



POSGRADOS

Maestría en **Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección**

RPC-SO-24-NO.381-2022

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

ANÁLISIS HIDRÁULICO Y EVALUACIÓN
ECONÓMICA DEL DIÁMETRO DE TUBERÍAS
EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO EN
ÁREAS RURALES MEDIANTE MODELACIÓN
NUMÉRICA

Autores

MAYRA ALEJANDRA NÚÑEZ MEDINA
CHRISTIAN MARCELO VEGA ALTAMIRANO

Director:

VERÓNICA VALERIA YÉPEZ MARTÍNEZ

QUITO - Ecuador

2024

Autores:



Mayra Alejandra Núñez Medina

Ingeniera Civil

Candidata a Magíster Elija un elemento.

Candidata a Magister en Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.

nm_mayri@hotmail.com



Christian Marcelo Vega Altamirano

Ingeniero Civil

Candidato a Magister en Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

ingchristianvega@hotmail.com

Dirigido por:



Verónica Valeria Yépez Martínez

Ingeniera Civil

Magíster en Recursos Hídricos con Mención en Diseño de Proyectos Hidráulicos

vyopez@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2024 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Mayra Alejandra Núñez Medina

Christian Marcelo Vega Altamirano

ANÁLISIS HIDRÁULICO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL DIÁMETRO DE TUBERÍAS EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO EN ÁREAS RURALES MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA

DEDICATORIA

A mis amadas hijas Arlette y Naomi.

Ustedes iluminan mi vida y son la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante. Cada logro, cada esfuerzo ha estado inspirado por el deseo de mostrarles que, con dedicación y amor, todo es posible; gracias por su paciencia, por sus sonrisas y por enseñarme cada día el verdadero significado de la perseverancia y el amor incondicional.

Con todo mi amor, Mayra.

A mi esposa, que con tu apoyo y paciencia me ha dado la fuerza necesaria para continuar este viaje. Sin ti, este logro no habría sido posible. A mis tres hijos, Sebastián, Jared y Antonio, quienes han sido mi inspiración constante. Me han impulsado a seguir adelante. Ustedes me recuerdan cada día lo que verdaderamente importa y por quiénes vale la pena darlo todo.

Este logro no es solo mío, es de todos nosotros. Con todo mi amor y gratitud. Christian.

AGRADECIMIENTO

Nuestro profundo agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, por brindarnos los espacios y herramientas necesarias para nuestra formación académica. Es un honor formar parte de esta comunidad educativa que impulsa el crecimiento y aprendizaje constante.

A nuestros profesores, quienes con dedicación, conocimiento y paciencia nos han guiado durante este proceso, gracias por sus valiosas enseñanzas, consejos y orientación para alcanzar esta meta.

Agradecemos a nuestros compañeros de estudios. Juntos compartimos horas de trabajo, discusiones, desafíos y aprendizajes que enriquecieron nuestra experiencia; especialmente a quienes establecieron lazos de amistad y compañerismo por su apoyo y motivación con lo que hicieron este recorrido más llevadero y gratificante.

Tabla de Contenido

1 Contenido

Resumen	12
Abstract	13
2 Introducción	14
3 Determinación del Problema.....	17
4 Objetivo	20
5 Marco teórico referencial.....	21
5.1 Introducción al Saneamiento y Sistemas de Alcantarillado en Áreas Rurales	21
5.2 Aguas residuales	21
5.3 Sistemas de alcantarillado sanitario.....	22
5.4 Alcantarillado sanitario rural	22
5.5 Diseño hidráulico	23
5.5.1 Flujo en Tuberías	23
5.5.2 Ecuaciones de diseño de alcantarillado	24
5.5.3 Limitaciones Hidráulicas en el Diseño de Tuberías de Alcantarillado Sanitario de PVC	27
5.5.4 Limitaciones de construcción	29

5.5.5	Limitaciones de autolimpieza	29
5.5.6	Fuerza tractiva	30
5.6	Costos	31
5.7	Fundamentación legal	31
6	Materiales y metodología.....	33
6.1	Área de estudio.....	33
6.1.1	Delimitación territorial e hidrosocial.....	35
6.2	Metodología	44
6.2.1	Manejo del ensayo experimental o toma de la información en campo	51
6.2.2	Consideraciones éticas	51
6.2.3	Resultados de la modelación.....	51
7	Resultados y discusión.....	68
7.1	Resultados y discusión para el sector de Santiago Méndez.....	70
7.2	Resultados y discusión para la comunidad el Rosario.....	72
7.3	Resultados y discusión para el sector Valle real.....	73
7.4	Resultados y discusión para el sector el Jardín del Upano.....	75
7.5	Resultados y discusión para el sector Sunicorral.	77
7.6	Resultados y discusión para el sector Bolsillo.	78
7.7	Resultados y discusión para el sector Caguanapamba.....	80

8	Conclusiones.....	83
	Referencias	87
	Anexos 1	90

TABLA DE ILUSTRACIONES

	Ilustración 6.1. Ubicación de los proyectos modelados.....	34
o	Ilustración 6.2. Ubicación de red de Santiago de Méndez.....	38
	Ilustración 6.3. Ubicación de red de Sunicorral, cantón el Tambo, provincia de Cañar.39	
	Ilustración 6.4. Ubicación de red de Bolsillo, cantón el Tambo, provincia de Cañar.....	40
	Ilustración 6.5. Ubicación de red de Caguanapamba, cantón el Tambo, provincia de Cañar.....	41
	Ilustración 6.6. Ubicación de red de sector Valle Real, cantón Morona, provincia de Morona Santiago.	42
	Ilustración 6.7. Ubicación de red de sector Jardín del Upano, cantón Morona, provincia de Morona Santiago.	43
o	Ilustración 6.8. Ubicación de red de Rosario, cantón Pablo Sexto, provincia de Morona Santiago.	44
	Ilustración 6.9. Modelación de red de Santiago de Méndez, original y variante.	52
	Ilustración 6.10. Modelación de red de Rosario, Pablo Sexto, original y variante.	54
	Ilustración 6.11. Modelación de red de Valle Real, original y variante.....	55
	Ilustración 6.12. Modelación de red de Jardín del Upano, original y variante.	56
	Ilustración 6.13. Modelación de red de Sunicorral, original y variante.	58

Ilustración 6.14. Modelación de red de Bolsillo, original y variante.....	60
Ilustración 6.15. Modelación de red de Bolsillo, original y variante.....	62
Ilustración 6.16. Variación Porcentual de la Velocidad Promedio en los sistemas modelados.....	63
Ilustración 6.17. Variación Porcentual de la Capacidad de Tubería en Sistemas Modelados.....	64
Ilustración 6.18. Variación Porcentual de la Capacidad de Tubería Promedio de los sistemas modelados	64
Ilustración 6.19. Variación Porcentual de Caudal / Capacidad de Tubería Promedio de los sistemas modelados.....	65
Ilustración 6.20. Variación Porcentual de la Fuerza Tractiva de los sistemas modelados.....	66
Ilustración 6.21. Variación Porcentual de Presupuesto Total de Red de los sistemas modelados.....	67

TABLA DE CUADROS

Tabla5.1. Profundidad mínima a cota clave.....	29
Tabla 6.1 Resultados de la modelación de red de Santiago de Méndez.....	52
Tabla 6.2 Resultados de la modelación de red de Rosario, cantón Pablo Sexto.	54
Tabla 6.3 Resultados de la modelación de red de Valle Real, cantón Morona.....	56
Tabla 6.4 Resultados de la modelación de red de Jardín del Upano, cantón Morona. .	57
Tabla 6.5 Resultados de la modelación de red de Sunicorral, cantón el Tambo.	58

Tabla 6.6 Resultados de la modelación de red de Bolsillo, cantón el Tambo.....	60
Tabla 6.7 Resultados de la modelación de red de Caguanapamba, cantón el Tambo. .	62
Tabla 6.8 Sectores en estudio.....	68
Tabla 6.9: Resultados generales de la modelación de red de los 7 casos.....	69

ANÁLISIS HIDRÁULICO Y
EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL
DIÁMETRO DE TUBERÍAS EN
SISTEMAS DE ALCANTARILLADO
EN ÁREAS RURALES MEDIANTE
MODELACIÓN NUMÉRICA

Autores:

MAYRA ALEJANDRA NÚÑEZ MEDINA
CHRISTIAN MARCELO VEGA ALTAMIRANO

Resumen

La investigación, aborda la optimización del diseño de sistemas de alcantarillado en áreas rurales, basado en modelaciones numéricas. Los sistemas de alcantarillados en estas zonas enfrentan desafíos particulares, tal es la baja densidad de la población y los limitados recursos económicos. El análisis hidráulico determina el diámetro óptimo de las tuberías, garantizando el transporte del caudal de aguas residuales en zona rural del Ecuador de modo eficiente, sin riesgos de desbordamientos o atascos en cumplimiento con las normativas vigentes. La evaluación económica es crucial en la selección del diámetro de las tuberías, optar por un diámetro mayor reduce los costos de mantenimiento a largo plazo, pero implica un mayor costo inicial. Utilizamos el software Sewer gems de diseño hidráulico para recrear la red de acuerdo a los diferentes proyectos de alcantarillado sanitario, manteniendo los nodos y las tuberías de conforman la red del diseño original. Se analizaron 7 sistemas de alcantarillado sanitario mediante modelación numérica, en cada uno se realizaron dos simulaciones: una con los diámetros originales y otra con diámetros comerciales más pequeños. El análisis incluyó la evaluación de variables como el caudal, la velocidad, el porcentaje de capacidad utilizada en las tuberías y el costo del sistema. Los resultados mostraron que, la reducción del diámetro no afectó significativamente la capacidad hidráulica de las redes, permitiendo una reducción de costos. Los hallazgos indicaron que el uso de diámetros más pequeños puede ser una opción viable en áreas rurales, donde la demanda de caudal es menor, lo que permite optimizar los costos de instalación y de mantenimiento sin comprometer el rendimiento del sistema. Este estudio contribuye a mejorar la planificación y optimización de sistemas de alcantarillado en contextos rurales, demostrando que una reducción controlada del diámetro de las tuberías puede ser económicamente beneficiosa y técnicamente factible.

Palabras clave:

Análisis hidráulico; evaluación económica; sistemas de alcantarillado; diámetro

Abstract

"The research addresses the optimization of sewer system design in rural areas, based on numerical modeling. Sewer systems in these areas face particular challenges, such as low population density and limited economic resources. Hydraulic analysis determines the optimal pipe diameter, ensuring efficient wastewater flow transport without risks of overflows or blockages, in compliance with current regulations. Economic evaluation is crucial in selecting pipe diameter; opting for a larger diameter reduces long-term maintenance costs but implies a higher initial cost. We used Sewer GEMS hydraulic design software to recreate the sanitary sewer network, maintaining the nodes and pipes that make up the original design network. Seven sanitary sewer systems were analyzed through numerical modeling, with two simulations performed for each: one with the original diameters and another with smaller commercial diameters. The analysis included the evaluation of variables such as flow rate, flow velocity, percentage of pipe capacity used, and system cost. The results showed that reducing the diameter did not significantly affect the hydraulic capacity of the networks, allowing for cost reduction. The findings indicated that the use of smaller diameters may be a viable option in rural areas, where flow demand is lower, allowing for optimization of installation and maintenance costs without compromising system performance. This study contributes to improving the planning and optimization of sewer systems in rural contexts, demonstrating that a controlled reduction in pipe diameter can be economically beneficial and technically feasible."

Palabras clave:

Hydraulic analysis; economic evaluation; sewage systems; diameter

2 Introducción

En Ecuador, las normativas y regulaciones de saneamiento son gestionadas principalmente por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) y la Secretaría del Agua, ahora integrada en el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Las normativas incluyen, entre otras, las Normas Técnicas de Diseño, como la NTE INEN 1108, define los estándares de calidad del agua para el consumo humano. También se destacan las Normas CO 10.07-601 y CO 10.07-602, centradas en el diseño de sistemas de agua potable y gestión de aguas residuales, aplicables en zonas urbanas y rurales, ajustadas al tamaño de la población servida.

Las normativas incluyen directrices para el diseño de sistemas de recolección y transporte de aguas residuales y pluviales, clasificando los sistemas de alcantarillado en tres tipos: separados, combinados y mixtos.

En el apartado 5.2.1.6. señalan que *“el diámetro mínimo que deberá usarse en sistemas de alcantarillado será 0,2 m para alcantarillado sanitario”* (INEN CO 10.07 - 601, 1992)

Se presentan antecedentes sobre la evaluación de costos y el análisis hidráulico para determinar los diámetros óptimos en redes de alcantarillado sanitario en áreas rurales, utilizando un modelo numérico:

- Problemas de saneamiento básico en áreas rurales: Las áreas rurales suelen enfrentar desafíos significativos en términos de acceso a servicios básicos, como el alcantarillado sanitario. La falta de infraestructura adecuada puede llevar a problemas de contaminación del agua, propagación de enfermedades y puede llevar a una calidad de vida deficiente para la población rural

- **Importancia del análisis hidráulico del diseño de sistemas de alcantarillado sanitario:** El diseño hidráulico sirve para que las redes de alcantarillado funcionen de manera eficiente. Este análisis ayuda a determinar los diámetros adecuados de las tuberías, así como la velocidad y el flujo óptimos del agua. De esta manera, se pueden prevenir problemas como el estancamiento del agua, la acumulación de sedimentos y el colapso de las tuberías.
- **Modelos numéricos en la planificación de redes sanitarias de alcantarillado:** El empleo de modelos numéricos se ha vuelto cada vez más frecuente en la planificación y diseño de alcantarillado. Estos modelos permiten simular el funcionamiento hidráulico de la red, teniendo en cuenta variables como la topografía, la demanda de agua y las características de las tuberías, lo que permite la toma de decisiones informadas.
- **Optimización de costos en sistemas de alcantarillado:** La optimización de costos es un aspecto crucial en la implementación de sistemas de alcantarillado, especialmente en zonas rurales con recursos limitados. Hay que evaluar diferentes opciones de diseño y materiales de tuberías para encontrar soluciones eficientes en costos, durabilidad y mantenimiento.
- **Normativas y estándares aplicables:** Al diseñar redes de alcantarillado, es crucial tener en cuenta las regulaciones y estándares tanto nacionales como internacionales que se aplican a los sistemas de saneamiento básico. Estas normativas aseguran la seguridad y la calidad de las instalaciones de alcantarillado al proporcionar pautas y criterios técnicos.

Ante la insuficiencia de los recursos fiscales se hace necesaria la presencia de apoyo financiero internacional como el Banco Interamericano de Desarrollo que mide la efectividad de los proyectos basado en 4 principios de los que menciona *“En tercer lugar, la eficiencia: ésta protege los recursos asegurando que los beneficios del proyecto superen los costos. Promueve intervenciones eficientes en función de los costos”* (Pantoja Bombón, 2016).

Estos antecedentes resaltan la importancia de realizar una evaluación de costos y un análisis hidráulico-adequados para determinar los diámetros óptimos en redes de alcantarillado sanitario en áreas rurales. Es esencial considerar estos aspectos económicos, técnicos, que aseguren la eficiencia, la sostenibilidad y el cumplimiento de las normativas al implementar sistemas de alcantarillado en las áreas mencionadas.

3 Determinación del Problema

Los sistemas de alcantarillado sanitario rural son esenciales para la salud pública. Al gestionar correctamente las aguas residuales y los desechos humanos, se reducen los riesgos sanitarios para la comunidad. Esto mejora la calidad de vida al evitar la acumulación de aguas residuales a cielo abierto y disminuye la contaminación ambiental, protegiendo el suelo, los cuerpos de agua y los recursos hídricos subterráneos. Una implementación adecuada de estos sistemas brinda el desarrollo económico en estas zonas rurales y la conservación de los recursos naturales, mejorando la vida de los residentes y promoviendo un entorno rural próspero.

La reducción del diámetro en las tuberías de las alcantarillas tiene varios beneficios económicos, entre los cuales se destacan:

- Reducción en los costos de construcción al utilizar tuberías de menor diámetro, se requiere menos material para la instalación, lo que se traduce en un ahorro significativo en los costos de construcción y
- Los caudales sanitarios en áreas rurales son bajos y no superan el 80% de la capacidad de la tubería, al cumplir con la recomendación de la normativa: “ el diámetro mínimo en los sistemas de alcantarillado es de 0.20 m” (INEN CO 10.07 - 601, 1992).

Actualmente, no existen estudios específicos enfocados en el análisis hidráulico y evaluación económica del diámetro de tuberías en sistemas de alcantarillado. Aunque es crucial optimizar los sistemas de alcantarillado para aumentar la eficiencia y reducir costos en áreas rurales, la literatura científica y técnica no explora el uso de técnicas de modelación numérica para determinar el diámetro óptimo de las tuberías en estos contextos. Nuestra investigación podría contribuir a mejorar la planificación,

sostenibilidad y gestión de estos sistemas mediante enfoques cuantitativos y análisis de costos.

Otra ventaja relacionada con la reducción en los costos operativos: Las tuberías de menor diámetro permiten un flujo más rápido del agua, para reducir la posibilidad de obstrucción se deberá controlar la pendiente y velocidad. Reducir los costos en un proyecto de alcantarillado rural puede proporcionar varias ventajas, entre las cuales se incluyen:

1. **Accesibilidad y cobertura:** Al reducir los costos, se puede ampliar la accesibilidad y la cobertura del sistema de alcantarillado rural. Esto significa que más comunidades rurales podrán acceder a servicios de alcantarillado adecuados, Esto reducirá los riesgos para la salud y mejorará significativamente el bienestar de los residentes.
2. **Viabilidad financiera:** La reducción de los costos del proyecto, puede facilitar la obtención de financiamiento y recursos necesarios para implementar el sistema de alcantarillado sanitario rural.
3. **Sostenibilidad a largo plazo:** La disminución de costos puede contribuir a la sostenibilidad a futuro del sistema de alcantarillado rural sanitario. Al hacer que el proyecto sea más rentable, se pueden destinar recursos adicionales a la operación, mantenimiento y mejora continua del sistema, lo que garantiza su funcionalidad a largo plazo.
4. **Mayor beneficio económico para la comunidad:** Al reducir los costos, los pagos asociados que le corresponden a la comunidad se reducen. Esto significa que los residentes podrán acceder a servicios de alcantarillado sin incurrir en costos excesivos.
5. **Posibilidad de replicación:** Si se logra reducir los costos en un proyecto de alcantarillado rural, esto puede servir como un modelo o ejemplo para futuros proyectos similares en otras comunidades rurales. Esto permitirá alcanzar un mayor número de áreas rurales con servicios de alcantarillado sanitario adecuados.

En resumen, la necesidad de mejorar la infraestructura de alcantarillado sanitario en las áreas rurales de Ecuador justifica este tema, a través de un análisis hidráulico preciso y una evaluación rigurosa de costos. Mejorar la situación de vida de la población rural, preservar el medio ambiente y promover un desarrollo sostenible en estas áreas permitirá diseñar redes de alcantarillado eficientes, sostenibles y económicamente viables.

4 Objetivo

Analizar los costos de los sistemas sanitarios de alcantarillado en zonas rurales con un modelo numérico para determinar los diámetros ideales de las redes y minimizar la carga económica de la comunidad, para ampliar la aplicabilidad de este enfoque a otros diseños de alcantarillado.

1. Realizar el análisis hidráulico de los sistemas de alcantarillado seleccionados, para obtener diferentes modelos que permitan realizar comparaciones cuantitativas entre ellos.
2. Comparar los costos de las variantes de las redes rurales, de alcantarillado sanitario, mediante el cambio de los diámetros y parámetros de diseño como velocidades mínimas, velocidades máximas, esfuerzo cortante, tirante de agua.
3. Especificar los resultados de la investigación, de forma cuantitativa, para su consideración técnica y económica en futuros proyectos de alcantarillado sanitario rural.

5 Marco teórico referencial

5.1 Introducción al Saneamiento y Sistemas de Alcantarillado en Áreas Rurales

El diseño y construcción de sistemas de saneamiento en áreas rurales es un desafío debido a la dispersión poblacional, la inexistencia de infraestructura y los recursos finitos. La implementación de sistemas de alcantarillado mejora la salud pública y previniendo enfermedades afines con el agua que está contaminada, la correcta selección de diámetros en tuberías es fundamental, ya que influye tanto en el funcionamiento hidráulico como en el costo total del sistema.

5.2 Aguas residuales

“Las aguas residuales de uso doméstico están conformadas en un elevado porcentaje de agua cercano al 99.9% y apenas un 0,1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos, esta pequeña fracción de sólidos presenta la necesidad de tratamientos y su disposición”.

(METCALF&EDDY, 1998)

Las aguas residuales están compuestas por una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, que pueden estar suspendidos o disueltos en el agua. Entre los materiales inorgánicos se encuentran las sales minerales. Los materiales orgánicos incluyen residuos alimenticios, heces, material vegetal, jabones y detergentes sintéticos. Las proteínas, presentes en organismos animales y vegetales, son un componente importante, y su descomposición genera sulfuro de hidrógeno, un gas tóxico con un olor característico a huevos podridos.

5.3 Sistemas de alcantarillado sanitario

“Un sistema de alcantarillado consiste en una serie de tuberías y obras complementarias, necesarias para recibir, conducir, ventilar y evacuar las aguas residuales de la población. De no existir estas redes de recolección de agua, se pondría en grave peligro la salud de las personas debido al riesgo de enfermedades epidemiológicas y, además, se causarían importantes pérdidas materiales”. (Comisión Nacional del Agua, 2009, pág. 2)

“Este tipo de alcantarillado, está planificado para que las aguas residuales generadas en las viviendas sean conducidas a su tratamiento. Aunque también puede recolectar ciertos desechos comerciales e industriales, su diseño no está preparado para manejar las aguas provenientes de las lluvias. Por tanto, su función principal es transportar exclusivamente aguas residuales domésticas y evitar la sobrecarga del sistema con agua pluvial” (Carrera, 2009).

5.4 Alcantarillado sanitario rural

La necesidad de construir sistemas de alcantarillado surge de la interacción entre las actividades humanas y el ciclo natural del agua. Esta interacción puede modificar el flujo natural del agua, haciendo esencial una gestión adecuada del alcantarillado para prevenir enfermedades, proteger la infraestructura y salvaguardar la salud pública.

“En las comunidades rurales de Ecuador, 8 de cada 10 niños indígenas carecen simultáneamente de agua segura, saneamiento básico e insumos de higiene en sus hogares. La falta de acceso a este derecho repercute principalmente en la salud de los niños. Las diarreas agudas son la segunda causa de muerte en los menores de 5 años en

los países en desarrollo, y se ha comprobado que es uno de los principales determinantes de la desnutrición crónica". (UNICEF, 2024).

"Entonces, la cantidad y la calidad del agua residual, depende de la cantidad de agua consumida y de la actividad de donde se demanda. Se drenan las aguas residuales con la finalidad de mantener la salud pública y garantizar un entorno con las menores alteraciones posibles, evitando la dispersión de enfermedades e incomodidades. Las aguas de este tipo representan un peligro para los humanos y la naturaleza, puesto que contienen altas concentraciones de contaminantes" (Butler, 2011).

"En el último siglo, el uso global de agua ha aumentado seis veces, alcanzando una demanda actual de aproximadamente 4600 km³/año, con proyecciones de un incremento del 20-30% para 2050. Las actividades humanas han incrementado la contaminación en cuerpos de agua, con nutrientes, antibióticos y metales pesados, deteriorando la calidad del agua en ríos y lagos de África, Asia y América Latina desde los años 90. Este deterioro se prevé que se intensifique en la próxima década, siendo la sobrecarga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) el principal desafío, causando eutrofización, floraciones de algas nocivas, "zonas muertas" y pérdida de biodiversidad acuática" (Qi, 2020).

5.5 Diseño hidráulico

5.5.1 Flujo en Tuberías

El flujo en tuberías sanitarias puede clasificarse en dos tipos principales: flujo a presión y flujo a superficie libre.

Cuando la tubería está completamente llena de agua y la presión interna es mayor que la atmosférica, se da el flujo a presión. Por otro lado, el flujo a superficie libre, característico de los sistemas de alcantarillado, ocurre cuando la tubería no está completamente llena y el nivel de agua es libre, influenciado principalmente por la gravedad.

La correcta comprensión de estos tipos de flujo es esencial para dimensionar tuberías que mantengan un flujo adecuado sin acumulación de sólidos ni problemas de sobrepresión en el sistema.

5.5.2 Ecuaciones de diseño de alcantarillado

Para elaborar los diseños se trabajó con las fórmulas de Manning. (Chow, 1959)

La ecuación de Manning es una fórmula empírica utilizada en hidráulica para calcular la velocidad del flujo en canales o tuberías que operan a flujo libre, es decir, sin presión. Esta ecuación relaciona la velocidad del flujo con el coeficiente de rugosidad, el radio hidráulico y la pendiente del terreno.

Esta ecuación es fundamental en el diseño y análisis de sistemas de drenaje, canales abiertos y tuberías parcialmente llenas.

La ecuación de Manning es la siguiente:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

V: velocidad del flujo (m/s).

n: coeficiente de rugosidad de Manning, que depende del material de la tubería o canal. Por ejemplo, para tuberías de concreto, $n=0.013$, y para tuberías de PVC, n está en el rango de 0.009 a 0.011

R: radio hidráulico, definido como el área de la sección transversal de flujo dividida entre el perímetro mojado:

$$R = \frac{A}{P}$$

Donde A es el área del flujo y P es el perímetro mojado.

S: pendiente de la línea de energía (generalmente es la pendiente del terreno o la inclinación de la tubería).

La ecuación de Manning es una herramienta clave en el diseño de sistemas de alcantarillado y drenaje porque permite determinar la velocidad del flujo, y combinada con la fórmula de continuidad $Q=A \cdot V$, también permite calcular el caudal en un sistema hidráulico.

Área Hidráulica (A): para tuberías circulares llenas, el área se calcula con:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

Donde:

D: es el diámetro de la tubería (m).

P: el perímetro mojado en una tubería completamente llena es igual a la circunferencia interna de la tubería:

$$P = \pi D \quad (2)$$

Q: el caudal o capacidad de la tubería se calcula con:

$$Q = A \cdot V \quad (3)$$

Donde

A: es el área de la sección transversal (m²).

V: es la velocidad del flujo calculada mediante la ecuación de Manning (m/s).

El resultado de Q estará en m³/s, que se convierte a litros por segundo (1 m³/s = 1000 L/s).

Caudal de Diseño: En un sistema de alcantarillado se calcula a partir del caudal medio diario de agua consumida por la población, ajustado con factores que consideran picos de uso y aportes adicionales. Generalmente, se incluyen factores de corrección para tomar en cuenta infiltraciones y variabilidad en el consumo, especialmente en áreas rurales. El caudal de diseño garantiza que el sistema de alcantarillado pueda soportar las demandas máximas sin desbordarse ni causar obstrucciones.

El caudal de diseño puede obtenerse a partir de la fórmula:

$$Q_d = Q_m * F_p \quad (4)$$

donde:

Qd: caudal de diseño (m³/s),

Qm: caudal medio diario (m³/s),

Fp: factor de pico, que usualmente varía entre 1.5 y 2.5 dependiendo de la variabilidad del uso de agua

Caudal/Capacidad (%): Este valor se obtiene al dividir el caudal actual entre la capacidad total de la tubería:

$$\frac{\text{Caudal}}{\text{Capacidad}} (\%) = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{capacidad}}} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

Q actual: el caudal real en la tubería (L/s).

Q capacidad: es el caudal máximo (capacidad) que la tubería puede manejar (L/s).

Profundidad Relativa (h/D): La profundidad relativa se refiere a la relación entre la altura del flujo h y el diámetro de la tubería D:

$$\frac{h}{D} \quad (6)$$

Se recomienda que h/D esté entre 0.5 y 0.9 para un buen rendimiento hidráulico.

5.5.3 Limitaciones Hidráulicas en el Diseño de Tuberías de Alcantarillado Sanitario de PVC

En este trabajo el diseño de sistemas sanitario de alcantarillado se utilizó tuberías de PVC requiere el establecimiento de restricciones hidráulicas esenciales para asegurar un funcionamiento seguro, eficiente y duradero.

A continuación, se detallan las principales restricciones que deben considerarse para garantizar la integridad hidráulica y estructural de las tuberías de PVC en los colectores de alcantarillado sanitario.

5.5.3.1 Relación Máxima de Llenado

“Para mantener un flujo adecuado y garantizar la aireación en el sistema, la normativa ecuatoriana establece que la profundidad de flujo en las tuberías de PVC no debe exceder el 85% del diámetro interno, de la tubería, en condiciones de caudal de diseño”. (EMAAP-Q, 2009). Este límite es fundamental para prevenir la formación de condiciones anaeróbicas y la acumulación de gases nocivos, lo que podría comprometer la integridad del PVC. Al mantener el flujo parcialmente lleno, se optimiza la capacidad de autolimpieza del sistema, esencial en alcantarillado sanitario para evitar obstrucciones y mantener la eficiencia hidráulica, “El calado máximo de agua en las tuberías no debe sobrepasar el 75% del diámetro” (INEN CO 10.07 - 601, 1992)

5.5.3.2 Velocidad Máxima en Tuberías de PVC

La normativa ecuatoriana recomienda que: “la velocidad máxima en el flujo de alcantarillado por gravedad, al utilizar tuberías de PVC, no debe exceder los 5 m/s. Esta limitación es crítica para evitar el desgaste por erosión en las tuberías y en las estructuras de conexión” (INEN CO 10.07 - 601, 1992). La resistencia a la abrasión del PVC es adecuada, pero a velocidades elevadas pueden surgir problemas como:

“Desgaste por erosión: Aunque el PVC tiene buena resistencia, flujos de alta velocidad pueden ocasionar deterioro en tramos y conexiones, particularmente en curvas y juntas.” (Chin, 2013)

“Requerimientos de estructuras de caída y disipación de energía: Para controlar la energía del flujo y prevenir daños en las tuberías de PVC, se deben implementar estructuras de caída adecuadas, especialmente en tramos donde las velocidades pueden ser altas”. (ASCE, 2007)

“Entrampamiento de aire y formación de resaltos: Estas condiciones pueden impactar negativamente la estabilidad del flujo y aumentar el riesgo de daños en la infraestructura”. (Mays, 2011)

5.5.3.3 Pendiente Máxima de la Tubería

Para cumplir con las normativas ecuatorianas, es necesario calcular las pendientes de las tuberías de PVC en sistemas de alcantarillado sanitario, asegurando que la velocidad del flujo se mantenga dentro de los límites establecidos. Un diseño adecuado asegura que la pendiente sea suficiente para facilitar la autolimpieza sin causar velocidades excesivas que puedan llevar a la erosión o acumulación de sólidos (INEN CO 10.07 - 601, 1992). Gracias a las propiedades de baja rugosidad del PVC, se pueden emplear pendientes menos pronunciadas en comparación con otros materiales, garantizando una conducción eficiente.

5.5.4 Limitaciones de construcción

Profundidad mínima a cota clave ver tabla 5.1, referente a *“profundidad mínima a cota clave: las tuberías deben ubicarse a una profundidad que garantice la protección de las tuberías; por lo tanto, se determinan los valores mínimos permisibles de la distancia entre la superficie y la cota clave de la tubería”*. (Criollo de la Cruz, 2020)

Tabla- 5-5.1. Profundidad mínima a cota clave.

Servidumbre	Profundidad a la clave del colector (m)
Vías peatonales o zonas verdes	0.75
Vías vehiculares	1.20

Fuente: (Ministerio de Vivienda , 2017).

“Profundidad máxima a cota clave: para controlar aspectos constructivos y las cargas a las que se somete cada tubería de la red” (Criollo de la Cruz, 2020), se debe establecer una profundidad máxima de 5 m.

5.5.5 Limitaciones de autolimpieza

“Mediante la autolimpieza se busca remover toda partícula sólida que ingrese en las tuberías recolectoras y de transporte, para así evitar su posible obstrucción como resultado de la sedimentación y acumulación de tales partículas”. (Criollo de la Cruz, 2020)

Velocidad mínima: *“Una velocidad de flujo considerablemente baja puede permitir la sedimentación de sólidos en el sistema, por lo que es necesario establecer una velocidad mínima capaz de lavar las partículas dentro del conducto. Esta velocidad mínima de autolimpieza es crucial para reducir costos de excavación al permitir pendientes menores en las redes colectoras, especialmente en áreas planas”*. (Criollo de la Cruz, 2020)

“Cuando se trata de un sistema de alcantarillado simplificado, el valor de la velocidad mínima real será de 0.4 m/s o el correspondiente a un esfuerzo cortante mínimo de 1.0 N/m²” (EMAAP-Q, 2009).

Para el caudal de diseño, considerando las condiciones iniciales y finales del período de diseño, deben establecerse los criterios de velocidad y esfuerzo cortante.

“En aguas residuales, la velocidad no debería ser inferior a 0.45 m/s para diámetros menores a 450 mm; mientras que, para aguas pluviales, la velocidad mínima debe ser de 0.75 m/s en diámetros similares. Además, se debe establecer una pendiente mínima para cada tubería, que asegure condiciones de autolimpieza y minimice la producción de gas sulfuro de hidrógeno”. (Criollo de la Cruz, 2020)

5.5.6 Fuerza tractiva

En el contexto del alcantarillado, la fuerza tractiva se refiere a la capacidad del flujo de agua en las tuberías para mover sólidos o sedimentos que se encuentran en el sistema. Para el diseño y operación de los sistemas de alcantarillado, es esencial contar con una fuerza tractiva adecuada. Esto es necesario para evadir la acumulación de sedimentos, que podría obstruir el flujo y causar problemas de mantenimiento.

La fuerza tractiva es directamente proporcional a la velocidad del flujo de agua y a la pendiente de la tubería. Para calcularla, se utilizan ecuaciones hidráulicas que tienen en cuenta factores como el caudal, la pendiente de las tuberías y el tipo de sedimento. Si la fuerza tractiva es muy baja, los sólidos no se desplazarán adecuadamente, lo que provocará acumulación, mientras que, si es muy alta, podría erosionar el sistema.

“Cuando la verificación se realice atendiendo el criterio de esfuerzo tractivo, para las condiciones iniciales de operación de cada tramo, debe verificarse el comportamiento autolimpieza del flujo, para lo cual es necesario utilizar el criterio de esfuerzo cortante medio. Por lo tanto, debe establecerse que el valor del esfuerzo cortante medio sea mayor o igual a 1,0 N/m) para el caudal mínimo de autolimpieza QLO.” (EMAAP-Q, 2009)

5.6 Costos

En el análisis de costos de las redes de alcantarillado sanitario rural, se unificaron los precios unitarios en todos los rubros relacionados con la construcción de las redes sanitarias evaluadas. Esto incluyó, por ejemplo: replanteo y nivelación, excavación manual y mecánica, tuberías, pozos de revisión, rellenos manual y mecánico, cargado manual y mecánico, y transporte. No se consideraron elementos externos como reparaciones de asfaltos o adoquines, plantas de tratamiento, acometidas, o pasos de agua. Esta unificación permitió realizar una comparación homogénea entre los distintos sistemas, manteniendo los precios unitarios consistentes en todas las modelaciones.

Los precios unitarios utilizados en el análisis incluyen todos los componentes para la ejecución de la obra: los costos de herramientas, mano de obra, materiales, transporte, así como los costos indirectos e impuestos. Esto garantiza que los presupuestos calculados reflejan una visión integral de los costos de la construcción de las redes de alcantarillado.

Los cálculos de volúmenes y costos se realizaron basados en los resultados de SewerGEMS, donde se analizaron varios resultados como las longitudes de tubería, profundidades de pozos y tuberías, longitudes y diámetros comerciales utilizados por tramos.

Estos datos se utilizaron para estimar las cantidades de obra necesarias, como longitudes, áreas y volúmenes. Mediante Excel, se calcularon estas cantidades y se multiplicaron por los precios unitarios de cada rubro, obteniendo así los presupuestos referenciales para cada uno de los sistemas y sus variantes de diseño (original y rediseño) en los 7 sistemas de alcantarillado analizados, lo que permitió realizar una comparación precisa entre ambas variantes.

5.7 Fundamentación legal

Este proyecto está sustentado en la (Constitución de la República del Ecuador, 2008), sección séptima referente a salud, que indica:

“Art. 32.- La salud es un derecho que garantiza el Estado, cuya realización se vincula al ejercicio de otros derechos, entre ellos el derecho al agua, la alimentación, la educación, la cultura física, el trabajo, la seguridad social, los ambientes sanos y otros que sustentan el buen vivir.”

“El Estado garantizará este derecho mediante políticas económicas, sociales, culturales, educativas y ambientales; y el acceso permanente, oportuno y sin exclusión a programas, acciones y servicios de promoción y atención integral de salud, salud sexual y salud reproductiva. La prestación de los servicios de salud se regirá por los principios de equidad, universalidad, solidaridad, interculturalidad, calidad, eficiencia, eficacia, precaución y bioética, con enfoque de género y generacional.”

En lo que se refiere a las aguas servidas en el Código de la Salud (D.E. 188 R.O. 158 del 2 de febrero de 1971), en los Art. 17, 19, 25 y 28 señala:

“Art. 17.- Nadie podrá descargar, directa o indirectamente, sustancias nocivas o indeseables en forma tal que puedan contaminar o afectar la calidad sanitaria del agua y obstruir, total o parcialmente, las vías de suministros.”

“Art. 19.- Los pozos y suministros privados de agua en las áreas servidas por acueductos de uso público serán clausurados o sellados, provisional o definitivamente, cuando se compruebe que no ofrecen seguridades de potabilidad.”

“Art. 25.- Las excretas, aguas servidas, residuos industriales no podrán descargarse, directa o indirectamente, en quebradas, ríos, lagos, acequias, o en cualquier curso de agua para uso doméstico, agrícola, industrial o de recreación, a menos que previamente sean tratados por métodos que los hagan inofensivos para la salud.”

“Art. 28.- Los residuos industriales no podrán eliminarse en un alcantarillado público, sin el permiso previo de la autoridad que administre el sistema, la cual aprobará la solución más conveniente en cada caso, de conformidad con la técnica recomendada por la autoridad de salud”.

6 Materiales y metodología

Se desarrolló un análisis hidráulico y económico de siete sistemas de alcantarillado sanitario rural en Ecuador mediante modelación numérica. Para esto, se utilizó el software SewerGEMS para las simulaciones hidráulicas, QGIS para la delimitación territorial, AutoCAD para el dibujo de redes y Excel para los cálculos de presupuesto. El estudio adoptó un enfoque cuantitativo y experimental, evaluando cada sistema con dos modelaciones: una basada en el diseño original y otra con diámetros comerciales menores. Se analizaron variables clave, como velocidad de flujo, capacidad de tuberías y costos de instalación, comparando así la eficiencia hidráulica y los ahorros económicos de cada alternativa. La metodología se basó en datos técnicos de proyectos preexistentes y aprobados, asegurando la exactitud y fiabilidad de los resultados.

Debido a la naturaleza de la tesis y los parámetros definidos en el anteproyecto, se ha determinado que el trabajo se enfocará exclusivamente en sistemas de alcantarillado sanitario de áreas rurales, para los cuales ya se disponen de los datos necesarios para su modelización.

6.1 Área de estudio

Las áreas de estudio se ubican en zonas rurales de las provincias de Morona Santiago y Cañar, en Ecuador, y comprenden siete sectores con características socioambientales y geográficas diversas.

En Santiago de Méndez (Morona Santiago), a 55 km de Macas, la interacción entre comunidades indígenas Shuar y colonos genera tensiones sobre el acceso a recursos hídricos.

Los sectores de Bolsillo, Sunicorral y Caguanapamba (Cantón El Tambo, Cañar), ubicados a 80, 85 y 90 km de Azogues respectivamente se caracterizan por un relieve accidentado

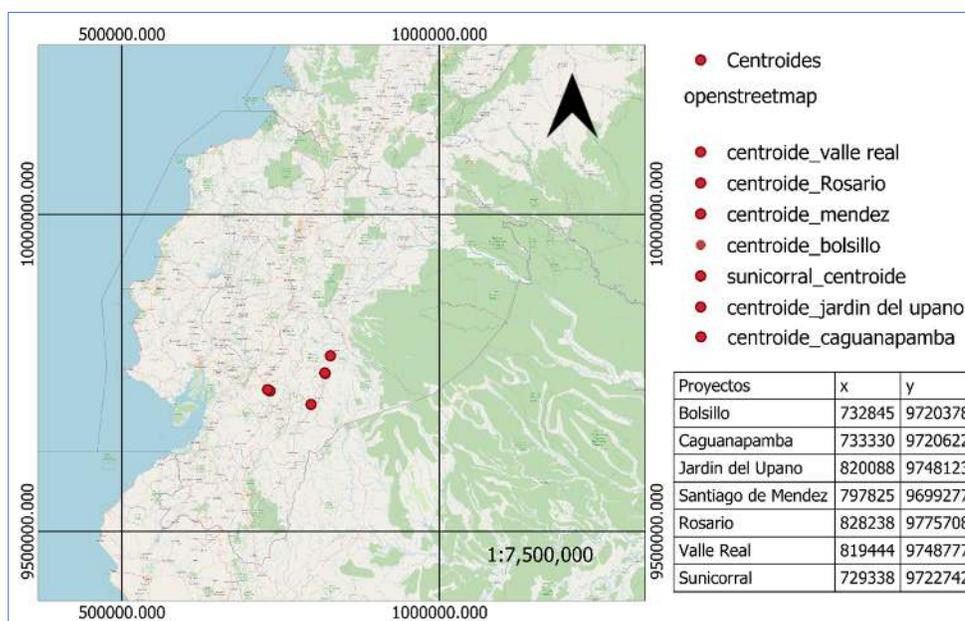
y una alta dependencia del agua para la agricultura, con conflictos por la disponibilidad del recurso en épocas de sequía.

En los sectores de Valle Real y Jardín del Upano (a 10 y 12 km de Macas, en Morona Santiago), la creciente urbanización presiona los recursos hídricos y genera tensiones entre las necesidades urbanas y rurales.

Finalmente, El Rosario (Pablo Sexto, Morona Santiago), a unos 40 km de Macas, es una comunidad amazónica donde el agua, aunque abundante, está amenazada por actividades como la deforestación y la expansión agrícola. Estos sectores reflejan una variedad de condiciones que afectan la gestión de los proyectos de alcantarillado en áreas rurales.

En la Ilustración 6.1, se presenta la ubicación de cada uno de los sectores de esta tesis, incluyendo las coordenadas del centroide de cada proyecto.

Ilustración 6.1. Ubicación de los proyectos modelados.



Fuente: Qgis. Openstreetmap.

A continuación, se detallan los sistemas:

- Cantón Santiago de Méndez, provincia de Morona Santiago.
- Sector Bolsillo, cantón el tambo, provincia del Cañar.
- Comunidad Sunicorral, cantón el tambo, provincia del Cañar.
- Sector Caguanapamba, cantón el Tambo, provincia del Cañar.
- Sector Jardín del Upano, parroquia Macas., cantón Morona, provincia de Morona Santiago.
- Sector Valle Real, parroquia Macas., cantón Morona, provincia de Morona Santiago.
- Comunidad el Rosario, cantón Pablo Sexto, provincia de Morona Santiago.

6.1.1 Delimitación territorial e hidrosocial

La información se organiza por cantones debido a las similitudes en aspectos hidrosociales, sujetos sociales, jerarquías de poder y estructuras organizacionales de los sectores dentro de cada cantón. Esta agrupación facilita una explicación más clara y coherente, permitiendo un análisis detallado y comparativo que resalta tanto las características comunes como las diferencias específicas de cada sistema. Se presenta mediante la tabla

Cantón/ Parroquia	Delimitación Territorial	Extensión Territorial	Historia y Espacio Social	Sujeto Social y Organizacio nes	Conflictivida d y Tensiones	Procesos de Organizaci ón e Incidencia Política	Estado del Proyecto de Alcantarillado	Coordenadas del Proyecto
Santiago de Méndez, Morona Santiago	Norte: Sucúa y Logroño, Sur: Limón Indanza, Este: Tiwintza, Oeste: Cañar y Azuay	1,981 km ²	Coloniza ción mestiza e indígena Shuar, espacio social diverso	Federación Shuar, organizacio nes campesinas , defensa de recursos hídricos	Tensiones por tenencia de tierras, minería y deforestación	Federación Shuar en defensa de derechos territoriales y recursos hídricos	Dispone agua potable en las zonas del estudio, las zonas tiene alcantarillado sanitario, no dispone sistema de alcantarillado pluvial.	Centroide Santiago de Mendez: X: 797825 Y:9699277
El Tambo, Cañar	Norte: Azogues, Sur: Biblián, Este: Cañar, Oeste: Suscal y Chimborazo	82 km ²	Pueblos indígenas Cañaris, cambios tras la colonizac ión	Juntas de agua, control de recursos hídricos por organizacio nes campesinas	Conflictos por uso del agua, especialment e en épocas de sequía	Juntas de regantes participan en resolución de conflictos hídricos	En el área rural, en las zonas de estudio dispone de agua cruda, no dispone de agua potable. No existe redes de alcantarillado sanitario ni pluvial.	Centroide Sunicorral: X:729338 Y:9722742 Bolsillo: X:732845 Y:9720378 Caguanapamba: X: 733330 Y:9720622
Macas, Morona Santiago	Capital de Morona Santiago, interacción urbanización y conservación	4,606.9 km ²	Crecimie nto urbano, migració n interna, presión	Gobierno local y organizacio nes comunitaria s gestionan	Conflictos por acceso a servicios básicos entre zonas urbanas y rurales	Comunidades periurbanas y rurales exigen mejores servicios básicos	Proyectos construidos, servicios básicos completos	Centroide Valle Real: X: 819444 Y:974877 Jardín del Upano: X: 820088 Y:9748123

			sobre recursos hídricos	acceso al agua				
Pablo Sexto, Morona Santiago	Abundancia hídrica, amenazada por deforestación y expansión agrícola	1,371 km ²	Nuevo cantón, población rural, comunidades indígenas Shuar	Organizaciones indígenas Shuar y campesinas defienden derechos territoriales	Conflictos por uso de tierras y agua, expansión agrícola y ganadería	Organizaciones Shuar y campesinas inciden en políticas locales sobre recursos hídricos	En las zonas del estudio tiene agua cruda, no agua potable, no dispone de redes de alcantarillado	Centroide Rosario: X:9775708 X: 828238

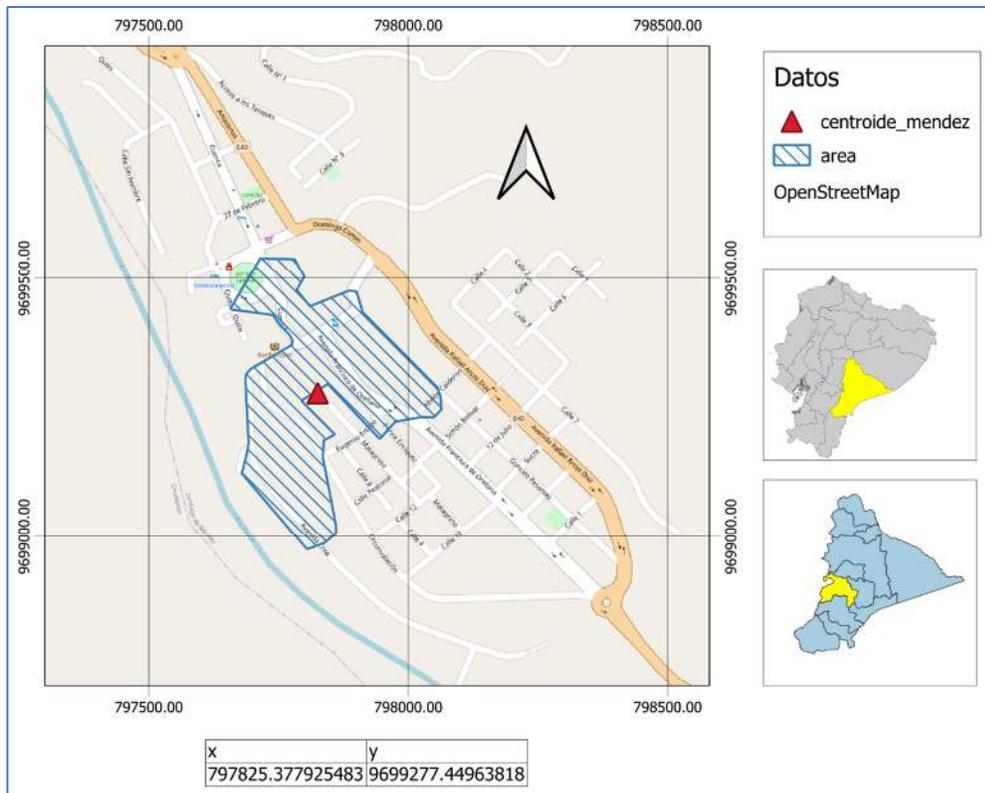
6.1.1.1 Cantón Santiago de Méndez, provincia de Morona Santiago

Se presenta un resumen de diversas características del sistema de Santiago de Méndez, ubicado en la provincia de Morona Santiago:

La zona del proyecto cuenta con el servicio de agua potable, tiene red de alcantarillado sanitario, no tiene red de alcantarillado pluvial. Se tiene un área aportante de 10.21 Ha. El caudal de diseño es de 28.78 l/seg.

En la Ilustración 6.2, se detalla el área del proyecto, incluyendo el plano de calles, las coordenadas del centroide del proyecto, y la ubicación tanto a nivel nacional como provincial

○ Ilustración 6.2. Ubicación de red de Santiago de Méndez.



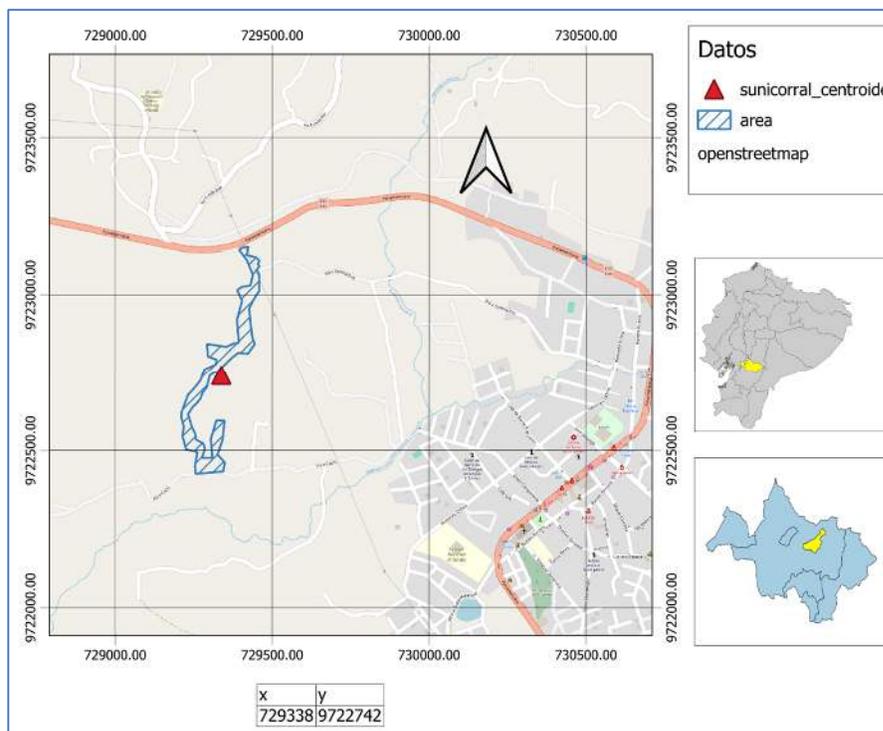
- *Nota: Las coordenadas de ubicación son del centroide del área del proyecto.*

6.1.1.2 Cantón El Tambo, provincia del Cañar

Se han modelado tres sectores situados en el área rural del cantón El Tambo. Estos sectores carecen de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial, no poseen agua potable, solo agua entubada, lo que ha provocado serios problemas de salubridad. A continuación, se detallan algunas características de cada sistema del cantón El Tambo:

En la Ilustración 6.3, se presenta detalladamente la ubicación del sector de Sunicorral, situado en el cantón El Tambo. La imagen muestra el área del proyecto, las coordenadas del centroide, así como la localización tanto a nivel provincial como nacional. Esta información es decisiva para percibir el contexto geográfico y el impacto territorial del proyecto. Sunicorral. Se tiene un área aportante de 3.53 Ha. El caudal de diseño es de 3.00 l/seg.

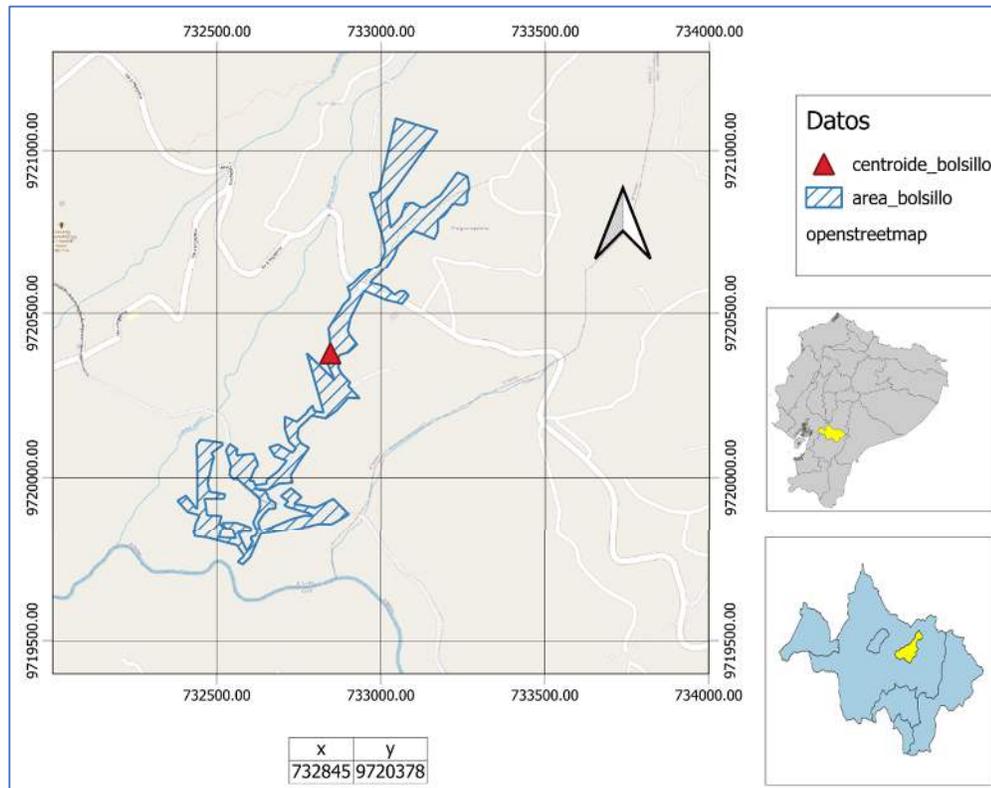
Ilustración 6.3. Ubicación de red de Sunicorral, cantón el Tambo, provincia de Cañar.



Nota: Las coordenadas de ubicación son del centroide del área del proyecto.

La comunidad Bolsillo, en el cantón El Tambo (Cañar, Ecuador). Se tiene un área aportante de 13.96 Ha. El caudal de diseño es de 9.90 l/seg. La Ilustración 6.4 presenta el área del proyecto, su ubicación tanto a nivel provincial como nacional, las coordenadas del centroide de la zona, y el mapa de Openstreetmap.

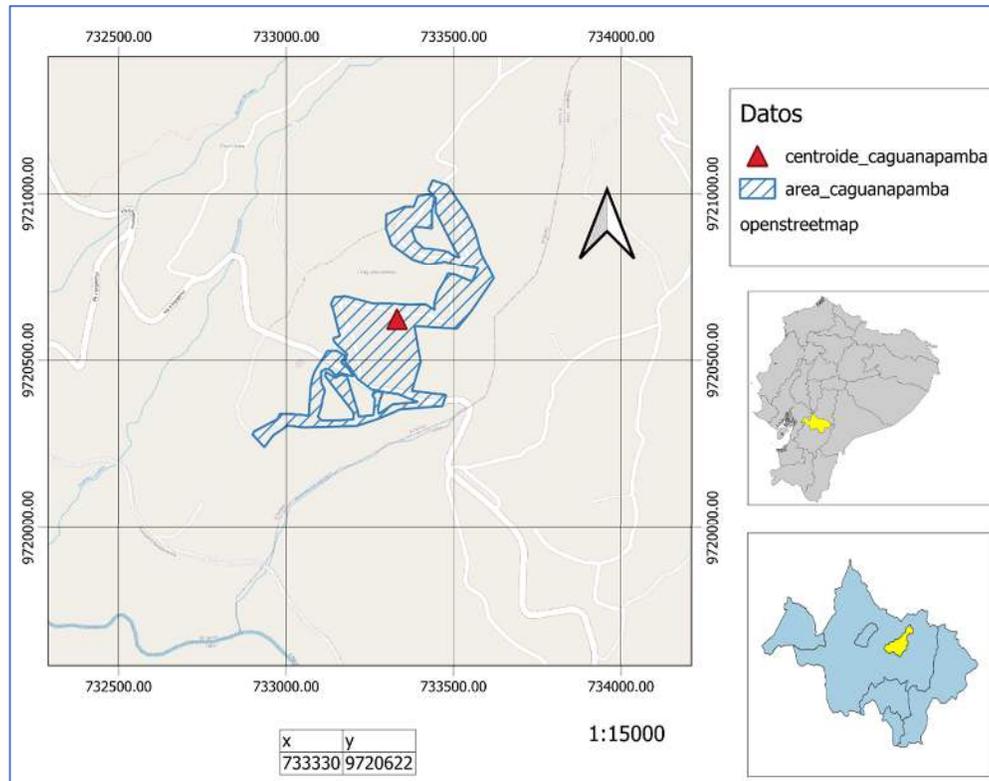
Ilustración 6.4. Ubicación de red de Bolsillo, cantón el Tambo, provincia de Cañar.



Nota: Las coordenadas de ubicación son del centroide del área del proyecto.

La comunidad de Caguanapamba, Se tiene un área aportante de 15.38 Ha. El caudal de diseño es de 3.40 l/seg, La Ilustración 6.5 muestra el área del proyecto, indicando su ubicación a escala provincial y nacional. También se incluyen las coordenadas del centroide de la zona, junto con un plano detallado basado en Openstreetmap.

Ilustración 6.5. Ubicación de red de Caguanapamba, cantón el Tambo, provincia de Cañar.



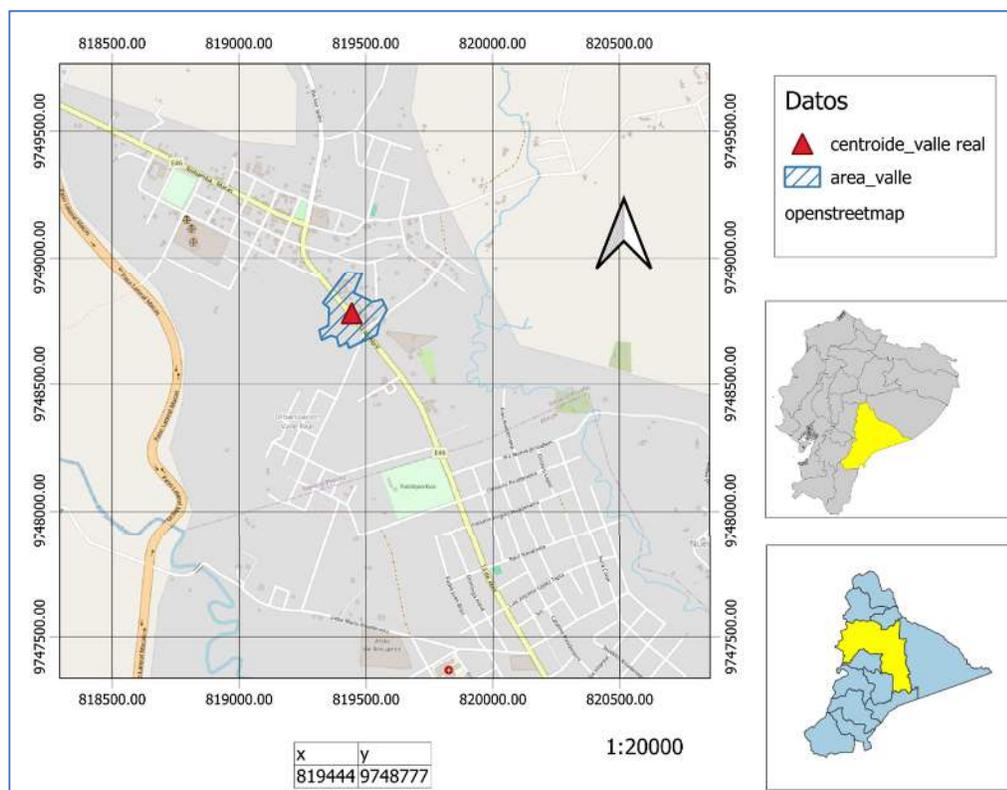
Nota: Las coordenadas de ubicación son del centroide del área del proyecto.

6.1.1.3 Parroquia Macas, cantón Morona, provincia de Morona Santiago

Se hace una breve descripción de las características de la parroquia Macas, cantón morona, Geográficamente, está situada en la cuenca del río Upano. Macas se ubica a una altitud promedio de 1.100 m.s.m, con un clima húmedo tropical, donde se destaca los siguientes parámetros:

En la Ilustración 6.6, muestra las coordenadas del centroide del área del proyecto Valle Real, ubicado en la zona norte de la parroquia Macas. Actualmente, el proyecto ya está construido y cuenta con todos los servicios básicos (agua potable, alcantarillado sanitario y pluvial). Se tiene un área aportante de 4.52 Ha. El caudal de diseño es de 2.57 l/seg, Además, se presenta su ubicación tanto a nivel provincial como nacional.

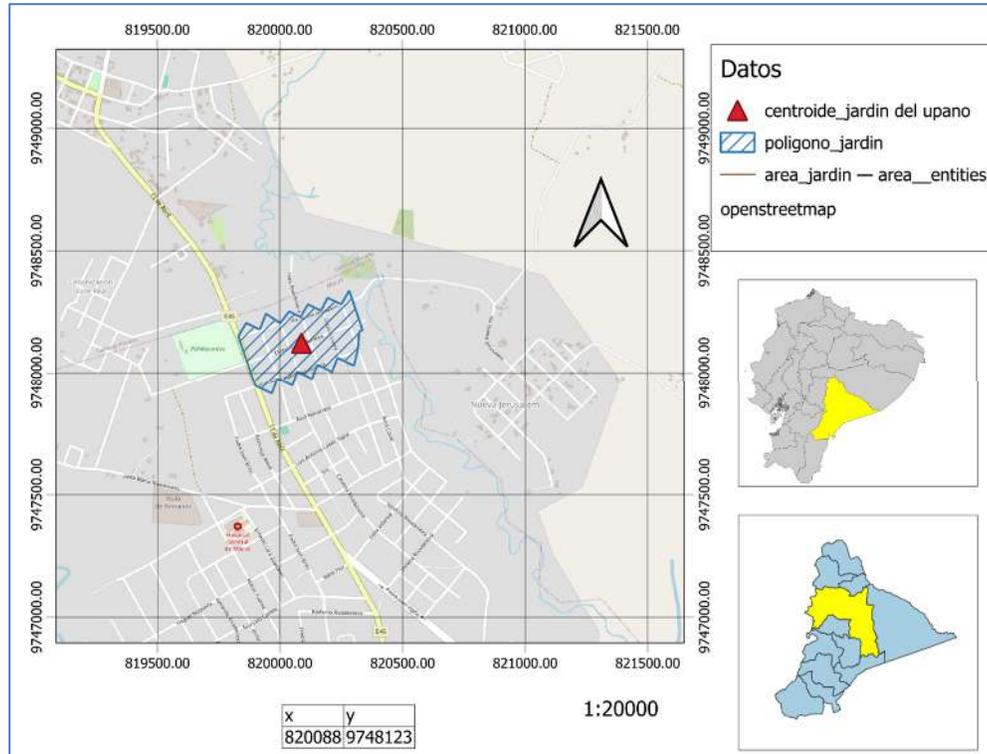
Ilustración 6.6. Ubicación de red de sector Valle Real, cantón Morona, provincia de Morona Santiago.



Nota: Las coordenadas de ubicación son del centroide del área del proyecto.

En la Ilustración 6.7, se detallan las coordenadas del centroide del área de influencia del proyecto, situado en la zona norte de la parroquia Macas, en el sector Jardín del Upano. Este proyecto, ya finalizado, cuenta con todos los servicios básicos esenciales. Se tiene un área aportante de 12.08 Ha. El caudal de diseño es de 6.55 l/seg. Además, la ilustración muestra su ubicación precisa tanto a nivel provincial como nacional, proporcionando un contexto geográfico integral que facilita su identificación y análisis en estudios posteriores.

Ilustración 6.7. Ubicación de red de sector Jardín del Upano, cantón Morona, provincia de Morona Santiago.

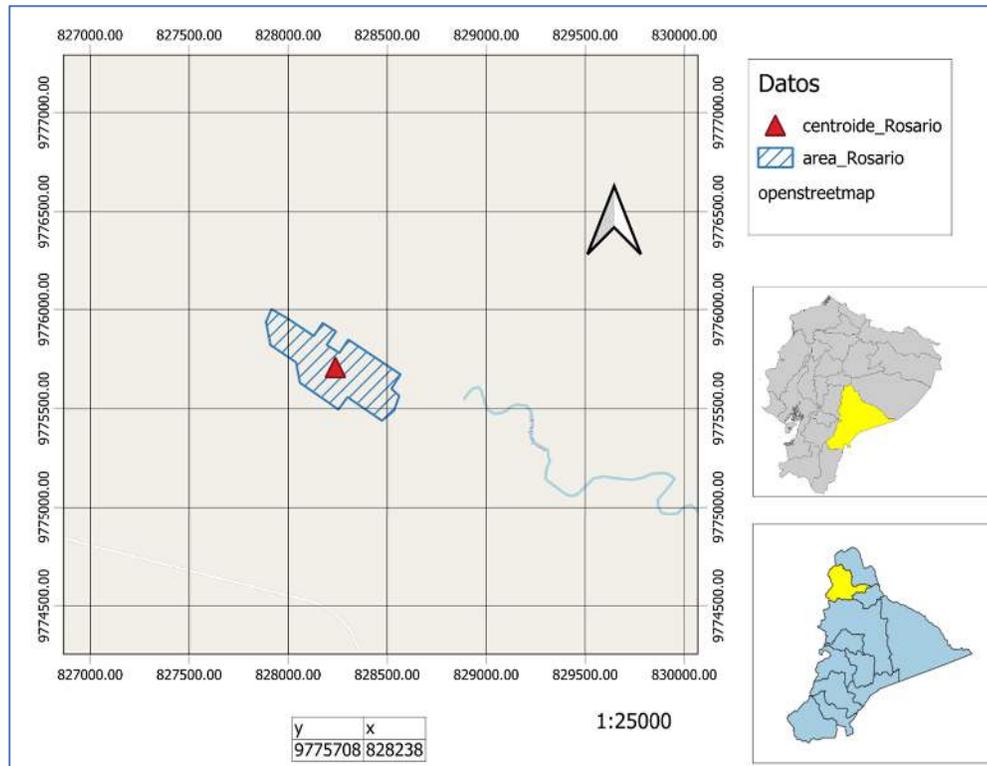


Nota: Las coordenadas de ubicación son del centroide del área del proyecto.

6.1.1.4 Cantón Pablo Sexto, provincia de Morona Santiago

En la Ilustración 6.6, se detallan las coordenadas del centroide del área del proyecto en la comunidad de Rosario, ubicada en el cantón Pablo Sexto. Esta comunidad no tiene redes de alcantarillado sanitario y pluvial, dispone de agua potable. Se tiene un área aportante de 17.45 Ha. El caudal de diseño es de 3.25 l/seg, Además, la ilustración muestra su ubicación precisa tanto a nivel provincial como nacional, proporcionando un contexto geográfico integral que facilita su identificación y análisis en estudios posteriores.

Ilustración 6.8. Ubicación de red de Rosario, cantón Pablo Sexto, provincia de Morona Santiago.



Nota: Las coordenadas de ubicación son del centroide del área del proyecto.

6.2 Metodología

Se utilizaron en esta tesis, los siguientes materiales y herramientas:

Software de modelación numérica: Las modelaciones se llevaron a cabo, manejando el software SewerGEMS, el cual permite realizar análisis hidráulicos detallados y precisos. Para analizar la delimitación territorial e hidrosocial de los sectores de estudio mencionados, se utilizó el programa QGIS, una herramienta potente y versátil para el manejo y análisis de información geoespacial. QGIS permitió la gestión precisa de datos de áreas y caudales, facilitando la visualización y modelación de la infraestructura de alcantarillado en las diversas localidades.

“AutoCAD es un software de diseño asistido por computadora (CAD) que permite trabajar con dibujos técnicos en 2D y 3D” (Autodesk., 2024). Se usa en ingeniería civil para crear y editar planos y modelos de infraestructura, como redes de alcantarillado y otros sistemas de saneamiento.

Herramientas de Presupuesto: Los presupuestos se calcularon y analizaron utilizando Microsoft Excel, lo cual facilitó la comparación económica entre los diferentes escenarios.

Este estudio se adoptó un enfoque cuantitativo y experimental, utilizando simulaciones numéricas para llevar a cabo el análisis hidráulico y económico de los sistemas de alcantarillado en áreas rurales. La investigación cuantitativa se enfoca en identificar patrones numéricos y comprobar hipótesis mediante la recopilación de datos medibles, justificando así su empleo en este trabajo. La metodología se basa en un enfoque experimental, realizando variaciones controladas en el diseño de las tuberías (diámetro) para evaluar su impacto en el desempeño tanto hidráulico como económico.

El diseño experimental consistió en la modelación numérica de 7 sistemas de alcantarillado sanitario ya construidos, donde se realizaron dos modelaciones para cada sistema. En la primera modelación se respetaron los diseños originales de las redes, mientras que en la segunda se redujo el diámetro de las tuberías al menor diámetro comercial disponible que garantiza el funcionamiento adecuado del sistema. Esto dio 14 modelaciones.

El muestreo se realizó de manera no probabilística por conveniencia, seleccionando aquellos sistemas que ya tenían diseños preexistentes o que estaban construidos y cuya información técnica completa (planos, memorias de cálculo, etc.) estaba disponible. Esto garantizó el uso de datos precisos y validados para el análisis. Esta estrategia permitió minimizar la variabilidad en la calidad de los datos y asegurar que los proyectos elegidos fueran representativos de sistemas de alcantarillado en áreas rurales con características similares.

En cada sistema se utilizaron los diámetros indicados en los estudios originales. Además, se trabajó con los diámetros comerciales disponibles en el mercado ecuatoriano, asegurando así que los materiales utilizados fueran accesibles y adecuados para las necesidades del proyecto.

En el análisis se consideraron exclusivamente las redes de alcantarillado sanitario, enfocándose en el diseño y comportamiento hidráulico de las tuberías que conducen las aguas residuales. Se descartaron otros elementos del sistema, tales como acometidas, plantas de tratamiento, y equipamientos especiales como pasos sobre ríos o pozos específicos. Esta delimitación permitió concentrarse en el análisis de los factores que afectan directamente el flujo dentro de la red de tuberías y su costo asociado.

Los factores principales en estudio fueron los siguientes:

- Diámetro de las tuberías: Este fue el factor principal de variación en el diseño de las redes, con dos niveles: el diámetro original y el diámetro comercial más pequeño.
- Costo de las tuberías: Solo se consideraron los costos de las tuberías y la instalación asociada a la red de alcantarillado, excluyendo costos adicionales por infraestructura complementaria.
- Capacidad hidráulica: Se analizó la capacidad de las tuberías para transportar el caudal de diseño, manteniendo la eficiencia operativa del sistema.

Esta simplificación permitió concentrar los recursos analíticos en el estudio de las variables que afectan más directamente la capacidad y eficiencia de las redes de alcantarillado en áreas rurales.

Cada sistema de alcantarillado representó un tratamiento diferente dentro del experimento. Se realizaron dos simulaciones por sistema: la primera con los diámetros originales y la segunda con el diámetro comercial reducido. Esto permitió una comparación directa entre las dos configuraciones de diseño para evaluar el impacto del cambio en las tuberías.

La unidad experimental fue cada sistema de alcantarillado en su totalidad. Específicamente, las tuberías de cada red de alcantarillado que conducen el flujo de aguas residuales fueron modeladas y evaluadas.

Se utilizaron herramientas estadísticas para comparar el rendimiento de los diferentes diámetros de tuberías en términos hidráulicos y económicos. Para evaluar si existían diferencias significativas en los costos y el rendimiento de los sistemas con distintos diámetros, se utilizó un análisis comparativo.

Los parámetros principales obtenidos de las modelaciones en SewerGEMS incluyen:

- Caudal (l/s): Refleja el flujo de agua que circula por las tuberías en cada sistema.
- Velocidad del flujo (m/s): Indicador crucial para asegurar el cumplimiento de las normativas.
- % de capacidad de la tubería: Mide la proporción de la capacidad máxima utilizada en cada tubería, reflejando el nivel de ocupación de la red y el riesgo de sobrecarga.
- Fuerza tractiva: Evalúa la fuerza ejercida por el flujo de agua sobre las paredes de las tuberías, esencial para el diseño hidráulico y la prevención de erosión y sedimentación en el sistema.
- Profundidad de pozos y tuberías: Indica las cotas a las que se sitúan los pozos y las tuberías, crucial para el diseño y construcción de la red de alcantarillado.
- Diámetros: Los diámetros de las tuberías utilizadas en las modelaciones, ajustados a los estándares comerciales disponibles en el mercado ecuatoriano.

En base a estos parámetros y los datos de distancias de tuberías, se puede realizar un análisis más detallado y preciso del rendimiento y la eficiencia de los sistemas modelados.

Este análisis permitió identificar de manera estadísticamente significativa si las diferencias en el diámetro afectaban el rendimiento y los costos de manera relevante para la toma de decisiones.

Para cada modelación, se calculó el caudal, la velocidad y la capacidad de las tuberías mediante simulaciones hidráulicas en SewerGEMS, mientras que los costos fueron estimados a partir de presupuestos de obras civiles con valores de mercado.

6.3 Metodología para el Cálculo del Análisis de Presupuesto Total de cada Red de Alcantarillado

El análisis económico y el cálculo del presupuesto total para el diseño de redes de alcantarillado en áreas rurales se llevó a cabo siguiendo un proceso estructurado que permite obtener una evaluación precisa de los costos asociados a la instalación del sistema. A continuación, se describe la metodología adoptada para el cálculo de los presupuestos, incluyendo la determinación del precio por metro de tubería y los precios unitarios de los diversos componentes de la red de alcantarillado. Se consideran los mismos rubros y precios en general para facilitar la comparación de precios entre variables y la relación entre sistemas. Se excluye plantas de tratamiento, acometidas, pasos elevados, estructuras especiales, recolectores, para considerar principalmente redes de recolección.

6.3.1 Identificación de Componentes y Rubros del Presupuesto

El primer paso consistió en identificar todos los elementos y rubros necesarios para la construcción de los sistemas de alcantarillado. Estos por ejemplo incluyen los siguientes:

- Excavación manual y mecánica.
- Tuberías de PVC, considerando el tipo y diámetro adecuado según el diseño hidráulico, incluye suministro e instalación.
- Pozos de revisión y cámaras de inspección.
- Rellenos manual y mecánico, incluyendo transporte de material.
- Cargado manual y mecánico.

6.3.2 . Obtención de Precios Unitarios

Se establecieron los precios unitarios para cada uno de los rubros identificados en el paso anterior, utilizando los costos actuales del mercado en Ecuador. Este proceso involucró la recopilación de información sobre:

- Precio por metro de tubería de PVC, ajustado según el diámetro seleccionado para cada tramo de la red.
- Costos por transporte, mano de obra y equipos para las tareas de excavación y colocación de las tuberías.
- Costos de instalación asociados a cada tipo de obra, tales como las conexiones y pozos de revisión.

Los precios unitarios se obtuvieron de los estudios previos de presupuestos y tarifas vigentes en la construcción de sistemas de alcantarillado en Ecuador. También se incluyeron los costos indirectos, como impuestos y costos administrativos.

6.3.3 . Cálculo de Cantidades de Obra

Con base en los datos obtenidos de las modelaciones realizadas con el software **SewerGEMS**, así como los planos generados en **AutoCAD**, se calcularon las cantidades de obra necesarias. Estas cantidades incluyen:

- La longitud total de las tuberías para cada sector.
- El número de pozos de revisión y cámaras de inspección necesarios.
- La cantidad de material necesario para la excavación y relleno de zanjas.
- Otros componentes del sistema como las conexiones y los accesorios.

La longitud de las tuberías y las demás cantidades de obra se calcularon de acuerdo con los tramos definidos en el diseño original y en el rediseño propuesto, considerando las distintas variantes de diámetro de las tuberías.

6.3.4 . Presupuesto Detallado

Una vez determinadas las cantidades de obra, se procedió a calcular el presupuesto total del sistema de alcantarillado. Este cálculo se realizó multiplicando las cantidades de obra por los precios unitarios obtenidos en el paso anterior.

- .

El presupuesto total se obtuvo sumando los costos de todos los rubros, proporcionando así el valor estimado para la construcción de cada variante de red de alcantarillado.

Se muestra los presupuestos en el anexo 2. Anexo de cálculo de cantidades y presupuestos.

6.3.5 Evaluación y Comparación de Opciones

Se realizaron comparaciones entre los diseños originales y los rediseños que incorporaban tuberías de menor diámetro. El análisis económico se centró en evaluar las variaciones en los costos totales y en el precio por metro de tubería, para determinar si los rediseños eran económicamente viables sin comprometer el rendimiento hidráulico del sistema. Para ello, se utilizaron los siguientes parámetros:

- Comparación de los presupuestos totales entre las opciones de diseño original y rediseñada.

$$\text{Variacion} = \frac{(\text{Presupuesto red rediseño} - \text{Presupuesto red original})}{\text{Presupuesto red original}}$$

- Precio por metro de tubería. Se obtiene mediante la división del valor total del presupuesto dividido para la longitud total de las redes.

$$\text{Precio por metro de tubería} = \frac{\text{Presupuesto}}{\text{Longitud total de tuberías}}$$

6.3.6 . Consideraciones Finales

Al realizar el análisis de costos, se consideró que el diseño de las tuberías debía cumplir con las normativas ecuatorianas, tales como la **NTE INEN 1108** y la **Norma CO 10.07-601** de la Secretaría del Agua. Se evaluó la viabilidad económica de reducir los diámetros de las tuberías sin comprometer la capacidad hidráulica del sistema y su capacidad para manejar los caudales previstos.

6.4 Manejo del ensayo experimental o toma de la información en campo

La recopilación de datos para la modelación se basó en estudios previos de los 7 sistemas de alcantarillado sanitario. La información técnica se obtuvo de planos, memorias de cálculo y datos topográficos de los proyectos, algunos ya construidos o recibidos los estudios. Para la validación de estos datos, se tiene los estudios en digital.

Se utilizaron herramientas de AutoCAD para el análisis topográfico y de las redes, facilitando la exportación de los datos al software SewerGEMS, donde se realizaron las modelaciones hidráulicas.

Antes de proceder con la modelación final, se realizaron simulaciones preliminares para validar los datos obtenidos y garantizar la confiabilidad de los resultados.

6.5 Consideraciones éticas

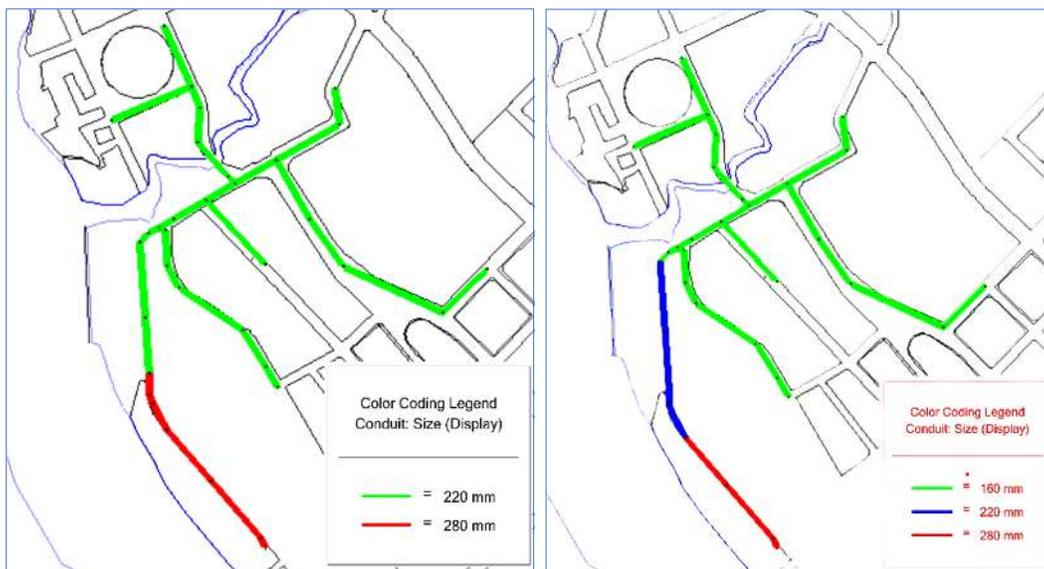
Dado que la información utilizada provino de proyectos previamente aprobados y, en algunos casos, construidos, se respetó la confidencialidad de los datos suministrados por las autoridades locales y las comunidades involucradas. Al realizarlo el equipo de la tesis, por sus ingenieros, estos son responsables de los sistemas de alcantarillado para usar los datos en este estudio.

6.6 Resultados de la modelación

Los resultados de las modelaciones se obtuvieron utilizando SewerGEMS y Excel. En la tabla de resultados, la última columna, titulada "variación," se calcula dividiendo los valores del rediseño por los del diseño original. Esta comparación permite evaluar de manera cuantitativa el impacto de los cambios realizados en cada sistema de alcantarillado, considerando tanto el rendimiento hidráulico como los costos asociados a cada alternativa.

En la Ilustración 6.9, se presentan dos modelaciones de la red sanitaria del cantón Santiago de Méndez. La ilustración a la izquierda muestra el diseño original realizado por el GAD de Méndez, predominando tuberías de diámetro interno de 200 mm. En contraste, la ilustración a la derecha destaca una modificación que reduce la mayoría de las tuberías de 200 mm a 160 mm, el diámetro interno menor. Ambas modelaciones incluyen indicaciones sobre los diámetros utilizados para facilitar la comparación.

Ilustración 6.9. Modelación de red de Santiago de Méndez, original y variante.



Nota: A la izquierda la modelación del diseño original, derecha diseño de la variante del proyecto.

La Tabla 6.1 Resultados de la modelación de red de Santiago de Méndez. Tabla 6.1 presenta una comparación de varios parámetros clave del sistema de Santiago de Méndez entre el diseño original y el rediseño del sistema.

Tabla 6.1 Resultados de la modelación de red de Santiago de Méndez.

Variable	unidad	original	rediseño	variación	variación %
Velocidad promedio	m/s	1.38	1.37	99.28%	-0,72%
Capacidad tubería promedio	l/s	70.18	41.75	59.49%	-40,51%
Caudal/capacidad tubería promedio	%	18.97	30.48	160.67%	60,67%
Profundidad relativa	%	40.64	51.47	126.65%	26,65%

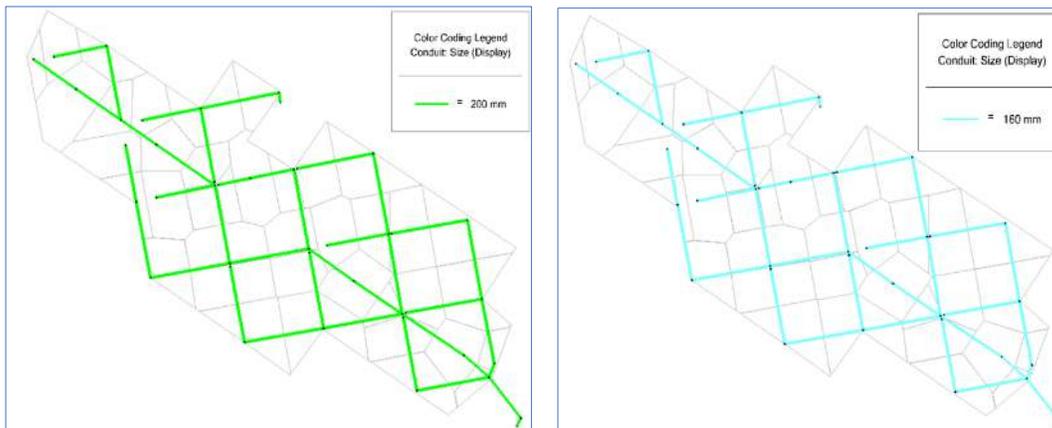
Fuerza tractiva	Pa	11.92	11.90	99.83%	-0,17%
Presupuesto de red	\$	50683.96	42629.51	84.11%	-15,89%
Longitud total de tuberías	m	1568.70	1568.70	100.00%	0,00%
Precio/longitud	\$/m	32.31	27.18	84.11%	-15,89%

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

En resumen, el rediseño del sistema de Santiago de Méndez muestra una reducción en varios parámetros clave como la capacidad de las tuberías y el presupuesto de la red, con una ligera disminución en la velocidad del flujo y la fuerza tractiva. La capacidad relativa y la profundidad muestran incrementos significativos, lo que refleja un rediseño más eficiente en términos de costo y capacidad.

En la Ilustración 6.10, se presentan dos modelaciones de la red sanitaria para la comunidad de Rosario, ubicada en el cantón Pablo Sexto. Esta comunidad actualmente no dispone de redes de alcantarillado sanitario ni pluvial, lo que representa un desafío significativo para sus habitantes. En la ilustración de la izquierda, se muestra el diseño inicial que contemplaba tuberías de 200 mm, propuesto como parte del proyecto de saneamiento. En la ilustración de la derecha, se observa una modificación del diseño original, donde la mayoría de las tuberías se reducen de 200 mm a 160 mm, el diámetro interno más pequeño disponible. Ambas ilustraciones indican los diámetros utilizados en cada modelación, permitiendo una comparación detallada entre las opciones propuestas.

Ilustración 6.10. Modelación de red de Rosario, Pablo Sexto, original y variante.



Nota: A la izquierda la modelación del diseño original, derecha diseño de la variante del proyecto.

En la Tabla 6.3, se presentan los resultados del sistema de alcantarillado en la comunidad de Rosario. La velocidad del flujo aumentó ligeramente, mientras que la capacidad de las tuberías disminuyó significativamente. El uso de la capacidad de las tuberías incrementó considerablemente, y la profundidad relativa también aumentó. La fuerza tractiva mostró un leve aumento. El presupuesto total de la red disminuyó, al igual que el costo por metro de tubería, aunque la longitud de la red se mantuvo constante. Estos cambios sugieren un rediseño enfocado en mejorar la eficiencia y reducir costos, a pesar de la reducción en la capacidad de las tuberías

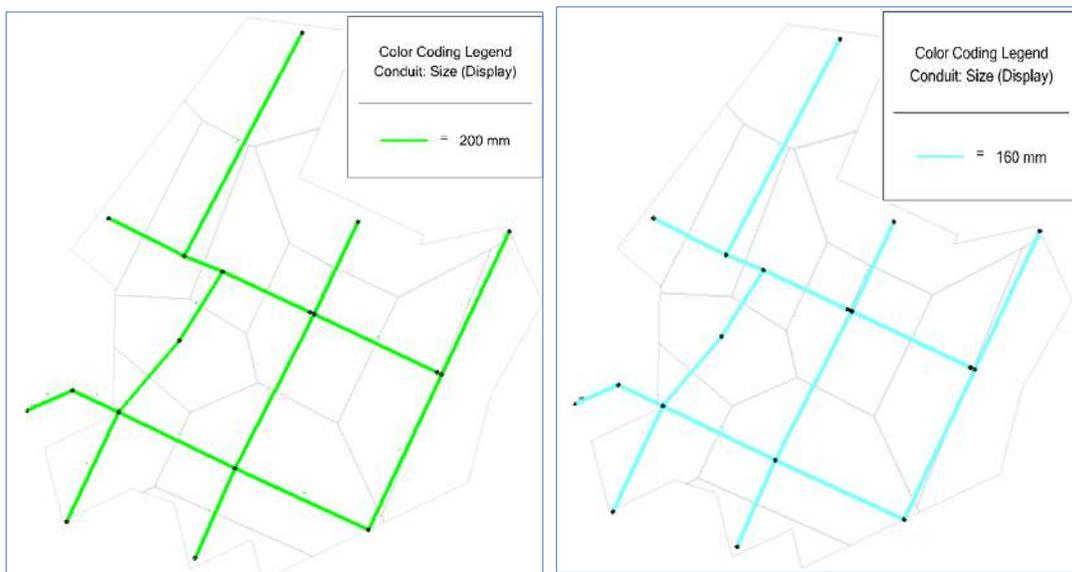
Tabla 6.2 Resultados de la modelación de red de Rosario, cantón Pablo Sexto.

Variable	unidad	original	rediseño	variación	Variación %
Velocidad promedio	m/s	0.79	0.81	102.53%	2,53%
Capacidad tubería promedio	l/s	57.28	26.60	46.44%	-53,56%
Caudal/capacidad tubería promedio	%	4.20	9.06	215.71%	115,71%
Profundidad relativa	%	15.57	22.16	142.32%	42,32%
Fuerza tractiva	Pa	4.52	4.72	104.42%	4,42%
Presupuesto total de red	\$	154264.81	142558.61	-11706.20	-7.59%
Longitud total de red	m	3524.74	3524.74	100.00%	0,00%
Precio/longitud	\$/m	43.77	40.45	-3.32	-7.59%

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

En la Ilustración 6.11, se presentan dos modelaciones de la red sanitaria del sector Valle del Upano, en el cantón Morona. Esta comunidad cuenta con una red de alcantarillado sanitario ya construida y funcional. La ilustración de la izquierda muestra el diseño original, mientras que la de la derecha presenta una alternativa con reducciones de diámetro en las tuberías. Ambas incluyen detalles de los diámetros utilizados para facilitar la comparación.

Ilustración 6.11. Modelación de red de Valle Real, original y variante.



Nota: A la izquierda la modelación del diseño original, derecha diseño de la variante del proyecto

En la Tabla 6.3, se presentan los datos obtenidos para el sector del Valle Real. Los resultados muestran un ligero aumento en la velocidad promedio del flujo, mientras que la capacidad de las tuberías disminuye significativamente. El uso de la capacidad de las tuberías incrementa notablemente, indicando un mayor aprovechamiento del sistema. La profundidad relativa también muestra un aumento considerable. La fuerza tractiva experimenta un leve incremento. En términos económicos, tanto el presupuesto total de la red como el costo por metro de tubería se reducen, mientras que la longitud total de la red se mantiene constante.

Estos datos permiten un análisis detallado y preciso del rendimiento y eficiencia del sistema de alcantarillado en el Valle Real.

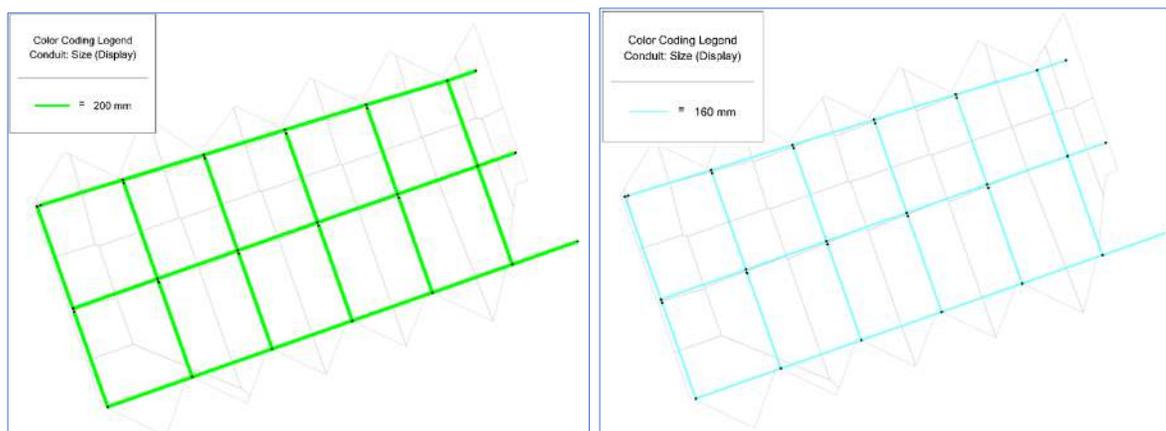
Tabla 6.3 Resultados de la modelación de red de Valle Real, cantón Morona.

Variable	unidad	original	rediseño	variación	Variación %
Velocidad promedio	m/s	0.84	0.87	103.57%	3,57%
Capacidad tubería promedio	l/s	64.55	35.60	55.15%	-44,85%
Caudal/capacidad tubería promedio	%	3.37	6.12	181.60%	81,60%
Profundidad relativa	%	15.79	21.05	133.31%	33,31%
Fuerza tractiva	Pa	5.73	5.99	104.54%	4,54%
Presupuesto total de red	\$	42198.41	37519.63	-4678.78	-11.09%
Longitud total de red	m	1066.16	1066.16	100.00%	0,00%
Precio/longitud	\$/m	39.58	35.19	-4.39	-11.09%

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

En la Ilustración 6.12, se presentan las dos modelaciones con sus diámetros correspondientes del sistema de alcantarillado para el Jardín del Upano en Macas. La imagen de la izquierda muestra el diseño original, mientras que la de la derecha presenta una modificación con diferentes diámetros de tuberías.

Ilustración 6.12. Modelación de red de Jardín del Upano, original y variante.



Nota: A la izquierda la modelación del diseño original, derecha diseño de la variante del proyecto

El sistema de alcantarillado del Jardín del Upano en Macas está construido y funcionando, proporcionando servicios esenciales de saneamiento. Cubre toda la zona, utilizando diámetros comerciales estándar, mejorando la salubridad y la calidad de vida de la comunidad. Su diseño facilita el mantenimiento y operación, asegurando su funcionalidad a largo plazo.

En la Tabla 6.4, se presentan los resultados del sistema de alcantarillado en el sector de Jardín del Upano. La velocidad promedio del flujo muestra un ligero aumento, mientras que la capacidad de las tuberías disminuye notablemente. El uso de la capacidad de las tuberías aumenta significativamente, indicando un mejor aprovechamiento del sistema. La profundidad relativa también presenta un incremento considerable. La fuerza tractiva experimenta un leve aumento. En términos económicos, el presupuesto total de la red se reduce, así como el costo por metro de tubería, aunque la longitud total de la red permanece constante.

Tabla 6.4 Resultados de la modelación de red de Jardín del Upano, cantón Morona.

Variable	unidad	original	rediseño	variación	Variación %
velocidad promedio	m/s	0.76	0.78	102.63%	2,63%
capacidad tubería promedio	l/s	51.43	28.36	55.14%	-44,86%
caudal/capacidad tubería promedio	%	4.48	8.13	181.47%	81,47%
profundidad relativa	%	17.41	23.18	133.14%	33,14%
fuerza tractiva	Pa	4.16	4.33	104.09%	4,09%
presupuesto total de red	\$	82235.56	71164.96	-11070.60	-13.46%
longitud total de red	m	2685.20	2685.20	0.00	0.00%
precio/longitud	\$/m	30.63	26.50	-4.12	-13.46%

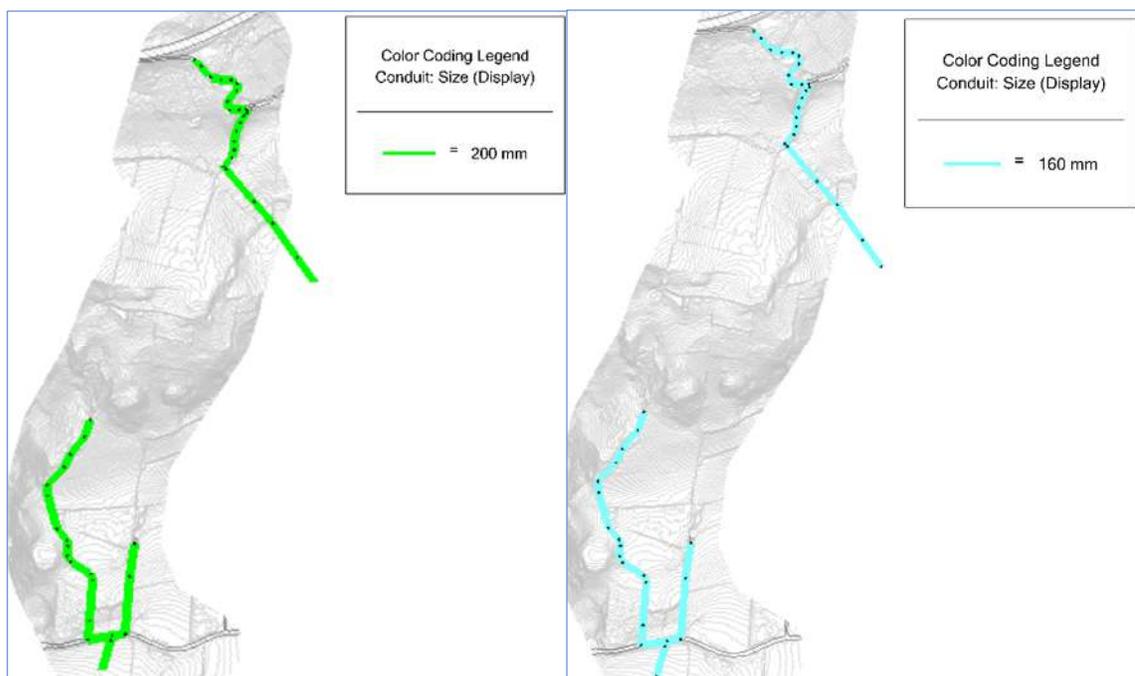
Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Los datos indican un ligero aumento en la velocidad promedio del flujo, mientras que la capacidad de las tuberías disminuye significativamente. El uso de la capacidad de las tuberías incrementa considerablemente, reflejando un mayor aprovechamiento del sistema. La profundidad relativa también muestra un aumento significativo. La fuerza

tractiva experimenta un leve incremento. En términos económicos, tanto el presupuesto total de la red como el precio por metro de tubería se reducen, mientras que la longitud total de la red se mantiene constante.

En la Ilustración 6.13, se presentan las redes de la comunidad de Sunicorral, ubicada en el cantón El Tambo. Esta ilustración muestra de manera detallada la configuración de las redes, facilitando la comprensión de la infraestructura existente en la zona.

Ilustración 6.13. Modelación de red de Sunicorral, original y variante.



Nota: A la izquierda la modelación del diseño original, derecha diseño de la variante del proyecto

En las ilustraciones de los sistemas modelados originales se puede observar que predominan las tuberías de 200 mm en su mayoría. Esto se debe principalmente a que la normativa (INEN CO 10.07 - 601, 1992) establece este diámetro como el mínimo requerido.

La Tabla 6.5 presenta los resultados obtenidos para la red de Sunicorral en el cantón El Tambo.

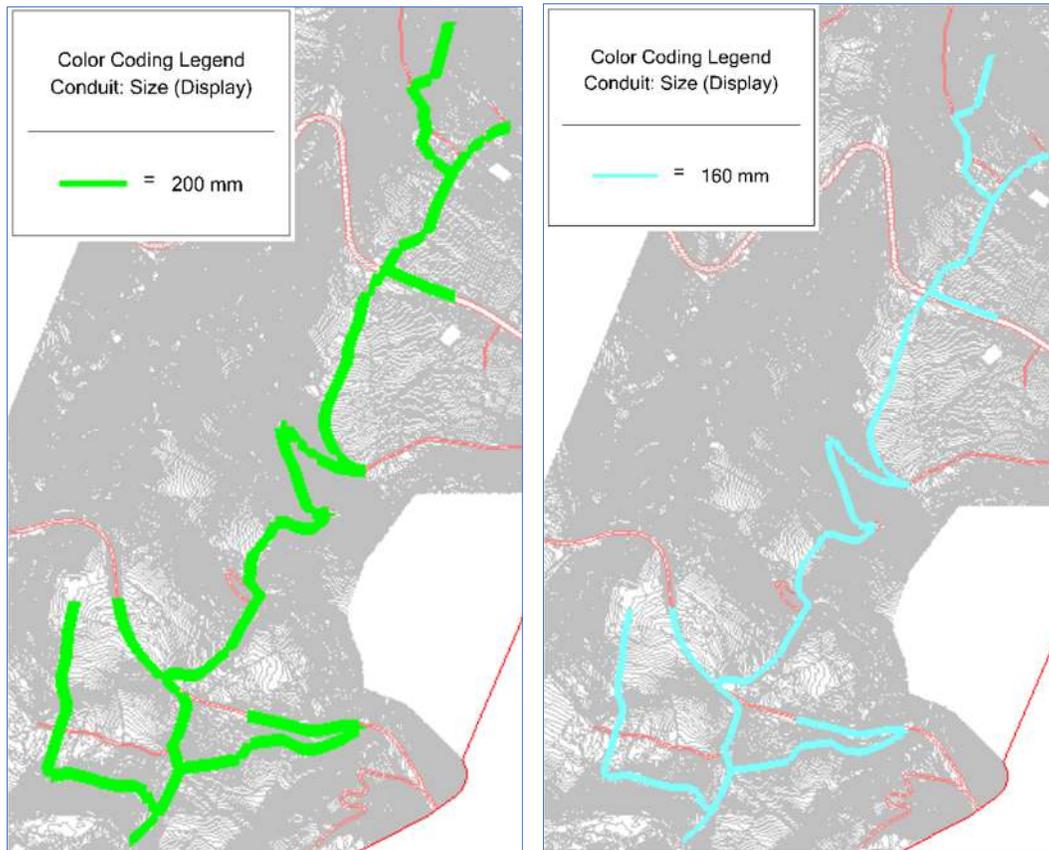
Tabla 6.5 Resultados de la modelación de red de Sunicorral, cantón el Tambo.

Variable	unidad	original	rediseño	variación	Variación %
velocidad promedio	m/s	1.35	1.39	102.96%	2,96%
capacidad tubería promedio	l/s	124.17	57.66	46.44%	-53,56%
caudal/capacidad tubería promedio	%	1.37	2.95	215.33%	115,33%
profundidad relativa	%	12.51	17.69	141.41%	41,41%
fuerza tractiva	Pa	14.50	15.15	104.48%	4,48%
presupuesto total de red	\$	52622.38	48952.93	-3669.45	-6.97%
longitud total de red	m	886.10	886.10	0.00	0.00%
precio/longitud	\$/m	59.39	55.25	-4.14	-6.97%

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

En la Ilustración 6.14, se presentan las redes de la comunidad de Bolsillo, ubicada en el cantón El Tambo. Esta ilustración muestra detalladamente la configuración de las redes, facilitando la comprensión de la infraestructura existente en esta área específica.

Ilustración 6.14. Modelación de red de Bolsillo, original y variante.



Nota: A la izquierda la modelación del diseño original, derecha diseño de la variante del proyecto

La Tabla 6.6 presenta los resultados obtenidos para la red de Bolsillo en el cantón El Tambo. Los datos indican un ligero aumento en la velocidad promedio del flujo, mientras que la capacidad de las tuberías disminuye significativamente. El uso de la capacidad de las tuberías incrementa considerablemente, reflejando un mayor aprovechamiento del sistema. La profundidad relativa también muestra un aumento significativo. La fuerza tractiva experimenta un leve incremento. En términos económicos, tanto el presupuesto total de la red como el precio por metro de tubería se reducen, mientras que la longitud total de la red se mantiene constante.

Tabla 6.6 Resultados de la modelación de red de Bolsillo, cantón el Tambo.

Variable	unidad	original	rediseño	variación	Variación %
velocidad promedio	m/s	1.41	1.45	102.84%	2,84%
capacidad tubería promedio	l/s	111.34	61.41	55.16%	-44,84%
caudal/capacidad tubería promedio	%	3.17	5.74	181.07%	81,07%
profundidad relativa	%	16.13	21.61	133.97%	33,97%
fuerza tractiva	Pa	15.65	16.35	104.47%	4,47%
presupuesto total de red	\$	164708.53	151157.06	-13551.47	-8.23%
longitud total de red	m	3173.10	3173.10	0.00	0.00%
precio/longitud	\$/m	51.91	47.64	-4.27	-8.23%

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

En la Ilustración 6.15, se presentan las áreas proyectadas para la comunidad de Caguanapamba, en el cantón El Tambo. Actualmente, esta comunidad no cuenta con redes de alcantarillado sanitario construido, lo que representa un reto significativo para el desarrollo y mejora de la infraestructura de saneamiento en la zona. La ilustración proporciona una visión detallada de las propuestas y planificaciones para la futura implementación de estas redes.

Ilustración 6.15. Modelación de red de Caguanapamba, original y variante.



Nota: A la izquierda la modelación del diseño original, derecha diseño de la variante del proyecto

La Tabla 6.7 presenta los resultados obtenidos para la red de Caguanapamba. Los datos indican un ligero aumento en la velocidad promedio del flujo, mientras que la capacidad de las tuberías disminuye notablemente. El uso de la capacidad de las tuberías incrementa considerablemente, reflejando un mayor aprovechamiento del sistema. La profundidad relativa también muestra un aumento significativo. La fuerza tractiva experimenta un leve incremento. En términos económicos, tanto el presupuesto total de la red como el precio por metro de tubería se reducen, mientras que la longitud total de la red se mantiene constante.

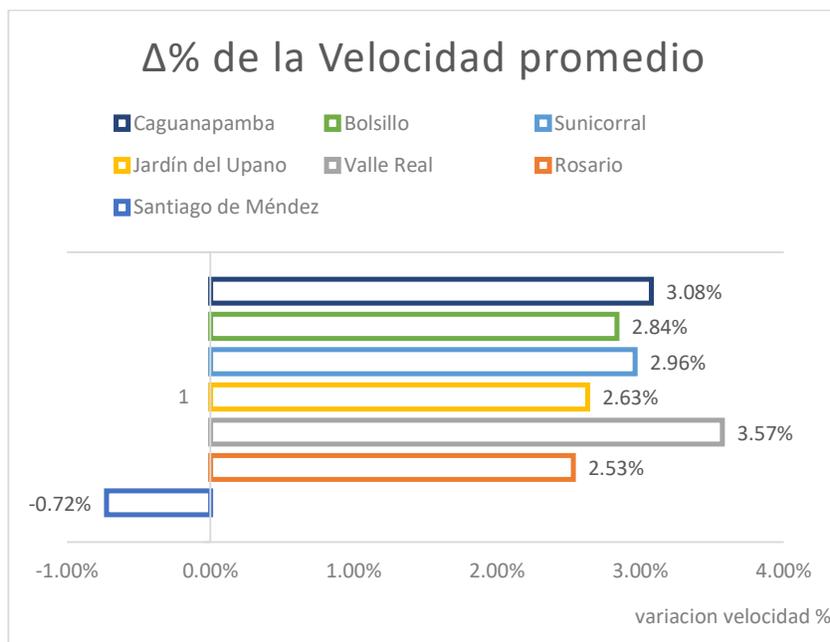
Tabla 6.7 Resultados de la modelación de red de Caguanapamba, cantón el Tambo.

Variable	unidad	original	rediseño	variación	Variación %
velocidad promedio	m/s	1.30	1.34	103.08%	3,08%
capacidad tubería promedio	l/s	110.69	63.56	57.42%	-42,58%
caudal/capacidad tubería promedio	%	2.34	4.08	174.36%	74,36%
profundidad relativa	%	13.81	18.35	132.87%	32,87%
fuerza tractiva	Pa	12.62	13.19	104.52%	4,52%
presupuesto total de red	\$	166165.72	153178.45	-12987.27	-7.82%

longitud total de red	m	2882.00	2882.00	0.00	0.00%
precio/longitud	\$/m	57.66	53.15	-4.51	-7.82%

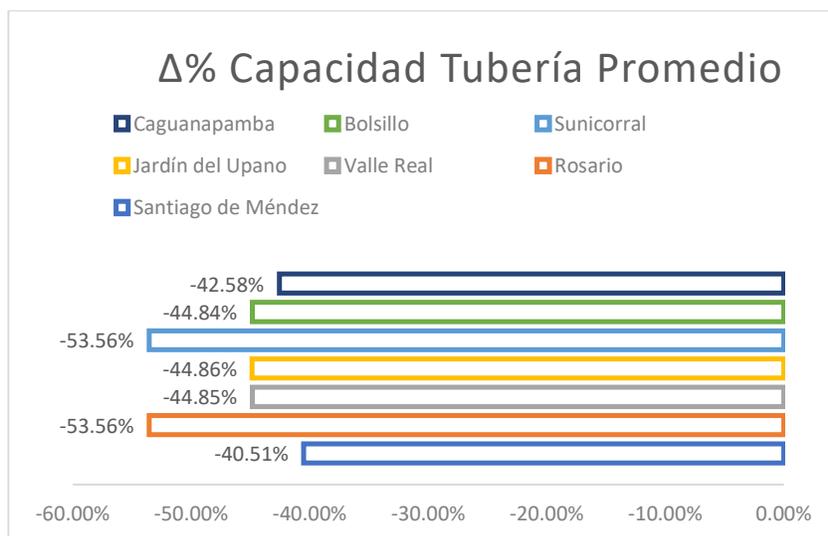
Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Ilustración 6.16. Variación Porcentual de la Velocidad Promedio en los sistemas modelados.



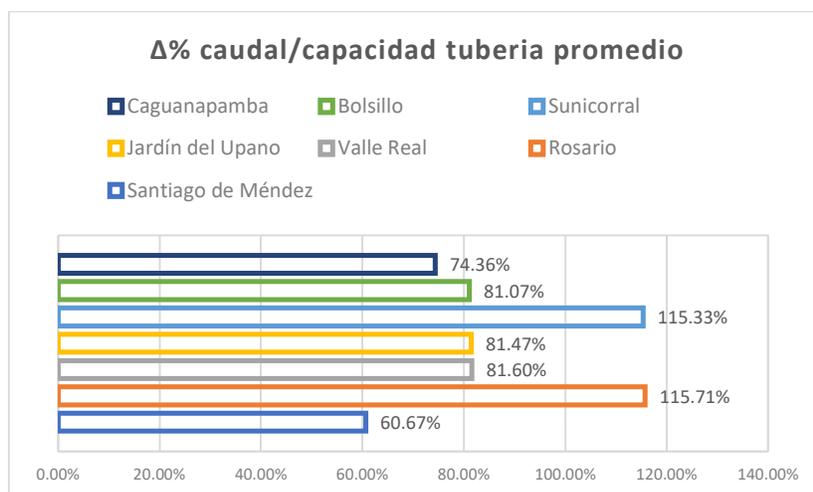
A partir de los datos analizados en la Tabla 6.9, los resultados expuestos en la Ilustración 6.17 muestran una disminución en la capacidad de la tubería promedio en todos los casos: Santiago de Méndez (-40.51%), Rosario (-53.56%), Valle Real (-44.85%), Jardín del Upano (-44.86%), Sunicorral (-53.56%), Bolsillo (-44.84%) y Caguanapamba (-42.58%). La variación promedio es una disminución del 46.39%, lo cual indica una tendencia generalizada de reducción que puede afectar el rendimiento y la eficiencia de cada sistema. Los resultados se exponen en Ilustración 6.17.

Ilustración 6.17. Variación Porcentual de la Capacidad de Tubería en Sistemas Modelados.



En la Ilustración 6.18, se presenta los resultados muestran las variaciones porcentuales del caudal respecto a la capacidad de la tubería promedio para diferentes casos modelados, analizados de la Tabla 7.2.

Ilustración 6.18. Variación Porcentual de la Capacidad de Tubería Promedio de los sistemas modelados

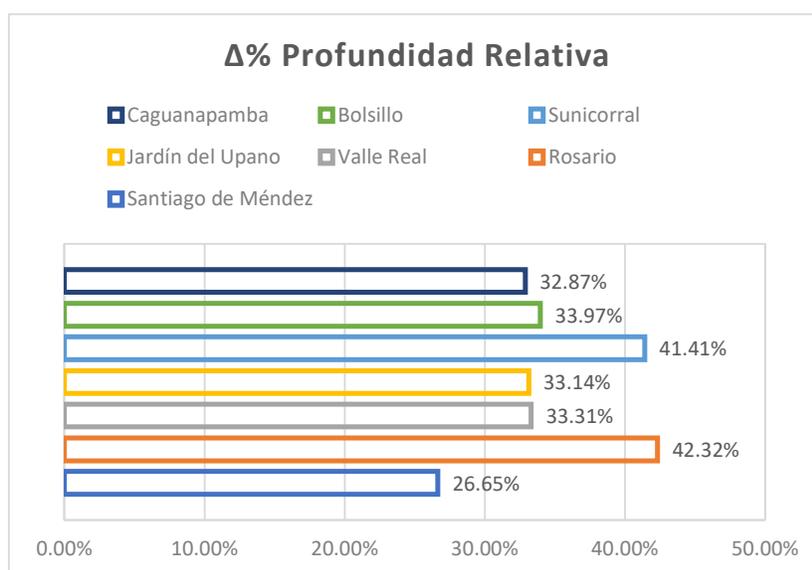


Las variaciones porcentuales del caudal respecto a la capacidad de la tubería promedio para los casos son: Santiago de Méndez (60.67%), Rosario (115.71%), Valle Real (81.60%), Jardín del Upano (81.47%), Sunicorral (115.33%), Bolsillo (81.07%) y

Caguanapamba (74.36%). La variación promedio es del 87.17%, indicando un incremento notable en la utilización de la capacidad de las tuberías.

En la ilustración 6.18, se presentan los resultados que muestran las variaciones porcentuales del caudal respecto a la capacidad de la tubería promedio para diferentes casos modelados.

Ilustración 6.19. Variación Porcentual de Caudal / Capacidad de Tubería Promedio de los sistemas modelados.



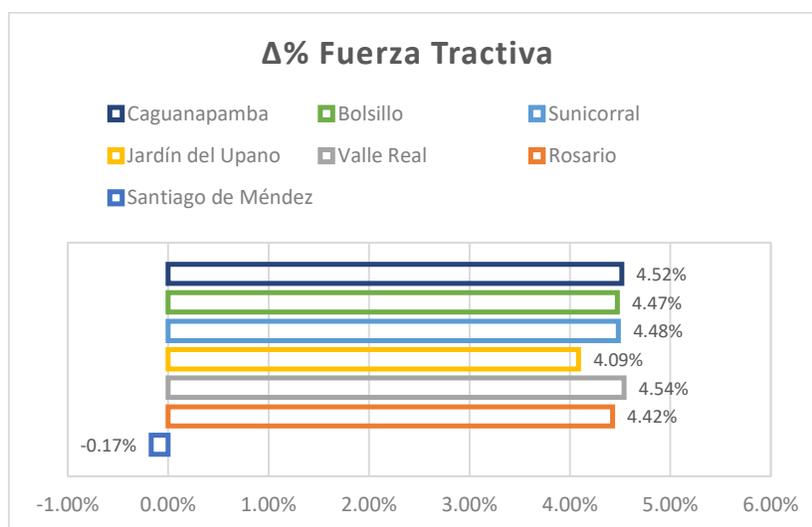
Las variaciones porcentuales de la profundidad relativa para los casos son: Santiago de Méndez (26.65%), Rosario (42.32%), Valle Real (33.31%), Jardín del Upano (33.14%), Sunicorral (41.41%), Bolsillo (33.97%) y Caguanapamba (32.87%). La variación promedio es del 34.81%, indicando un aumento general en la profundidad relativa.

Es notable la variación por la reducción del diámetro de las tuberías.

De la Tabla 7.2 se realizó la Ilustración 6.20. La fuerza tractiva aumenta al reducir el diámetro de la tubería porque la velocidad del flujo de agua tiende a incrementarse, lo que provoca una mayor fuerza ejercida sobre las paredes de la tubería. Este cambio en el diámetro provoca un ligero aumento de la fuerza tractiva, posiblemente por la mayor

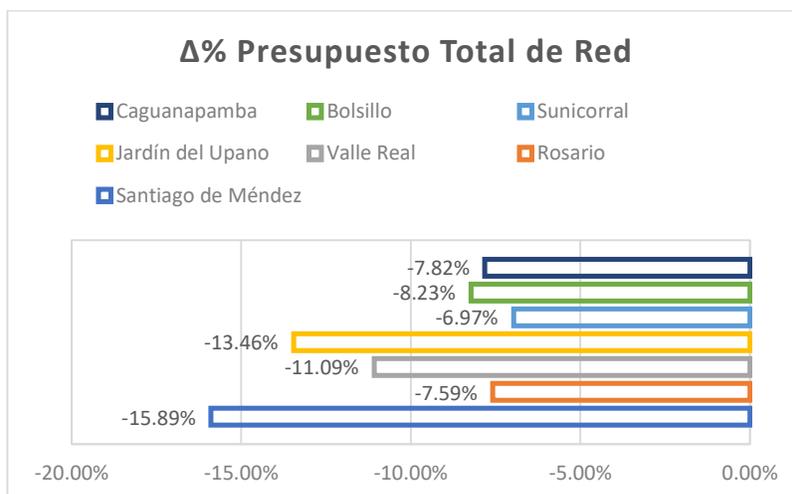
velocidad. Este efecto puede mejorar la capacidad de limpieza de las tuberías. La fuerza tractiva es crucial en el diseño hidráulico de tuberías y canales, ya que afecta la estabilidad del sedimento y la capacidad de arrastre de partículas.

Ilustración 6.20. Variación Porcentual de la Fuerza Tractiva de los sistemas modelados.



A partir de los datos analizados en la Tabla 7.2 y presentados en la Ilustración 6.21 Ilustración 6.21. Variación Porcentual de Presupuesto Total de Red de los sistemas modelados., se observa una variación porcentual en el presupuesto total de la red para los siguientes casos: Santiago de Méndez (-15.89%), Rosario (-7.59%), Valle Real (-11.09%), Jardín del Upano (-13.46%), Sunicorral (-6.97%), Bolsillo (-8.23%) y Caguanapamba (-7.82%). La variación promedio es una disminución del 10.15%, reflejando una tendencia general de reducción en el presupuesto total de las redes.

Ilustración 6.21. Variación Porcentual de Presupuesto Total de Red de los sistemas modelados.



Los resultados indican una disminución general del presupuesto total de red, con variaciones de entre -6.97 % y -15.89 %. La reducción promedio es del 10.15%, reflejando una tendencia generalizada hacia la optimización de costos. Santiago de Méndez muestra la mayor reducción, mientras que Sunicorral tiene la menor. Esta variabilidad sugiere que los rediseños han tenido diferentes grados de impacto económico en los distintos sistemas.

7 Resultados y discusión

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos de los casos investigados, se exponen las distribuciones de los 7 diseños analizados, para los sectores de Santiago de Méndez, sector Bolsillo, comunidad Sunicorral, cantón el tambo, sector Caguanapamba, sector Jardín del Upano, sector Valle Real, comunidad el Rosario. Se analizan los resultados de los diseños teniendo siempre en cuenta la parte técnica y el análisis económico.

Se identifican factores que afectan el costo final de los sistemas, verificando que cumplan con las restricciones especificadas en las normativas vigentes.

Posteriormente de haber modelado los sistemas de alcantarillado en el SewerGEMS, se obtuvo los diseños mostrados en las ilustraciones del capítulo anterior donde se puede observar la variación de diámetros en las tuberías

En la Tabla 7.1, se codifican los sistemas modelados de la siguiente manera: 1. Santiago de Méndez, 2. Rosario, 3. Valle Real, 4. Jardín del Upano, 5. Sunicorral, 6. Bolsillo y 7. Caguanapamba. Esta codificación permite una fácil identificación y comparación entre los distintos sistemas.

Tabla 7.1 Sectores en estudio.

Número	Sector
1	<i>Santiago de Méndez</i>
2	<i>Rosario</i>
3	<i>Valle Real</i>
4	<i>Jardín del Upano</i>
5	<i>Sunicorral</i>
6	<i>Bolsillo</i>
7	<i>Caguanapamba</i>

Los resultados de la modelación computacional y el análisis de costos corresponden a las alternativas estudiadas (diseño original y rediseño). Esto permite realizar comparaciones entre las distintas opciones y evaluar el impacto tanto hidráulico como económico en cada alternativa. Nombrar la tabla en el cuerpo del documento. En la Tabla 7.2, se presentan los resultados generales de cada uno de estos sistemas modelados, lo cual facilita el análisis de los parámetros clave, así como el rendimiento y eficiencia de cada sistema.

Tabla 7.2: Resultados generales de la modelación de red de los 7 casos

Casos	Variación%		Δ%		Δ%		Δ%	
	Variación% velocidad	capacidad tubería promedio	caudal/capacidad tubería promedio	Profundidad Relativa	Fuerza Tractiva	Presupuesto Total de Red	Precio/Longitud	
1	-0.72%	-40.51%	60.67%	26.65%	-0.17%	-15.89%	-15.89%	
2	2.53%	-53.56%	115.71%	42.32%	4.42%	-7.59%	-7.59%	
3	3.57%	-44.85%	81.60%	33.31%	4.54%	-11.09%	-11.09%	
4	2.63%	-44.86%	81.47%	33.14%	4.09%	-13.46%	-13.46%	
5	2.96%	-53.56%	115.33%	41.41%	4.48%	-6.97%	-6.97%	
6	2.84%	-44.84%	81.07%	33.97%	4.47%	-8.23%	-8.23%	
7	3.08%	-42.58%	74.36%	32.87%	4.52%	-7.82%	-7.82%	
promedio	2.41%	-46.39%	87.17%	34.81%	3.76%	-10.15%	-10.15%	

Nota: Los resultados son calculados en base a los datos obtenidos, El porcentaje de la variante rediseño sobre el original.

De la Tabla 7.2, se realiza un análisis que se muestra en la Ilustración 6.16. Variación Porcentual de la Velocidad Promedio en sobre la variación de la velocidad en porcentaje.

Aunque la red de Caguanapamba, inicialmente muestra una disminución en la velocidad (-0.72%), las demás redes presentan un aumento, con variaciones que oscilan entre 2.53% y 3.57%. Esta estabilización de la variación en la velocidad, con una fluctuación promedio del 2.41%, indica un rendimiento general estable tras las primeras

mediciones. Es razonable que, dado que el área se reduce y el caudal se mantiene constante, la velocidad aumente.

7.1 Resultados y discusión para el sector de Santiago Méndez.

La tabla 7.1 que se presenta compara algunas variables clave entre el diseño original y el rediseño de un sistema de alcantarillado sanitario, mostrando sus valores originales, los del rediseño, y la variación en términos absolutos y porcentuales. A continuación, se explican los resultados por cada variable:

Tabla 7.1 Análisis de los resultados de la modelación de la red de Santiago Méndez.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Cambio		Interpretación
			Absoluto	Porcentual	
Velocidad promedio	1.38 m/s	1.37 m/s	-0.01 m/s	-0.72%	Mantiene velocidades de flujo similares
Capacidad tubería promedio	70.18 l/s	41.75 l/s	-28.43 l/s	-40.51%	Uso de diámetros de tubería más pequeños
Caudal/capacidad tubería promedio	18.97%	30.48%	+11.51%	+60.67%	Mayor uso de la capacidad de la tubería
Profundidad relativa	40.64%	51.47%	+10.83%	+26.65%	Nivel de agua en tuberías más alto
Fuerza tractiva	11.92 Pa	11.90 Pa	-0.02 Pa	-0.17%	Potencial de arrastre similar
Presupuesto de red	\$50,683.96	\$42,629.51	-\$8,054.45	-15.89%	Rediseño más rentable
Longitud total de tuberías	1,568.70 m	1,568.70 m	0 m	0%	Mismo trazado de la red
Precio/longitud	\$32.31/m	\$27.18/m	-\$5.13/m	-15.89%	Reducción en el costo por longitud de la tubería

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Potenciales beneficios:

Menor inversión inicial permite una implementación más rápida del sistema. Posibilidad de extender la red a más hogares con el mismo presupuesto. Reducción en los costos de intereses si el proyecto se financia mediante préstamos.

Posibles desafíos:

El aumento en la profundidad relativa (de 40.64% a 51.47%) implica a largo plazo, mayores costos de mantenimiento. La mayor utilización de la capacidad de las tuberías (de 18.97% a 30.48%) puede requerir actualizar las redes si la población crece.

Adaptabilidad y escalabilidad:

El rediseño está bien adaptado a las condiciones actuales de baja densidad poblacional en áreas rurales. Sin embargo, es importante considerar la capacidad del sistema para manejar posibles aumentos futuros en la demanda debido al crecimiento poblacional o desarrollo de la zona.

Análisis costo-beneficio:

Beneficio inmediato: El ahorro de \$8,054.45 es significativo en el contexto de áreas rurales con recursos limitados. Rendimiento del sistema: La reducción mínima en la velocidad promedio (-0.72%) y en la fuerza tractiva (-0.17%) sugiere que el rendimiento hidráulico se mantiene, justificando la reducción de costos.

Impacto socioeconómico

Accesibilidad: El menor costo podría permitir que más comunidades rurales accedan a sistemas de saneamiento adecuados.

Desarrollo local: La construcción de sistemas de alcantarillado más económicos puede elevar la calidad de vida en las zonas rurales y fomentar el desarrollo económico.

En resumen, el rediseño utiliza diámetros de tubería más pequeños, lo que reduce los costos mientras mantiene velocidades de flujo similares. Utiliza un mayor porcentaje de la capacidad de las tuberías y resulta en niveles de agua más altos en las mismas. El rediseño logra un ahorro significativo de costos (15,89%) sin cambiar el trazado de la red. La ligera disminución en la fuerza tractiva sugiere que probablemente se mantienen las capacidades de autolimpieza. En general, el rediseño optimiza el sistema para una mayor rentabilidad mientras mantiene un rendimiento hidráulico adecuado.

7.2 Resultados y discusión para la comunidad el Rosario.

La tabla 7.2 que se presenta compara algunas variables clave entre el diseño original y el rediseño de un sistema de alcantarillado sanitario, mostrando sus valores originales, los del rediseño, y la variación en términos absolutos y porcentuales. A continuación, se explican los resultados por cada variable:

Tabla 7.2 Análisis de los resultados de la modelación de la red del Rosario.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Cambio Absoluto	Cambio Porcentual	Interpretación
Velocidad promedio	0.79 m/s	0.81 m/s	+0.20 m/s	+2.53%	Incremento de velocidades
Capacidad tubería promedio	57.28 l/s	26.60 l/s	-30.68 l/s	-53.56%	Uso de diámetros de tubería más pequeños
Caudal/capacidad tubería promedio	4.20%	9.06%	+4.86%	+115.71%	Mayor uso de la capacidad de la tubería
Profundidad relativa	15.57%	22.16%	+6.59%	+42.32%	Nivel de agua en tuberías más alto
Fuerza tractiva	4.52 Pa	4.72 Pa	+0.20 Pa	+4.42%	Potencial de arrastre similar
Presupuesto de red	\$154,264.81	\$142,558.61	\$11,706.20	-7.59%	Rediseño más rentable
Longitud total de tuberías	3,524.74 m	3,524.74 m	0 m	0%	Mismo trazado de la red

Precio/longitud	\$43.77/m	\$40.45/m	3.32 /m	-7.59%	Reducción en el costo por longitud de la tubería
-----------------	-----------	-----------	---------	--------	--

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Eficiencia hidráulica: El rediseño mantiene y mejora ligeramente la eficiencia hidráulica, con aumentos en la velocidad promedio y la fuerza tractiva.

Optimización de capacidad: La reducción significativa en la capacidad de las tuberías, junto con el aumento en la relación caudal/capacidad, sugiere una optimización importante en el uso de la infraestructura.

Impacto económico: El rediseño logra una reducción del 7.59% en el presupuesto total, lo que representa un ahorro significativo sin comprometer la longitud de la red.

Consideraciones de rendimiento: El aumento en la profundidad relativa y en la utilización de la capacidad de las tuberías podría requerir un monitoreo más cercano del rendimiento del sistema a largo plazo.

Balance costo-beneficio: El rediseño parece lograr un buen equilibrio entre la reducción de costos y el mantenimiento (o incluso mejora) de parámetros hidráulicos clave.

Este rediseño parece ser una optimización efectiva del sistema de alcantarillado, logrando ahorros significativos mientras mantiene o mejora los parámetros de rendimiento críticos. Sin embargo, se recomienda un seguimiento a largo plazo para asegurar que el sistema pueda manejar adecuadamente posibles aumentos futuros en la demanda.

7.3 Resultados y discusión para el sector Valle real.

La tabla 7.3 que se presenta compara algunas variables clave entre el diseño original y el rediseño de un sistema de alcantarillado sanitario, mostrando sus valores originales, los del rediseño, y la variación en términos absolutos y porcentuales. A continuación, se explican los resultados por cada variable:

Tabla 7.3 Análisis de los resultados de la modelación de la red de Valle Real.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Cambio Absoluto	Cambio Porcentual	Interpretación
Velocidad promedio	0.84 m/s	0.87 m/s	+0.03 m/s	+3.57%	Incremento en la velocidad promedio
Capacidad tubería promedio	64.55 l/s	35.60 l/s	-28.95 l/s	-44.85%	Reducción significativa en la capacidad de las tuberías
Caudal/capacidad tubería promedio	3.37%	6.12%	+2.75%	+81.60%	Mayor uso de la capacidad de la tubería
Profundidad relativa	15.79%	21.05%	+5.26%	+33.31%	Nivel de agua en tuberías más alto
Fuerza tractiva	5.73 Pa	5.99 Pa	+0.26 Pa	+4.54%	Potencial de arrastre mayor
Presupuesto de red	\$42,198.41	\$37,519.63	-\$4,678.78	-11.09%	Rediseño más rentable
Longitud total de tuberías	1,066.16 m	1,066.16 m	0 m	0%	Mismo trazado de la red
Precio/longitud	\$39.58/m	\$35.19/m	-\$4.39/m	-11.09%	Reducción en el costo por longitud de la tubería

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Mejora en la eficiencia hidráulica: El rediseño logra aumentos en la velocidad promedio y la fuerza tractiva, esto mejora el rendimiento general del sistema al promover la autolimpieza y prevenir obstrucciones.

Optimización de capacidad: La reducción del 44.85% en la capacidad de las tuberías, junto con el aumento del 81.60% en la relación caudal/capacidad, sugiere una optimización importante en el uso de la infraestructura.

Impacto económico positivo: El rediseño logra una reducción del 11.09% en el presupuesto total, lo que representa un ahorro significativo sin comprometer la longitud de la red.

Consideraciones de rendimiento: El aumento en la profundidad relativa (33.31%) podría requerir un monitoreo más cercano del rendimiento del sistema a largo plazo, especialmente en condiciones de flujo máximo.

Balance costo-beneficio: El rediseño logra un buen equilibrio entre la reducción de costos y la mejora de parámetros hidráulicos clave.

Este rediseño demuestra ser una optimización efectiva del sistema de alcantarillado, logrando ahorros significativos mientras mejora los parámetros de rendimiento críticos. La combinación de menor costo y mejor rendimiento hidráulico sugiere que este rediseño podría ser particularmente beneficioso para áreas con recursos limitados. Sin embargo, se recomienda un seguimiento a largo plazo para asegurar que el sistema pueda manejar adecuadamente posibles aumentos futuros en la demanda.

7.4 Resultados y discusión para el sector el Jardín del Upano.

La tabla 7.4 que se presenta, compara algunas variables clave entre el diseño original y el rediseño de un sistema de alcantarillado sanitario, mostrando sus valores originales, los del rediseño, y la variación en términos absolutos y porcentuales. A continuación, se explican los resultados por cada variable:

Tabla 7.4 Análisis de los resultados de la modelación de la red de Jardín del Upano.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Cambio Absoluto	Cambio Porcentual	Interpretación
Velocidad promedio	0.76 m/s	0.78 m/s	+0.02 m/s	+2.63%	Incremento en la velocidad promedio
Capacidad tubería promedio	51.43 l/s	28.36 l/s	-23.07 l/s	-44.86%	Reducción significativa en la capacidad de las tuberías
Caudal/capacidad tubería promedio	4.48%	8.13%	+3.65%	+81.47%	Mayor uso de la capacidad de la tubería

Profundidad relativa	17.41%	23.18%	+5.77%	+33.14%	Nivel de agua en tuberías más alto
Fuerza tractiva	4.16 Pa	4.33 Pa	+0.17 Pa	+4.09%	Potencial de arrastre mayor
Presupuesto de red	\$82,235.56	\$71,164.96	-\$11,070.60	-13.46%	Rediseño más rentable
Longitud total de tuberías	2,685.20 m	2,685.20 m	0 m	0%	Mismo trazado de la red
Precio/longitud	\$30.63/m	\$26.50/m	-\$4.13/m	-13.46%	Reducción en el costo por longitud de la tubería

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Eficiencia hidráulica: El rediseño mantiene y mejora ligeramente la eficiencia hidráulica, con pequeños aumentos en la velocidad promedio y la fuerza tractiva.

Optimización de capacidad: La reducción del 44.86% en la capacidad de las tuberías, junto con el aumento del 81.47% en la relación caudal/capacidad, sugiere una optimización importante en el uso de la infraestructura.

Impacto económico significativo: El rediseño logra una reducción del 13.46% en el presupuesto total, lo que representa un ahorro sustancial sin alterar la longitud de la red.

Consideraciones de rendimiento: El aumento en la profundidad relativa (33.14%) podría requerir un monitoreo más cercano del rendimiento del sistema a largo plazo, especialmente en condiciones de flujo máximo.

Balance costo-beneficio: El rediseño logra un buen equilibrio entre la reducción de costos y el mantenimiento de parámetros hidráulicos clave.

Este rediseño demuestra ser una optimización efectiva del sistema de alcantarillado, logrando ahorros significativos mientras mantiene o mejora ligeramente los parámetros de rendimiento críticos. La combinación de menor costo y mantenimiento de la eficiencia hidráulica sugiere que este rediseño puede ser particularmente beneficioso

para áreas con recursos limitados. Se recomienda un seguimiento a largo plazo para asegurar que el sistema maneje adecuadamente posibles aumentos futuros en la demanda, especialmente considerando el aumento en la profundidad relativa y el uso de la capacidad de las tuberías.

7.5 Resultados y discusión para el sector Sunicorral.

La tabla 7.5 que se presenta compara algunas variables clave entre el diseño original y el rediseño de un sistema de alcantarillado sanitario, mostrando sus valores originales, los del rediseño, y la variación en términos absolutos y porcentuales. A continuación, se explican los resultados por cada variable:

Tabla 7.5 Análisis de los resultados de la modelación de la red de Sunicorral.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Cambio		Interpretación
			Absoluto	Porcentual	
Velocidad promedio	1.35 m/s	1.39 m/s	+0.04 m/s	+2.96%	Incremento en la velocidad promedio
Capacidad tubería promedio	124.17 l/s	57.66 l/s	-66.51 l/s	-53.56%	Reducción significativa en la capacidad de las tuberías
Caudal/capacidad tubería promedio	1.37%	2.95%	+1.58%	+115.33%	Mayor uso de la capacidad de la tubería
Profundidad relativa	12.51%	17.69%	+5.18%	+41.41%	Nivel de agua en tuberías más alto
Fuerza tractiva	14.50 Pa	15.15 Pa	+0.65 Pa	+4.48%	Potencial de arrastre mayor
Presupuesto de red	\$52,622.38	\$48,952.93	-\$3,669.45	-6.97%	Rediseño más rentable
Longitud total de tuberías	886.10 m	886.10 m	0 m	0%	Mismo trazado de la red
Precio/longitud	\$59.39/m	\$55.25/m	-\$4.14/m	-6.97%	Reducción en el costo por longitud de la tubería

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

En resumen, el rediseño ha logrado una mayor eficiencia en el uso de la capacidad de la tubería y una reducción de costos, aunque disminuye significativamente la capacidad promedio de la tubería. La velocidad y la fuerza tractiva aumentaron ligeramente, lo que podría mejorar el rendimiento del sistema.

El rediseño logró una reducción significativa en la capacidad de la tubería (-53.56%), lo que indica un diseño más eficiente o ajustado a las necesidades reales.

A pesar de la reducción en la capacidad, la relación caudal/capacidad aumentó considerablemente (115.33%), sugiriendo un uso más eficiente de la capacidad disponible.

La profundidad relativa aumentó en un 41.41%, lo que está relacionado con los cambios en la capacidad y el flujo.

El presupuesto total se redujo en un 6.97%, lo que representa un ahorro de costos.

La longitud total de la red no cambió, pero el costo por metro disminuyó en la misma proporción que el presupuesto total (-6.97%).

Los cambios en velocidad y fuerza tractiva fueron relativamente pequeños, lo que sugiere que el rendimiento hidráulico se mantuvo similar.

En general, el rediseño reduce costos y aumenta la eficiencia en la capacidad de las tuberías, manteniendo o mejorando otros parámetros de rendimiento.

7.6 Resultados y discusión para el sector Bolsillo.

La tabla 7.6 que se presenta compara algunas variables clave entre el diseño original y el rediseño de un sistema de alcantarillado sanitario, mostrando sus valores originales, los del rediseño, y la variación en términos absolutos y porcentuales. A continuación, se explican los resultados por cada variable:

Tabla 7.6 Análisis de los resultados de la modelación de la red de Bolsillo.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Cambio Absoluto	Cambio Porcentual	Interpretación
Velocidad promedio	1.41 m/s	1.45 m/s	+0.04 m/s	+2.84%	Incremento en la velocidad promedio
Capacidad tubería promedio	111.34 l/s	61.41 l/s	-49.93 l/s	-44.84%	Reducción significativa en la capacidad de las tuberías
Caudal/capacidad tubería promedio	3.17%	5.74%	+2.57%	+81.07%	Mayor uso de la capacidad de la tubería
Profundidad relativa	16.13%	21.61%	+5.48%	+33.97%	Nivel de agua en tuberías más alto
Fuerza tractiva	15.65 Pa	16.35 Pa	+0.70 Pa	+4.47%	Potencial de arrastre mayor
Presupuesto de red	\$164,708.53	\$151,157.06	-\$13,551.47	-8.23%	Rediseño más rentable
Longitud total de tuberías	3,173.10 m	3.173.10 m	0 m	0%	Mismo trazado de la red
Precio/longitud	\$51.91/m	\$47.64/m	-\$4.27/m	-8.23%	Reducción en el costo por longitud de la tubería

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Mejora en la eficiencia hidráulica: El rediseño logra aumentos en la velocidad promedio y la fuerza tractiva, lo que mejora el rendimiento general del sistema en términos de autolimpieza y prevención de obstrucciones.

Optimización de capacidad: La reducción del 44.84% en la capacidad de las tuberías, junto con el aumento del 81.07% en la relación caudal/capacidad, propone una optimización importante en el uso de la infraestructura.

Impacto económico positivo: El rediseño logra una reducción del 8.23% en el presupuesto total, lo que representa un ahorro significativo sin comprometer la longitud de la red.

Consideraciones de rendimiento: El aumento en la profundidad relativa (33.97%) podría requerir un monitoreo más cercano del rendimiento del sistema a largo plazo, especialmente en condiciones de flujo máximo.

Balance costo-beneficio: El rediseño logra un buen equilibrio entre la reducción de costos y la mejora de parámetros hidráulicos clave.

Este rediseño demuestra ser una optimización efectiva del sistema de alcantarillado, logrando ahorros significativos mientras mejora los parámetros de rendimiento críticos. La combinación de menor costo y mejor rendimiento hidráulico sugiere que este rediseño podría ser particularmente beneficioso para áreas con recursos limitados. Se recomienda un seguimiento a largo plazo para asegurar que el sistema maneje adecuadamente posibles aumentos futuros en la demanda, especialmente considerando el aumento en la profundidad relativa y el uso de la capacidad de las tuberías.

7.7 Resultados y discusión para el sector Caguanapamba.

La tabla 7.7 que se presenta compara algunas variables clave entre el diseño original y el rediseño de un sistema de alcantarillado sanitario, mostrando sus valores originales, los del rediseño, y la variación en términos absolutos y porcentuales. A continuación, se explican los resultados por cada variable:

Tabla 7.7 Análisis de los resultados de la modelación de la red de Caguanapamba.

Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Cambio	Cambio	Interpretación
			Absoluto	Porcentual	
Velocidad promedio	1.30 m/s	1.34 m/s	+0.04 m/s	+3.08%	Incremento en la velocidad promedio
Capacidad tubería promedio	110.69 l/s	63.56 l/s	-47.13 l/s	-42.58%	Reducción significativa en la

Caudal/capacidad tubería promedio	2.34%	4.08%	+1.74%	+74.36%	capacidad de las tuberías Mayor uso de la capacidad de la tubería
Profundidad relativa	13.81%	18.35%	+4.54%	+32.87%	Nivel de agua en tuberías más alto
Fuerza tractiva	12.62 Pa	13.19 Pa	+0.57 Pa	+4.52%	Potencial de arrastre mayor
Presupuesto de red	\$166,165.72	\$153,178.45	-\$12,987.27	-7.82%	Rediseño más rentable
Longitud total de tuberías	2,882.00 m	2,882.00 m	0 m	0%	Mismo trazado de la red
Precio/longitud	\$57.66/m	\$53.15/m	-\$4.51/m	-7.82%	Reducción en el costo por longitud de la tubería

Nota: Los resultados de las modelaciones son obtenidos de cada alternativa.

Mejora en la eficiencia hidráulica: El rediseño logra aumentos en la velocidad promedio y la fuerza tractiva, lo que mejora en términos de autolimpieza y prevención de obstrucciones.

Optimización de capacidad: La reducción del 42.58% en la capacidad de las tuberías, junto con el aumento del 74.36% en la relación caudal/capacidad, sugiere una optimización importante en el uso de la infraestructura.

Impacto económico positivo: El rediseño logra una reducción del 7.82% en el presupuesto total, lo que representa un ahorro significativo sin comprometer la longitud de la red.

Consideraciones de rendimiento: El aumento en la profundidad relativa (32.87%) podría requerir un monitoreo más cercano del rendimiento del sistema a largo plazo, especialmente en condiciones de flujo máximo.

Balance costo-beneficio: El rediseño parece lograr un buen equilibrio entre la reducción de costos y la mejora de parámetros hidráulicos clave.

Este rediseño demuestra ser una optimización efectiva del sistema de alcantarillado, logrando ahorros significativos mientras mejora los parámetros de rendimiento críticos. La combinación de menor costo y mejor rendimiento hidráulico sugiere que este rediseño podría ser particularmente beneficioso para áreas con recursos limitados. Se recomienda un seguimiento a largo plazo para asegurar que el sistema maneje adecuadamente posibles aumentos futuros en la demanda, especialmente considerando el aumento en la profundidad relativa y el uso de la capacidad de las tuberías.

8 Conclusiones

- El análisis hidráulico de los sistemas de alcantarillado seleccionados mostró que los rediseños resultaron en una reducción promedio del 46.39% en la capacidad de las tuberías. Como las pendientes y la rugosidad interna son similares en ambas alternativas, esta reducción puede causar desbordamientos y afectar la eficiencia de los sistemas, especialmente si se infiltran aguas clandestinas o se usan mal los sistemas por los residentes.
- Los sistemas rediseñados mostraron una reducción promedio del 87.17% en el caudal relativo a la capacidad de las tuberías. Un aumento en este valor indica que la tubería está utilizando un mayor porcentaje de su capacidad, Sin embargo, también implica que el sistema está más cerca de su límite de capacidad, lo que aumenta el riesgo de obstrucciones o colapsos si el caudal aumenta inesperadamente.
- La velocidad promedio del flujo se mantuvo casi constante, con un aumento promedio del 2.41% entre la alternativa original y el rediseño. Esto es significativo porque la velocidad del agua en las tuberías es esencial para prevenir la sedimentación de sólidos y garantizar el buen funcionamiento del sistema. El leve aumento observado asegura que el flujo de agua sigue siendo suficiente para movilizar los desechos eficientemente.
- El aumento promedio del 34.81% en la profundidad relativa del flujo sugiere que las tuberías manejan un flujo más elevado, reduciendo su capacidad de transportar caudales. Aunque la fuerza tractiva se mantuvo estable con un pequeño incremento del 3.76%, se observa en los resultados que cumplen las normativas ecuatorianas.
- Comparar estos diseños a través de análisis cuantitativos muestra cómo los cambios en la velocidad y la capacidad afectan el rendimiento del sistema. El análisis hidráulico demuestra que los rediseños cumplieron con la velocidad

mínima exigida por las normas y transportaron el mismo caudal, a pesar de reducir la capacidad de las tuberías.

- Una de las conclusiones de este análisis es la reducción en los costos de los sistemas rediseñados. En promedio, el presupuesto total de red se redujo en un 10.15%, demostrando un ahorro económico significativo que cumple con las normas de desempeño hidráulico. En casos como Santiago de Méndez, el ahorro llegó al 15.89%, mientras que, en otros, como Caguanapamba, fue del 7.82%. Esta reducción de costos hace que los proyectos sean viables y accesibles para zonas rurales con presupuestos ajustados.
- El costo por metro lineal de tubería también experimentó una reducción significativa del 10.15% en promedio. Esto es particularmente importante cuando se trata de redes de gran longitud, como las de Rosario (3524.74 m) o Bolsillo (3173.10 m), donde una disminución en el costo por metro genera un impacto económico positivo en todo el proyecto. Estos ahorros se lograron mediante la reducción de los diámetros de las tuberías y la optimización de otros parámetros de diseño, como las velocidades mínimas y máximas, sin comprometer la operación del sistema.
- La fuerza tractiva aumentó ligeramente un 3,76 % de media, lo que asegura que el sistema aún puede movilizar los sólidos eficientemente, incluso con tuberías de menor capacidad. Este equilibrio entre la reducción del diámetro y el mantenimiento de una fuerza tractiva adecuada fue clave para lograr ahorros en el costo sin sacrificar la funcionalidad del sistema.
- Los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan un marco cuantitativo valioso para futuros proyectos de alcantarillado sanitario en áreas rurales. El hecho de que los rediseños hayan logrado una eficiencia numérica con respecto a la norma ecuatoriana, reduciendo los costos y manteniendo el rendimiento hidráulico, indica que estos enfoques pueden ser replicables en otros contextos rurales con limitaciones económicas.
- Las reducciones en el presupuesto, que oscilaron entre el 6.97% y el 15.89%, demuestran que las alternativas de rediseño son una opción viable para proyectos de alcantarillado en zonas rurales, donde los recursos financieros son

limitados. El uso de tuberías de menor capacidad, combinado con un diseño optimizado que maximiza el caudal relativo y mantiene la fuerza tractiva dentro de los márgenes aceptables, ofrece una solución rentable y técnicamente eficiente.

- **Facilidad de financiamiento:** La reducción del costo total del proyecto puede hacer que sea más atractivo para entidades financieras y gobiernos que otorgan fondos o préstamos a proyectos de infraestructura. Al presentar proyectos optimizados, es posible que las comunidades rurales tengan más facilidad para obtener financiamiento de agencias internacionales de desarrollo o bancos que promueven proyectos sostenibles en zonas de bajos recursos.
- **Elegibilidad para subsidios y ayudas:** Los proyectos que optimizan el uso de recursos y logran importantes reducciones de costos pueden ser elegibles para subsidios gubernamentales o de organizaciones no gubernamentales (ONG). Al demostrar que los rediseños ofrecen una relación costo-beneficio favorable, estos proyectos pueden recibir apoyo adicional para cubrir los costos de construcción.
- **Desarrollo económico regional:** Al contar con sistemas de alcantarillado más accesibles y eficientes, las comunidades rurales pueden experimentar mejoras en la calidad de vida, salud pública y medio ambiente. Esto fomenta el desarrollo económico, ya que un mejor saneamiento está vinculado a mayores tasas de productividad y mejoras en las condiciones de salud, lo que disminuye los costos relacionados con enfermedades transmitidas por el agua o la falta de saneamiento adecuado.
- **Aplicación en múltiples proyectos:** La metodología de rediseño y optimización de costos se puede aplicar a diferentes localidades rurales. Las soluciones de bajo costo y alta eficiencia pueden replicarse en nuevos proyectos de alcantarillado, generando economías de escala en las compras de materiales, maquinaria y mano de obra. Este enfoque tiene el potencial de ser un modelo para programas nacionales o regionales de mejoramiento de infraestructuras. El rango de la presente tesis tiene los mayores valores en área de 16.00 Ha. Una caudal de 28.78 l/seg.

Esta investigación demuestra que los rediseños de los sistemas de alcantarillado rural pueden resultar en ahorros significativos sin comprometer el rendimiento hidráulico. Las modificaciones en el diseño, como la reducción de la capacidad de las tuberías, la optimización de la velocidad y la mejora en el caudal relativo, permiten obtener sistemas más eficientes y menos costosos. La información cuantitativa obtenida en esta investigación proporciona un marco sólido para futuros proyectos de alcantarillado en zonas rurales, demostrando que es posible alcanzar un equilibrio entre costos, eficiencia operativa y durabilidad.

Referencias

- ASCE. (2007). *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction*. ASCE.
- Autodesk. (2024). <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>. Retrieved from <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>
- Butler, D. &. (2011). *Urban Drainage*. Taylor & Francis.
- Calles-García, J., & González-Pérez, P. (2011). *La Biblia del Footprinting*.
- Carrera, A. (2009). *Apuntes de Ingeniería Sanitaria*. Guatemala: Universidad de San Carlos.
- Chin, D. A. (2013). *Water Resources Engineering (3rd ed.)*. Pearson.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Chucya, P. (2024, septiembre 28). *Diseño hidráulico*. Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/6739600/Diseno-Hidraulico-Ing>
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. Coyoacán, México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Constitución de la República del Ecuador*. (2008).
- Criollo de la Cruz, S. C. (2020). *Comparacion tecnica y financiera entre alcantarillado optimizado y alcantarillado condominial*. Bogota: Universidad de los Andes.
- EMAAP-Q. (2009). *NORMAS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO PARA LA EMAAP-Q*. Quito: V&M Gráficas.

- IEOS., E. (1986). *Normas de diseño para sistemas de agua potable y eliminación de residuos líquidos*.
- INEN CO 10.07 - 601. (1992). *Normas de diseño para sistemas de agua potable y eliminación de residuos líquidos*.
- Mays, L. W. (2011). *Water Transmission and Distribution*. American Water Works Association.
- METCALF&EDDY. (1998). *Ingeniería de Aguas Residuales. Volumen 1*. Madrid: Impreso y revistas S.A.
- Ministerio de Vivienda . (2017).
- Pantoja Bombón, E. A. (2016). *Análisis de costos de producción y su impacto en la rentabilidad de la empresa Holviplas SA en el año 2015*. Ambato: Universidad Tecnica de Ambato.
- Qi, M. Y. (2020). Pollution reduction and operating cost analysis of municipal wastewater treatment in China and implication for future wastewater management. *Journal of Cleaner Production*,, 1-12.
- Saldarriaga, J. (2017). *Clase de Sistemas Integrados de Drenaje Urbano*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Saldarriaga, J. (2019). *Sistemas Integrados de Drenaje Urbano*. Universidad de los Andes.
- UNICEF. (2024). *La falta de higiene, agua segura y saneamiento ECUADOR_UNICEF*. UNICEF. Obtenido de <https://www.unicef.org/ecuador:https://www.unicef.org/ecuador/media/9671/file?form=MG0AV3>

Anexos 1

Si fuera necesario incluya los más relevantes para la replicabilidad de la investigación o ampliación de información que no se presenta en los resultados y es relevante para la comprensión de estos.

1. Planos de las redes modeladas.
2. Anexo de cálculo de cantidades y presupuestos.
3. Anexos de los cálculos de los sistemas de alcantarillado en SewerGEMS.