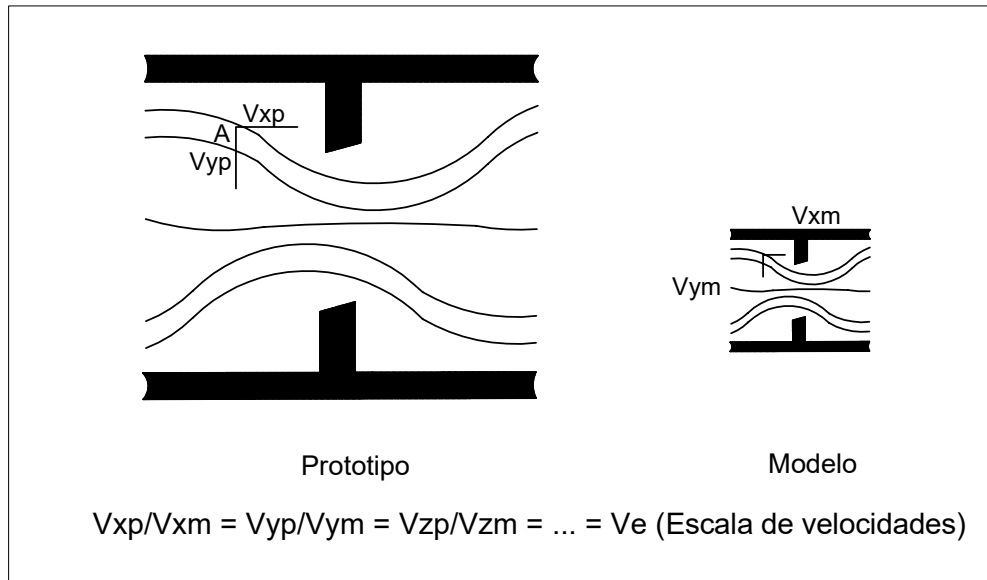


Figura 2.3: Semejanza cinemática. *Adaptado de Aldape [5]*

- Dinámicas:** Existe semejanza dinámica si las fuerzas producidas tanto geométrica como cinemática, son semejantes entre modelo y prototipo, es decir, las fuerzas de gravedad, presión, viscosidad, cantidades de movimiento y densidades son dinámicamente semejantes [5]. En la Figura 2.4 se puede observar que las fuerzas de presión, viscosidad, inercia y peso del modelo y prototipo son iguales ya que si se divide las fuerzas del prototipo con respecto a las del modelo, estas poseen las mismas escalas dinámicamente.

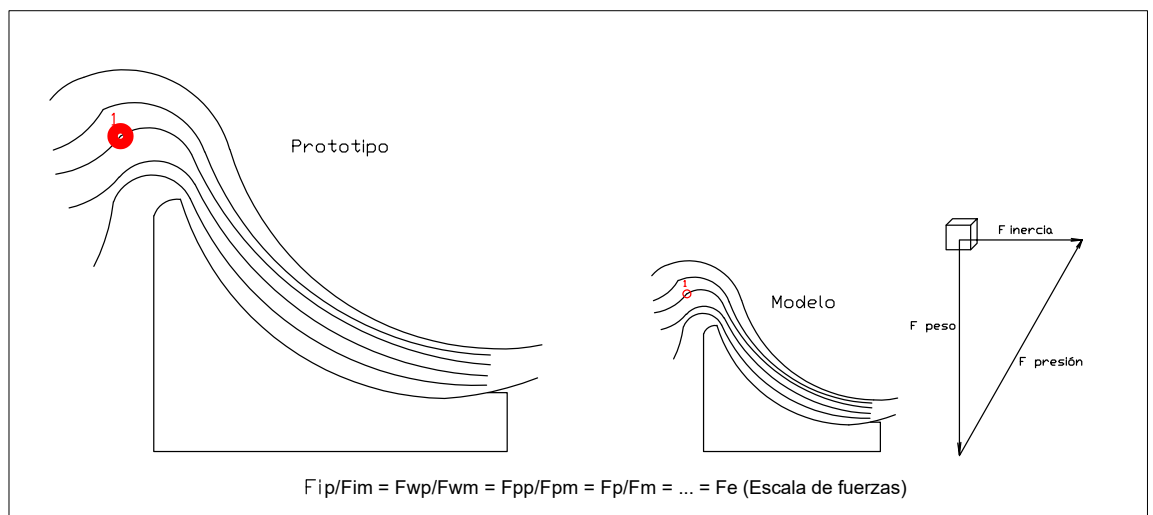


Figura 2.4: Semejanza dinámica. *Adaptado de Aldape [5]*

2.5. Relaciones de escalas

Todo modelo físico requiere de una escala a la cual se le va a plasmar el prototipo real, mientras más grande sea la escala (ej. 1:15), más semejante es el comportamiento del modelo frente al prototipo, sin embargo, el costo de construcción del mismo puede ser muy alto, en cambio si se utiliza una escala pequeña (ej. 1:1000) pueden generar incongruencias y errores en la toma de datos y en los resultados finales, también puede suceder que ciertas magnitudes sean imposibles de ser medidas ya que estas pueden ser muy pequeñas, por tanto, es necesario establecer las escalas a las cuales se trabajará y realizar simulaciones en donde permitan al operador recolectar datos del modelo [5].

La semejanza geométrica está encargada de que toda relación longitudinal en el modelo con respecto a la del prototipo, sean las mismas. A esta relación se la denomina como *Factor de escala* (ver ecuación 2.19) en donde, L_r representa el factor de escala adimensional, L_p es la longitud correspondiente al prototipo en metros, L_m es la longitud correspondiente al modelo en metros. Cabe recalcar que el subíndice "p" se emplea para denominar al prototipo, el subíndice "m" para denotar al modelo y el subíndice "r" representa la relación [5].

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.19)$$

Con base a la ecuación mostrada anteriormente, se determinan las escalas de semejanza necesarias para modelar un sistema de abastecimiento, obteniendo como resumen la Tabla 2.1. Si se emplea el fluido del prototipo en el modelo físico, entonces $\rho_r = \mu_r = 1$ [5].

Tabla 2.1: *Características de flujo y escalas de semejanza* [5]

Característica	Ley de Reynolds
Longitud	L_r
Área	L_r^2
Volumen	L_r^3
Tiempo	$\frac{L_r^2 \rho_r}{\mu_r}$
Velocidad	$\frac{\mu_r}{L_r \rho_r}$
Gasto	$\frac{L_r \mu_r}{\rho_r}$
Presión	$\frac{\rho_r}{\mu_r L_r^2}$
Rugosidad	L_r ó Moody
No de Reynolds	1
Pendientes	1

2.6. Construcción y operación de modelos físicos

2.6.1. Componentes de un modelo hidráulico

Todo modelo físico consta de componentes, según *Aldape* [5], los principales son:

- **Tanque de tirante hidráulico constante:** Es aquel tanque elevado, el cual traslada el agua al sistema de tuberías de tal forma que mantenga su carga hidráulica constante.
- **Sistema de tuberías:** Son aquellas tuberías por donde circula el agua y es el medio por el cual se medirán los caudales y presiones en la red. Se las colocarán de acuerdo a la topografía del sistema y y sus pendientes.
- **Accesorios de tuberías:** Son aquellos componentes de tuberías los cuales intervienen en el enrutamiento de tal forma que pueda existir cambios de direcciones, tamaños o conexiones de ramales en las tuberías. Algunos accesorios empleados en la industria de plomería y tuberías son los codos, reductores, conexión en T, conexión en cruz, etc.
- **Instrumentos de medición:** Son una pieza clave para la calidad de los resultados. Estos equipos están encargados de medir caudales, niveles, velocidades y presiones.
- **Modelo:** Es todo elemento que constituye el modelo físico (Componentes enlistados anteriormente), el cual se lo construye a partir de las leyes de semejanza de Reynolds. [5].

2.6.2. Construcción y operación de un modelo físico

Para la construcción del modelo, si el fluido empleado es agua, es necesario implementar un material resistente, como por ejemplo tubos comerciales de PVC. Es preciso que el tanque de carga hidráulica constante se encuentre a una altura donde su mantenimiento y operación sean fáciles de controlar. En caso de realizar un modelo físico de un sistema de abastecimiento, se requiere construir soportes los cuales servirán como restricciones para cada nodo en el modelo a escala, cabe destacar que es necesario equipos topográficos los cuales permitirán que las redes construidas respeten las distancias y pendientes previamente diseñadas. Por último se emplea equipos de medición, con el propósito de calibrar el modelo, al ser la presión el principal parámetro a medir, se requiere de una serie de manómetros o piezómetros colocados estratégicamente en ciertos tramos de la red [11].

La operación del modelo físico depende de las condiciones específicas de cada tipo de obra hidráulica. Sin embargo a continuación se darán una serie de recomendaciones generales [5].

- Verificar que el flujo llegue al modelo en la forma más parecida o semejante al prototipo,
- Verificar que los aparatos de medición estén colocados de acuerdo con las especificaciones y que estos no afecten a las pruebas,
- Observar que en las zonas en donde se va a aforar el agua sea lo más parecido al del prototipo y comprobar que si se asemejan a las cargas hidráulicas o gastos esperados,
- Inspeccionar el modelo con el fin de identificar fugas o grietas para poder impermeabilizarlo o incluso cambiar secciones si es necesario,
- Comprobar el funcionamiento de modelo mediante un control hacia la carga hidráulica o gastos deseados. En ciertos casos el flujo tarda en estabilizarse demasiado tiempo, por ende se requiere tomar medidas pasando un tiempo dependiendo del tipo de modelo para que estas no sean inexactas [5].

En la etapa de ensayos, es importante seguir un plan que permita obtener el máximo de información, las mediciones deben ser muy cuidadosas, es recomendable que más de una persona recolecte la información y repitiendo el proceso de medir varias veces. Siempre es fundamental poseer una bitácora en el cual se debe registrar todo el proceso de medición, desde la información recolectada de los equipos hasta las fechas y observaciones que se presentan en el entorno del modelo [5].

Una vez acabe la etapa de ensayos, el agua acumulada en los componentes del modelo deberá ser drenada, del mismo modo los equipos empleados en la medición deberán ser retirados del modelo y guardados con el objetivo de preservar su funcionamiento. Finalmente, una vez terminado el proceso de calibración y toma de resultados del modelo, este deberá no ser destruido, alterado o modificado ya que puede ser un medio por el cual se pueda arreglar problemas o implementar mejoras en el prototipo [5].

2.7. Calibración de modelos físicos

Hoy en día los modelos hidráulicos de redes de distribución son empleados en las empresas designadas al suministro de agua potable, utilizados generalmente para el diseño, planificación y operación del abastecimiento. Se ha convertido en una

herramienta importante debido a su precisión, mientras mayor sea esta más confiable será como herramienta de toma de decisiones, por ende, su calibración resulta fundamental [14].

La *American Water Works Association AWWA* [14] indica que la calibración compara resultados de las modelizaciones con datos tomados en campo. Los parámetros empleados para la calibración son: la rugosidad de tuberías, válvulas, sistemas de bombeo y demandas en nodos. Existen una variedad de métodos de calibración, tanto para periodos extendidos o estados estacionarios, en los cuales incluyen técnicas analíticas e implícitas.

Water Research Center presenta un procedimiento para la elaboración de un modelo, el cual está constituido por: revisión de los registros de la red de distribución, inspección de los equipos en campo, mediciones de campo preliminares, mediciones en campo, ingreso de datos, calibración del modelo [14].

2.7.1. Calibración

La calibración determina las características operacionales y físicas de un prototipo, para luego asignar los datos tomados a un modelo construido que permita la obtención de resultados reales. Según el autor *Walski* [5] en el proceso de calibración se compara las presiones y caudales respecto al prototipo (datos medidos en campo), además, los datos de entrada del modelo deben ser ajustados, de forma que exista relación entre los valores observados y simulados. La AWWA asegura que en la calibración se debe analizar los datos del prototipo respecto a los resultados del modelo, por lo tanto, la calibración de los modelos es el ajuste de los parámetros que rigen el comportamiento hidráulico del modelo, el cual refleja con precisión el funcionamiento del prototipo, tanto en estado estático como dinámico [14].

Procedimiento para la calibración de modelos:

Rondán [14] indica que el procedimiento consta de siete pasos para la obtención de una adecuada calibración:

- Propósito del modelo: refiere al tipo de análisis hidráulico requerido, ya sea en periodo extendido o estado estacionario, brinda una guía a los requerimientos del modelo, como la calidad de datos de campo, el tipo, tolerancia permitida entre los datos simulados y observados;
- Valores iniciales de los parámetros: indica los parámetros básicos del modelo como las demandas en los nodos, rugosidad de tuberías, en caso de período extendido un factor de modulación;

- Recopilación de datos de calibración: provee la información necesaria para evaluar los resultados preliminares del modelo, se obtienen mediante simulaciones que hacen uso las estimaciones iniciales de los parámetros de la red. Los datos se pueden obtener a través de pruebas en campo y datos de telemetría;
- Análisis de resultados: permite evaluar la precisión del modelo hidráulico, realizando una comparación de las simulaciones con los datos recolectados en campo, se relaciona sus criterios comúnmente con la valoración absoluta de la presión;
- Macro-calibración: se orienta en la calibración de la red de distribución completa o zonas de presión de la misma. Identifica y corrige los errores que representan las diferencias significativas entre el modelo y prototipo;
- Evaluación de sensibilidad: varía los parámetros del modelo, cuantifica el efecto sobre cada una de las variaciones, e identifica los parámetros de mayor impacto en los resultados de las simulaciones;
- Micro-calibración: analiza la precisión del modelo de una sección en particular, corroborando que cumplan con las condiciones requeridas. Los parámetros ha ajustar finalmente en esta etapa son las demandas en los nodos y los coeficientes de las tuberías.

2.7.2. Errores presentados en los modelos hidráulicos

La información tomada en campo, comúnmente es similar a los datos obtenidos de su modelo, los errores que pueden poseer los datos suelen presentarse debido a ciertos efectos, ya sea por simplificar variables e incluso suponerlas o aproximarlas. Existen varias razones por las que se producen inexactitudes ya sea por errores en las conexiones de las tuberías, excluir pérdidas por accesorios, confundir diámetro nominal con el interno, etc. La *AWWA* plantea que errores presentados en la asignación de demanda y datos de entrada; la precisión en los aparatos de medición; en la geometría y topografía de la red, pueden ocasionar incoherencia entre los datos obtenidos en el modelo respecto a los del prototipo [14].

Además, un error que no se debe omitir es la presencia de aire en las tuberías que puede introducirse al momento de llenar el modelo, ocasionando inexactitud en la calibración por la presencia de burbujas a lo largo del sistema, este afectará en la medición de presiones, reduce la sección efectiva en las tuberías y el paso del caudal e incrementando pérdidas [14].

2.7.3. Criterios de valoración para la calibración de modelos hidráulicos

Existen ciertos autores que presentan criterios para analizar y valorar la calibración en modelos, por ejemplo los autores *Walski (1983)*, *Harris (1984)*, *Cesario y Lee (1984)* afirman que todo modelo hidráulico está calibrado si la precisión de las presiones están en un rango de ± 5 psi; sin embargo, la *Water Authorities Association (WAA)* propuso ciertos criterios de tolerancia para un modelo de régimen estacionario, en la Tabla 2.2 se puede apreciar los criterios de presión según la tolerancia para la calibración de un modelo [14].

Tabla 2.2: *Criterios prácticos de presiones para la calibración de modelos hidráulicos.* [14]

Criterios de presiones para la calibración de modelos.	
(1)	El 85 % de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en ± 5 % de la pérdida de carga registrada.
(2)	El 95 % de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en ± 7.5 % de la pérdida de carga registrada.
(3)	El 100 % de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en ± 15 % de la pérdida de carga registrada

Sección 3

Metodología

La obtención del modelo físico de la comunidad de *Rumihurco* se realizará por medio de la aplicación de los conceptos y teorías expresadas en el capítulo del Marco Teórico. A partir de ello, se definirán sus dimensiones, así como también valores de velocidades, caudales y presiones con su respectiva escala.

3.1. Modelo matemático del sistema de abastecimiento de la Comunidad de Rumihurco

3.1.1. Proyección poblacional

La parroquia *Javier Loyola* según la información obtenida por el *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC)*, posee un crecimiento importante desde el año 2001 (ver Tabla 3.1), en donde se puede observar un incremento desde el año 1990 hasta el 2001 solo de 56 personas, en cambio en el periodo de 2001 a 2010 existe un crecimiento de 1387 personas.

Tabla 3.1: *Evolución Inter-Censal [12]*

Año Censal	Población Total	Periodo	Crecimiento poblacional
1990	5364		
2001	5420	1990-2001	56
2010	6807	2001-2010	1387

Al poseer una carencia de datos poblacionales de los demás años y observar que desde el año 2001 existe un incremento excesivo en comparación a censo anterior, fue necesario realizar proyecciones basadas en métodos estadísticos. A partir de esto, se realizó el cálculo, donde se empleó tres métodos según la normativa de diseño como: regresión lineal, curva exponencial y curva potencial, se seleccionará el método de

mayor confiabilidad, es decir, menor porcentaje de error. En la Figura 3.1 se observa los puntos de los censos realizados en los años mencionados, conjuntamente con la ecuación que representó cada método con su respectivo coeficiente de correlación (R^2).

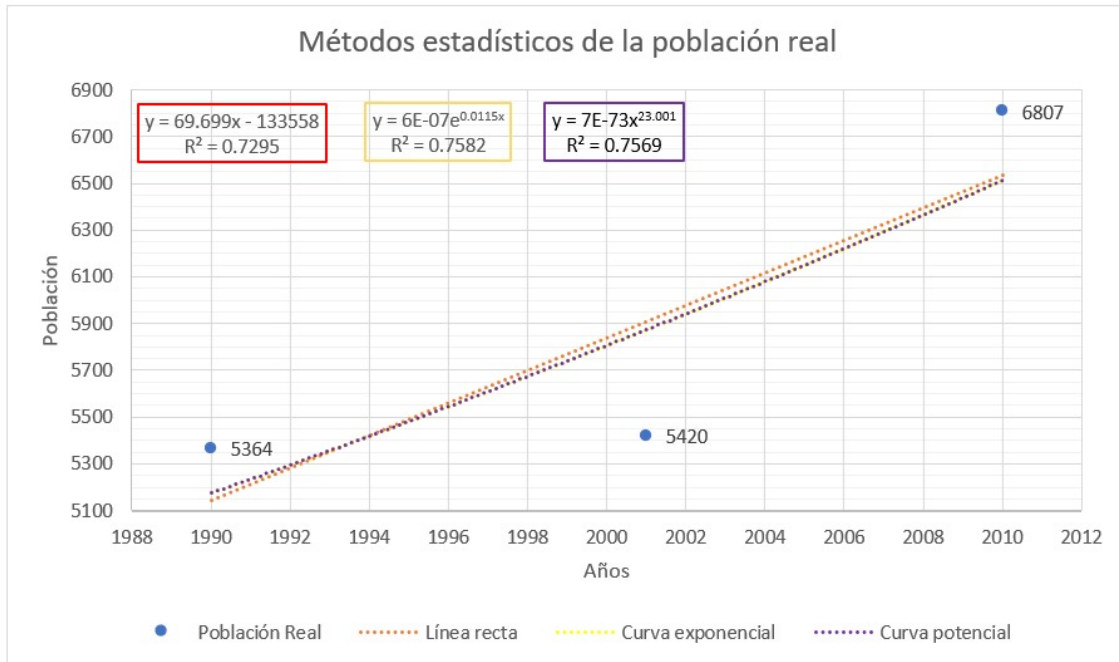


Figura 3.1: *Métodos estadísticos de la población real.* (Autores)

- Método línea recta:** A partir de la Figura 3.1, la ecuación 3.1 representa el método de regresión lineal, con la cual se realizó la población aproximada respecto al número de censos registrados (ver Tabla 3.2), a partir de dicha población se encontró el porcentaje de error empleando la ecuación 2.15, obteniendo un porcentaje de error promedio de 5.70 %.

$$y = 69.699x - 133558 \quad (3.1)$$

Tabla 3.2: *Cálculo de proyecciones poblacionales por el método estadísticos línea recta.* (Autores)

Año	Población	Población Aprox.	Error %
1990	5364	5144	4.10
2001	5420	5910	9.04
2010	6807	6537	3.97
Promedio:			5.70

- **Método curva exponencial:** A partir de la Figura 3.1, la ecuación 3.2 representa el método de curva exponencial, con la cual se realizó la población aproximada respecto al número de censos registrados (ver Tabla 3.3, a partir de dicha población se encontró el porcentaje de error empleando la ecuación 2.15), obteniendo un porcentaje de error promedio de 5.19 %.

$$y = (6 * 10^{-7})e^{0.0115x} \quad (3.2)$$

Tabla 3.3: Cálculo de proyecciones poblacionales por el método estadísticos curva exponencial. (Autores)

Año	Población	Población Aprox.	Error %
1990	5364	5212	2.83
2001	5420	5915	9.13
2010	6807	6560	3.62
Promedio:			5.19

- **Método curva potencial:** A partir de la Figura 3.1, la ecuación 3.3 representa el método de curva ponencial, con la cual se realizó la población aproximada respecto al número de censos registrados (ver Tabla 3.4), a partir de dicha población se encontró el porcentaje de error empleando la ecuación 2.15, obteniendo un porcentaje de error promedio de 4.88 %.

$$y = (7 * 10^{-73})x^{23.001} \quad (3.3)$$

Tabla 3.4: Cálculo de proyecciones poblacionales por el método estadísticos curva potencial. (Autores)

Año	Población	Población Aprox.	Error %
1990	5364	5273	1.70
2001	5420	5986	10.44
2010	6807	6637	2.50
Promedio:			4.88

Análisis de sensibilidad

Al aplicar los métodos mencionados, el que mejor se ajusta a la proyección de la población es el método curva potencial, debido a que presenta el menor error porcentual en comparación a los otros, en la Tabla 3.5 se puede apreciar los resultados.

Tabla 3.5: *Errores porcentuales de métodos estadísticos. (Autores)*

Método	Error %
Regresión lineal	5.70
Curva exponencial	5.20
Curva potencial	4.88

En la Tabla 3.6 se expresa la población aproximada hasta el año 2022, la cual se utilizará para el cálculo del diseño de la red de abastecimiento y en la ejecución del modelo físico.

Tabla 3.6: *Cálculo de la proyección aproximada para el año 2022. (Autores)*

Año	Población real	Población aprox.
1990	5364	5273
2001	5420	5986
2010	6807	6637
2012		6790
2014		6947
2016		7107
2018		7271
2020		7439
2022		7610

3.1.2. Caudal de diseño de la red de abastecimiento de la comunidad Rumihurco.

Para determinar el caudal de diseño del sistema de tuberías de agua potable es necesario obtener ciertos parámetros, uno de ellos es la población de diseño, en la Tabla 3.6 se puede observar que para el año 2022, la parroquia *Javier Loyola* contará con un total de 7610 de habitantes.

De acuerdo a la Figura 3.2 se puede visualizar que toda la red abastece a una área total de 965.373 hectáreas. A partir de estos datos, se calculó la densidad poblacional, el cual es dividir la población de diseño con respecto al área total, obteniendo 7.9 *hab/ha*.

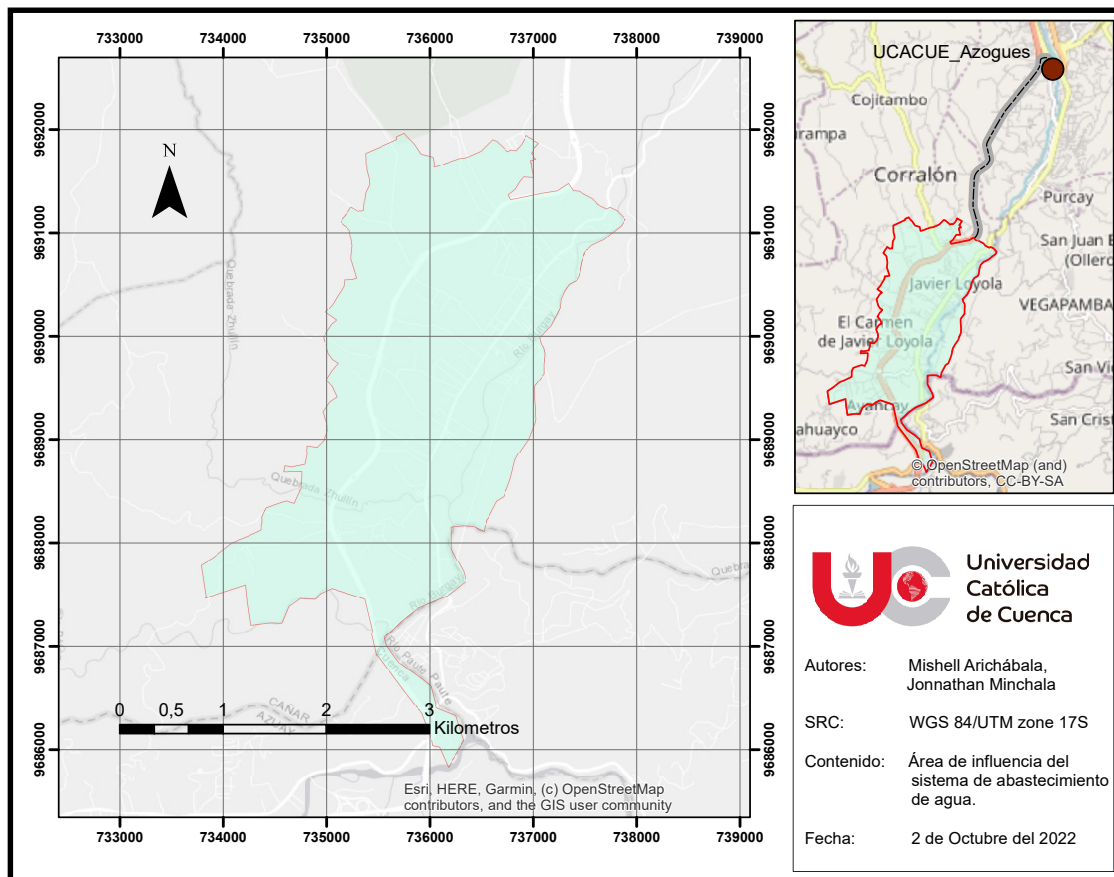


Figura 3.2: Área de influencia. (Autores)

El parámetro de dotación de agua fue proporcionado por la *Empresa Pública Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Ambiental (EMAPAL-EP)*, según el criterio de la Tabla V.3 Dotaciones recomendadas de la *Norma de diseño de agua potable*, indica que para el sistema estudiado es necesario una dotación de $180 \text{ l}/(\text{hab} * \text{dia})$.

El *caudal medio anual diario* se calculó mediante la ecuación 2.16 obteniendo un caudal de $15.85 \text{ l}/\text{s}$. Para el *caudal máximo diario* se eligió un coeficiente de variación de consumo de 1.3 y con la ecuación 2.17 dio como resultado un gasto de $20.61 \text{ l}/\text{s}$. Por último se calcula el *caudal máximo horario*, donde su coeficiente de consumo horario fue de 2 y a partir de la ecuación 2.18 se obtuvo un caudal de $31.70 \text{ l}/\text{s}$.

El sistema de abastecimiento estudiado cuenta con un hidrante, por tanto, es necesario implementar un valor adicional para el caudal de diseño de la red, y esta es la dotación de protección contra incendios, considerando la Tabla V.4 de la *Norma de diseño de agua potable* se obtiene que la dotación por incendios será de $10 \text{ l}/\text{s}$.

Finalmente, de acuerdo con la Tabla V.5 de la *Norma de diseño de agua potable*, el sistema es una red de distribución, de manera que el caudal de diseño debe de ser el caudal máximo horario más la dotación contra incendios, obteniendo un caudal de abastecimiento para la comunidad de *Rumihurco* de 41.70 l/s. A continuación en la Tabla 3.7 se puede visualizar un cuadro resumen con todos los parámetros para la obtención del caudal de abastecimiento de la red de distribución de agua.

Tabla 3.7: *Resumen de parámetros para la obtención del caudal de abastecimiento de la red. (Autores)*

Parámetros de diseño		
Año	2022	
Población	7610	hab
Área de influencia	965.373	ha
Densidad Poblacional	7.9	hab/ha
Dotación de agua	180.0	l/(hab*día)
Caudal medio	15.85	l/s
Coeficiente de variación de consumo máximo diario	1.3	
Caudal máximo diario	20.61	l/s
Coeficiente de variación de consumo máximo horario	2	
Caudal máximo horario	31.70	l/s
Dotación contra incendios	10	l/s
Caudal de abastecimiento	41.70	l/s

3.1.3. Tramo seleccionado.

El sistema de abastecimiento de agua potable consta de 488 tuberías, cuyos diámetros empleados en su construcción son de 200mm, 160mm, 110mm, 90mm y 63mm. En la sección de Anexos: Figura 7.1 se puede apreciar que la tubería de 63 mm representa la mayor parte del sistema y en la Figura 7.2 se seleccionó un tramo, el cual este constituido por el tanque, tuberías de 200mm, 160mm, 110mm y 63mm. Las características reales de cada elemento (tanque, nodos y tuberías) se pueden observar en Anexos: Figura 7.3.

Mediante el uso de un software de *Sistema de Información Geográfica (SIG)* y mediante ecuaciones simples se determinó las demandas para cada nodo, las cuales representarán el caudal del prototipo debido a que al ser un sistema construido, no es posible obtener valores reales, distribuyendo el área de influencia y población a partir de la densidad poblacional. La demanda que requiere cada nodo es la suma del caudal máximo horario y el caudal contra incendios pertenecientes a cada área

determinada, los resultados de los cálculos realizados se observan en el apartado de Anexos: Tabla 7.1.

3.1.4. Parámetros hidráulicos del modelo matemático.

Mediante el uso del software Epanet 2.0 se calculó los parámetros cinemáticos y dinámicos del tramo seleccionado en el cual se puede observar que las velocidades en su mayoría cumplen con el criterio de diseño según la normativa, sin embargo, existen tramos en las que estas son menores al mínimo recomendado (0,6 m/s). El mismo caso ocurre con las presiones en los nodos, cuya máxima presión permitida por la normativa es la de 70 m.c.a., ya que pueden provocar roturas, golpe de ariete y sedimentación en las tuberías (ver Tabla 3.8).

Tabla 3.8: *Velocidades, caudales y presiones del sistema. (Autores)*

Modelo Matemático				
Tramo	Velocidades (m/s)	Nodo	Caudales (l/s)	Presiones (mca)
Tanque - 2	1.73	Tanque	-	-
2-3	1.72	2	0.110	6.41
3-4	1.72	3	0.115	33.56
4-5	1.71	4	0.066	40.78
5-12	1.49	5	0.071	49.5
12-13	1.48	12	0.033	35.92
13-14	1.48	13	0.115	45.96
14-15	1.48	14	0.050	70.24
15-16	1.08	15	0.022	72.67
16-60	1.51	16	0.016	74.54
60-314	0.44	60	0.011	73.59
4-188	0.03	314	0.005	86.69
5-6	0.22	188	0.110	35.33
15-39	0.62	6	0.148	21.27
16-17	0.62	39	0.087	74.3
60-61	1.37	17	0.005	72.31
		61	0.022	73.29

3.2. Prototipo del sistema de abastecimiento de la comunidad de Rumihurco

Se tomaron datos en campo de las presiones del sistema real (ver Tabla 3.9) haciendo uso de un instrumento de medición (manómetro), al estar ya construido el prototipo se dificulta la obtención completa de estos, por ello, mediante el uso del modelo matemático se ajustaron los datos faltantes (ver Tabla 3.10).

Tabla 3.9: *Presiones recolectadas en campo del prototipo. (Autores)*

Prototipo		
Nodo	Presiones	
	(PSI)	(mca)
14	90	63.36
39	96	67.58
16	100	70.4
60	102	71.81
61	92	64.77
314	108	76.03

Tabla 3.10: *Velocidades, caudales y presiones del prototipo. (Autores)*

Prototipo				
Tramo	Velocidades (m/s)	Nodo	Caudales (l/s)	Presiones (mca)
Tanque - 2	1.73	Tanque	-	-
2-3	1.72	2	0.110	6.41
3-4	1.72	3	0.115	33.56
4-5	1.71	4	0.066	40.78
5-12	1.49	5	0.071	49.50
12-13	1.48	12	0.033	35.92
13-14	1.48	13	0.115	45.96
14-15	1.48	14	0.050	63.36
15-16	1.08	15	0.022	72.67
16-60	1.51	16	0.016	70.40
60-314	0.44	60	0.011	71.81
4-188	0.03	314	0.005	76.03
5-6	0.22	188	0.110	35.33
15-39	0.62	6	0.148	21.27
16-17	0.62	39	0.087	67.58
60-61	1.37	17	0.005	72.31
		61	0.022	64.77

3.3. Modelo físico del sistema de abastecimiento de la comunidad de Rumihurco

3.3.1. Escalas del modelo físico

Una vez seleccionado el tramo de la red, se desarrolló las escalas geométricas que se empleará para la construcción del modelo, por tanto, mediante la ecuación 2.19 se determinaron dos escalas de similitud. En la Tabla 3.11 se puede observar

los factores calculados los cuales pertenecen a las diferentes tuberías que conforman el sistema.

Tabla 3.11: Factores de escala longitudinal para el Tramo de la red. (Autores)

Parámetro	Símbolo	Escala
Longitud para una tubería de 200 mm	L	$L_{r1} = 175$
Longitud para las tuberías de 160mm, 110mm y 63mm	L	$L_{r2} = 110$

En el apartado de Anexos: Figura 7.4 se observa las longitudes, cargas hidráulicas y accesorios que posee cada parte del modelo físico (tanque, nodos y tuberías). A continuación para la similitud cinemática se emplearon otras escalas, se tomó en cuenta el diámetro interior de las tuberías, en la Tabla 3.12 se puede observar las escalas de longitudes, velocidades y caudales que tendrá el modelo.

Tabla 3.12: Escala cinemática para el Tramo de la red. (Autores)

Tubería	Parámetro	Símbolo	Escala
200mm	Longitud	L	$L_{r1} = 14.20$
	Velocidad	Ve	$\frac{1}{L_{r1}} = 0.070$
	Caudal	Q	$L_{r1} = 14.20$
160mm	Longitud	L	$L_{r2} = 11.35$
	Velocidad	Ve	$\frac{1}{L_{r2}} = 0.088$
	Caudal	Q	$L_{r2} = 11.35$
110mm	Longitud	L	$L_{r3} = 7.82$
	Velocidad	Ve	$\frac{1}{L_{r3}} = 0.128$
	Caudal	Q	$L_{r3} = 7.82$
63mm	Longitud	L	$L_{r4} = 4.48$
	Velocidad	Ve	$\frac{1}{L_{r4}} = 0.223$
	Caudal	Q	$L_{r4} = 4.48$

Del mismo modo, a partir del factor de escala longitudinal de la similitud cinemática, se obtuvo la semejanza dinámica, donde su parámetro principal es la presión, debido que en la Tabla 2.1 las recomendaciones para el cálculo de parámetros dinámicos no son congruentes, más adelante se propuso una escala de calibración.

3.3.2. Presupuesto para la construcción del modelo físico.

Se determinó el presupuesto para la construcción del modelo físico de acuerdo con la escala longitudinal del diseño, con base en la Tabla 3.11 se determinó que la longitud de todo el sistema de abastecimiento será de 8,6 metros. Del mismo

modo se diseño un plano del modelo (ver Anexos: Figura 7.4), en el cual se puede observar la longitud que poseerá cada sección de la red conjuntamente con el nombre y cantidad de accesorios que se emplearán, obteniendo un total de 20 accesorios. Para la representación el tanque del prototipo se utilizará una caneca y un tanque de 250 litros, donde la caneca será lo que simule al tanque de abastecimiento y el tanque abastecerá a la caneca y a las redes de tuberías con el objetivo de que a la salida del tanque este otorgue un caudal y carga hidráulica constante. Para los soportes del tanque, la caneca y la red se hará uso de los siguientes materiales: troncos, pallet, tiras, tablero, bisagras y abrazaderas. Además, para la obtención de las presiones del modelo físico se construyó un aparato de medición (piezómetro), cuyos componentes son: plancha (6mm), manguera transparente (1/2”), adaptadores (1/2”) y abrazaderas.

Tabla 3.13: *Presupuesto de materiales del sistema. (Autores)*

Materiales	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio Total
Sistema				
Tanque	U	60.71	1	60.71
Caneca	U	3	1	3
Accesorio de conexión (Tanque)	U	4	1	4
Accesorio de conexión (Caneca)	U	4	1	4
Tuberias roscable PVC (1/2”)	U	8.04	2	16.08
Codo pegable 90° (1/2”)	U	0.45	6	2.7
Codo pegable 45° (1/2”)	U	0.4	9	3.6
Tee roscable (1/2”)	U	0.75	3	2.25
Cruz roscable (1/2”)	U	3.34	3	10.02
Adaptador (1/2”)	U	0.3	4	1.2
Tapón hembra (1/2”)	U	0.6	6	3.6
Tapón macho (1/2”)	U	0.3	8	2.4
Neplo (1/2”)	U	0.5	4	2
Cemento CPVC	U	5.2	1	5.2
Polilimpia	U	3.39	1	3.39
Válvula de bola FV (1/2”)	U	4.5	1	4.5
Válvula de bola plastica (1/2”)	U	2.5	6	15
Válvula de compuerta metálicas (1/2”)	U	5	1	5
Teflón	U	1.07	4	4.28
Soportes				
Tira (2cmx4cm)	U	1.8	18	32.4
Tira (3cmx4cm)	U	2.5	2	5
Tronco	m	1	6	6
Tornillos (3/4”)	U	0.02	80	1.6
Tornillos (1 1/2”)	U	0.07	30	2.1
Clavos	U	0.03	30	0.9
Bisagras	U	0.33	12	3.96
Alambre de amarre	Kg	2.2	1	2.2
Abrazaderas	U	0.11	12	1.32
Pallet	U	3	1	3
Aparato de medición (Piezómetro)				
Plancha (6mm)	U	18	1	18
Tira (3cmx4cm)	U	2.5	1	2.5
Manguera transparente (1/2”)	m	0.45	9	4.05

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 3.13: (Continuación) *Presupuesto de materiales del sistema. (Autores)*

Materiales	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio Total
Abrazaderas Emt	U	0.11	6	0.66
Tornillos pequeños + Arandelas + Pernos	U	0.2	20	4
Pallet	U	3	1	3
Broca	U	0.75	3	2.25
Codo roscable 90° (1/2”)	U	0.55	2	1.1
Adaptador de manguera (1/2”)	U	1.7	6	10.2
Sticker (regla)	U	6	1	6
Neplo (1/2”)	U	0.5	4	2
Tornillos (2”)	U	0.1	40	4
Total				\$ 269.17

(Fin de la tabla)

3.3.3. Construcción del modelo físico

Construcción del sistema

Para la construcción del modelo se cortó la tubería con sus longitudes correspondiente para cada tramo, se codificó cada una de ellas para mayor facilidad en su colocación, el sistema fue armado en cuatro secciones, se colocó los accesorios correspondientes en cada punto y se verificó que no existieran fugas. Se instaló el tanque y la caneca junto al sistema con sus respectivos accesorios (codo de 90°, adaptadores pegables-roscables de 1/2” y válvulas de control) (ver Anexos 7.7, 7.10 y 7.11).

Con el propósito de elevar el tanque y la caneca, se construyeron mesas de madera, cuyas elevaciones fueron 1.50m y 1.40m respectivamente, ambos soportes fueron enterrados aproximadamente unos 30 centímetros. Con el objetivo de restringir el movimiento en las tuberías, se construyeron tripies (ver Anexos 7.5, 7.12 y 7.6) y con la ayuda de un nivel topográfico, se colocaron estacas como puntos de control, los cuales fueron necesarios para obtener las cotas de cada nodo según el diseño del modelo como se muestra en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14: *Elevación de nodos del modelo físico. (Autores)*

Estación	Punto	Lec.	Altura	Lec.	Cota	Nivel	Nivel	Cota
	Visión	Atrás	Instr.	Frente		Equipo	Requerido	Final
1	BN1	1.235	101.235		100.000			
	T1			1.322	99.913	1.14	1.14	101.053
	N2			1.295	99.940	1.11	1.083	101.023
	N3			1.399	99.836	0.959	1.036	100.872
	N4			1.400	99.835	0.918	0.996	100.831
	N5			1.441	99.794	0.868	0.987	100.781
	N12			1.487	99.748	0.794	0.959	100.707

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 3.14: (Continuación) *Elevación de nodos del modelo físico. (Autores)*

Estación	Punto Visión	Lec. Atrás	Altura Instr.	Lec. Frente	Cota	Nivel Equipo	Nivel Requerido	Cota Final
	N13			1.525	99.710	0.738	0.941	100.651
	N14			1.579	99.656	0.599	0.856	100.512
	N15			0.000		0.585		
	N16			1.589	99.646	0.575	0.842	100.488
	N60			1.647	99.588	0.583	0.908	100.496
	N314			1.720	99.515	0.47	0.868	100.383
2	BN1	1.299	101.299		100			
	Piezómetro			1.213	100.086		0,155	100.241

(Fin de la tabla)

Construcción del piezómetro

A partir de la Figura 7.4, la cual se encuentra en la sección de Anexos, se determinó que la presión más alta en el sistema es de 0.608 m.c.a., por lo tanto, fue necesario construir un instrumento de medición (piezómetro), el cual pueda representar las presiones menores a un metro, se empleó una plancha cuyo objetivo fue sostener mangueras transparentes verticalmente junto a un sticker impreso (regla métrica) destinado para la medición de presiones. Para mantener la estabilidad vertical del instrumento, se hizo uso de de soportes de madera permitiendo así la restricción del movimiento del piezómetro (Anexo: Figura 7.15).

3.4. Calibración del modelo físico.

En el modelo, al ser de régimen dinámico, se comprobó que no existiera fugas de agua en el tanque, la caneca y en el sistema para evitar resultados erróneos en las mediciones de presiones. El proceso de calibración comprende varios pasos previos a la toma de datos, el primero consta en controlar la carga hidráulica de la caneca, pues debe permanecer constante al momento de realizar las simulaciones con el propósito de tener una representación correcta del prototipo, para ello se empleó una válvula de compuerta en el tanque (ver Anexo: Figura 7.10). Simultáneamente, a partir de la Tabla 3.17 en los nodos 188, 6, 39, 17,61, 314 se midió los caudales correspondientes mediante un recipiente calibrado y un cronómetro, en la Figura 3.3 se puede visualizar la curva de calibración del recipiente.

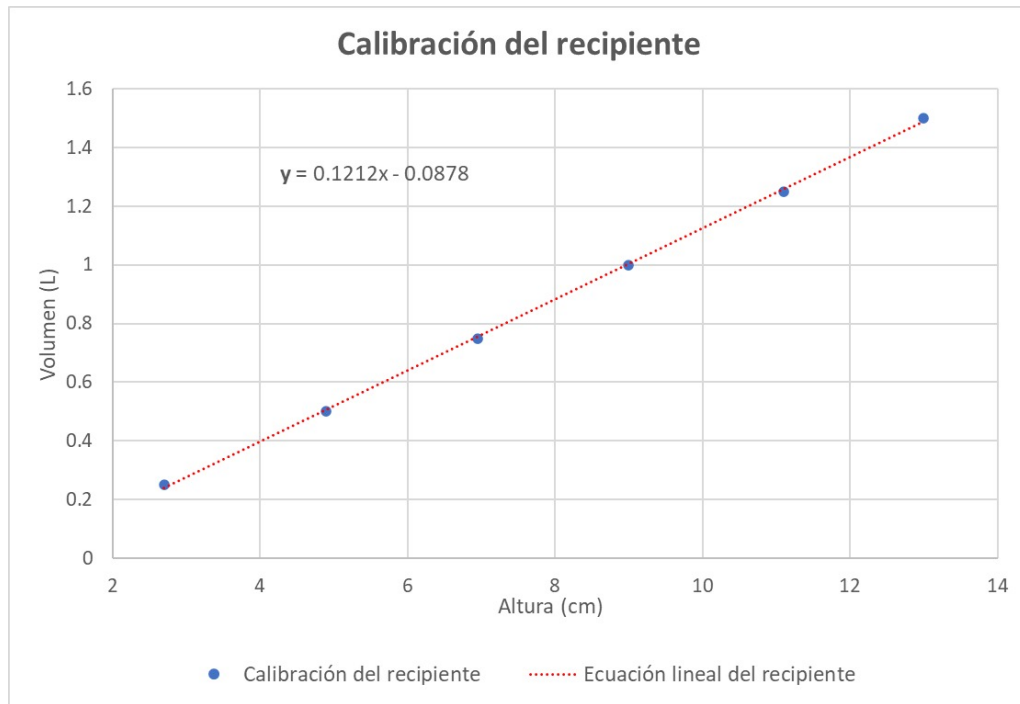


Figura 3.3: Calibración del recipiente. (Autores)

A continuación, se conectó el piezómetro al sistema en los puntos de control correspondientes (Nodo 4, Nodo 13, Nodo 16 y Nodo 60), debido a que el instrumento solo consta de dos puntos de medición, se conectaban alternadamente en los nodos propuestos al momento de realizar las simulaciones. Finalmente se extraía el aire del sistema, este se realizaba cerrando por completo el nodo 314 ya que representa el punto más bajo del sistema, a partir de ello se abre el suministro de agua (caneca) y con golpeteos se recorrió la red desde el punto más alto hasta el más bajo. Una vez comprobado que no existiera aire en el sistema ni en el piezómetro, se empezó la toma de datos en el modelo.

En la obtención de datos de presiones se realizaron simulaciones, las cuales comprendían periodos de tiempo de 20 y 40 minutos, para ello se tomaron lecturas cada 1 y 2 minutos respectivamente, el operador del sistema (encargado de verificar que la carga hidráulica de la caneca permaneciera constante) y el recolector de datos (responsable de anotar las presiones en los nodos seleccionados) se intercalaban su trabajo en cada simulación para así obtener resultados variados que representen el comportamiento real del sistema.

Se calibró el modelo realizando simulaciones, se presentaron los siguientes datos (ver Anexos: Tablas 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6), en la Tabla 3.15 se calculó las presiones en cada nodo seleccionado como punto de control, estas se adquirieron restando los datos de cada simulación con la cota respectiva.

Tabla 3.15: *Resultados de presiones para la calibración del modelo físico. (Autores)*

Calibración				
Cotas (cm)	59	41	24.7	25.5
Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
1	31.1	44.2	60.3	59.3
2	31.1	44.2	60.3	59.4
3	31.1	44.1	60.3	59.3
4	31.2	44.2	60.3	59.4
5	31	44.1	60.2	59.2
6	31.1	44.1	60.4	59.3
7	31.1	44	60.2	59.2
8	31	44	60.1	59.2
9	31.1	44.1	60.3	59.3
10	31.2	44.1	60.3	59.4
11	31.2	44.2	60.4	59.4
12	31	44.1	60.3	59.3
13	31	44	60.2	59.2
14	31	44.1	60.3	59.2
15	31.1	44.1	60.3	59.3
16	31	44	60.2	59.2
17	31	44.1	60.3	59.3
18	31.1	44.1	60.1	59.3
19	31.1	44.1	60.3	59.3
20	31	44	60.1	59.1
21	30	43	59.2	58.2
22	30.1	43.1	59.3	58.4
23	30.1	43.1	59.3	58.3
24	30.2	43.1	59.4	58.3
25	30.3	43.3	59.5	58.5
26	30.2	43.2	59.4	58.4
27	30.1	43.2	59.4	58.4
28	30.2	43.2	59.4	58.4
29	30.2	43.2	59.4	58.4
30	30.3	43.3	59.4	58.5
31	30.1	43.1	59.3	58.3
32	30.2	43.1	59.4	58.3
33	30.1	43.1	59.3	58.3
34	30.1	43.1	59.3	58.3
35	30.2	43.2	59.4	58.4
36	30.2	43.1	59.3	58.4
37	30.1	43.1	59.3	58.3
38	30.1	43.1	59.3	58.3
39	30	43	59.2	58.2

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 3.15: (Continuación) *Resultados de presiones para la calibración del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
40	30	43	59.2	58.2
41	30.1	43.4	59.6	58.5
42	30.4	43.4	59.6	58.6
43	30.2	43.4	59.5	58.5
44	30.4	43.4	59.6	58.6
45	30.4	43.5	59.7	58.7
46	30.5	43.5	59.7	58.7
47	30.4	43.4	59.6	58.6
48	30.5	43.7	59.8	58.8
49	30.5	43.5	59.7	58.7
50	30.4	43.5	59.7	58.7
51	30.4	43.4	59.6	58.6
52	30.4	43.5	59.7	58.6
53	30.4	43.4	59.6	58.6
54	30.4	43.3	59.5	58.6
55	30.4	43.4	59.6	58.6
56	30.4	43.4	59.6	58.6
57	30.4	43.5	59.7	58.7
58	30.5	43.5	59.7	58.7
59	30.4	43.4	59.6	58.6
60	30.3	43.4	59.6	58.7
61	30.4	43.6	59.8	58.8
62	30.5	43.6	59.9	58.9
63	30.5	43.5	59.7	58.7
64	30.5	43.6	59.8	58.7
65	30.6	43.6	59.8	58.8
66	30.5	43.5	59.7	58.7
67	30.7	43.8	60	59
68	30.5	43.5	59.7	58.7
69	30.5	43.5	59.7	58.8
70	30.5	43.5	59.7	58.7
71	30.5	43.5	59.7	58.7
72	30.6	43.6	59.9	58.8
73	30.5	43.5	59.7	58.7
74	30.5	43.5	59.7	58.7
75	30.4	43.6	59.7	58.7
76	30.4	43.4	59.6	58.6
77	30.4	43.4	59.6	58.6
78	30.5	43.5	59.7	58.7
79	30.5	43.5	59.7	58.7
80	30.5	43.6	59.7	58.7
81	29.3	42.3	58.5	57.5

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 3.15: (Continuación) *Resultados de presiones para la calibración del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
82	29.4	42.5	58.6	57.6
83	29.5	42.5	58.6	57.7
84	29.5	42.6	58.8	57.8
85	29.4	42.5	58.6	57.6
86	29.3	42.3	58.5	57.5
87	29.3	42.3	58.5	57.5
88	29.3	42.4	58.6	57.6
89	29.4	42.4	58.6	57.6
90	29.4	42.4	58.6	57.6
91	29.5	42.5	58.6	57.7
92	29.4	42.4	58.6	57.6
93	29.4	42.5	58.6	57.6
94	29.3	42.3	58.5	57.5
95	29.3	42.3	58.5	57.5
96	29.3	42.3	58.5	57.5
97	29.4	42.4	58.6	57.6
98	29.4	42.4	58.6	57.6
99	29.5	42.6	58.8	57.7
100	29.4	42.5	58.6	57.6
Promedio	30.3	43.3	59.5	58.5

(Fin de la tabla)

Como se mencionó anteriormente, la escala de presiones en la Tabla 2.1 no poseen relación con respecto a los datos obtenidos en campo, se propuso una escala de calibración (ver ecuación 3.4), el cual cumple con el funcionamiento del modelo físico para la representación del prototipo, en la Tabla 3.16 se puede visualizar la escala de presión para cada diámetro de tubería.

$$P_e = \frac{P_p}{P_m} = \frac{1}{x * L_r^y} \quad (3.4)$$

Donde x representa el factor multiplicativo del L_r el cual es 0,00747 y y el valor exponencial de L_r el cual es 0,04244. Estos valores se calcularon a partir del factor de escala correspondientes para cada diámetro de la red, con la relación prototipo/modelo.

Tabla 3.16: *Escala dinámica para el tramo de la red. (Autores)*

Tubería	Parámetro	Símbolo	Escala
200mm	Presión	P	$\frac{1}{0,00747L_{r1}^{0,04244}} = 119.612$
160mm	Presión	P	$\frac{1}{0,00747L_{r2}^{0,04244}} = 120.753$
110mm	Presión	P	$\frac{1}{0,00747L_{r3}^{0,04244}} = 122.682$
63mm	Presión	P	$\frac{1}{0,00747L_{r4}^{0,04244}} = 125.618$

A partir de la escala de semejanza y mediante el factor de relación para cada parámetro (cinemático y dinámico), se encontró los valores de velocidades, caudales y presiones que posee el modelo físico (ver Tabla 3.17).

Tabla 3.17: *Velocidades, caudales y presiones del modelo físico calibrado. (Autores)*

Modelo Físico Calibrado				
Tramo	Velocidades (m/s)	Nodo	Caudales (l/s)	Presiones (cm.c.a.)
Tanque - 2	24.71	Tanque	-	-
2-3	24.57	2	0.0077	5.4
3-4	24.57	3	0.0081	28.1
4-5	24.43	4	0.0046	34.1
5-12	21.29	5	0.0050	41.4
12-13	21.14	12	0.0023	30.0
13-14	21.14	13	0.0081	38.4
14-15	21.14	14	0.0035	53.0
15-16	15.43	15	0.0015	60.8
16-60	11.80	16	0.0011	58.9
60-314	1.97	60	0.0014	58.5
4-188	0.23	314	0.0011	60.5
5-6	3.14	188	0.0141	28.8
15-39	7.05	6	0.0104	17.8
16-17	8.86	39	0.0077	56.0
60-61	10.70	17	0.0004	60.5
		61	0.0028	52.8

Se comparó las presiones del modelo basado en las leyes de semejanza (ver Tabla 3.17) respecto al modelo físico construido obtenidas en las simulaciones (ver Tabla 3.15) obteniendo la variación de presiones para cada punto de control (ver Tabla 3.18). Además, en la Figura 3.4 se observa el comportamiento de presiones que presenta cada nodo con su respectivo porcentaje de variación, donde los nodos 16 y 60 son los que poseen menor variación.

Tabla 3.18: Variación de presiones del modelo físico leyes de semejanza y el modelo físico calibrado. (Autores)

Calibración				
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
Presiones del modelo basado en las leyes de semejanza (cm.c.a.)	34.1	38.4	58.9	58.5
Presiones del modelo físico construido (cm.c.a.)	30.3	43.3	59.5	58.5
Variación de presiones	-3.8	4.9	0.7	0
Porcentaje de variación	12.5 %	-11.3 %	-1.1 %	0 %

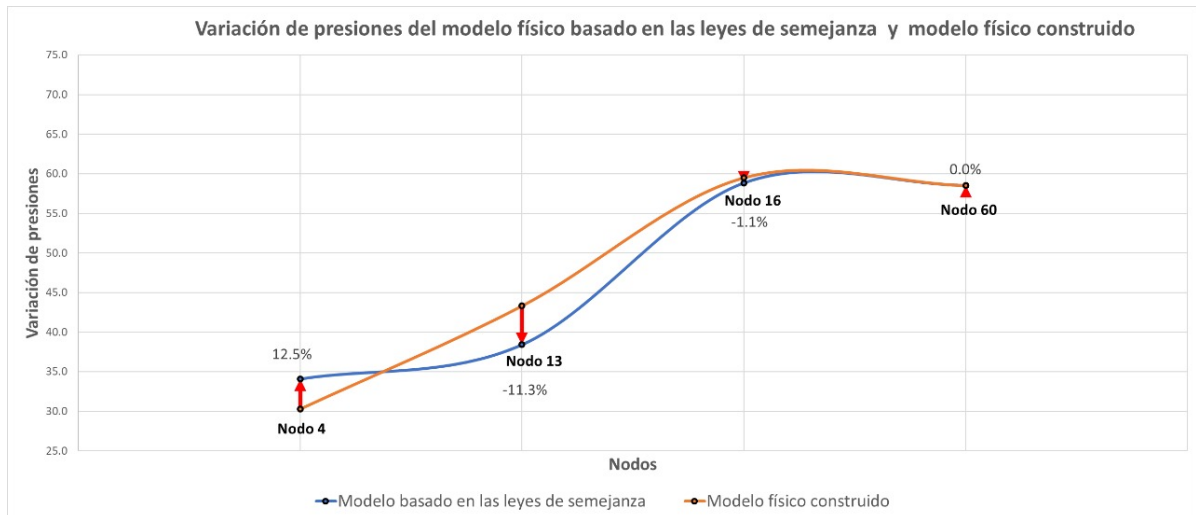


Figura 3.4: Variación de presiones del modelo físico basado en las leyes de semejanza respecto al modelo físico construido. (Autores)

A partir de la Tabla 3.19 se calcularon las presiones correspondientes en cada nodo del modelo, haciendo uso del promedio del error porcentual en el análisis, en la Tabla 3.20 se presentan los valores del prototipo mediante el factor de escala dinámica con el propósito de conocer el funcionamiento real del sistema.

Tabla 3.19: Porcentaje de variación de las presiones del modelo Físico de leyes de semejanza con respecto al construido. (Autores)

Nodo	Presiones (cm.c.a.)		
	Modelo Físico Leyes de semejanza	Modelo Físico construido	Porcentaje de error (%)
4	34.1	30.3	11.13
13	38.4	43.3	12.76
16	58.9	59.5	1.11
60	58.5	58.5	0
Promedio			6.26

Tabla 3.20: *Valores de presiones del prototipo respecto al error porcentual. (Autores)*

Presiones del prototipo calibrado		
	Modelo Físico	Prototipo
Nodo	Presión (cm.c.a.)	Presión (m.c.a.)
Tanque	–	–
2	5.4	6.46
3	28.1	33.61
4	30.3	36.24
5	41.4	49.52
12	30.0	35.88
13	43.3	51.79
14	53.0	63.39
15	60.8	72.72
16	59.5	71.17
60	58.5	71.77
314	60.5	76.00
188	28.8	35.33
6	17.8	21.29
39	56.0	67.62
17	60.5	72.37
61	52.8	64.78

Para verificar la calibración del modelo se tomó en cuenta las recomendaciones mencionadas en la Tabla 2.2, las cuales indican que el 85 % de las presiones obtenidas en campo no deben diferir al $\pm 5\%$, el 95 % las presiones no deben diferir al $\pm 7.5\%$ y el 100 % de los datos no deben diferir al $\pm 15\%$. En la Figura 3.5 se pudo observar el comportamiento de las presiones del prototipo, modelo calibrado y modelo matemático para cada nodo, interpretando que el modelo físico calibrado es aquel que comparte mayor relación respecto a las presiones del prototipo.

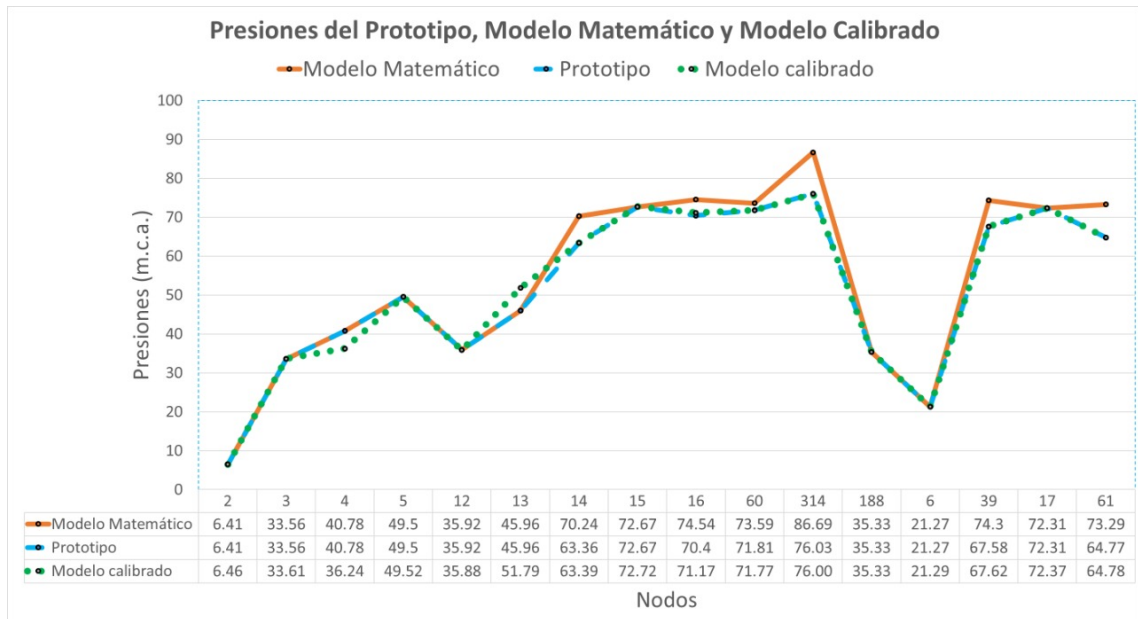


Figura 3.5: Presiones del prototipo, modelo matemático y modelo calibrado. (Autores)

En la Figura 3.6 se observa el porcentaje de variación de presiones del modelo físico calibrado respecto al prototipo, en la mayoría de nodos esta es menor al 1%, lo cual indica una correcta calibración debido a que sus presiones son similares, sin embargo, en los nodos donde la variación es mayor se carecía de puntos de medición en campo.

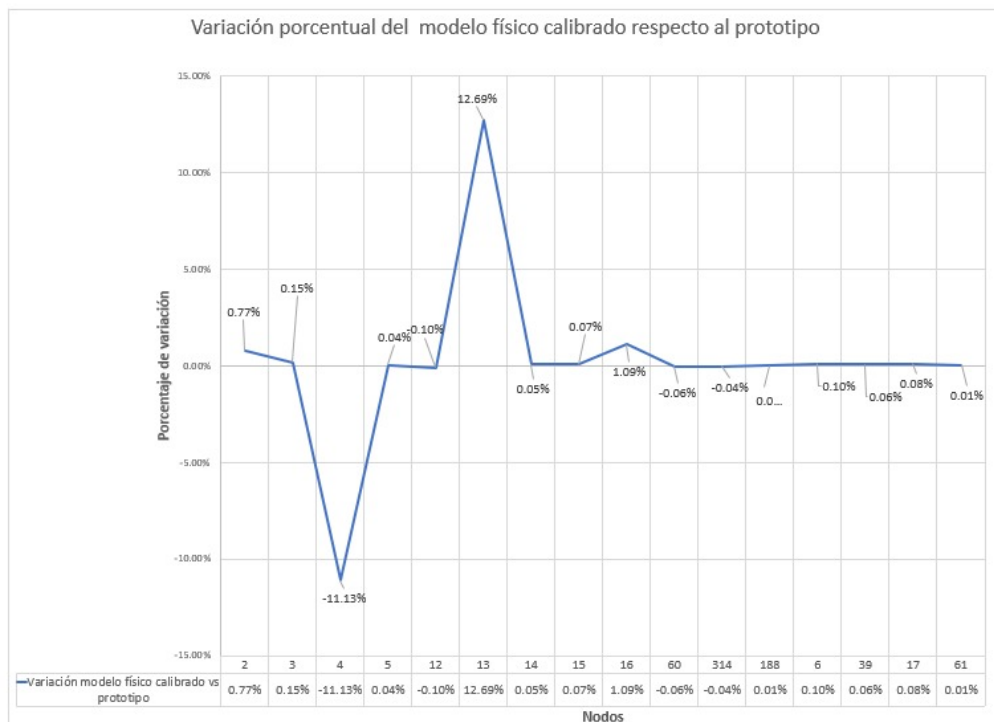


Figura 3.6: Variación porcentual de presiones del modelo físico calibrado respecto al prototipo. (Autores)

En la Figura 3.7 se observa el porcentaje de variación de presiones del modelo matemático respecto al prototipo, en los nodos cercanos al tanque esta variación es nula, debido a que en esos puntos no se obtuvieron medición en campo, por lo tanto, se hizo uso de los datos empleados en el diseño. Además, en los nodos restantes la variación de mayor, lo que indica que ciertos parámetros constructivos no pueden ser representados en un modelo matemático.

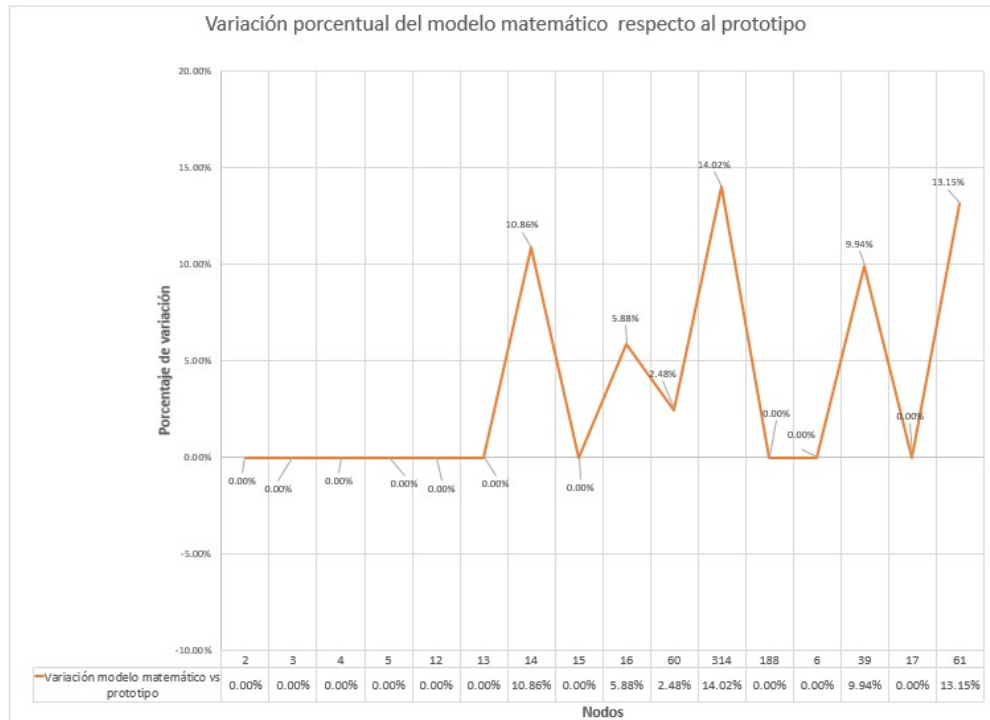


Figura 3.7: Variación porcentual de presiones del modelo matemático respecto al prototipo. (Autores)

En la Figura 3.8 se observa el porcentaje de variación de presiones del modelo físico calibrado respecto al modelo matemático, existe grande variaciones en sus presiones debido a que en el modelo físico su comportamiento es similar al del prototipo. Además, se pudo comparar los nodos iniciales de la red, debido a que se cuenta con datos suficientes.

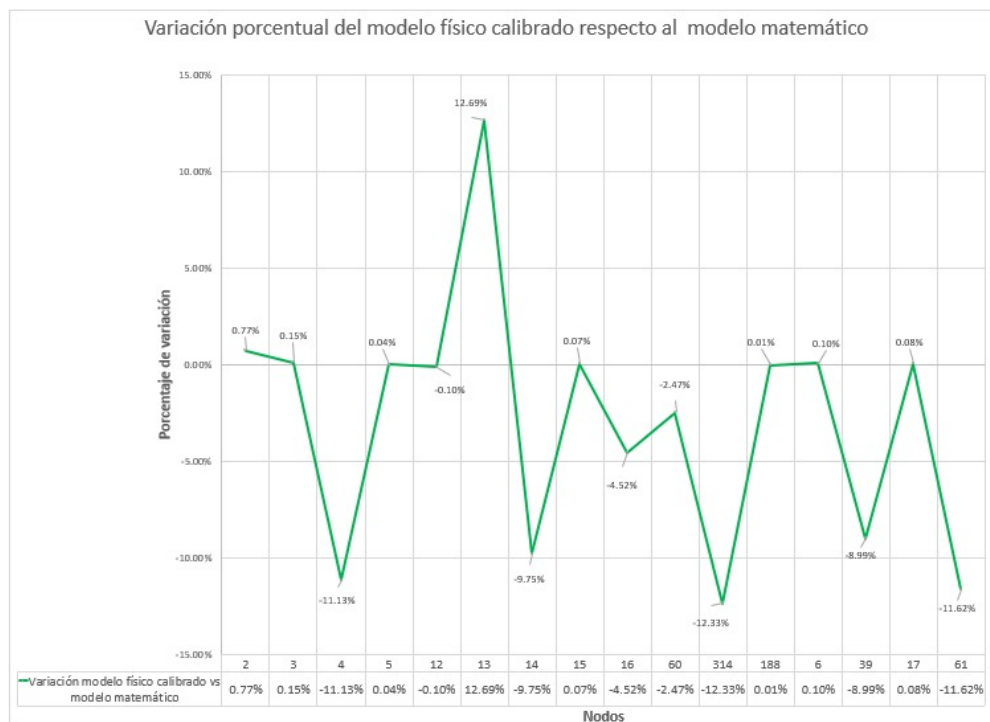


Figura 3.8: Variación porcentual de presiones del modelo calibrado respecto al modelo matemático. (Autores)

3.5. Escenarios hidráulicos en el modelo físico.

Una vez calibrado el sistema, se plantearon tres escenarios, en los cuales se puede observar el comportamiento del modelo, este representaría el funcionamiento del prototipo bajo diferentes situaciones.

Escenario 1: Reduce la carga hidráulica (CH) del suministro a la mitad, es decir, que el tanque en vez de poseer 14.8cm, este sería de 7.4cm y a partir de válvulas de control se corrigieron los caudales, de tal manera que estos sean los mismos empleados en la calibración (ver Figura 3.9).

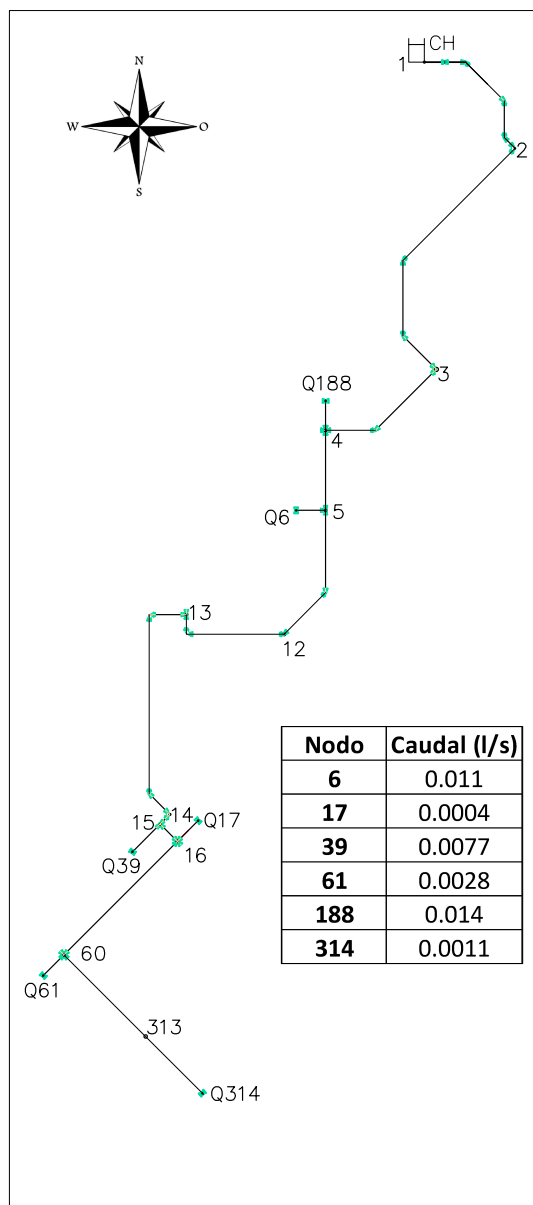


Figura 3.9: Escenario 1 del modelo físico. (Autores)

Escenario 2: Este emplea la misma carga hidráulica en el tanque (14.8cm), sin embargo, las demandas de los puntos de salida 188 y 314 serán nulas, los demás nodos continuarán con los mismos caudales empleados para la calibración por medio del uso de válvulas de control (ver Figura 3.10).

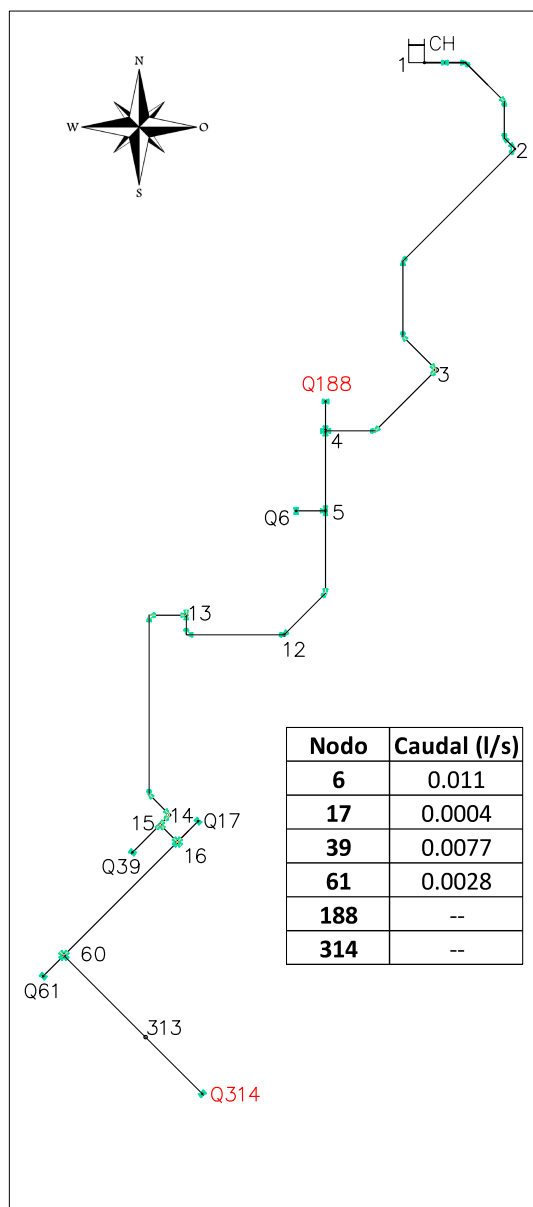


Figura 3.10: Escenario 2 del modelo físico. (Autores)

Escenario 3: Reducir a la mitad los caudales de los nodos 6 y 39, manteniendo la carga hidráulica (14.8cm) y a partir del uso de válvulas de control, se mantendrán los mismos caudales empleados para la calibración en cada nodo (ver Figura 3.11).

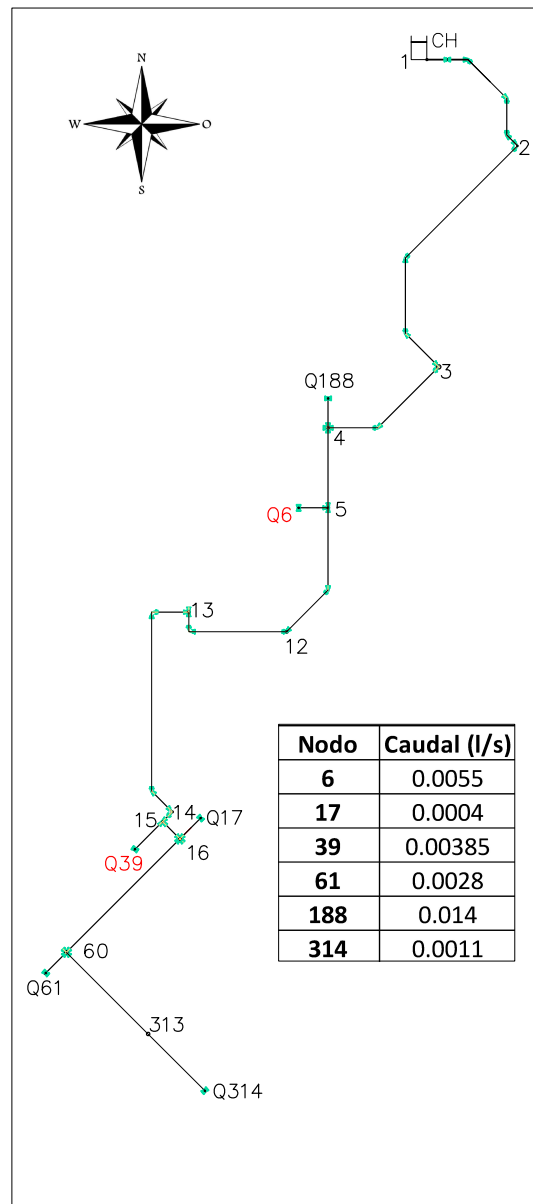


Figura 3.11: Escenario 3 del modelo físico. (Autores)

Sección 4

Análisis de Resultados

4.1. Escenario 1 del modelo físico

Como se definió en el escenario uno la carga hidráulica del suministro se redujo a la mitad, manteniendo los caudales de calibración, en el apartado de Anexos: Tabla 7.12 se puede observar las presiones de los nodos obtenidas para cada simulación, estas se consiguen a partir de los datos en campo restando su respectiva cota (ver Anexos: Tablas 7.7, 7.8, 7.9, 7.10 y 7.11). En la Figura 4.1 se puede apreciar los datos obtenidos en campo para el escenario uno, en donde los promedios (representados por un “x”) se encuentran entre el 50% de las presiones obtenidas. El nodo 13 no presenta puntos de datos únicos, ya que sus valores máximos y mínimos son los extremos de la caja y bigotes.

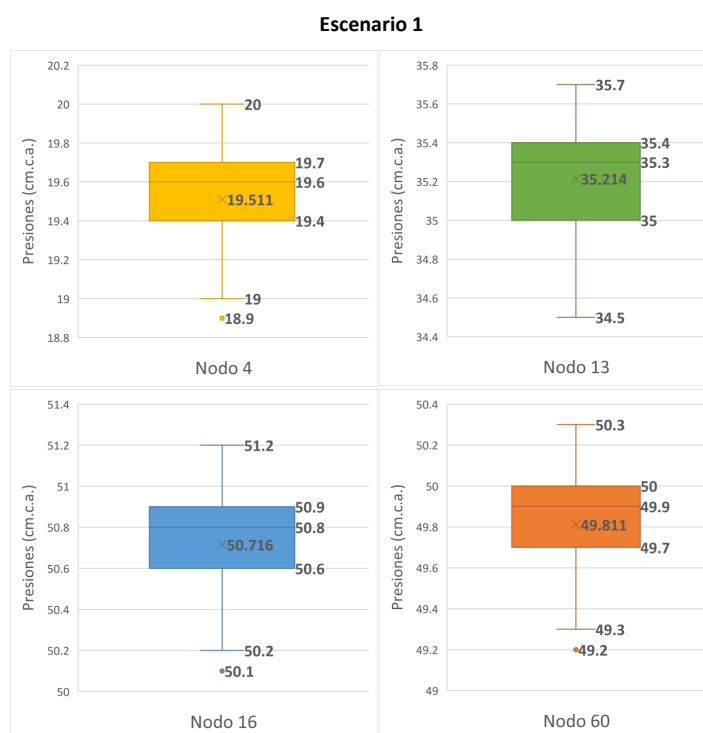


Figura 4.1: Presiones del escenario 1 de cada nodo. (Autores)

En la Figura 4.1 se expresan las presiones máximas y mínimas que puede alcanzar cada punto de control en el modelo mediante las simulaciones realizadas y se llevó a cabo una comparación de las presiones calculadas en el escenario uno respecto a las presiones del modelo físico calibrado (ver Tabla 4.1), estos datos se obtuvieron a partir de la Tabla 7.12 la cual se encuentra en el apartado de Anexos. En la Figura 4.2 se observa el comportamiento de presiones que presenta cada nodo con su respectivo porcentaje de variación.

Tabla 4.1: Variación de presiones del escenario 1 y el modelo físico calibrado. (Autores)

Escenario 1				
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
Presiones promedio del escenario 1 (cm.c.a.)	19.5	35.2	50.7	49.8
Presiones del modelo físico calibrado (cm.c.a.)	30.2	43.3	59.5	58.5
Variación de presiones	10.8	8.1	8.8	8.7
Porcentaje de variación	-35.6%	-18.7%	-14.8%	-14.9%

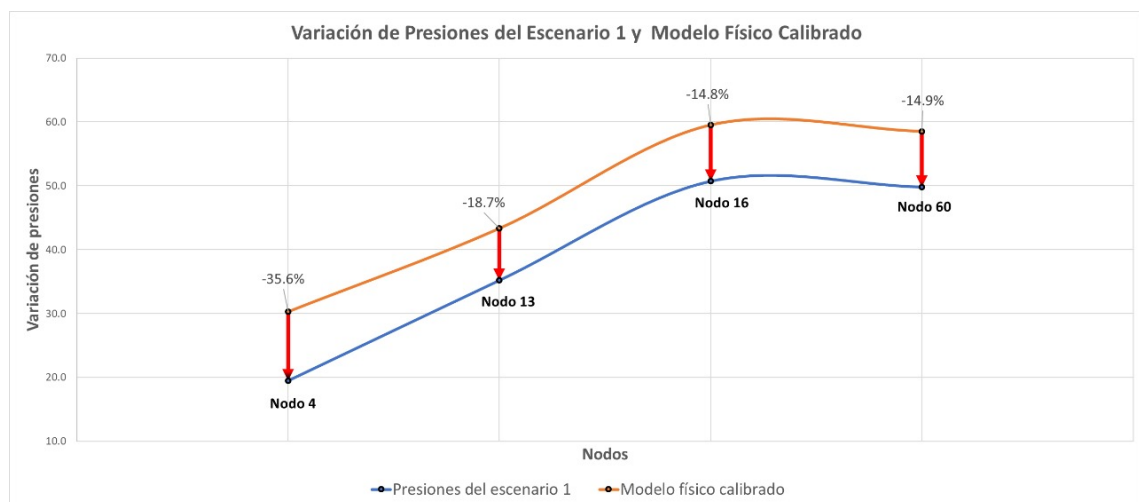


Figura 4.2: Variación porcentual de presiones del Escenario 1 respecto al modelo físico calibrado en cada nodo. (Autores)

Mediante las leyes de semejanza se calcularon las presiones del prototipo real empleando los datos obtenidos en el escenario uno (ver Figura 4.3). Se puede visualizar una reducción de presiones en el prototipo basado en el escenario uno, siendo las tuberías próximas al tanque las más afectadas, estimando que puede reducirse más del 36 % las presiones anteriores al nodo 4.

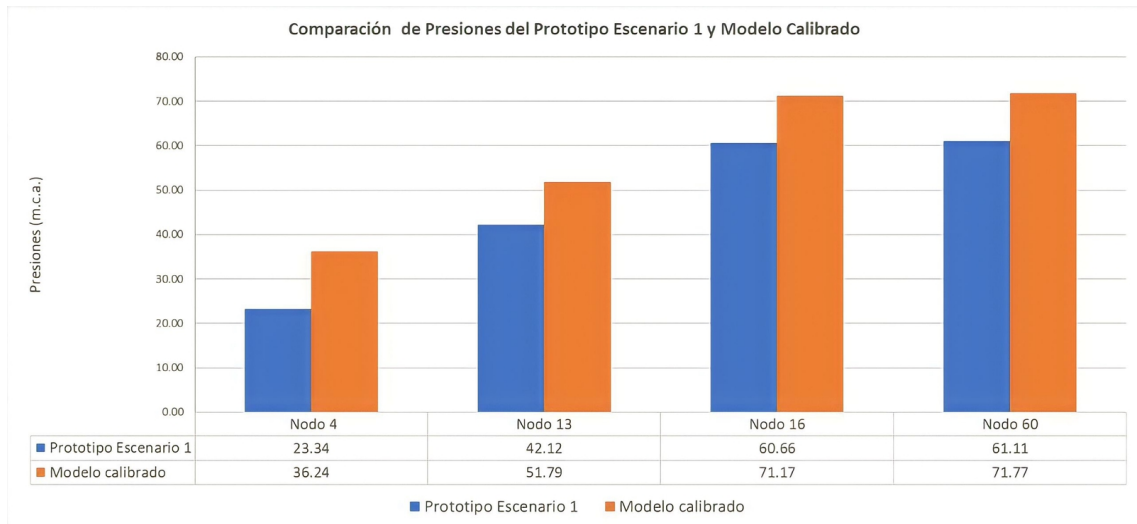


Figura 4.3: Comparación de presiones del prototipo escenario 1 respecto al modelo físico calibrado. (Autores)

En la Figura 4.4 se puede observar el comportamiento del prototipo basado en el escenario uno, el cual expresa que los nodos 16, 60 y 314 presentan presiones elevadas, sin embargo, estos no exceden a 70 m.c.a., cumpliendo con las recomendaciones de la norma de diseño. Además, se puede visualizar la variación porcentual que existe entre el escenario uno respecto al modelo físico calibrado y prototipo real.

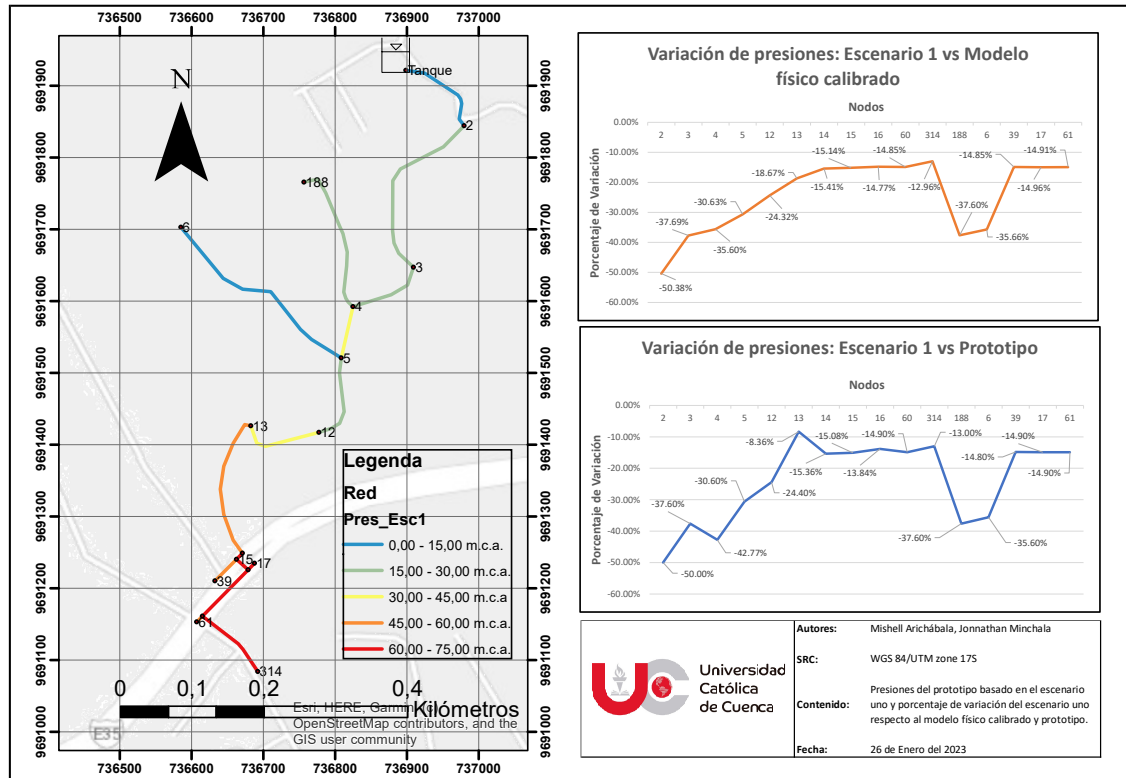


Figura 4.4: Presiones del prototipo basado en el escenario uno y porcentaje de variación respecto al modelo físico y prototipo. (Autores)

4.2. Escenario 2 del modelo físico

El escenario dos la carga hidráulica del suministro es la misma que en el modelo calibrado, sin embargo, las válvulas Q188 y Q314 están completamente cerradas, en el apartado de Anexos: Tabla 7.18 se puede observar las presiones de los nodos obtenidas para cada simulación, estas se consiguen a partir de los datos en campo restando su respectiva cota (ver Anexos: Tablas 7.13, 7.14, 7.15, 7.16 y 7.17). En la Figura 4.5 se puede apreciar los datos obtenidos en campo para el escenario dos, en donde los promedios (representados por un “x”) se encuentran entre el 50% de las presiones obtenidas. El nodo 4 no presenta puntos de datos únicos, ya que sus valores máximos y mínimos son los extremos de la caja y bigotes.

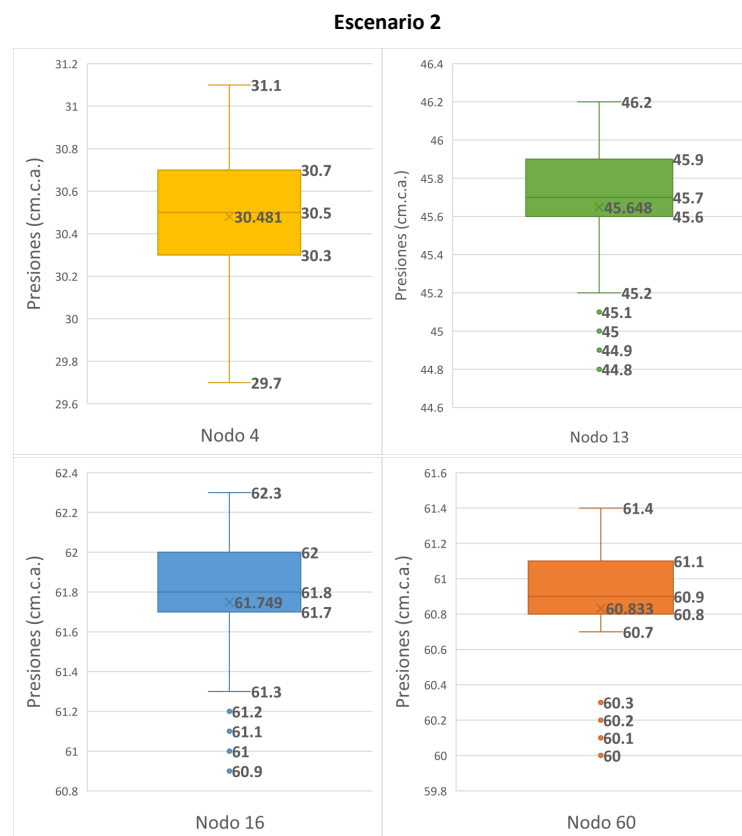


Figura 4.5: Presiones del escenario 2 de cada nodo. (Autores)

En la Figura 4.5 se expresan las presiones máximas y mínimas que puede alcanzar cada punto de control en el modelo mediante las simulaciones realizadas y se llevó a cabo una comparación de las presiones calculadas en el escenario dos respecto a las presiones del modelo físico calibrado (ver Tabla 4.2), estos datos se obtuvieron a partir de la Tabla 7.18 la cual se encuentra en el apartado de Anexos. En la Figura 4.6 se observa el comportamiento de presiones que presenta cada nodo con su respectivo porcentaje de variación, además, se visualiza que en el nodo 4 no existen cambios significativos debido a que su variación es menor al 1 %.

Tabla 4.2: Variación de presiones del escenario 2 y el modelo físico calibrado. (Autores)

Escenario 2				
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
Presiones promedio del escenario 2 (cm.c.a.)	30.5	45.6	61.7	60.8
Presiones del modelo físico calibrado (cm.c.a.)	30.3	43.3	59.5	58.5
Variación de presiones	-0.2	-2.3	-2.2	-2.3
Porcentaje de variación	0.60 %	5.36 %	3.76 %	3.96 %

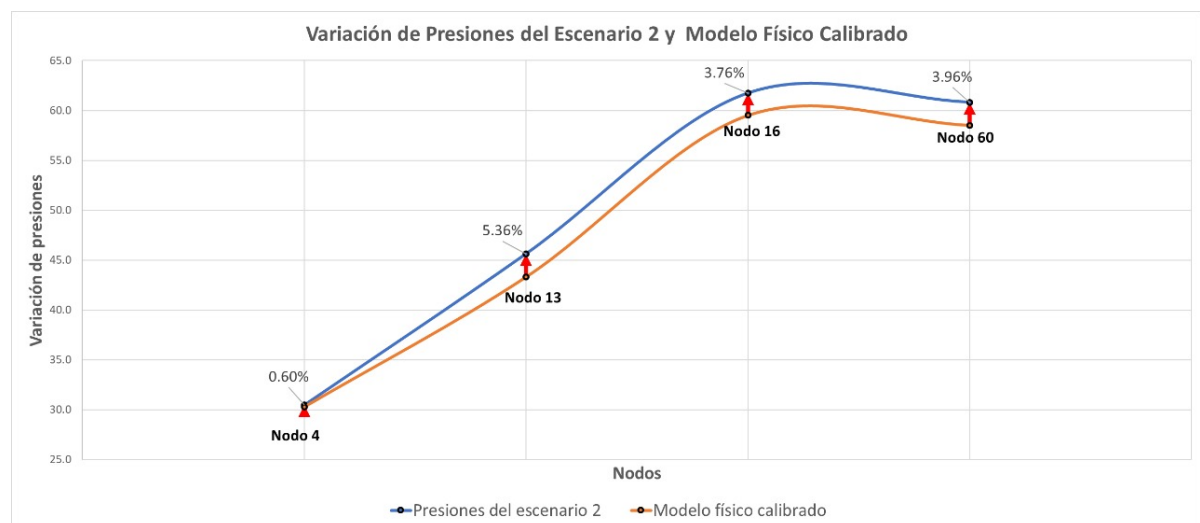


Figura 4.6: Variación porcentual de presiones del Escenario 2 respecto al modelo físico calibrado en cada nodo (Autores)

Del mismo modo que se emplearon las leyes de semejanza en el escenario uno, se calcularon las presiones del prototipo real empleando los datos obtenidos en el escenario dos (ver Figura 4.7). Se puede visualizar un aumento de presiones en el prototipo basado en el escenario dos, siendo las tuberías próximas al tanque las menos afectadas.

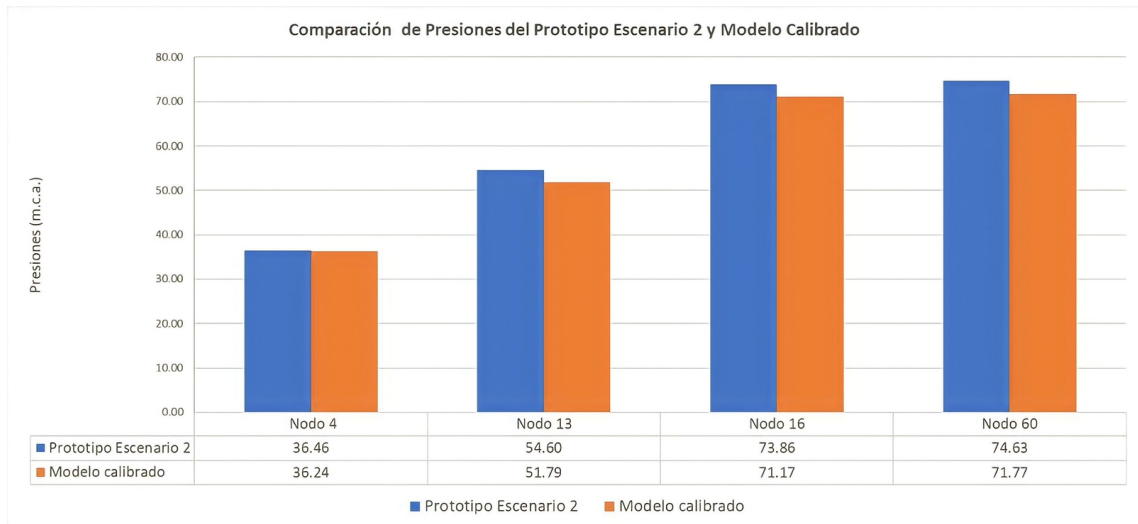


Figura 4.7: Comparación de presiones del prototipo escenario 2 respecto al modelo físico calibrado. (Autores)

En la Figura 4.8 se puede observar el comportamiento del prototipo basado en el escenario dos, el cual expresa que los nodos 15, 16, 17 y 60 presentan presiones elevadas, de manera que exceden los valores recomendados de la norma de diseño. Además, se puede visualizar la variación porcentual que existe entre el escenario dos respecto al modelo físico calibrado y prototipo real.

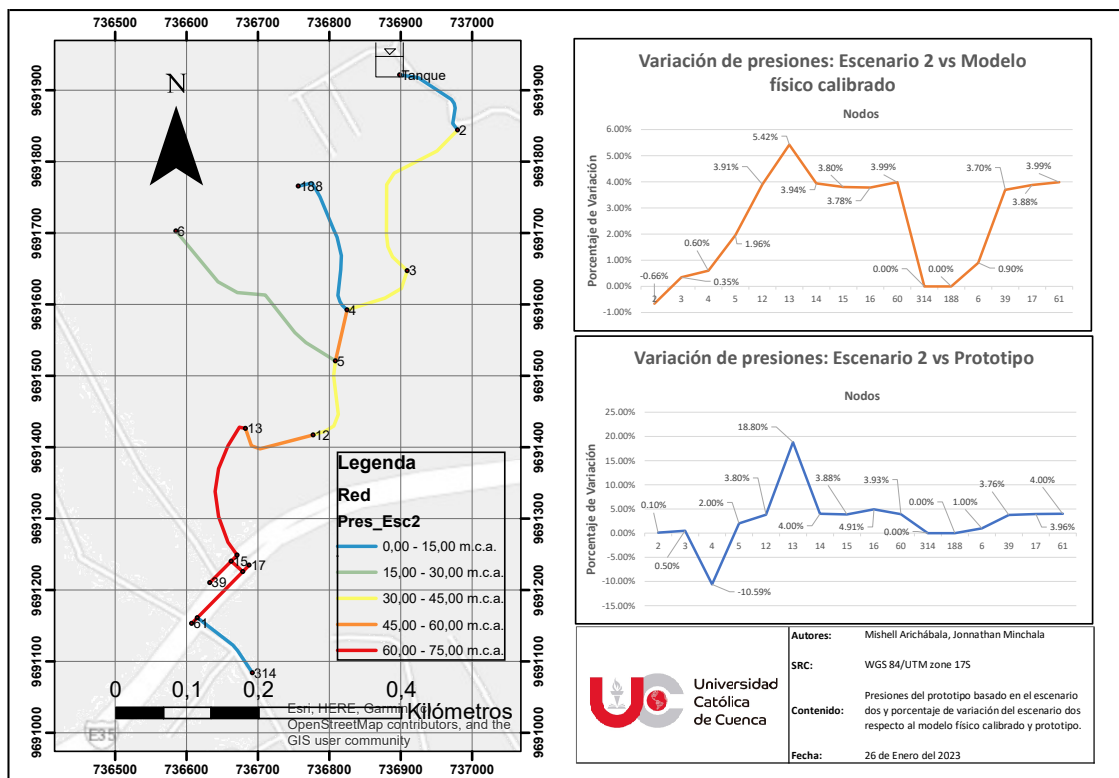


Figura 4.8: Presiones del prototipo basado en el escenario dos y porcentaje de variación respecto al modelo físico y prototipo. (Autores)

4.3. Escenario 3 del modelo físico

Para el escenario tres la carga hidráulica se mantiene con respecto al escenario dos, los caudales de las válvulas son las mismas que en el modelo calibrado a excepción de los nodos Q6 y Q39 los cuales se reducen a la mitad, en el apartado de Anexos: Tabla 7.24 se puede observar las presiones de los nodos obtenidas para cada simulación, estas se consiguen a partir de los datos en campo restando su respectiva cota (ver Anexos: Tablas 7.19, 7.20, 7.21, 7.22 y 7.23). En la Figura 4.9 se puede apreciar los datos obtenidos en campo para el escenario tres, en donde los promedios (representados por un “x”) se encuentran sobre el 50% de las presiones obtenidas. Ningún nodo presenta puntos de datos únicos, ya que sus valores máximos y mínimos son los extremos de la caja y bigotes.

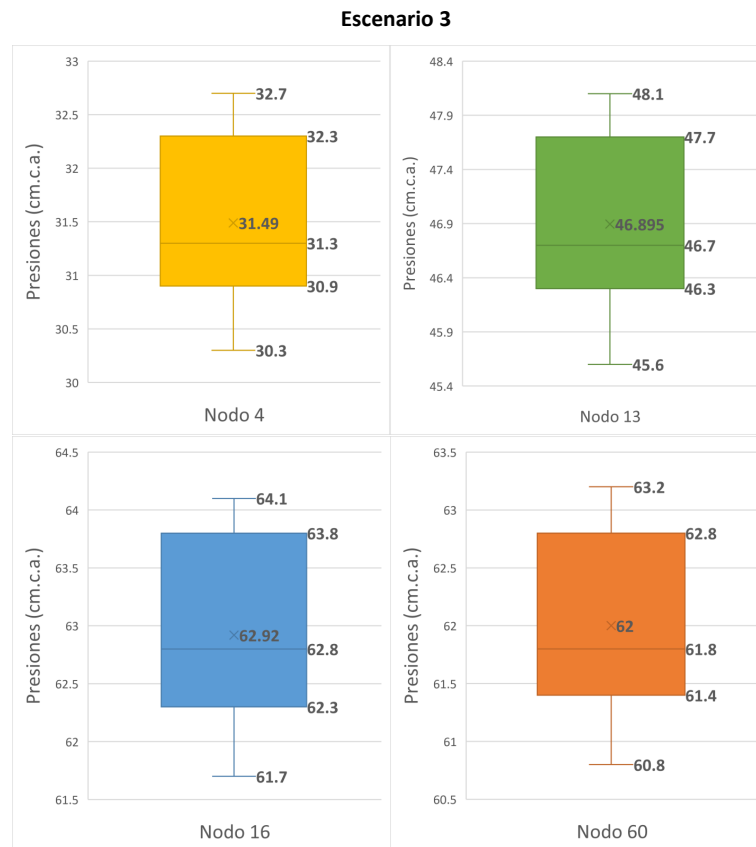


Figura 4.9: Presiones del escenario 3 de cada nodo. (Autores)

En la Figura 4.9 se expresan las presiones máximas y mínimas que puede alcanzar cada punto de control en el modelo mediante las simulaciones realizadas y se llevó a cabo una comparación de las presiones calculadas en el escenario uno respecto a las presiones del modelo físico calibrado (ver Tabla 4.3), estos datos se obtuvieron a partir de la Tabla 7.24 la cual se encuentra en el apartado de Anexos. En la

Figura 4.10 se observa el comportamiento de presiones que presenta cada nodo con su respectivo porcentaje de variación.

Tabla 4.3: Variación de presiones del escenario 3 y el modelo físico calibrado. (Autores)

Escenario 3				
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
Presiones promedio del escenario 3 (cm.c.a.)	31.5	46.9	62.9	62.0
Presiones del modelo físico calibrado (cm.c.a.)	30.3	43.3	59.5	58.5
Variación de presiones	-1.2	-3.6	-3.4	-3.5
Porcentaje de variación	3.93 %	8.24 %	5.73 %	5.95 %

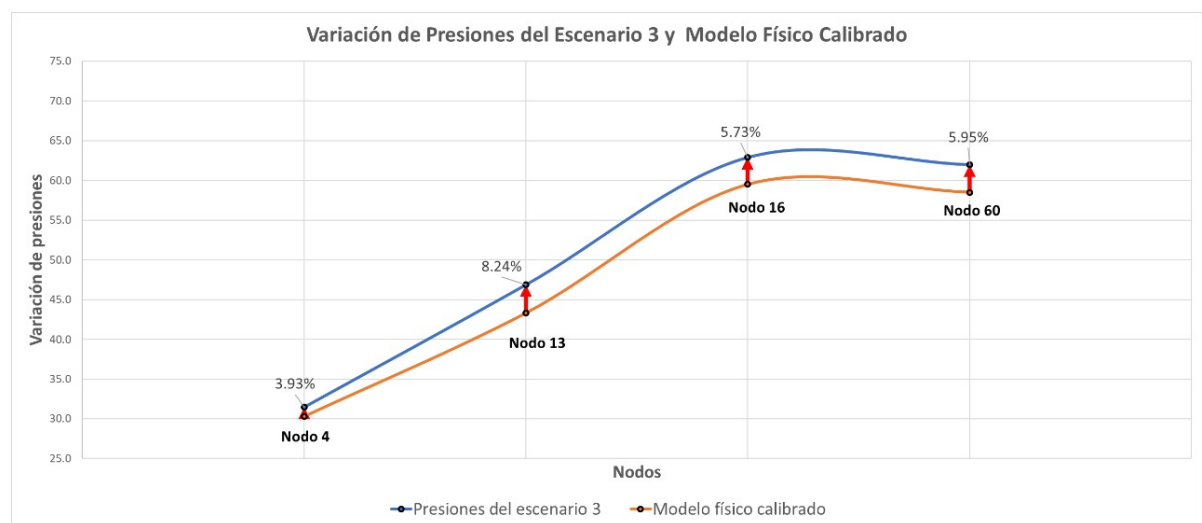


Figura 4.10: Variación porcentual de presiones del Escenario 3 respecto al modelo físico calibrado en cada nodo. (Autores)

Finalmente, al igual que en los escenarios ya mencionados, se utilizó las leyes de semejanza para calcular las presiones del prototipo real empleando los datos obtenidos en el escenario tres (ver Figura 4.11). Se puede visualizar un aumento de presiones en el prototipo basado en el escenario tres, siendo las tuberías próximas al tanque las menos afectadas.

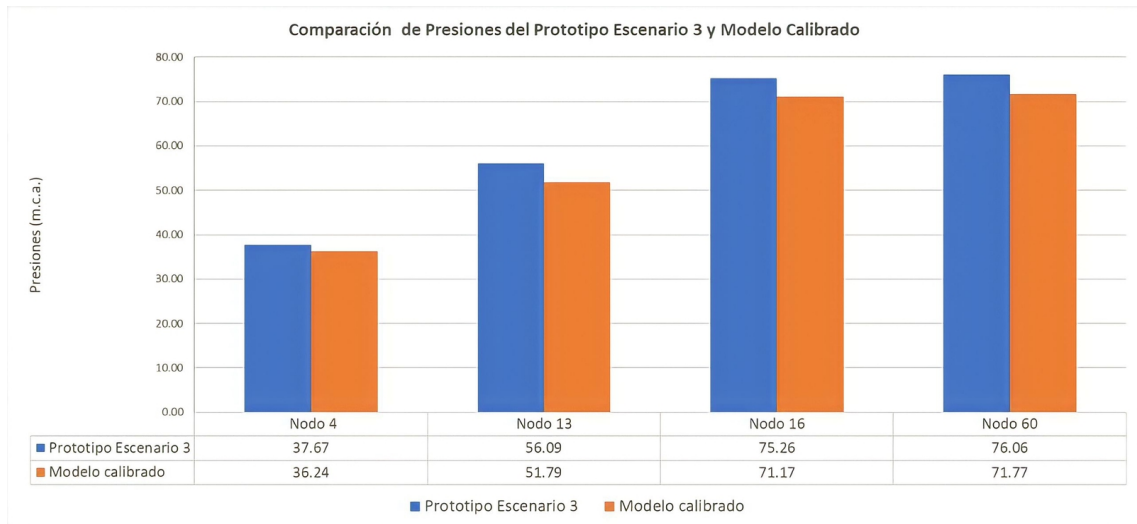


Figura 4.11: Comparación de presiones del prototipo escenario 3 respecto al modelo físico calibrado. (Autores)

En la Figura 4.12 se puede observar el comportamiento del prototipo basado en el escenario tres, el cual expresa que los nodos 15, 16, 17, 60 y 314 presentan presiones elevadas, de manera que exceden los valores recomendados de la norma de diseño. Además, se puede visualizar la variación porcentual que existe entre el escenario tres respecto al modelo físico calibrado y prototipo real.

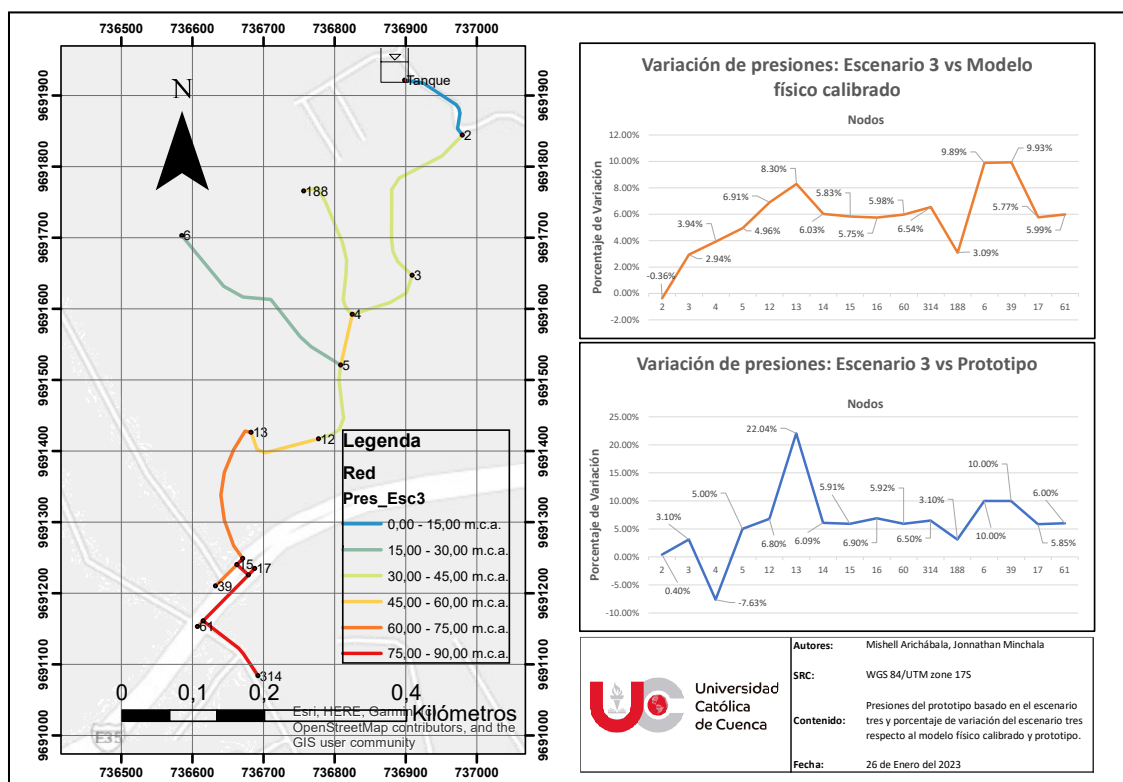


Figura 4.12: Presiones del prototipo basado en el escenario tres y porcentaje de variación respecto al modelo físico y prototipo. (Autores)

Sección 5

Conclusiones

Con base a lo expuesto se construyó un modelo físico calibrado de la red de abastecimiento de agua potable de la comunidad de *Rumihurco*, que representa su funcionamiento y condiciones reales, el modelo sirve como herramienta que permite visualizar situaciones hidráulicas, facilitando al investigador comprender de forma directa su comportamiento y complementando el análisis de los modelos matemáticos.

En el prototipo, se identificó los parámetros hidráulicos del sistema (presiones y demandas) por medio del modelo matemático empleado en su construcción, a excepción de ciertas presiones, donde se pudo comprobar que la red de distribución difiere con el modelo matemático de la red, esto se debe a la rugosidad de las tuberías, la estimación de coeficientes de pérdidas en accesorios, materiales implementados en su construcción, estimación de caudales, velocidades y presiones en el diseño, entre otros.

Mediante el prototipo se construyó la modelización física, en la cual sus factores de escala cumplen con las especificaciones recomendadas, a excepción del factor de similitud dinámica, en la que se hizo uso de una propia expresión matemática que permitiera al modelo calibrarse, obteniendo las dimensiones y materiales necesarios para la construcción del modelo.

Con la implementación del piezómetro se realizaron simulaciones, obteniendo información sobre el comportamiento del sistema, observando que la mayoría de los parámetros hidráulicos (caudales, velocidades y presiones) cumplen con los valores recomendados por “*La norma urbana para diseño de agua potable*”, a excepción de algunos tramos en los cuales las presiones exceden a los valores, lo que podría ocasionar en el sistema roturas y golpes de ariete, presentando inconvenientes en el abastecimiento a ciertos sectores por cortes del suministro para reparaciones. Además, ciertas velocidades presentan datos menores al recomendado por la norma,

provocando sedimentación en las tuberías e impidiendo un eficiente rendimiento en su suministro.

A partir de la calibración se generaron tres escenarios, permitiendo observar como el sistema de abastecimiento actúa bajo diferentes condiciones. En el escenario uno se redujo la carga hidráulica del tanque a la mitad conservando los caudales como en el modelo calibrado, lo que ocasionó una reducción de presiones en el sistema. En el segundo y tercer escenario se cerró y se limitó caudales en ciertos nodos respectivamente, esto provocó que las presiones aumentaran en la red, siendo las tuberías cercanas al tanque las menos afectadas, generando mayores inconvenientes si se presentaran en el prototipo debido a que exceden los valores recomendados en la norma de diseño.

Recomendaciones

El modelo físico debería ser construido en un laboratorio, de manera que los factores climáticos como la lluvia, viento y temperatura no influyan en el comportamiento del modelo ocasionando una recolección de datos erróneos al momento de realizar las simulaciones. Además, tanto el modelo como el instrumento de medición deben ser vaciados correctamente al término de su uso, para mayor conservación y manteniendo sus condiciones.

Es necesario implementar canales o tuberías que recolecten el agua empleado en las simulaciones, permitiendo reutilizarlo y no generar un desperdicio. Adicionalmente, los soportes empleados para la red deben ser ajustados para cada nodo, de manera que estos ocupen el menor espacio en el terreno, evitando choques o cruces en su colocación.

Finalmente, se recomienda implementar nuevos escenarios, los cuales permitan al investigador estudiar situaciones que puedan presentar el sistema de abastecimiento, es decir, analizar efectos al momento de limitar las demandas o aumentar la carga hidráulica del tanque, de esta manera, no solo se limite a tres escenarios el modelo sino observar más condiciones que puedan cambiar su comportamiento.

Sección 6

Bibliografía

- [1] Secretaría del Agua. *Normas para el estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición en aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. Secretaría del agua, 1992.
- [2] López C. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillado*. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003.
- [3] N. Díaz. «Diseño de un banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios.» 2018.
- [4] R. Fernández. «Conceptualización para el proyecto del polígono de modelos físicos en Ingeniería Hidráulica en la Facultad de Construcciones.» 2017.
- [5] Echávez G. *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.
- [6] P. Ganchozo y H. Monserrate. «Diseño y construcción de una unidad didáctica de pérdidas de carga en el laboratorio de operaciones unitarias.» 2018.
- [7] Y. Cengel y J. Cimbala. *Mecánica de fluidos*. McGraw Hill, 2012.
- [8] C. Herrera y J. Martínez. «Diseño hidráulico de un tanque de succión, un tanque de regulación y red de distribución para el abastecimiento de agua en la urbanización Rincón De Las Margaritas, Villavicencio - Meta». 2019.
- [9] P. Jaramillo y J. Vásquez. «Diseño y construcción de un equipo de laboratorio para modelar el funcionamiento de válvulas de aire y de purga en conductos a presión.» 2019.
- [10] J. Jiménez. «Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario.» 2019.
- [11] C. Mateos. «La modelación física en las obras hidráulicas.» En: *CEDEX*. 1 (2000), págs. 55-70.

- [12] Gobierno de la República del Ecuador. *Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)*. Nov. de 2022. URL: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>.
- [13] L. Revilla. «Sistema de abastecimiento de agua potable y su incidencia en la calidad de vida de los pobladores del Asentamiento Humano los conquistadores, Nuevo Chimbote – 2017». 2017.
- [14] E. Rondán. «Estado del arte de la calibración de modelos hidráulicos. Modelado de fugas con Epanet.» 2016.
- [15] Arocha S. *Abastecimiento de agua*. Ediciones Vega, 1997.
- [16] J. Saldarriaga. *Hidráulica de tuberías abastecimiento de agua, redes, riego*. Alfaomega Bogotá, 2007.
- [17] G. Sotelo. *Hidráulica General*. Limusa, 1997.

Sección 7

Anexos

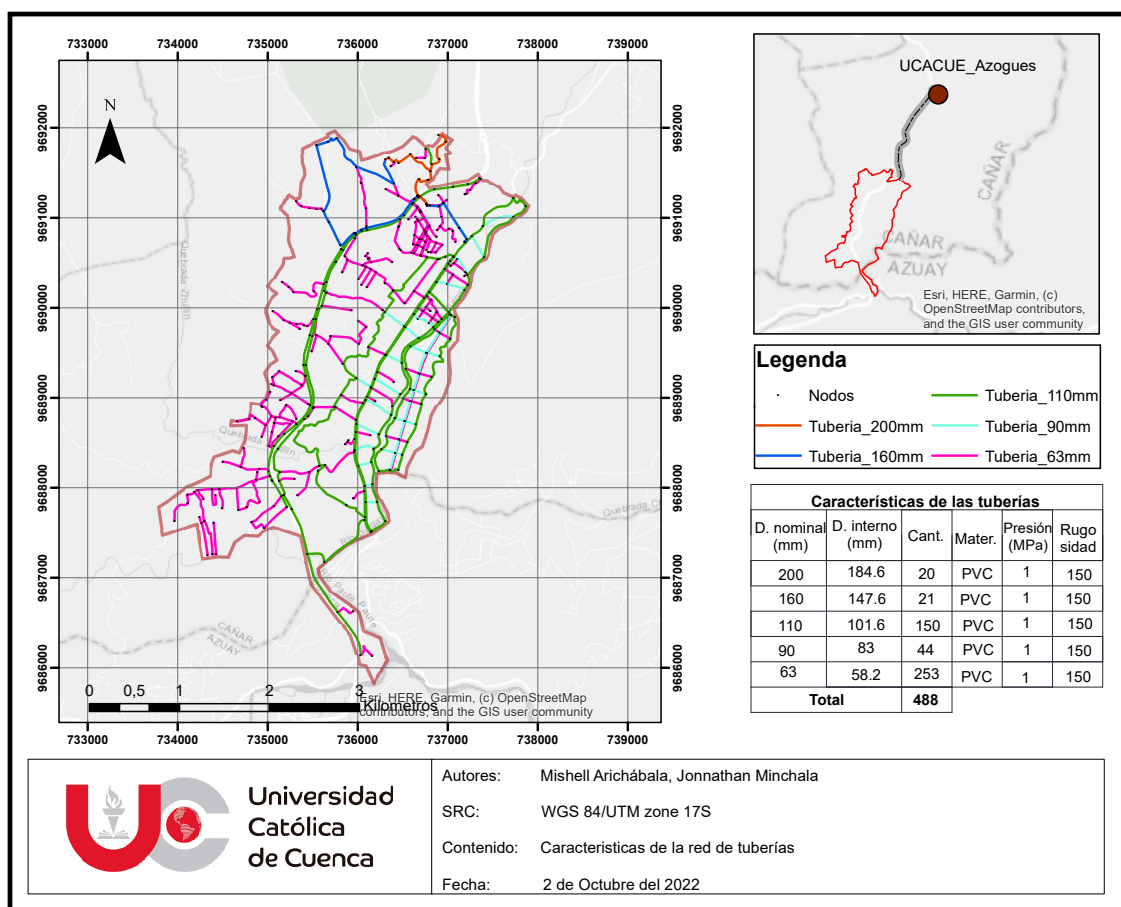


Figura 7.1: Red de distribución de agua para la parroquia Javier Loyola. (Autores)

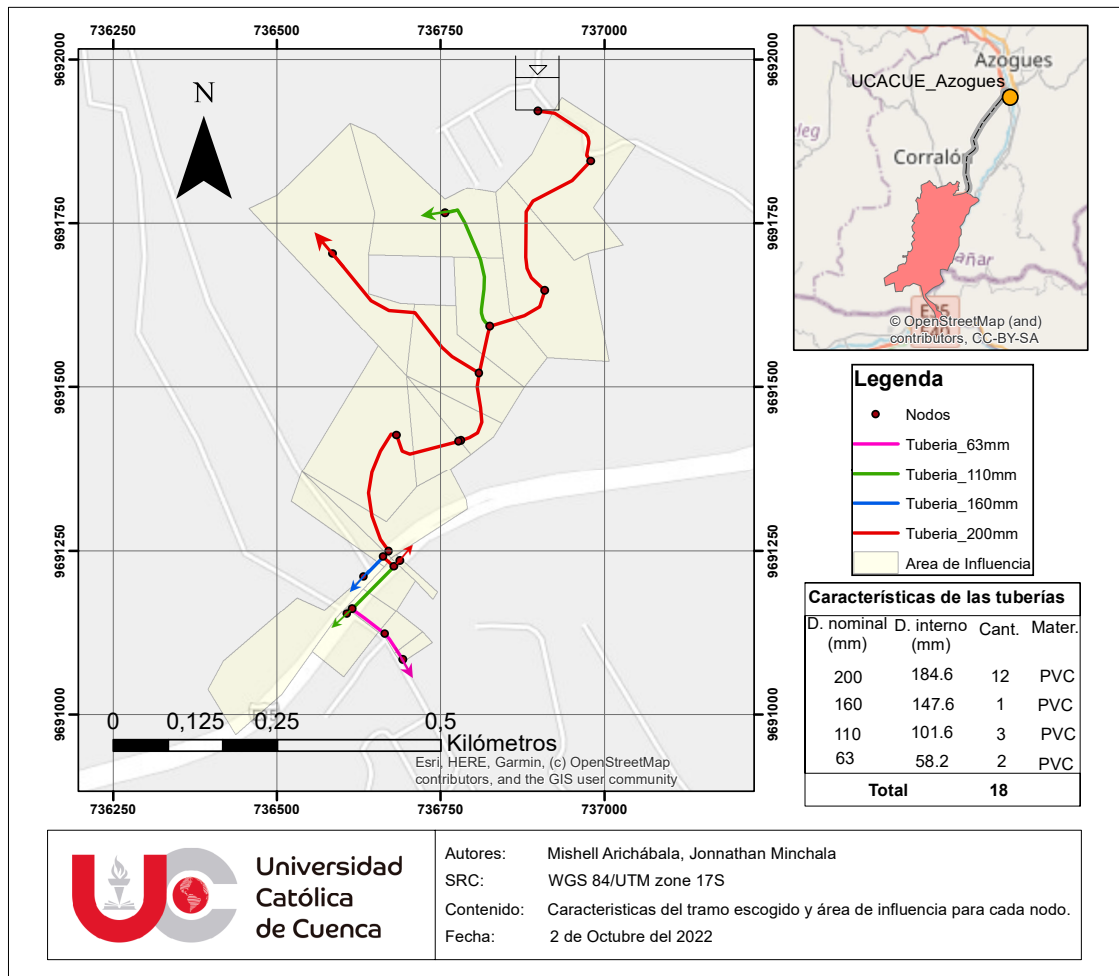


Figura 7.2: Tramo escogido y áreas de influencia para cada nodo. (Autores)

Tabla 7.1: Caudales de diseño de la red de abastecimiento para cada nodo del tramo seleccionado. (Autores)

Nodo	Área de influencia (ha)	Población/nodo	Qmedio (l/s)	Qmáx-día (l/s)	Qmáx-hr (l/s)	Qcincendio (l/s)	Qdiseño (l/s)	Elevación
Tanque								2 570.00
2	2.548	20.00	0.0417	0.05417	0.08333	0.026	0.110	2 565.67
3	2.648	21.00	0.0438	0.05688	0.08750	0.027	0.115	2 538.46
4	1.54	12.00	0.0250	0.03250	0.05000	0.016	0.066	2 531.22
5	1.673	13.00	0.0271	0.03521	0.05417	0.017	0.071	2 522.49
6	3.474	27.00	0.0563	0.07313	0.11250	0.036	0.148	2 550.77
12	0.759	6.00	0.0125	0.01625	0.02500	0.008	0.033	2 509.83
13	2.675	21.00	0.0438	0.05688	0.08750	0.028	0.115	2 499.78
14	1.17	9.00	0.0188	0.02438	0.03750	0.012	0.050	2 475.45
15	0.56	4.00	0.0083	0.01083	0.01667	0.006	0.022	2 473.01
16	0.321	3.00	0.0063	0.00813	0.01250	0.003	0.016	2 471.14
17	0.09	1.00	0.0021	0.00271	0.00417	0.001	0.005	2 473.37
39	1.987	16.00	0.0333	0.04333	0.06667	0.021	0.087	2 471.37
60	0.251	2.00	0.0042	0.00542	0.00833	0.003	0.011	2 472.07
61	0.533	4.00	0.0083	0.01083	0.01667	0.006	0.022	2 472.38
188	2.548	20.00	0.0417	0.05417	0.08333	0.026	0.110	2 536.68
313	0.212	2.00	0.0042	0.00542	0.00833	0.002	0.011	2 464.99
314	0.111	1.00	0.0021	0.00271	0.00417	0.001	0.005	2 460.45

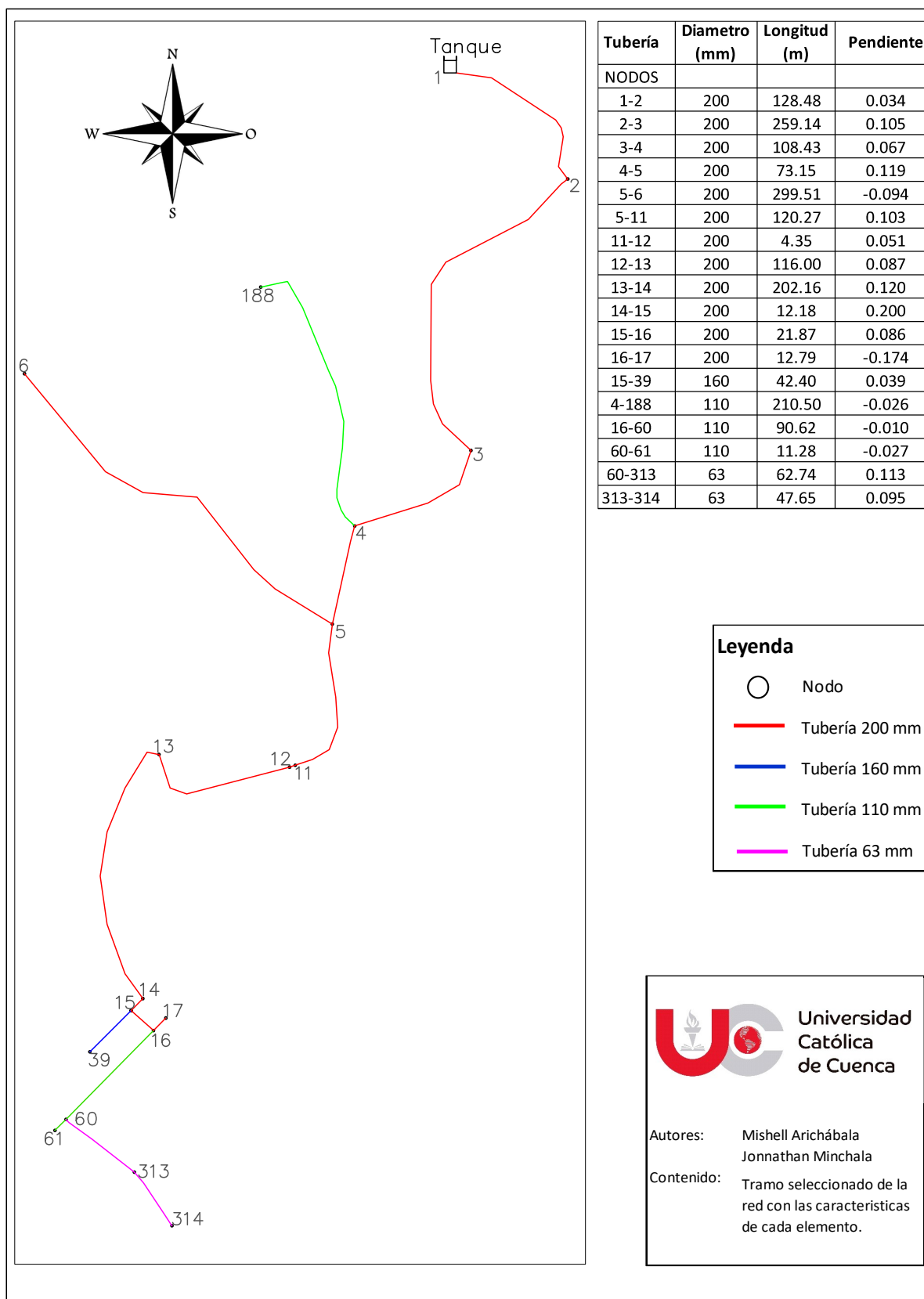


Figura 7.3: Tramo seleccionado de la red con las características de cada elemento. (Autores)

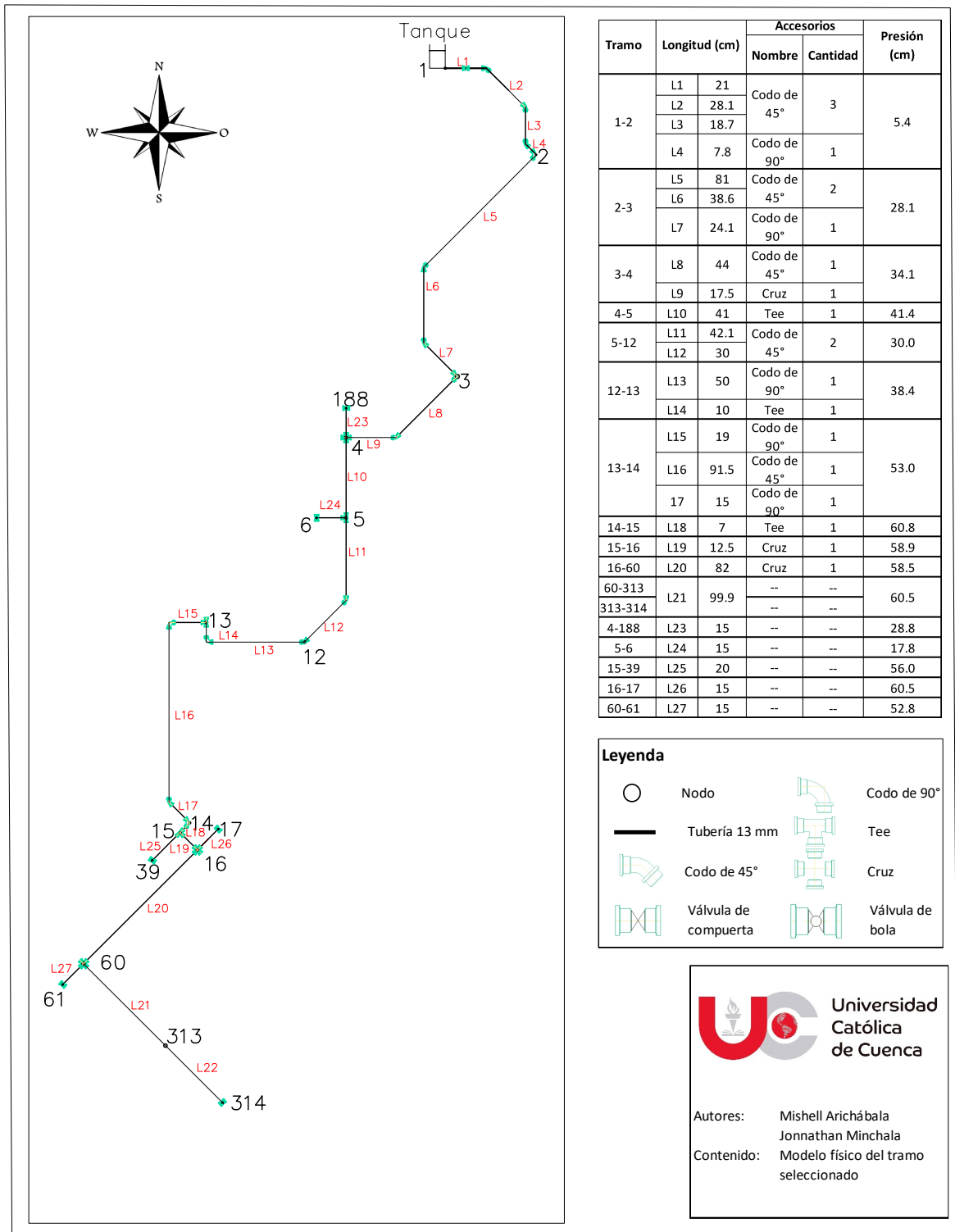


Figura 7.4: Plano del modelo físico del tramo seleccionado. (Autores)



Vista frontal



Vista lateral

Figura 7.5: *Soportes de la red. (Autores)*



Figura 7.6: *Abrazaderas - Soporte - Red. (Autores)*



Figura 7.7: *Tramos del sistema.* (Autores)



Figura 7.8: *Calibración de la caneca.* (Autores)



Figura 7.9: *Construcción del modelo.*(Autores)



Figura 7.10: *Conexión tanque - caneca - sistema.*(Autores)



Figura 7.11: Conexión caneca - sistema.(Autores)



Figura 7.12: Puntos de control de nodos.(Autores)



Figura 7.13: *Nivelación de nodos del modelo.*(Autores)



Figura 7.14: *Medición de caudales del sistema.*(Autores)



Figura 7.15: *Piezómetro.*(Autores)



Figura 7.16: *Medición de presiones en el modelo.*(Autores)

Tabla 7.2: *Datos obtenidos en la simulación 1 para calibración del modelo físico.* (Autores)

Título:	Calibración del Modelo Físico			
Fecha:	14-dic-22			
Descripción:	Simulación 1 para la calibración del modelo			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima templado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	90.1	85.2	85	84.8
1	90.1	85.2	85	84.9
2	90.1	85.1	85	84.8
3	90.2	85.2	85	84.9
4	90	85.1	84.9	84.7
5	90.1	85.2	85.1	84.8
6	90.1	85	84.9	84.7
7	90	85	84.8	84.7
8	90.1	85.1	85	84.8
9	90.2	85.1	85	84.9
10	90.2	85.2	85.1	84.9
11	90	85.1	85	84.8
12	90	85	84.9	84.7
13	90	85.1	85	84.7
14	90.1	85.1	85	84.8
15	90	85	84.9	84.7
16	90	85.1	85	84.8
17	90.1	85.1	84.8	84.8
18	90.1	85.1	85	84.8
19	90	85	84.8	84.6

Tabla 7.3: *Datos obtenidos en la simulación 2 para calibración del modelo físico. (Autores)*

Título: Calibración del Modelo Físico				
Fecha: 14-dic-22				
Descripción: Simulación 2 para la calibración del modelo				
Observación general: Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima templado				
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89	84	83.9	83.7
2	89.1	84.1	84	83.9
4	89.1	84.1	84	83.8
6	89.2	84.1	84.1	83.8
8	89.3	84.3	84.2	84
10	89.2	84.2	84.1	83.9
12	89.1	84.2	84.1	83.9
14	89.2	84.2	84.1	83.9
16	89.2	84.2	84.1	83.9
18	89.3	84.3	84.1	84
20	89.1	84.1	84	83.8
22	89.2	84.2	84.1	83.8
24	89.1	84.1	84	83.8
26	89.1	84.1	84	83.8
28	89.2	84.2	84.1	83.9
30	89.2	84.1	84	83.9
32	89.1	84.1	84	83.8
34	89.1	84.1	84	83.8
36	89	84	83.9	83.7
38	89	84	83.9	83.7

Tabla 7.4: *Datos obtenidos en la simulación 3 para calibración del modelo físico. (Autores)*

Título: Calibración del Modelo Físico				
Fecha: 15-dic-22				
Descripción: Simulación 3 para la calibración del modelo				
Observación general: Inicio de Prueba a las 10 A.M. con un clima soleado				
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.1	84.4	84.3	84
1	89.4	84.4	84.3	84.1
2	89.2	84.4	84.2	84
3	89.4	84.4	84.3	84.1
4	89.4	84.5	84.4	84.2
5	89.5	84.5	84.4	84.2
6	89.4	84.4	84.3	84.1
7	89.5	84.6	84.5	84.3
8	89.5	84.5	84.4	84.2
9	89.4	84.5	84.4	84.2
10	89.4	84.4	84.3	84.1
11	89.4	84.5	84.4	84.1
12	89.4	84.4	84.3	84.1
13	89.4	84.3	84.2	84.1
14	89.4	84.4	84.3	84.1
15	89.4	84.4	84.3	84.1
16	89.4	84.5	84.4	84.2
17	89.5	84.5	84.4	84.2
18	89.4	84.4	84.3	84.1
19	89.3	84.4	84.3	84.2

Tabla 7.5: *Datos obtenidos en la simulación 4 para calibración del modelo físico. (Autores)*

Título: Calibración del Modelo Físico				
Fecha: 15-dic-22				
Descripción: Simulación 4 para la calibración del modelo				
Observación general: Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima templado				
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.4	84.6	84.5	84.3
2	89.5	84.6	84.6	84.4
4	89.5	84.5	84.4	84.2
6	89.5	84.6	84.5	84.2
8	89.6	84.6	84.5	84.3
10	89.5	84.5	84.4	84.2
12	89.7	84.8	84.7	84.5
14	89.5	84.5	84.4	84.2
16	89.5	84.5	84.4	84.3
18	89.5	84.5	84.4	84.2
20	89.5	84.5	84.4	84.2
22	89.6	84.7	84.6	84.3
24	89.5	84.5	84.4	84.2
26	89.5	84.5	84.4	84.2
28	89.4	84.5	84.4	84.2
30	89.4	84.4	84.3	84.1
32	89.4	84.4	84.3	84.1
34	89.5	84.5	84.4	84.2
36	89.5	84.5	84.4	84.2
38	89.5	84.5	84.4	84.2

Tabla 7.6: *Datos obtenidos en la simulación 5 para calibración del modelo físico. (Autores)*

Título: Calibración del Modelo Físico				
Fecha: 15-dic-22				
Descripción: Simulación 5 para la calibración del modelo				
Observación general: Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima templado				
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	88.3	83.3	83.2	83
1	88.4	83.5	83.3	83.1
2	88.5	83.5	83.3	83.2
3	88.5	83.6	83.5	83.3
4	88.4	83.5	83.3	83.1
5	88.3	83.3	83.2	83
6	88.3	83.3	83.2	83
7	88.3	83.4	83.3	83.1
8	88.4	83.4	83.3	83.1
9	88.4	83.4	83.3	83.1
10	88.5	83.5	83.3	83.2
11	88.4	83.4	83.3	83.1
12	88.4	83.5	83.3	83.1
13	88.3	83.3	83.2	83
14	88.3	83.3	83.2	83
15	88.3	83.3	83.2	83
16	88.4	83.4	83.3	83.1
17	88.4	83.4	83.3	83.1
18	88.5	83.6	83.5	83.2
19	88.4	83.5	83.3	83.1

Tabla 7.7: *Datos obtenidos en la simulación 1 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 1 del Modelo Físico			
Fecha:	16-dic-22			
Descripción:	Simulación 1 para el escenario 1 del modelo con la carga hidráulica del tanque a la mitad.			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	78.7	76.5	75.6	75.5
1	78.5	76.2	75.4	75.3
2	78.8	76.5	75.8	75.6
3	78.4	76	75.3	75.2
4	78.7	76.4	75.6	75.5
5	78.4	76.1	75.3	75.2
6	78.6	76.3	75.5	75.4
7	78.5	76.2	75.4	75.3
8	78.7	76.5	75.6	75.5
9	78.7	76.4	75.6	75.5
10	78.8	76.5	75.7	75.6
11	78.7	76.4	75.6	75.5
12	78.5	76.2	75.4	75.3
13	78.4	76.1	75.3	75.2
14	78.7	76.3	75.6	75.5
15	78.7	76.4	75.6	75.5
16	78.6	76.3	75.6	75.4
17	78.5	76.2	75.4	75.3
18	78.7	76.4	75.6	75.5
19	78.4	76.1	75.3	75.2

Tabla 7.8: *Datos obtenidos en la simulación 2 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 1 del Modelo Físico			
Fecha:	16-dic-22			
Descripción:	Simulación 2 para el escenario 1 del modelo con la carga hidráulica del tanque a la mitad.			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	78.9	76.6	75.9	75.7
2	78.9	76.6	75.8	75.7
4	78.7	76.4	75.6	75.5
6	78.9	76.6	75.8	75.7
8	78.7	76.4	75.6	75.5
10	79	76.7	75.9	75.8
12	78.8	76.4	75.7	75.6
14	78.9	76.7	75.8	75.7
16	78.8	76.5	75.7	75.6
18	78.9	76.6	75.9	75.7
20	79	76.7	75.9	75.8
22	78.8	76.5	75.7	75.6
24	78.7	76.4	75.6	75.5
26	78.8	76.5	75.7	75.6
28	78.7	76.4	75.6	75.5
30	78.8	76.5	75.7	75.6
32	78.8	76.5	75.7	75.6
34	78.9	76.6	75.8	75.7
36	78.7	76.4	75.6	75.5
38	78.7	76.4	75.6	75.5

Tabla 7.9: *Datos obtenidos en la simulación 3 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 1 del Modelo Físico			
Fecha:	17-dic-22			
Descripción:	Simulación 3 para el escenario 1 del modelo con la carga hidráulica del tanque a la mitad.			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 10 A.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	78.4	76.1	75.3	75.2
1	78.7	76.3	75.6	75.5
2	78.4	76.1	75.3	75.2
3	78.4	76.1	75.3	75.2
4	78.6	76.3	75.5	75.4
5	78.6	76.3	75.5	75.4
6	78.4	76.1	75.3	75.2
7	78.6	76.3	75.5	75.4
8	78.7	76.4	75.6	75.5
9	78.4	76	75.3	75.2
10	78.4	76.1	75.3	75.2
11	78.5	76.2	75.4	75.3
12	78.7	76.4	75.6	75.5
13	78.4	76.1	75.3	75.2
14	78.7	76.4	75.6	75.5
15	78.4	76.1	75.3	75.2
16	78.6	76.3	75.5	75.4
17	78.7	76.5	75.6	75.5
18	78.5	76.3	75.4	75.3
19	78.8	76.5	75.7	75.6

Tabla 7.10: *Datos obtenidos en la simulación 4 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 1 del Modelo Físico			
Fecha:	17-dic-22			
Descripción:	Simulación 4 para el escenario 1 del modelo con la carga hidráulica del tanque a la mitad.			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	78.1	75.8	75	74.9
2	78.3	76	75.2	75.1
4	78.1	75.8	75	74.9
6	78	75.8	74.9	74.8
8	78	75.7	74.9	74.8
10	78.1	75.8	75	74.9
12	78	75.7	74.9	74.8
14	78.1	75.8	75	74.9
16	77.9	75.6	74.8	74.7
18	78.2	75.9	75.1	75
20	77.9	75.6	74.8	74.7
22	77.9	75.6	74.8	74.7
24	78.1	75.8	75	74.9
26	78.1	75.8	75	74.9
28	77.9	75.5	74.8	74.7
30	77.9	75.6	74.8	74.7
32	78.3	76	75.2	75.1
34	78.3	76	75.2	75.1
36	78	75.8	74.9	74.8
38	78	75.7	74.9	74.8

Tabla 7.11: *Datos obtenidos en la simulación 5 para Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 1 del Modelo Físico				
Fecha:	17-dic-22				
Descripción:	Simulación 5 para el escenario 1 del modelo con la carga hidráulica del tanque a la mitad.				
Observación general:	Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima soleado				
	Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
	0	78.3	76	75.2	75.1
	1	78.7	76.5	75.6	75.5
	2	78.6	76.3	75.5	75.4
	3	78.7	76.4	75.6	75.5
	4	78.5	76.2	75.4	75.3
	5	78.6	76.3	75.5	75.4
	6	78.5	76.2	75.4	75.3
	7	78.6	76.3	75.5	75.4
	8	78.3	76	75.2	75.1
	9	78.3	76	75.3	75.1
	10	78.5	76.3	75.4	75.3
	11	78.7	76.4	75.6	75.5
	12	78.3	76	75.2	75.1
	13	78.5	76.2	75.4	75.3
	14	78.7	76.4	75.6	75.5
	15	78.5	76.2	75.4	75.3
	16	78.6	76.3	75.5	75.4
	17	78.6	76.3	75.5	75.4
	18	78.6	76.3	75.5	75.4
	19	78.5	76.2	75.4	75.3

Tabla 7.12: *Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Escenario 1				
Cotas (cm)	59	41	24.7	25.5
Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
1	19.7	35.5	50.9	50
2	19.5	35.2	50.7	49.8
3	19.8	35.5	51.1	50.1
4	19.4	35	50.6	49.7
5	19.7	35.4	50.9	50
6	19.4	35.1	50.6	49.7
7	19.6	35.3	50.8	49.9
8	19.5	35.2	50.7	49.8
9	19.7	35.5	50.9	50
10	19.7	35.4	50.9	50
11	19.8	35.5	51	50.1
12	19.7	35.4	50.9	50
13	19.5	35.2	50.7	49.8
14	19.4	35.1	50.6	49.7

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 7.12: (Continuación) *Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
15	19.7	35.3	50.9	50
16	19.7	35.4	50.9	50
17	19.6	35.3	50.9	49.9
18	19.5	35.2	50.7	49.8
19	19.7	35.4	50.9	50
20	19.4	35.1	50.6	49.7
21	19.9	35.6	51.2	50.2
22	19.9	35.6	51.1	50.2
23	19.7	35.4	50.9	50
24	19.9	35.6	51.1	50.2
25	19.7	35.4	50.9	50
26	20	35.7	51.2	50.3
27	19.8	35.4	51	50.1
28	19.9	35.7	51.1	50.2
29	19.8	35.5	51	50.1
30	19.9	35.6	51.2	50.2
31	20	35.7	51.2	50.3
32	19.8	35.5	51	50.1
33	19.7	35.4	50.9	50
34	19.8	35.5	51	50.1
35	19.7	35.4	50.9	50
36	19.8	35.5	51	50.1
37	19.8	35.5	51	50.1
38	19.9	35.6	51.1	50.2
39	19.7	35.4	50.9	50
40	19.7	35.4	50.9	50
41	19.4	35.1	50.6	49.7
42	19.7	35.3	50.9	50
43	19.4	35.1	50.6	49.7
44	19.4	35.1	50.6	49.7
45	19.6	35.3	50.8	49.9
46	19.6	35.3	50.8	49.9
47	19.4	35.1	50.6	49.7
48	19.6	35.3	50.8	49.9
49	19.7	35.4	50.9	50
50	19.4	35	50.6	49.7
51	19.4	35.1	50.6	49.7
52	19.5	35.2	50.7	49.8
53	19.7	35.4	50.9	50
54	19.4	35.1	50.6	49.7
55	19.7	35.4	50.9	50
56	19.4	35.1	50.6	49.7

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 7.12: (Continuación) *Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
57	19.6	35.3	50.8	49.9
58	19.7	35.5	50.9	50
59	19.5	35.3	50.7	49.8
60	19.8	35.5	51	50.1
61	19.1	34.8	50.3	49.4
62	19.3	35	50.5	49.6
63	19.1	34.8	50.3	49.4
64	19	34.8	50.2	49.3
65	19	34.7	50.2	49.3
66	19.1	34.8	50.3	49.4
67	19	34.7	50.2	49.3
68	19.1	34.8	50.3	49.4
69	18.9	34.6	50.1	49.2
70	19.2	34.9	50.4	49.5
71	18.9	34.6	50.1	49.2
72	18.9	34.6	50.1	49.2
73	19.1	34.8	50.3	49.4
74	19.1	34.8	50.3	49.4
75	18.9	34.5	50.1	49.2
76	18.9	34.6	50.1	49.2
77	19.3	35	50.5	49.6
78	19.3	35	50.5	49.6
79	19	34.8	50.2	49.3
80	19	34.7	50.2	49.3
81	19.3	35	50.5	49.6
82	19.7	35.5	50.9	50
83	19.6	35.3	50.8	49.9
84	19.7	35.4	50.9	50
85	19.5	35.2	50.7	49.8
86	19.6	35.3	50.8	49.9
87	19.5	35.2	50.7	49.8
88	19.6	35.3	50.8	49.9
89	19.3	35	50.5	49.6
90	19.3	35	50.6	49.6
91	19.5	35.3	50.7	49.8
92	19.7	35.4	50.9	50
93	19.3	35	50.5	49.6
94	19.5	35.2	50.7	49.8
95	19.7	35.4	50.9	50
96	19.5	35.2	50.7	49.8
97	19.6	35.3	50.8	49.9
98	19.6	35.3	50.8	49.9

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 7.12: (Continuación) *Resultados de presiones para el Escenario 1 del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
99	19.6	35.3	50.8	49.9
100	19.5	35.2	50.7	49.8
Promedio	19.5	35.2	50.7	49.8

(Fin de la tabla)

Tabla 7.13: *Datos obtenidos en la simulación 1 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 2 del Modelo Físico			
Fecha:	19-dic-22			
Descripción:	Simulación 1 para el escenario 2 del modelo con la carga hidráulica de calibración con cierre de nodos Q188 y Q314			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima templado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.3	86.5	86.3	86.2
1	89.5	86.6	86.5	86.3
2	89.3	86.5	86.2	86.1
3	89.3	86.5	86.3	86.2
4	89.4	86.5	86.3	86.2
5	89.3	86.4	86.3	86.1
6	89.4	86.5	86.3	86.2
7	89.5	86.6	86.4	86.3
8	89.6	86.7	86.5	86.4
9	89.5	86.5	86.3	86.2
10	89.6	86.7	86.5	86.4
11	89.5	86.7	86.5	86.3
12	89.5	86.6	86.4	86.3
13	89.3	86.5	86.3	86.2
14	89.5	86.6	86.4	86.3
15	89.3	86.4	86.2	86.1
16	89.4	86.5	86.3	86.2
17	89.5	86.6	86.4	86.3
18	89.3	86.5	86.2	86.1
19	89.5	86.6	86.4	86.3

Tabla 7.14: *Datos obtenidos en la simulación 2 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 2 del Modelo Físico			
Fecha:	19-dic-22			
Descripción:	Simulación 2 para el escenario 2 del modelo con la carga hidráulica de calibración con cierre de nodos Q188 y Q314			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima templado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.7	86.8	86.6	86.5
2	89.6	86.7	86.5	86.4
4	89.5	86.7	86.5	86.3
6	89.5	86.7	86.4	86.3
8	89.7	86.8	86.6	86.5
10	89.7	86.9	86.7	86.6
12	89.7	86.8	86.7	86.5
14	89.8	86.9	86.7	86.6
16	89.7	86.8	86.6	86.5
18	89.7	86.8	86.6	86.5
20	89.7	86.7	86.5	86.4
22	89.5	86.7	86.5	86.3
24	89.5	86.6	86.4	86.3
26	89.7	86.8	86.6	86.5
28	89.5	86.6	86.4	86.3
30	89.7	86.8	86.6	86.5
32	89.7	86.9	86.7	86.6
34	89.5	86.7	86.5	86.4
36	89.5	86.7	86.5	86.3
38	89.7	86.8	86.6	86.5

Tabla 7.15: *Datos obtenidos en la simulación 3 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 2 del Modelo Físico			
Fecha:	20-dic-22			
Descripción:	Simulación 3 para el escenario 2 del modelo con la carga hidráulica de calibración con cierre de nodos Q188 y Q314			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 10 A.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89	86	85.8	85.7
1	88.7	85.8	85.6	85.5
2	88.8	85.9	85.7	85.6
3	89	86.2	86	85.8
4	89	86.1	86	85.8
5	89	86.1	85.9	85.8
6	88.8	85.9	85.7	85.6
7	88.9	86	85.8	85.7
8	89	86.1	85.9	85.8
9	88.9	86	85.8	85.7
10	88.9	86	85.8	85.7
11	88.7	85.8	85.6	85.5
12	88.7	85.9	85.7	85.6
13	88.7	85.9	85.7	85.6
14	88.8	86	85.7	85.6
15	88.9	86	85.8	85.7
16	88.7	85.8	85.6	85.5
17	88.9	86	85.8	85.7
18	88.9	86.1	85.9	85.8
19	88.7	85.9	85.7	85.5

Tabla 7.16: *Datos obtenidos en la simulación 4 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 2 del Modelo Físico			
Fecha:	20-dic-22			
Descripción:	Simulación 4 para el escenario 2 del modelo con la carga hidráulica de calibración con cierre de nodos Q188 y Q314			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.9	87	86.8	86.7
2	90	87.2	87	86.9
4	90	87.2	87	86.9
6	89.9	87	86.8	86.7
8	89.7	86.9	86.7	86.6
10	90	87.1	86.9	86.8
12	90	87.2	87	86.8
14	90.1	87.2	87	86.9
16	89.9	87	86.9	86.7
18	90	87.1	86.9	86.8
20	89.9	87	86.8	86.7
22	89.7	87	86.7	86.6
24	89.9	87	86.8	86.7
26	90	87.1	86.9	86.8
28	90.1	87.2	87	86.9
30	89.9	87	86.8	86.7
32	90	87	86.8	86.7
34	90	87	86.9	86.8
36	89.9	87	86.9	86.7
38	90.1	87.2	87	86.9

Tabla 7.17: *Datos obtenidos en la simulación 5 para Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 2 del Modelo Físico			
Fecha:	20-dic-22			
Descripción:	Simulación 5 para el escenario 2 del modelo con la carga hidráulica de calibración con cierre de nodos Q188 y Q314			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.6	86.7	86.5	86.4
1	89.4	86.5	86.3	86.2
2	89.5	86.7	86.4	86.3
3	89.5	86.6	86.4	86.3
4	89.7	86.8	86.6	86.5
5	89.6	86.7	86.5	86.4
6	89.5	86.7	86.5	86.4
7	89.5	86.6	86.4	86.3
8	89.7	86.8	86.6	86.5
9	89.5	86.7	86.5	86.4
10	89.6	86.7	86.5	86.4
11	89.5	86.6	86.5	86.3
12	89.4	86.5	86.3	86.2
13	89.5	86.7	86.5	86.4
14	89.7	86.8	86.6	86.5
15	89.5	86.7	86.4	86.3
16	89.6	86.7	86.5	86.4
17	89.7	86.8	86.6	86.5
18	89.5	86.7	86.5	86.3
19	89.5	86.5	86.3	86.2

Tabla 7.18: *Resultados de presiones para el Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Escenario 2				
Cotas (cm)	59	41	24.7	25.5
Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
1	30.3	45.8	61.9	61
2	30.5	45.7	61.8	60.9
3	30.3	45.7	61.8	60.8
4	30.3	45.7	61.7	60.8
5	30.4	45.8	61.9	61
6	30.3	45.9	62	61.1
7	30.4	45.8	62	61
8	30.5	45.9	62	61.1
9	30.6	45.8	61.9	61
10	30.5	45.8	61.9	61
11	30.6	45.7	61.8	60.9
12	30.5	45.7	61.8	60.8
13	30.5	45.6	61.7	60.8
14	30.3	45.8	61.9	61
15	30.5	45.6	61.7	60.8
16	30.3	45.8	61.9	61
17	30.4	45.9	62	61.1
18	30.5	45.7	61.8	60.9
19	30.3	45.7	61.8	60.8
20	30.5	45.8	61.9	61
21	30.7	45.8	61.9	61
22	30.6	45.7	61.8	60.9
23	30.5	45.7	61.8	60.8
24	30.5	45.7	61.7	60.8
25	30.7	45.8	61.9	61
26	30.7	45.9	62	61.1
27	30.7	45.8	62	61
28	30.8	45.9	62	61.1
29	30.7	45.8	61.9	61
30	30.7	45.8	61.9	61
31	30.7	45.7	61.8	60.9
32	30.5	45.7	61.8	60.8
33	30.5	45.6	61.7	60.8
34	30.7	45.8	61.9	61
35	30.5	45.6	61.7	60.8
36	30.7	45.8	61.9	61
37	30.7	45.9	62	61.1
38	30.5	45.7	61.8	60.9
39	30.5	45.7	61.8	60.8

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 7.18: (Continuación) *Resultados de presiones para el Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
40	30.7	45.8	61.9	61
41	30	45	61.1	60.2
42	29.7	44.8	60.9	60
43	29.8	44.9	61	60.1
44	30	45.2	61.3	60.3
45	30	45.1	61.3	60.3
46	30	45.1	61.2	60.3
47	29.8	44.9	61	60.1
48	29.9	45	61.1	60.2
49	30	45.1	61.2	60.3
50	29.9	45	61.1	60.2
51	29.9	45	61.1	60.2
52	29.7	44.8	60.9	60
53	29.7	44.9	61	60.1
54	29.7	44.9	61	60.1
55	29.8	45	61	60.1
56	29.9	45	61.1	60.2
57	29.7	44.8	60.9	60
58	29.9	45	61.1	60.2
59	29.9	45.1	61.2	60.3
60	29.7	44.9	61	60
61	30.9	46	62.1	61.2
62	31	46.2	62.3	61.4
63	31	46.2	62.3	61.4
64	30.9	46	62.1	61.2
65	30.7	45.9	62	61.1
66	31	46.1	62.2	61.3
67	31	46.2	62.3	61.3
68	31.1	46.2	62.3	61.4
69	30.9	46	62.2	61.2
70	31	46.1	62.2	61.3
71	30.9	46	62.1	61.2
72	30.7	46	62	61.1
73	30.9	46	62.1	61.2
74	31	46.1	62.2	61.3
75	31.1	46.2	62.3	61.4
76	30.9	46	62.1	61.2
77	31	46	62.1	61.2
78	31	46	62.2	61.3
79	30.9	46	62.2	61.2
80	31.1	46.2	62.3	61.4
81	30.6	45.7	61.8	60.9

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 7.18: (Continuación) *Resultados de presiones para el Escenario 2 del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
82	30.4	45.5	61.6	60.7
83	30.5	45.7	61.7	60.8
84	30.5	45.6	61.7	60.8
85	30.7	45.8	61.9	61
86	30.6	45.7	61.8	60.9
87	30.5	45.7	61.8	60.9
88	30.5	45.6	61.7	60.8
89	30.7	45.8	61.9	61
90	30.5	45.7	61.8	60.9
91	30.6	45.7	61.8	60.9
92	30.5	45.6	61.8	60.8
93	30.4	45.5	61.6	60.7
94	30.5	45.7	61.8	60.9
95	30.7	45.8	61.9	61
96	30.5	45.7	61.7	60.8
97	30.6	45.7	61.8	60.9
98	30.7	45.8	61.9	61
99	30.5	45.7	61.8	60.8
100	30.5	45.5	61.6	60.7
Promedio	30.5	45.6	61.7	60.8

(Fin de la tabla)

Tabla 7.19: *Datos obtenidos en la simulación 1 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

“Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.”

Título:	Escenario 3 del Modelo Físico			
Fecha:	21-dic-22			
Descripción:	Simulación 1 para el escenario 3 del modelo con carga hidráulica de calibración con caudales de los nodos Q6 y Q39 a la mitad			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.5	87	86.7	86.6
1	89.5	86.7	86.5	86.4
2	89.5	87	86.6	86.5
3	89.5	86.8	86.5	86.4
4	89.6	87	86.7	86.6
5	89.5	86.9	86.6	86.5
6	89.5	86.9	86.6	86.5
7	89.3	86.6	86.5	86.3
8	89.5	86.9	86.6	86.5
9	89.8	87	86.7	86.6
10	89.3	86.8	86.5	86.4
11	89.3	86.7	86.4	86.3
12	89.5	86.9	86.7	86.5
13	89.3	86.8	86.6	86.4
14	89.5	86.9	86.6	86.5
15	89.5	86.9	86.6	86.5
16	89.5	86.9	86.7	86.5
17	89.5	87	86.7	86.6
18	89.3	86.8	86.5	86.4
19	89.5	87	86.6	86.5

Tabla 7.20: *Datos obtenidos en la simulación 2 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 3 del Modelo Físico			
Fecha:	21-dic-22			
Descripción:	Simulación 2 para el escenario 3 del modelo con carga hidráulica de calibración con caudales de los nodos Q6 y Q39 a la mitad			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima soleado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	89.9	87.3	87	86.9
2	90	87.4	87.1	87
4	89.7	87	86.9	86.8
6	90	87.4	87.1	87
8	89.9	87.3	87	86.9
10	89.9	87.3	87	86.9
12	90.1	87.5	87.2	87.1
14	90	87.3	87.1	87
16	89.9	87.3	87.1	86.9
18	90	87.5	87.2	87.1
20	89.9	87.3	87	86.9
22	89.7	87.2	86.9	86.8
24	90	87.4	87.1	87
26	89.9	87.3	87.1	86.9
28	89.9	87.3	87	86.9
30	89.7	87.3	86.9	86.8
32	90	87.3	87.1	87
34	89.9	87.3	87	86.9
36	89.9	87.3	87.1	86.9
38	89.9	87.3	87	86.9

Tabla 7.21: *Datos obtenidos en la simulación 3 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

“Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.”

Título:	Escenario 3 del Modelo Físico			
Fecha:	22-dic-22			
Descripción:	Simulación 3 para el escenario 3 del modelo con carga hidráulica de calibración con caudales de los nodos Q6 y Q39 a la mitad			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 10 A.M. con un clima templado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	91.3	88.7	88.4	88.3
1	91.1	88.5	88.3	88.1
2	91.2	88.5	88.3	88.2
3	91.3	88.7	88.4	88.3
4	91.3	88.7	88.4	88.3
5	91.2	88.5	88.3	88.2
6	91.2	88.5	88.3	88.1
7	91.3	88.7	88.4	88.3
8	91.3	88.7	88.4	88.3
9	91.4	88.8	88.5	88.4
10	91.3	88.7	88.4	88.3
11	91.3	88.7	88.4	88.3
12	91.3	88.8	88.5	88.4
13	91.5	89	88.6	88.5
14	91.3	88.7	88.5	88.3
15	91.3	88.9	88.6	88.4
16	91.2	88.7	88.3	88.2
17	91.3	88.7	88.5	88.3
18	91.4	88.7	88.5	88.4
19	91.3	88.7	88.5	88.3

Tabla 7.22: *Datos obtenidos en la simulación 4 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

Título:	Escenario 3 del Modelo Físico			
Fecha:	16-dic-22			
Descripción:	Simulación 4 para el escenario 3 del modelo con carga hidráulica de calibración con caudales de los nodos Q6 y Q39 a la mitad			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 2 P.M. con un clima templado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	91.3	88.7	88.5	88.3
2	91.5	88.9	88.6	88.5
4	91.5	88.7	88.5	88.4
6	91.5	88.9	88.6	88.5
8	91.5	89	88.7	88.6
10	91.5	88.9	88.7	88.5
12	91.5	88.9	88.6	88.5
14	91.7	89.1	88.8	88.7
16	91.5	89	88.7	88.6
18	91.5	88.9	88.6	88.5
20	91.5	88.9	88.6	88.5
22	91.5	88.9	88.6	88.5
24	91.6	89	88.7	88.6
26	91.5	88.9	88.6	88.5
28	91.3	88.7	88.5	88.4
30	91.3	88.7	88.5	88.3
32	91.5	89	88.7	88.6
34	91.5	88.9	88.5	88.4
36	91.3	88.7	88.4	88.3
38	91.5	88.9	88.6	88.5

Tabla 7.23: *Datos obtenidos en la simulación 5 para Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

“Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.”

Título:	Escenario 3 del Modelo Físico			
Fecha:	16-dic-22			
Descripción:	Simulación 5 para el escenario 3 del modelo con carga hidráulica de calibración con caudales de los nodos Q6 y Q39 a la mitad			
Observación general:	Inicio de Prueba a las 3 P.M. con un clima templado			
Tiempo (min)	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
0	90.4	87.8	87.5	87.4
1	90.2	87.6	87.3	87.2
2	90.1	87.5	87.3	87.1
3	90.3	87.7	87.5	87.4
4	90.3	87.7	87.5	87.3
5	90.3	87.7	87.5	87.4
6	90.3	87.7	87.4	87.3
7	90.2	87.6	87.3	87.2
8	90.4	87.8	87.5	87.4
9	90.4	87.8	87.5	87.4
10	90.3	87.7	87.5	87.3
11	90.3	87.8	87.5	87.4
12	90.3	87.7	87.4	87.3
13	90.2	87.7	87.3	87.2
14	90.2	87.7	87.3	87.2
15	90.4	87.8	87.5	87.4
16	90.4	87.8	87.5	87.4
17	90.5	87.7	87.4	87.3
18	90.3	87.7	87.5	87.4
19	90.3	87.7	87.5	87.3

Tabla 7.24: *Resultados de presiones para el Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

Escenario 3				
Cotas (cm)	59	41	24.7	25.5
Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
1	30.5	46	62	61.1
2	30.5	45.7	61.8	60.9
3	30.5	46	61.9	61
4	30.5	45.8	61.8	60.9
5	30.6	46	62	61.1
6	30.5	45.9	61.9	61
7	30.5	45.9	61.9	61
8	30.3	45.6	61.8	60.8
9	30.5	45.9	61.9	61
10	30.8	46	62	61.1
11	30.3	45.8	61.8	60.9
12	30.3	45.7	61.7	60.8
13	30.5	45.9	62	61
14	30.3	45.8	61.9	60.9
15	30.5	45.9	61.9	61
16	30.5	45.9	61.9	61
17	30.5	45.9	62	61
18	30.5	46	62	61.1

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 7.24: (Continuación) *Resultados de presiones para el Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
19	30.3	45.8	61.8	60.9
20	30.5	46	61.9	61
21	30.9	46.3	62.3	61.4
22	31	46.4	62.4	61.5
23	30.7	46	62.2	61.3
24	31	46.4	62.4	61.5
25	30.9	46.3	62.3	61.4
26	30.9	46.3	62.3	61.4
27	31.1	46.5	62.5	61.6
28	31	46.3	62.4	61.5
29	30.9	46.3	62.4	61.4
30	31	46.5	62.5	61.6
31	30.9	46.3	62.3	61.4
32	30.7	46.2	62.2	61.3
33	31	46.4	62.4	61.5
34	30.9	46.3	62.4	61.4
35	30.9	46.3	62.3	61.4
36	30.7	46.3	62.2	61.3
37	31	46.3	62.4	61.5
38	30.9	46.3	62.3	61.4
39	30.9	46.3	62.4	61.4
40	30.9	46.3	62.3	61.4
41	32.3	47.7	63.7	62.8
42	32.1	47.5	63.6	62.6
43	32.2	47.5	63.6	62.7
44	32.3	47.7	63.7	62.8
45	32.3	47.7	63.7	62.8
46	32.2	47.5	63.6	62.7
47	32.2	47.5	63.6	62.6
48	32.3	47.7	63.7	62.8
49	32.3	47.7	63.7	62.8
50	32.4	47.8	63.8	62.9
51	32.3	47.7	63.7	62.8
52	32.3	47.7	63.7	62.8
53	32.3	47.8	63.8	62.9
54	32.5	48	63.9	63
55	32.3	47.7	63.8	62.8
56	32.3	47.9	63.9	62.9
57	32.2	47.7	63.6	62.7
58	32.3	47.7	63.8	62.8
59	32.4	47.7	63.8	62.9
60	32.3	47.7	63.8	62.8

(Continúa en la siguiente página)

Tabla 7.24: (Continuación) *Resultados de presiones para el Escenario 3 del modelo físico. (Autores)*

Número de Datos	Presiones (cm.c.a.)			
	Nodo (4)	Nodo (13)	Nodo (16)	Nodo (60)
61	32.3	47.7	63.8	62.8
62	32.5	47.9	63.9	63
63	32.5	47.7	63.8	62.9
64	32.5	47.9	63.9	63
65	32.5	48	64	63.1
66	32.5	47.9	64	63
67	32.5	47.9	63.9	63
68	32.7	48.1	64.1	63.2
69	32.5	48	64	63.1
70	32.5	47.9	63.9	63
71	32.5	47.9	63.9	63
72	32.5	47.9	63.9	63
73	32.6	48	64	63.1
74	32.5	47.9	63.9	63
75	32.3	47.7	63.8	62.9
76	32.3	47.7	63.8	62.8
77	32.5	48	64	63.1
78	32.5	47.9	63.8	62.9
79	32.3	47.7	63.7	62.8
80	32.5	47.9	63.9	63
81	31.4	46.8	62.8	61.9
82	31.2	46.6	62.6	61.7
83	31.1	46.5	62.6	61.6
84	31.3	46.7	62.8	61.9
85	31.3	46.7	62.8	61.8
86	31.3	46.7	62.8	61.9
87	31.3	46.7	62.7	61.8
88	31.2	46.6	62.6	61.7
89	31.4	46.8	62.8	61.9
90	31.4	46.8	62.8	61.9
91	31.3	46.7	62.8	61.8
92	31.3	46.8	62.8	61.9
93	31.3	46.7	62.7	61.8
94	31.2	46.7	62.6	61.7
95	31.2	46.7	62.6	61.7
96	31.4	46.8	62.8	61.9
97	31.4	46.8	62.8	61.9
98	31.5	46.7	62.7	61.8
99	31.3	46.7	62.8	61.9
100	31.3	46.7	62.8	61.8
Promedio	31.5	46.9	62.9	62.0

(Fin de la tabla)

Mishell Alexandra Arichábala Coronel portador(a) de la cédula de ciudadanía N^o 0302478300. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 24 de febrero de 2023

F: 

Mishell Alexandra Arichábala Coronel

C.I. 0302478300

Jonnathan Martin Minchala Angulo portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0302711221. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Modelización física del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Rumihurco del cantón Azogues, provincia del Cañar.**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 24 de febrero de 2023

F:


Jonnathan Martin Minchala Angulo

C.I. 0302711221