

TESIS DE MAESTRÍA

**REVISIÓN CRÍTICA DEL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONEXIÓN
BASADO EN LA METODOLOGÍA HEC-22. EFECTO SOBRE LOS COSTOS
DE CÁMARAS DE CAÍDA Y SU EQUIVALENTE EN TONELADAS DE
CARBONO**

Francisco José Álvarez Cáceres

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2026**

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos, por ser una fuente constante de motivación y por impulsarme siempre a exigirme más, tanto personal como académicamente.

A mis compañeros del CIACUA, por su valiosa amistad, colaboración y apoyo incondicional durante el desarrollo de la maestría.

Al profesor Juan Saldarriaga, por su guía, experiencia y disposición constante para orientar este trabajo desde sus inicios hasta su culminación.

A la Universidad de los Andes, por brindarme la formación académica, los recursos y el entorno propicio para crecer como estudiante, profesional y persona

A Sonia Yolanda Cáceres, mi mayor fuente de inspiración.



TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2.	Marco teórico	3
2.1	Estructuras de Conexión	3
2.1.1	Diseño geométrico de cámaras de unión.....	4
2.1.2	Diseño hidráulico de cámaras de unión.....	4
2.1.3	Ecuaciones de Costo	11
2.2	Metodología de Diseño HEC-22	14
2.2.1	Principios Generales del Diseño según HEC-22	14
2.2.2	Capacidad hidráulica y dimensionamiento.....	16
2.2.3	Pérdidas de energía en el sistema.....	17
2.2.4	Cálculo de pérdidas de energía en estructuras de unión	19
2.2.5	Proceso de diseño según HEC-22	23
2.3	Metodología optimizada de diseño (UTOPIÍA).....	37
2.4	Metodología de aplicación parcial HEC-22.	38
2.5	Determinantes de Impacto Ambiental	39
2.5.1	Carbono Equivalente	39
2.5.2	Análisis de Ciclo de Vida	41
3.	Metodología	43
3.1	Caso de Estudio 1: Ejemplo Circular No. 22.....	44
3.1.1	Datos técnicos del caso de estudio	44
3.1.2	Aplicación de metodología HEC-22	46
3.1.3	Aplicación de metodología UTOPIÍA.....	56
3.2	Caso de Estudio 2: Series de Tubos	57
3.2.1	Series de 10 Tubos.....	58
3.2.2	Series de 20 Tubos.....	66
3.2.3	Variantes de aplicación de la metodología HEC-22 en el Caso de Estudio 2.....	67



3.3	Caso de Estudio 3: Redes Complejas	67
3.3.1	Descripción de las redes complejas.....	68
3.3.2	Aplicación de la metodología HEC-22	71
3.3.3	Variantes de aplicación de la metodología HEC-22 en el Caso de Estudio 3.....	73
3.3.4	Aplicación de la metodología UTOPIA	74
3.4	Análisis de Ciclo de Vida.....	76
3.4.1	Fuente de Información y cálculo original de las emisiones.....	76
3.4.2	Transformación de los datos y ajuste funcional	76
3.4.3	Aplicación a los casos de estudio.....	78
3.5	Relación entre resultados de diseño y evaluación económica	79
4.	Resultados	80
4.1	Resultados – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22.....	80
4.1.1	Resultados Hidráulicos y Geométricos	81
4.1.2	Resultados Económicos	82
4.1.3	Resultados de Emisiones de Carbono	83
4.2	Resultados – Caso de Estudio 2: Series de Tubos	84
4.2.1	Resultados Hidráulicos y Geométricos	85
4.2.2	Resultados Económicos	87
4.2.3	Resultados de Emisiones de Carbono	88
4.3	Resultados – Caso de Estudio 3: Redes Complejas	89
4.3.1	Resultados Hidráulicos y Geométricos	90
4.3.2	Resultados Económicos	91
4.3.3	Resultados de Emisiones de Carbono	92
5.	Análisis de resultados.....	94
5.1	Comparación hidráulica y geométrica.....	94
5.1.1	Diámetros y pendientes.....	95
5.1.2	Profundidades de excavación y configuración vertical	95
5.1.3	Caídas internas en cámaras de unión	96
5.2	Comparación económica entre metodologías.....	96
5.2.1	Casos de estudio 1 y 2: Series de Tubos	96
5.2.2	Caso de estudio 3: Redes Complejas	102



5.3	Comparación ambiental (ACV).....	104
5.3.1	Casos de Estudio 1 y 2: Series de Tubos.....	104
5.3.2	Caso de Estudio 3: Redes Complejas.....	106
5.4	Síntesis comparativa	107
5.4.1	Desempeño Hidráulico y control Geométrico	108
5.4.2	Comparación económica global.....	108
5.4.3	Comparación Ambiental	108
5.4.4	Balance integral y jerarquización de metodologías.....	109
6.	Conclusiones	110
7.	Recomendaciones.....	113
8.	Referencias.....	115
9.	Anexos	117



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Relación entre el conducto, la línea piezométrica (HGL) y la línea de energía (EGL)	15
Figura 2-2. Representación de términos de EGL y HGL según su ubicación	28
Figura 3-1. Presentación 3D de las coordenadas de las estructuras – Caso 1.....	45
Figura 3-2. Presentación 2D de las coordenadas de las estructuras – Caso 1.....	46
Figura 3-3. Vista general del Programa StormCAD con la serie de 10 tubos creada	60
Figura 3-4. Asignación de Terreno (horizontal) y asignación de caudales para cada pozo	60
Figura 3-5. Configuración de Velocidad Máxima, Velocidad Mínima y Relación de Llenado Máxima para el diseño	61
Figura 3-6. Configuración de Profundidad Mínima y Profundidad Máxima de Excavación.....	61
Figura 3-7. Módulo de cálculo de pérdidas de energía en estructuras de conexión.....	64
Figura 3-8. Módulo de verificación del perfil hidráulico del sistema	65
Figura 3-9. Módulo de diseño hidráulico de las tuberías.....	65
Figura 3-10. Diagrama de la Red Chicó Sur.....	69
Figura 3-11. Diagrama de la Red Moeni	70
Figura 3-12 Diagrama de la Red Li & Matthew	70
Figura 3-13. Vista general de la Red Chicó Sur.....	72
Figura 3-14. Perfil hidráulico de un tramo de la Red Chicó Sur	73
Figura 3-15. Ajuste de curvas de datos de emisión.....	78
Figura 5-1. Costo total de construcción vs. pendiente del terreno para series de 10 tuberías (Caso de Estudio 2).....	97
Figura 5-2. Costo total de construcción vs. pendiente del terreno para series de 20 tuberías (Caso de Estudio 2).....	97
Figura 5-3. Desagregación del costo de construcción (tuberías y cámaras) para terreno con pendiente 0% – Serie de 10 tuberías.....	98
Figura 5-4. Desagregación del costo de construcción (tuberías y cámaras) para terreno con pendiente 0% – Serie de 20 tuberías.....	98
Figura 5-5. Incremento porcentual del costo total frente a UTOPIA por pendiente – Serie de 10 tuberías.....	99
Figura 5-6. Incremento porcentual del costo total frente a UTOPIA por pendiente – Serie de 20 tuberías.....	99
Figura 5-7. Costos desagregados de la Red Chicó Sur - Caso de Estudio 3.....	102
Figura 5-8. Costos desagregados de la Red Moeni - Caso de Estudio 3.....	103



Figura 5-9. Costos desagregados de la Red Li & Matthew - Caso de Estudio 3	103
Figura 5-10. Comparación de emisiones por etapa - Caso de Estudio 2: Serie de 10 Tuberías	104
Figura 5-11. Comparación de emisiones por etapa - Caso de Estudio 2: Serie de 20 Tuberías	105
Figura 5-12. Distribución de generación de carbono [t CO ₂]. Serie de 10 Tuberías (Izquierda). Serie de 20 Tuberías (Derecha). Correspondiente al terreno horizontal (0.0%)	105
Figura 5-13. Comparación de producción de carbono equivalente [t CO ₂] por etapa. Caso de Estudio 3: Redes Complejas	106
Figura 5-14. Distribución porcentual de las etapas de ACV según metodología de diseño. Caso de Estudio 3: Redes Complejas	107



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Diámetro interno mínimo de estructuras de conexión.....	4
Tabla 2-2. Relación entre el tirante relativo y la capacidad hidráulica de una tubería circular.....	17
Tabla 2-3. Valores típicos del coeficiente de rugosidad de Manning (n) según el material del conducto.....	17
Tabla 2-4. Coeficientes típicos de pérdida localizada en sistemas pluviales.....	19
Tabla 2-5. Formato para proceso preliminar de diseño según la HEC-22.....	25
Tabla 2-6. Formato para documentar los niveles de EGL y HGL - Tabla A.....	29
Tabla 2-7. Formato para documentar los niveles de EGL y HGL - Tabla B.....	30
Tabla 3-1. Información de Intensidad/Duración – Caso 1.....	44
Tabla 3-2. Información de área de drenaje – Caso 1.....	45
Tabla 3-3. Coordenadas espaciales de la red de alcantarillado – Caso 1.....	45
Tabla 3-4. Longitud de tramos y pendientes del terreno – Caso 1.....	46
Tabla 3-5. Información tramo 1 - Caso 1.....	47
Tabla 3-6. Información tramo 2 – Caso 1.....	48
Tabla 3-7. Información tramo 3 – Caso 1.....	49
Tabla 3-8. Información tramo 4 – Caso 1.....	50
Tabla 3-9. Información requerida por el programa UTOPIA – Caso 1.....	56
Tabla 3-10. Restricciones de Diseño Caso 2 y Caso 3.....	58
Tabla 3-11. Diámetros disponibles para el diseño Caso 2 y Caso 3 (Li & Matthew, 1990).....	58
Tabla 3-12. Caudal por cámaras y longitud de tubería - Serie 10 Tubos.....	59
Tabla 3-13. Datos de entrada para la aplicación de UTOPIA – Series de 10 tubos.....	63
Tabla 3-14. Datos de entrada para UTOPIA - Caso 3 Red Chicó Sur.....	74
Tabla 3-15. Resultados de Ariza (2022). Emisiones de CO2 [kg/100 m].....	76
Tabla 3-16. Datos Transformados. Emisiones de CO2 [Ton/m].....	77
Tabla 4-1. Resultados de diámetros y pendientes – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22.....	81
Tabla 4-2. Resultados de profundidades de excavación – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22.....	81
Tabla 4-3. Costos de Construcción – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22.....	82
Tabla 4-4. Emisiones totales de carbono equivalente - Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22.....	83
Tabla 4-5. Emisiones de carbono equivalente por etapa del ciclo de vida - Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22.....	84



Tabla 4-6. Resultados de diámetros y pendiente - Caso de Estudio 2: Serie de 10 Tuberías.....	85
Tabla 4-7. Costos de Construcción – Caso de Estudio 2: Serie de 10 Tuberías	87
Tabla 4-8. Costos de Construcción – Caso de Estudio 2: Serie de 20 Tuberías	87
Tabla 4-9. Emisiones agregadas de carbono equivalente – Caso 2: Serie de 10 tuberías	88
Tabla 4-10. Emisiones agregadas de carbono equivalente – Caso 2: Serie de 20 tuberías	89
Tabla 4-11. Indicadores hidráulicos y geométricos agregados - Caso de Estudio 3: Redes Complejas.....	90
Tabla 4-12. Costos de construcción por red y metodología - Caso de Estudio 3: Redes Complejas.....	91
Tabla 4-13. Emisiones de carbono equivalente por red y metodología [t CO ₂ -eq] – Caso de Estudio 3: Redes Complejas.....	92
Tabla 5-1. Resumen de costos totales e incremento porcentual frente a UTOPIA por pendiente del terreno y metodología (series de 10 y 20 tuberías).....	100
Tabla 5-2. Síntesis comparativa del desempeño de las metodologías evaluadas.....	109



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1. Ecuación general de costo de tuberías.....	12
Ecuación 2-2. Ecuación de costo de tuberías propuesta por Li & Matthew (1990).....	12
Ecuación 2-3. Ecuación de costo de tuberías propuesta por Maurer et al. (2010).....	12
Ecuación 2-4. Ecuación de costo de estructuras de unión propuesta por Li & Matthew (1990).....	14
Ecuación 2-5. Ecuación de costo de estructuras de unión propuesta por Saldarriaga (2023)	14
Ecuación 2-6. Ecuación de Manning.....	16
Ecuación 2-7. Ecuación de pérdidas por fricción.....	18
Ecuación 2-8. Ecuación de Manning despejada para la pendiente	18
Ecuación 2-9. Ecuación general para pérdidas de energía	19
Ecuación 2-10. Ecuación para determinar energía inicial en estructuras de unión.....	20
Ecuación 2-11. Ecuación de energía con control en la salida (Eaio)	20
Ecuación 2-12. Ecuación de energía con control a la entrada sumergida (Eais)	21
Ecuación 2-13. Ecuación de energía con control a la entrada no sumergida (Eaiu).....	21
Ecuación 2-14. Ecuación de energía ajustada en la estructura de unión	21
Ecuación 2-15. Ecuación de pérdidas por cañuela	21
Ecuación 2-16. Ecuaciones de pérdidas por ángulos de entrada.....	22
Ecuación 2-17. Ecuaciones de pérdidas por flujos en caída	22
Ecuación 2-18. Ecuación de energía para las tuberías entrantes sin caída	22



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de alcantarillado pluvial son infraestructuras esenciales para la gestión adecuada del drenaje urbano, ya que permiten la recolección, conducción y disposición de las aguas lluvias, con el objetivo de prevenir inundaciones, proteger la infraestructura urbana y salvaguardar la salud pública (Mays, 2011; Metcalf & Eddy, 2013). A diferencia del alcantarillado sanitario, que transporta aguas residuales domésticas e industriales, el alcantarillado pluvial se enfoca exclusivamente en evacuar el agua proveniente de precipitaciones, razón por la cual su diseño hidráulico está fuertemente influenciado por eventos meteorológicos extremos, la topografía y el desarrollo urbano (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016).

Dentro del sistema de alcantarillado pluvial, uno de los componentes clave son las estructuras de conexión o de unión, las cuales permiten enlazar múltiples tuberías entre sí, realizar cambios de dirección, acomodar diferencias de nivel, y en general, facilitar el funcionamiento del sistema ante condiciones hidráulicas complejas (Metcalf & Eddy, 2013). Estas estructuras incluyen cámaras de inspección, cajas de unión, pozos de caída y sumideros con conexiones múltiples, entre otras. Su presencia es inevitable en redes urbanas extensas, donde la geometría y las restricciones del trazado demandan soluciones versátiles (Mays, 2011).

El diseño adecuado de estas estructuras ha sido objeto de constante revisión por parte de la ingeniería hidráulica, ya que en ellas se presentan pérdidas de energía significativas debido a la concentración de flujos, cambios bruscos de dirección, diferencias de velocidad y turbulencia (WEF, 2009). En Colombia, la normativa vigente, particularmente el Título D del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico y los manuales técnicos de diseño de las empresas prestadoras del servicio de alcantarillado, ha incorporado de forma explícita el tratamiento de estas pérdidas, incentivando su cuantificación para mejorar la precisión del perfil hidráulico y garantizar el buen funcionamiento del sistema (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016).

Ante la necesidad de estimar estas pérdidas con mayor realismo, se han adoptado y adaptado diferentes metodologías. Una de las más influyentes ha sido la contenida en tercera edición de la Hydraulic Engineering Circular No. 22 (HEC-22), desarrollada por la Federal Highway Administration (FHWA, 2009). Esta guía, ampliamente utilizada para el diseño de sistemas de drenaje urbano propone un enfoque semiempírico para la estimación de pérdidas en estructuras de unión, basándose en configuraciones geométricas, relaciones de caudal y estudios de laboratorio. En Colombia, la adaptación de este enfoque ha llevado a modelos que buscan equilibrar simplicidad, aplicabilidad y realismo hidráulico.

No obstante, el énfasis técnico en el cálculo de pérdidas ha generado un efecto colateral importante: la tendencia a sobredimensionar las estructuras de conexión para mitigar dichas pérdidas (Mays, 2011). Este sobredimensionamiento tiene un impacto directo en los costos de construcción y operación, ya que estructuras con mayores diámetros y profundidades implican mayores volúmenes de excavación, mayores costos de instalación de cámaras prefabricadas o fundidas in situ, y en



algunos casos, la necesidad de estaciones de bombeo para superar diferencias topográficas críticas (Tchobanoglous & Burton, 2003; WEF, 2009). Estos costos, a su vez, pueden traducirse en un incremento del consumo energético y de las emisiones asociadas a la construcción y operación, especialmente en sistemas donde el bombeo es frecuente. Por tanto, existe una conexión directa entre las decisiones de diseño hidráulico, los costos económicos del sistema y su impacto ambiental, medido en toneladas equivalentes de CO₂.

En este contexto, la presente tesis realiza una revisión crítica del diseño de estructuras de conexión basado en la metodología HEC-22, evaluando su impacto en el dimensionamiento de la infraestructura, los costos asociados (especialmente de bombeo, cámaras de caída y excavaciones profundas), y su huella de carbono. El objetivo es identificar oportunidades de optimización en el diseño que permitan mantener la funcionalidad hidráulica sin incurrir en sobredimensionamientos innecesarios, promoviendo así soluciones más sostenibles técnica, económica y ambientalmente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Realizar una revisión crítica del diseño de estructuras de conexión en sistemas de alcantarillado basado en la metodología HEC-22, evaluando su pertinencia técnica y su impacto sobre los costos de bombeo, la necesidad de cámaras de caída y las emisiones equivalentes de carbono, en el contexto de las normativas del RAS y de empresas prestadoras de servicios de alcantarillado en Colombia.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analizar el origen, supuestos y alcances técnicos del método HEC-22, especialmente en lo referente al cálculo de pérdidas de energía en cámaras de unión.
- Revisar el marco normativo vigente en Colombia (RAS y manuales técnicos de empresas prestadoras del servicio de alcantarillado) que exige la aplicación del método HEC-22 en el diseño de redes de alcantarillado.
- Comparar diseños hidráulicos de cámaras de unión realizados con la aplicación total, parcial y nula del método HEC-22, evaluando diferencias en pérdidas de carga, requerimientos geométricos y necesidades de bombeo.
- Cuantificar el impacto de los diseños sobre el consumo energético del sistema y su equivalente en emisiones de CO₂, con base en escenarios comparativos.
- Proponer lineamientos técnicos alternativos o ajustes normativos que permitan un diseño más eficiente y sostenible de las estructuras de conexión en redes de alcantarillado.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estructuras de Conexión

Las estructuras de conexión en redes de alcantarillado pluvial cumplen funciones hidráulicas, estructurales y operativas fundamentales. Su propósito principal es permitir la unión de múltiples conductos, facilitar cambios de dirección, nivel o pendiente, integrar caudales provenientes de diferentes ramales y posibilitar el acceso para inspección, operación y mantenimiento del sistema (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016). Estas estructuras incluyen cámaras de inspección, pozos de caída, cajas de empalme y sumideros conectados, y su uso es especialmente necesario cuando el trazado de la red exige modificaciones geométricas o cuando se espera la confluencia de flujos con diferentes características hidráulicas. La elección del tipo y geometría de la estructura debe considerar el régimen de flujo: en condiciones de flujo subcrítico, se busca preservar la línea piezométrica y minimizar pérdidas, mientras que en flujo supercrítico pueden presentarse fenómenos como saltos hidráulicos y turbulencia intensa, lo que demanda un diseño más cuidadoso para controlar la energía y evitar erosiones (Mays, 2011; FHWA, 2009). Desde el punto de vista operativo, estas estructuras deben permitir el acceso seguro al personal de mantenimiento, lo cual implica dimensiones mínimas para ingreso, ventilación adecuada, y la inclusión de elementos como escalas, pasos de hombre y tapas removibles según las normas de seguridad vigentes (Metcalf & Eddy, 2013; WEF, 2009). Además, su ubicación debe definirse estratégicamente: se recomienda instalarlas en intersecciones de tuberías, cambios de alineación o pendiente, extremos de líneas y cada cierta distancia lineal (usualmente entre 60 y 120 metros) para asegurar el mantenimiento rutinario con equipos convencionales (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016). Adicionalmente, deben evitarse ubicaciones que dificulten su operación, como zonas de tráfico pesado sin protección, pasos peatonales concurridos o áreas propensas a inundación. Por tanto, el diseño adecuado de las estructuras de conexión no solo responde a criterios hidráulicos, sino también a consideraciones operativas, de accesibilidad, durabilidad y seguridad, que en conjunto garantizan la eficiencia funcional y sostenibilidad del sistema pluvial urbano.

Si bien el diseño de las estructuras de conexión en sistemas de alcantarillado pluvial implica una amplia variedad de consideraciones, incluyendo aspectos geométricos, constructivos, estructurales y operativos, el enfoque de la presente tesis se centra en el análisis del comportamiento hidráulico de estas estructuras, particularmente en lo relacionado con las pérdidas de energía asociadas a su funcionamiento. En efecto, variables como el diámetro, la forma interna, la altura útil y la configuración de entrada y salida están fuertemente condicionadas por las condiciones de flujo y por los criterios de diseño hidráulico que se adopten. Si bien la geometría final de la estructura depende en gran medida de parámetros constructivos y espaciales, esta es subordinada a las exigencias del régimen hidráulico (subcrítico o supercrítico), el caudal de diseño, las velocidades esperadas y las pérdidas permitidas. Por tanto, esta investigación se enfoca en el estudio crítico de las metodologías utilizadas para estimar las pérdidas de energía en estas estructuras, con énfasis en la aplicación y



adaptación del método propuesto por la HEC-22, y en cómo dichas decisiones de diseño influyen directamente en los costos y la huella de carbono de los sistemas de drenaje urbanos.

2.1.1 Diseño geométrico de cámaras de unión

Aunque el diseño geométrico de las cámaras de unión no constituye el foco principal de esta tesis, su presentación resulta necesaria para contextualizar adecuadamente las condiciones físicas que influyen en su comportamiento hidráulico y constructivo. Este diseño se fundamenta principalmente en lo establecido por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), el cual define criterios mínimos en cuanto a dimensiones y accesibilidad. Según el RAS (2016), la profundidad mínima permitida para una cámara de unión es de 1,20 metros, medida desde la parte superior de la estructura hasta la cota clave de la tubería más superficial que se conecta a ella. Además, el orificio de acceso a la cámara debe tener un diámetro mínimo de 0,60 metros, con el fin de garantizar condiciones adecuadas para las labores de inspección, operación y mantenimiento. El diámetro total de la estructura, por su parte, está directamente relacionado con el diámetro de las tuberías afluentes y efluentes, de modo que se asegure una adecuada disposición interna de los conductos y espacio suficiente para el ingreso de personal. La Tabla 1 presenta estas relaciones geométricas típicas recomendadas por el RAS (2016), modificado por la resolución 799 de 2021.

Tabla 2-1. Diámetro interno mínimo de estructuras de conexión

Mayor diámetro de tuberías conectadas [mm]	Diámetro interno de la estructura [m]
200 a 500	1,20
> 500 a 750	1,50
> 750 a 900	1,80

Fuente. Adaptado de la Resolución 799 de 2021 Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio

Cabe destacar que, en general, los manuales técnicos de las principales empresas prestadoras del servicio de alcantarillado en Colombia adoptan estos mismos lineamientos normativos para el diseño geométrico de las cámaras de unión, ajustándolos únicamente cuando las condiciones locales lo exigen.

2.1.2 Diseño hidráulico de cámaras de unión

A continuación, se abordará el diseño hidráulico de las cámaras de unión conforme a lo establecido por el RAS y los manuales técnicos de tres de las principales empresas prestadoras del servicio de alcantarillado en Colombia: la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), Empresas Públicas de Medellín (EPM) y Empresas Municipales de Cali (EMCALI). Esta revisión permite identificar tanto los criterios comunes como las particularidades en la aplicación del enfoque hidráulico para este tipo de estructuras dentro del contexto normativo colombiano. Un aspecto especialmente relevante es que no todas las entidades hacen uso de la misma versión de la metodología HEC-22. Mientras que el RAS y EMCALI se basan en la segunda edición de la HEC-22, tanto EAAB como EPM han adoptado criterios correspondientes a la tercera edición. Esta



diferencia tiene ciertas implicaciones, ya que cada versión incorpora cambios en los coeficientes, en los factores de forma y en el tratamiento de ciertas configuraciones hidráulicas, lo que puede influir significativamente en la estimación de pérdidas de energía, el dimensionamiento de las estructuras y, en última instancia, en los costos del sistema. Por tanto, se analizará detalladamente cómo cada entidad interpreta y aplica la metodología HEC-22 en sus respectivas guías de diseño, como paso previo para evaluar sus implicaciones técnicas, económicas y ambientales.

2.1.2.1 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)

El Título D del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), expedido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, establece las directrices normativas y técnicas para el diseño y análisis hidráulico de las estructuras complementarias en redes de alcantarillado sanitario y pluvial. Estas estructuras, entre las que se incluyen cámaras de inspección y conexión, sumideros, cámaras de caída, aliviaderos, sifones invertidos, cámaras disipadoras de energía y cámaras de descarga, son elementos fundamentales para garantizar tanto la continuidad operativa del sistema como su adecuada inspección, limpieza y mantenimiento (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016, p. 137).

El objetivo principal de estas cámaras de conexión e inspección es permitir la vinculación de varios tramos de tubería y proporcionar acceso al sistema desde la superficie para facilitar su monitoreo. Su diseño debe responder al régimen de flujo predominante (subcrítico o supercrítico), y tener en cuenta factores hidráulicos, geométricos y operativos. Desde el punto de vista geométrico, estas estructuras suelen tener forma cilíndrica en su parte inferior, un cono de reducción en la parte superior y cañuelas en el fondo que encauzan adecuadamente los caudales. Asimismo, deben contar con un acceso vertical seguro (de al menos 0,6 m de diámetro) y permitir el ingreso de equipos de inspección o limpieza, con dimensiones internas moduladas según el número y tamaño de tuberías conectadas (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016, pp. 138–140).

El diseño hidráulico de estas estructuras se centra en minimizar las pérdidas de energía que se generan por la confluencia de flujos, cambios de dirección, diferencias de nivel y geometrías irregulares. En el caso de flujo subcrítico, el diseño puede apoyarse en el análisis de línea de energía, considerando una caída de fondo (D_z) que compense las pérdidas menores (h_m). Estas pérdidas pueden estimarse mediante dos métodos: el método estándar, que emplea coeficientes de pérdida asociados a configuraciones geométricas simples, y el método HEC-22, adoptado como referencia para el cálculo detallado de la línea de gradiente hidráulico (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016, pp. 142–144).

El método HEC-22 (segunda edición), adaptado en este reglamento, evalúa las pérdidas mediante un coeficiente compuesto (k_t) que integra seis factores de corrección: el coeficiente inicial de pérdida (k_o), la presencia o ausencia de cañuela (C_b), el flujo relativo en cámaras con múltiples tuberías (C_Q), la profundidad del flujo (C_d), la relación de diámetros entre entrada y salida (C_D), y la inmersión de flujos entrantes (C_p). Cada uno de estos factores se calcula con ecuaciones empíricas específicas o



tablas normalizadas, según el comportamiento del flujo en la cámara (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016, pp. 144–147).

Para flujos en régimen supercrítico, el enfoque del diseño cambia significativamente. Dado que en este régimen el flujo es más inestable y propenso a generar fenómenos como ondas de choque, remansos o pérdida de aireación, el diseño busca conservar el régimen sin introducir perturbaciones abruptas. Se establecen diferentes configuraciones de unión, ya sea sin caída (cuando las tuberías se conectan al mismo nivel), con caída (cuando hay un desnivel moderado de hasta 0,75 m), o con pequeñas caídas en casos especiales. Cada caso incluye ecuaciones para verificar el comportamiento energético y garantizar la transición hidráulica eficiente (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016, pp. 147–149).

En cuanto al nivel de agua en la estructura, el RAS exige verificar que la línea de gradiente hidráulico nunca supere la cota clave de las tuberías de entrada, para evitar su inmersión. Para ello, se calcula primero la energía disponible a la salida, se añade la pérdida estimada en la estructura (con coeficientes K_u y K_w según geometría y condiciones de entrada), y se ajusta el nivel de agua (H_w) cuando sea necesario. Estos pasos permiten modelar adecuadamente la elevación piezométrica dentro de la cámara (Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016, pp. 150–151).

2.1.2.2 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

La norma técnica NS-029-37-51, emitida por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), establece los lineamientos específicos para el diseño hidráulico de cámaras de unión y pozos de inspección en redes de alcantarillado. El propósito fundamental de estas estructuras es garantizar un tránsito controlado y seguro del flujo, minimizando fenómenos no deseados como presurización del sistema, desbordamientos a través de tapas o acometidas domiciliarias, velocidades excesivas que deterioren los materiales, o acumulación de gases por deficiente aireación (EAAB, 2024, p. 37).

El enfoque adoptado por la EAAB para el diseño hidráulico se basa en el principio del empate de colectores por la línea de energía. Este criterio busca que la energía total del flujo en los conductos de entrada (considerando energía cinética y presión) se mantenga por encima de la energía del conducto de salida en un valor al menos equivalente a las pérdidas de energía que ocurren dentro de la estructura (EAAB, 2024, pp. 37–38). Esta condición tiene como objetivo evitar resaltos hidráulicos, remansos o presurizaciones imprevistas. No obstante, se reconoce que una aplicación estricta de este principio puede conducir a diseños conservadores con profundizaciones innecesarias, por lo cual se recomienda complementar el análisis con modelos de simulación hidráulica, como el flujo gradualmente variado en redes locales y el flujo no permanente en redes troncales, en concordancia con lo estipulado en la norma NS-085 (EAAB, 2024, p. 38).

En cuanto al cálculo de pérdidas de energía en estas estructuras, la norma permite la aplicación de dos métodos. El primero es el método estándar, que asocia un coeficiente de pérdida adimensional (K) a la geometría de las tuberías conectadas. Su principal ventaja es la simplicidad y rapidez de aplicación, por lo que resulta útil en etapas preliminares de diseño. Sin embargo, presenta limitaciones



importantes, ya que no considera aspectos como cambios de sección, geometría de la cañuela, deflexión de los flujos, ni fenómenos de turbulencia compleja. Por esta razón, su uso está restringido a condiciones donde no se presenten regímenes de flujo supercrítico (EAAB, 2024, pp. 39–40).

El segundo método es una adaptación del método HEC-22, basado en la tercera edición de la Hydraulic Engineering Circular No. 22, desarrollada por la Federal Highway Administration (FHWA). Es importante aclarar que la norma de la EAAB no adopta el procedimiento completo propuesto en el manual HEC-22, sino que se limita a emplearlo como referencia para el cálculo detallado de las pérdidas de energía en la estructura (EAAB, 2024, p. 40). Este enfoque considera tres tipos principales de pérdidas adicionales: por configuración de la cañuela, por ángulo de entrada de los flujos, y por flujos que ingresan en caída o cascada.

El procedimiento adaptado consta de tres pasos. El primero consiste en el cálculo de la energía específica inicial en la estructura (E_{ai}), determinada como el valor máximo entre tres posibles condiciones de control hidráulico: control a la salida, control de entrada sumergida (análoga a un orificio), y control de entrada no sumergida (análoga a un vertedero) (EAAB, 2024, p. 41). En el segundo paso, esta energía inicial se ajusta para considerar pérdidas adicionales provocadas por las condiciones geométricas mencionadas. Este ajuste se realiza mediante la suma de términos independientes para cada tipo de pérdida, utilizando coeficientes empíricos derivados del HEC-22 (EAAB, 2024, pp. 43–45). El tercer paso se enfoca en la estimación de la línea de energía en cada colector entrante, diferenciando entre aquellos conectados hidráulicamente al flujo en la estructura y aquellos que ingresan en caída, aplicando fórmulas específicas en cada caso (EAAB, 2024, p. 47).

En lo referente a los tipos de empalme entre colectores, la norma distingue entre uniones “a nivel” y uniones “con caída”. En el primer caso, cuando las láminas de agua en las tuberías de entrada y salida están al mismo nivel, se busca conservar la energía cinética del flujo mediante cañuelas adecuadas. Se establecen relaciones mínimas entre el radio de curvatura de la cañuela (r) y el diámetro de la tubería (D), siendo $r/D \geq 1$ para flujo subcrítico y $r/D \geq 6$ para flujo supercrítico. Estas relaciones buscan minimizar la generación de ondas de choque o resaltos que puedan alterar la estabilidad del sistema. Las pérdidas se estiman con coeficientes de pérdida asociados al valor de r/D , conforme a tablas establecidas (EAAB, 2024, p. 48).

En cambio, la unión “con caída” se emplea cuando las condiciones hidráulicas o geométricas no permiten un empate eficiente a nivel. En estos casos se asume la pérdida total de energía cinética de la tubería entrante y se modela el comportamiento hidráulico como el de un tanque. El caudal que ingresa a la tubería de salida depende de su capacidad de transporte, del tipo de control hidráulico (entrada sumergida o no), y del nivel del agua dentro de la estructura de unión (H_w), el cual se calcula mediante ecuaciones empíricas específicas según el régimen de flujo (EAAB, 2024, pp. 49–51).

Finalmente, la norma permite la presencia de remansos, resaltos o presurizaciones puntuales dentro de las cámaras de unión, siempre y cuando estos fenómenos sean identificados y analizados durante el diseño, y se garantice que no afectan negativamente el desempeño hidráulico del sistema (EAAB,



2024, p. 38). Asimismo, fija valores estándar para los coeficientes de pérdida de entrada (0.2) y de salida (0.4), a emplear en los cálculos correspondientes (EAAB, 2024, pp. 42 y 47)

2.1.2.3 Empresas Públicas de Medellín

Las Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de Empresas Públicas de Medellín (EPM), en su capítulo 8.3.6, establecen los lineamientos para el diseño hidráulico de las estructuras de conexión y/o inspección, con un enfoque orientado a estimar adecuadamente las pérdidas menores de energía generadas en su interior. Estas pérdidas se producen como resultado de diversos fenómenos hidráulicos, entre los que se destacan los cambios de dirección del flujo, las expansiones y contracciones, la confluencia de chorros provenientes de diferentes tuberías y la forma en que la cañuela direcciona el flujo dentro de la cámara (EPM, 2021, p. 8-116). La norma subraya que la magnitud de estas pérdidas está estrechamente ligada al régimen hidráulico en que operan las tuberías conectadas (subcrítico o supercrítico), así como a la tubería hidráulicamente dominante, la cual determina las condiciones principales del flujo que ingresa a la estructura.

En estructuras donde confluyen múltiples conductos, se establece que debe identificarse la tubería hidráulicamente dominante para realizar el cálculo de pérdidas. La norma propone tres criterios para definir dicha tubería: primero, seleccionar el conducto con menor ángulo de deflexión respecto a la dirección del colector de salida, especialmente cuando los caudales son similares; segundo, elegir el conducto que presente mayor altura de velocidad ($v^2/2g$); y tercero, usar el criterio del producto entre caudal y velocidad ($Q \cdot v$), seleccionando el conducto que produzca el mayor valor (EPM, 2021, p. 8-117). Esta última opción se considera la más representativa cuando los caudales son desiguales entre colectores.

Cuando el sistema opera bajo régimen de flujo subcrítico, se emplea el criterio de empate de línea de energía entre las tuberías de entrada y salida, de modo que la diferencia de energía entre ambas se iguale a las pérdidas menores (hm) generadas al interior de la estructura. Este análisis se basa en una ecuación de energía específica que incluye los términos de velocidad, profundidad y caída de fondo (H_p), la cual se incorpora solo si el resultado lo exige (EPM, 2021, p. 8-117). Si H_p es positivo, se establece una caída de fondo entre la bodega de la tubería dominante y la de salida. Si es cero o negativo, no se permite caída, pero debe verificarse que las cotas de energía de entrada sigan superando la de salida para evitar condiciones indeseables como remansos o resaltos.

Para estimar las pérdidas de energía al interior de la estructura, EPM permite el uso de tres metodologías distintas, las cuales se seleccionan en función de la complejidad hidráulica y geométrica del caso:

La primera es el método estándar, recomendado para configuraciones simples en las que ingresan un máximo de dos tuberías, ambas en régimen subcrítico, con diámetros similares y ángulos de deflexión no mayores a 15° . Este método calcula la pérdida como el producto entre la altura de velocidad en la tubería de salida y un coeficiente de pérdida (K_m), seleccionado en función de la geometría de la estructura. La norma provee una tabla (Tabla 8-2) con valores de K_m para distintas configuraciones,



que oscilan entre 0.5 (una sola entrada sin cañuela) y 1.0 (tres o más conductos entrantes) (EPM, 2021, p. 8-117).

La segunda opción es el método AASHTO, más apropiado para condiciones complejas con tres o más entradas o cuando el diámetro del tubo de salida es mayor al de los de entrada. Este método descompone la pérdida total (hm) en tres componentes: pérdida por contracción (H_o), por expansión (H_i) y por cambio de dirección (H_b), esta última ajustada mediante un factor K dependiente del ángulo de deflexión, cuyos valores también se presentan en tabla. Además, el método incorpora un factor correctivo por cañuela ($C_s = 0.5$) para reflejar su efecto amortiguador sobre las pérdidas (EPM, 2021, pp. 8-117 a 8-118).

La tercera metodología corresponde a una adaptación del método HEC-22 (tercera edición). Aunque en el documento se presenta como “metodología HEC-22”, EPM aclara que su aplicación se limita únicamente al cálculo de pérdidas de energía dentro de la estructura, sin adoptar el procedimiento completo de diseño planteado por la Federal Highway Administration (EPM, 2021, p. 8-118). Este enfoque se estructura en tres pasos principales: (1) determinación del nivel de energía inicial (E_{ai}), el cual se toma como el mayor entre el control a la salida (flujo parcial o lleno), entrada sumergida (tipo orificio) o entrada libre (tipo vertedero); (2) estimación de las pérdidas adicionales por efecto de la configuración geométrica de la cañuela, el ángulo de entrada del flujo y la existencia de flujos que ingresan por encima del nivel del agua en la estructura; y (3) cálculo de las pérdidas a la salida de cada colector y determinación de la línea de energía aguas arriba (EPM, 2021, p. 8-118 a 8-119).

En condiciones de flujo supercrítico, la norma diferencia dos tipos de configuraciones: uniones sin caída y con pequeñas caídas. En las uniones sin caída, se permiten aportes por encima del nivel de agua siempre que no superen el 10% del caudal principal, y se exige que las cotas de energía de entrada sean mayores que la de salida. Se establece un límite máximo para el ángulo de intersección entre tuberías, el cual disminuye con el aumento del diámetro de la tubería de salida: desde 90° para $DN < 250$ mm hasta 15° para $DN > 900$ mm. Para estos diámetros grandes, el diseño debe realizarse mediante un análisis hidráulico basado en la ecuación de cantidad de movimiento (EPM, 2021, p. 8-119).

Cuando se trata de uniones con pequeñas caídas ($\Delta z < 0.75$ m) y flujo supercrítico, se permite estimar la máxima caída admisible utilizando la metodología propuesta por Hager y Gisonni (2002), basada en el factor de capacidad (FC) de la cámara y en la relación y/d en la tubería de entrada. La caída máxima (Δz) se calcula en función del diámetro de salida y se restringe a un valor no superior al 60% de dicho diámetro. Esta metodología se aplica exclusivamente cuando la relación $\Delta z/d_{out}$ es menor a 0.75; si la caída requerida supera ese valor, se debe recurrir al diseño de una cámara de caída formal bajo otro criterio normativo (EPM, 2021, pp. 8-120 a 8-121).

2.1.2.4 Empresas Municipales de Cali

La norma técnica NDC-SE-RA-001/V2.0 de Empresas Municipales de Cali (EMCALI) establece los lineamientos para el análisis hidráulico de las cámaras de inspección en sistemas de alcantarillado,



enfocándose principalmente en la estimación precisa de las pérdidas menores de energía que se producen al interior de estas estructuras. Estas pérdidas se generan como resultado de distintos fenómenos que interactúan simultáneamente dentro de la cámara, tales como cambios de dirección, expansiones, contracciones, confluencias de flujos y el efecto de la cañuela, que direcciona la circulación del agua dentro del pozo (EMCALI, 2021, p. 20). El tratamiento de estas pérdidas depende del régimen hidráulico predominante (subcrítico o supercrítico) y de la identificación de la tubería hidráulicamente dominante, que se determina con base en tres posibles criterios: el menor ángulo de deflexión respecto al eje del colector de salida, la mayor altura de velocidad ($v^2/2g$) o el mayor valor del producto entre caudal y velocidad ($Q \cdot v$) (EMCALI, 2021, p. 21).

En condiciones de flujo subcrítico, EMCALI permite emplear el criterio de empate por la línea de energía, que consiste en igualar la energía total entre la entrada y la salida, incorporando las pérdidas menores mediante una expresión de energía específica. En los casos en que esta ecuación arroje una caída de fondo positiva ($H_p > 0$), se deberá incorporar físicamente esa caída entre la batea de la tubería dominante y la de salida. En caso contrario, no se permite la introducción de una caída, aunque deberá verificarse que la energía en la entrada siga siendo superior a la de salida para evitar efectos hidráulicos no deseados como remansos o transiciones críticas (EMCALI, 2021, pp. 21–22).

Para el cálculo de pérdidas menores en estas estructuras, la norma establece tres metodologías principales. La primera es el método estándar, recomendado para configuraciones simples con no más de dos tuberías de entrada, operando en régimen subcrítico, con ángulos de deflexión menores a 15° , y cuando el diámetro de la tubería de salida es igual o mayor que los de entrada. En este método, la pérdida se estima como el producto entre la altura de velocidad en la tubería de salida y un coeficiente de pérdida (K_m), el cual se selecciona en función de la geometría y número de entradas a la cámara. Por ejemplo, se toma $K_m = 0.5$ para una sola entrada sin cañuela y sin deflexión, y $K_m = 1.0$ en cámaras con tres o más entradas (EMCALI, 2021, p. 22).

La segunda metodología corresponde al método AASHTO, que se recomienda en configuraciones más complejas donde confluyen más de dos tuberías o cuando la tubería de salida tiene un diámetro significativamente mayor. Esta metodología descompone la pérdida total en tres componentes: la pérdida por contracción (H_o), la pérdida por expansión (H_i) y la pérdida por cambio de dirección (H_b). Esta última se ajusta mediante un factor K relacionado con el ángulo de deflexión entre las tuberías, cuyo valor puede oscilar entre 0.0 y 0.7 dependiendo del ángulo. Adicionalmente, se incorpora un factor de corrección por cañuela (C_s) con valor de 0.5, el cual busca representar el efecto disipador de estas en la trayectoria del flujo (EMCALI, 2021, pp. 23–24).

La tercera opción corresponde a una adaptación del método HEC-22 en su segunda edición, el cual EMCALI utiliza únicamente para el cálculo de pérdidas de energía en el interior de la estructura, sin aplicar el procedimiento completo de diseño geométrico propuesto en dicha metodología. En este caso, las pérdidas menores se estiman como el producto entre la altura de velocidad y un coeficiente de pérdida total (K_t), el cual resulta de ajustar un coeficiente base (K_o) mediante la multiplicación de cinco factores de corrección empíricos. Estos factores son: C_b , que representa el tipo de cañuela (por



ejemplo, piso plano, media caña, piso deprimido); Cd, por la profundidad relativa del flujo; CD, por la relación entre los diámetros de las tuberías de entrada y salida; CQ, que toma en cuenta la proporción de caudales cuando confluyen múltiples entradas; y Cp, por condición de flujo en zambullida, es decir, cuando una tubería descarga por encima de la lámina de agua en la cámara. Estos factores se calculan a partir de expresiones empíricas y tablas proporcionadas por la norma, y permiten una representación más realista de las pérdidas internas en situaciones complejas (EMCALI, 2021, pp. 24–26).

En condiciones de flujo supercrítico, la norma establece también dos configuraciones principales: uniones sin caída y uniones con caída. Para el primer caso, se permite que las entradas sin contacto hidráulico con la lámina de agua no superen el 10% del caudal total, y que las cotas de energía de entrada sean mayores que las de salida. Además, se establecen límites máximos para el ángulo de deflexión entre las tuberías, los cuales disminuyen a medida que aumenta el diámetro del colector de salida, desde 90° para $DN \leq 250$ mm hasta 15° para $DN > 900$ mm (EMCALI, 2021, p. 26). En el segundo caso, cuando se trata de uniones con caída y el diámetro de salida supera los 900 mm, el diseño deberá basarse en un análisis mediante la ecuación de cantidad de movimiento, resolviendo iterativamente entre secciones para encontrar la energía disponible aguas abajo (EMCALI, 2021, p. 27). Si las condiciones no se ajustan a estos supuestos, el diseñador deberá justificar técnicamente el empleo de una caída interna apoyado en literatura especializada y principios hidráulicos sólidos (EMCALI, 2021, p. 28).

2.1.3 Ecuaciones de Costo

El diseño y construcción de un sistema de alcantarillado implica una inversión significativa, en la que intervienen múltiples componentes como las tuberías, las cámaras de unión, las estaciones de bombeo, los pozos de inspección, entre otros. Sin embargo, en el contexto de esta tesis, el análisis económico se centrará en dos de estos elementos: las tuberías y las cámaras de unión. Estos componentes no solo representan una parte importante del costo total del sistema, sino que además están directamente relacionados con las decisiones hidráulicas adoptadas durante el diseño.

Según Saldarriaga (2024), las ecuaciones de costo en sistemas de alcantarillado deben permitir comparar entre diferentes configuraciones de diseño, reconociendo que los costos de un componente pueden influir o estar condicionados por las características de otro. Un ejemplo clásico de esta interdependencia es la relación entre el diámetro de la tubería y la pendiente hidráulica: al aumentar la pendiente, normalmente se requiere un menor diámetro para transportar un mismo caudal. No obstante, una mayor pendiente implica excavaciones más profundas, lo que eleva significativamente los costos de construcción, tanto por volumen de tierra removida como por las condiciones técnicas y de seguridad requeridas a mayor profundidad.

2.1.3.1 Costo de Tuberías

El costo de una tubería en un sistema de alcantarillado se encuentra influenciado por múltiples variables, pero principalmente por tres: la longitud total instalada, el diámetro de la tubería y el



volumen de excavación requerido para su instalación. La interacción entre estas variables permite formular ecuaciones que reflejan el comportamiento del costo unitario en función del diseño hidráulico y geométrico del sistema.

De acuerdo con Saldarriaga (2024), la estructura general de una ecuación de costo de tubería puede expresarse como una función lineal y no lineal de estas variables:

Ecuación 2-1. Ecuación general de costo de tuberías

$$C = c_1 \cdot L \cdot d + c_2 \cdot L \cdot b \cdot \frac{h_{in} + h_{out}}{2}$$

Donde:

- C: Costo de la tubería
- c_1 y c_2 : coeficientes empíricos constantes
- L: longitud de la tubería
- d: diámetro de la tubería
- b: ancho del volumen de excavación
- h_{in} : profundidad de excavación aguas arriba de la tubería
- h_{out} : profundidad de excavación aguas abajo de la tubería

De acuerdo con la literatura las ecuaciones más comúnmente utilizadas para el costo de tuberías son las propuestas por Li & Matthew (1990) y Maurer et al. (2010). A continuación, se presenta las ecuaciones.

Ecuación 2-2. Ecuación de costo de tuberías propuesta por Li & Matthew (1990)

$$C = \begin{matrix} (4.27 + 93.59d^2 + 2.86dh + 2.39h^2)L & d \leq 1 \text{ m y } h \leq 3 \text{ m} \\ (36.47 + 88.96d^2 + 8.70dh + 1.78h^2)L & d \leq 1 \text{ m y } h > 3 \text{ m} \\ (20.50 + 149.27d^2 - 58.96dh + 17.75h^2)L & d > 1 \text{ m y } h \leq 4 \text{ m} \\ (78.44 + 29.25d^2 + 31.80dh + 2.32h^2)L & d > 1 \text{ m y } h > 4 \text{ m} \end{matrix}$$

Ecuación 2-3. Ecuación de costo de tuberías propuesta por Maurer et al. (2010)

$$C = ((110d + 127)h + (1200d - 35))L$$

En ambas ecuaciones las variables son las siguientes:

- C: Costo de la tubería [USD (Maurer et al.), CNY (Li & Mathew)]
- d: diámetro de la tubería [m]
- h: profundidad promedio de excavación [m]
- L: longitud de tubería [m]



2.1.3.2 Costo de estructuras de unión

Además de las tuberías, otro componente fundamental del sistema de alcantarillado que representa un costo significativo en el diseño y la construcción es el asociado a las estructuras de unión o cámaras de inspección. Estas estructuras permiten la conexión de múltiples conductos, facilitan el cambio de dirección o de pendiente en la red y garantizan el acceso para labores de operación y mantenimiento. Su presencia, especialmente en redes urbanas con trazados complejos, es inevitable y su diseño influye de forma directa en el comportamiento hidráulico del sistema, así como en los costos asociados.

De acuerdo con Saldarriaga (2024), el costo de una estructura de unión depende principalmente de dos variables: la profundidad de excavación y el diámetro de la tubería de salida conectada a la estructura. En este sentido, el costo total no solo considera el volumen de excavación, sino también los materiales, la complejidad constructiva, el tamaño del pozo y los requerimientos estructurales relacionados con su estabilidad. A partir de este enfoque, se plantea una ecuación general que relaciona estas variables a través de una función polinómica cuadrática:

$$C = c_1 + c_2 \cdot h + c_3 \cdot h^2 + c_4 \cdot d + c_5 \cdot d^2$$

Donde:

- C: Costo de la tubería
- c_1, c_2, c_3, c_4 : coeficientes empíricos constantes
- h: profundidad de estructura de unión
- d: diámetro de la tubería de salida

Esta expresión permite capturar tanto el efecto lineal como el cuadrático de las dos variables más determinantes. El término cuadrático es especialmente relevante en proyectos de gran escala, donde las profundidades pueden superar los cinco metros, y donde los diámetros de tubería se incrementan para colectores troncales.

En la literatura, se han desarrollado varias formulaciones empíricas para estimar el costo de estas estructuras. Una de las más citadas es la de Li & Matthew (1990), quienes desarrollaron una expresión basada en proyectos urbanos, con dependencia directa de la profundidad y del volumen excavado, incorporando además factores de corrección por complejidad geotécnica. Más recientemente, Saldarriaga et al. (2023) propusieron una ecuación actualizada para condiciones típicas de infraestructura urbana en Colombia, considerando estructuras prefabricadas o fundidas in situ, y teniendo en cuenta escalabilidad en función del diámetro de la tubería de salida.

A continuación, se presentan las dos ecuaciones mencionadas:

**Ecuación 2-4. Ecuación de costo de estructuras de unión propuesta por Li & Mathew (1990)**

$$\begin{array}{ll} 136.67 + 166.19d^2 + 3.50dh + 16.22h^2 & d \leq 1 \text{ m y } h \leq 3 \text{ m} \\ C = 132.91 + 790.94d^2 - 280.23dh + 34.97h^2 & d \leq 1 \text{ m y } h > 3 \text{ m} \\ 209.74 + 57.53d^2 + 10.93dh + 19.88h^2 & d > 1 \text{ m y } h \leq 4 \text{ m} \\ 210.66 - 113.04d^2 + 126.43dh - 0.60h^2 & d > 1 \text{ m y } h > 4 \text{ m} \end{array}$$

Ecuación 2-5. Ecuación de costo de estructuras de unión propuesta por Saldarriaga (2023)

$$C = 4354.98 - 776.76h + 5404.52d - 6370.59hd + 870.05h^2 + 12820.76d^2$$

En ambas ecuaciones las variables son las siguientes:

- C: Costo de la tubería [CNY (Li & Mathew), USD (Saldarriaga)]
- d: diámetro de la tubería [m]
- h: profundidad promedio de excavación [m]

2.2 Metodología de Diseño HEC-22

La Hydraulic Engineering Circular No. 22 (HEC-22) es una guía técnica desarrollada por la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos, cuyo objetivo principal es servir como referencia para el diseño hidráulico de sistemas de drenaje urbano, especialmente en el contexto de infraestructura vial. Esta guía proporciona criterios, metodologías y ecuaciones para el dimensionamiento de elementos como alcantarillas, cunetas, sistemas de captación superficial y, particularmente, redes de alcantarillado pluvial. Desde su primera publicación, la HEC-22 ha sido actualizada en varias ocasiones, reflejando avances en la modelación hidráulica, estudios experimentales y recomendaciones prácticas derivadas de su aplicación. La versión más reciente corresponde a la cuarta edición, publicada en el año 2024, la cual incorpora mejoras sustanciales respecto a los métodos de cálculo, ampliación de criterios para estructuras especiales y una mayor integración con herramientas de simulación computacional. No obstante, como se mencionó en la sección 2.1.2, la normativa colombiana y los manuales técnicos de empresas prestadoras del servicio de alcantarillado urbano continúan utilizando las ediciones segunda y tercera de esta guía. En el marco de esta tesis, se adopta como base de análisis la tercera edición de la HEC-22, que ha tenido una amplia difusión en Latinoamérica y es la versión más utilizada en diseños urbanos recientes. De esta edición, se abordará específicamente el capítulo 7, titulado “Storm Drains”, el cual se enfoca en el diseño de sistemas de drenaje pluvial, incluyendo el trazado de redes, determinación de caudales, dimensionamiento de conductos y análisis de estructuras de unión, con énfasis en el cálculo de pérdidas de energía localizadas en cámaras y empalmes.

2.2.1 Principios Generales del Diseño según HEC-22

El diseño de sistemas de alcantarillado pluvial se fundamenta en principios hidráulicos que garantizan la recolección y conducción eficiente del agua lluvia desde las superficies urbanas hasta un punto de



descarga final. La Hydraulic Engineering Circular No. 22 (HEC-22), desarrollada por la Federal Highway Administration (FHWA), establece criterios técnicos y procedimientos estandarizados para el diseño de estos sistemas, especialmente en el contexto de infraestructura vial urbana (FHWA, 2009).

Según lo establece la HEC-22, un "storm drain" o sistema de drenaje pluvial subterráneo es un conjunto de estructuras que tiene como función recoger, transportar y descargar el caudal generado por una tormenta dentro del área de diseño. Este sistema incluye entradas superficiales (sumideros), conductos subterráneos, estructuras de conexión y el punto de descarga (outfall), y su diseño debe responder tanto a requerimientos hidráulicos como económicos y operativos (FHWA, 2009, p. 7-1).

Uno de los principios clave del diseño propuesto por la HEC-22 es que los conductos se dimensionan y operan, preferiblemente, en régimen de flujo a superficie libre. Aunque el flujo a presión puede manejar mayores caudales en secciones más pequeñas, implica riesgos de presurización no controlada, lo que lo hace menos deseable en contextos urbanos. De hecho, la guía señala que los sistemas pluviales operan de forma más segura y predecible bajo condiciones de flujo parcialmente lleno, lo que también facilita su inspección y mantenimiento (FHWA, 2009, p. 7-1).

Adicionalmente, se asume que el flujo es permanente y uniforme, salvo en zonas de entrada o salida donde pueden ocurrir cambios de régimen. Esta suposición permite aplicar metodologías simplificadas como la ecuación de Manning, que constituye la base del dimensionamiento hidráulico. A pesar de la simplificación, la guía reconoce que el comportamiento real puede ser no permanente y no uniforme, especialmente en eventos extremos o en sistemas extensos, por lo cual recomienda aplicar el diseño bajo condiciones conservadoras y utilizar herramientas de modelación computacional cuando sea necesario (FHWA, 2009, p. 7-2).

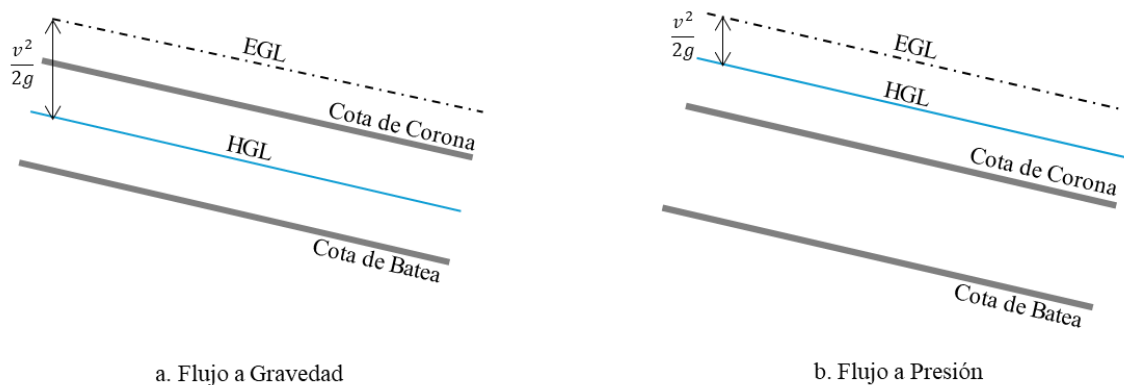


Figura 2-1. Relación entre el conducto, la línea piezométrica (HGL) y la línea de energía (EGL)

Fuente. Adaptado de Federal Highway Administration. 2009.

Otro principio importante es que el diseño debe ser hidráulicamente coherente y económicamente eficiente. En otras palabras, no basta con garantizar capacidad de transporte: es necesario minimizar pérdidas, controlar las profundidades de flujo, limitar la excavación y reducir los riesgos de



inundación o erosión. Para lograr esto, la HEC-22 introduce el concepto de línea de energía (Energy Grade Line – EGL) y línea piezométrica (Hydraulic Grade Line – HGL) como herramientas de control a lo largo del sistema, cuyos trazados permiten identificar zonas críticas, evaluar la eficiencia del sistema y garantizar que las estructuras conectadas operen dentro de condiciones hidráulicas seguras.

2.2.2 Capacidad hidráulica y dimensionamiento

El dimensionamiento hidráulico de los conductos en un sistema de alcantarillado pluvial tiene como objetivo asegurar que el flujo generado por un evento de diseño pueda ser transportado eficientemente sin causar sobrecargas, retrocesos o condiciones de falla en el sistema. De acuerdo con la HEC-22, el diseño hidráulico de estos conductos se basa en el supuesto de que operan mayoritariamente en régimen de flujo a superficie libre, salvo en situaciones especiales como cámaras de bombeo o condiciones de flujo presurizado localizadas (FHWA, 2009, p. 7-3).

La herramienta fundamental utilizada para estimar la capacidad de conducción de una tubería circular es la ecuación de Manning, la cual relaciona el caudal con la geometría del conducto, su rugosidad y la pendiente hidráulica. Para una sección circular, la ecuación de Manning se expresa como:

Ecuación 2-6. Ecuación de Manning

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Donde:

- Q: caudal [m³/s]
- n: coeficiente de rugosidad de Manning,
- A: área hidráulica de la sección [m²]
- R: radio hidráulico (área dividida por el perímetro mojado) [m]
- S: pendiente hidráulica del conducto [m/m]

En el caso de tuberías circulares, tanto el área como el radio hidráulico son funciones de la relación de llenado, lo que requiere soluciones numéricas o el uso de gráficas auxiliares, como las tablas de flujo parcial o los nomogramas disponibles en la propia HEC-22 (FHWA, 2009, Apéndice B). En particular, la guía recomienda que el diseño se realice para una condición de llenado del 93%, lo cual permite un margen de seguridad ante aumentos de caudal o condiciones transitorias de operación (FHWA, 2009, p. 7-3).

El proceso de dimensionamiento inicial consiste en determinar el diámetro mínimo requerido que pueda transportar el caudal de diseño bajo una pendiente conocida. Esta operación puede realizarse mediante la inversión de la ecuación de Manning o por procedimientos gráficos. Una vez definido el diámetro, se procede a verificar que la condición de flujo parcial se mantiene y que no se supera la profundidad máxima deseada (usualmente limitada por la HGL).



La Tabla 2-2 presenta un ejemplo de cómo varía la capacidad hidráulica relativa de una tubería circular en función de la relación de llenado de la tubería (y/d), lo cual ilustra por qué se evita diseñar con el conducto completamente lleno.

Tabla 2-2. Relación entre el tirante relativo y la capacidad hidráulica de una tubería circular

y/d	Q/Q_{lleno}
0.5	0.42
0.75	0.77
0.90	0.95
0.93	1.00
1.00	0.96

Fuente. Adaptado de Federal Highway Administration. 2009.

Como se observa, el flujo máximo en un conducto circular ocurre cuando la tubería está aproximadamente al 93% de su altura. Superar ese punto no implica mayor capacidad, sino una posible transición a flujo presurizado, lo cual no es deseable en sistemas diseñados para flujo libre.

El diseño inicial también debe tener en cuenta el coeficiente de rugosidad, que depende del material del conducto. En la Tabla 2-3 se presentan valores típicos sugeridos por la HEC-22 para distintos materiales utilizados en alcantarillado pluvial.

Tabla 2-3. Valores típicos del coeficiente de rugosidad de Manning (n) según el material del conducto

Material del Conducto	n típico
PVC / PE corrugado	0.012 – 0.015
Concreto Reforzado	0.012 – 0.014
Acero Corrugado	0.022 – 0.025
Fibra de Vidrio	0.010 – 0.013

Fuente. Adaptado de Federal Highway Administration. 2009.

En resumen, el dimensionamiento inicial de las tuberías en un sistema de drenaje pluvial según la HEC-22 se basa en garantizar el transporte adecuado del caudal de diseño mediante la aplicación de la ecuación de Manning, seleccionando el diámetro más económico que mantenga el flujo en condiciones estables, con una profundidad de flujo que no exceda el 93% de la sección, y respetando las limitaciones de pendiente y materiales disponibles.

2.2.3 Pérdidas de energía en el sistema

En un sistema de alcantarillado pluvial, además del dimensionamiento de los conductos, es esencial considerar las pérdidas de energía que ocurren a lo largo del recorrido del flujo. Estas pérdidas, al reducir la energía disponible, influyen directamente sobre la línea de energía (EGL) y la línea piezométrica (HGL), afectando la capacidad operativa del sistema y su estabilidad hidráulica. La HEC-22 clasifica las pérdidas de energía en dos grandes categorías: pérdidas continuas, que ocurren



a lo largo del tramo por efecto del rozamiento del agua con las paredes del conducto, y pérdidas localizadas, que se producen en puntos específicos como curvas, uniones o transiciones geométricas (FHWA, 2009, p. 7-4).

2.2.3.1 Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción, también conocidas como pérdidas continuas o distribuidas, se generan por la resistencia que ofrece el conducto al paso del agua a lo largo de su longitud. Estas se calculan con base en el gradiente hidráulico, que representa la pendiente de la línea de energía en un tramo dado.

La ecuación que define la pérdida de energía por fricción entre dos secciones es:

Ecuación 2-7. Ecuación de pérdidas por fricción

$$h_f = S_f \cdot L$$

Donde:

- h_f : pérdida de energía por fricción [m]
- S_f : gradiente de fricción [m/m]
- L : longitud del tramo [m]

El valor de S_f puede determinarse directamente a partir de la ecuación de Manning. Para una sección circular que no opera completamente llena, la pendiente hidráulica puede estimarse de forma inversa como:

Ecuación 2-8. Ecuación de Manning despejada para la pendiente

$$S_f = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot R^{2/3}} \right)^2$$

donde todos los términos se definen como en la sección anterior. Este valor es fundamental para construir la línea de energía a lo largo del sistema y verificar si las pendientes del terreno y la profundidad de la red permiten mantener el flujo en régimen subcrítico sin sobreelevaciones ni fallos hidráulicos.

2.2.3.2 Pérdidas localizadas

Las pérdidas localizadas se producen en puntos específicos donde ocurren interrupciones o perturbaciones del flujo, tales como uniones entre conductos, cambios bruscos de dirección, reducciones o expansiones, cámaras de inspección o estructuras especiales. Estas pérdidas se cuantifican utilizando coeficientes de pérdida adimensionales (K) que multiplican la energía cinética del flujo, según la fórmula general:



Ecuación 2-9. Ecuación general para pérdidas de energía

$$h_L = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- h_L : pérdida de energía localizada [m]
- K : coeficiente de pérdida,
- v : velocidad media del flujo [m/s]
- g = aceleración de la gravedad [9.81 m/s²]

La *HEC-22* proporciona valores típicos para los coeficientes K según el tipo de elemento generador de pérdida. Estos valores pueden consultarse en la Tabla 2-4, elaborada a partir de los rangos propuestos por la *HEC-22*.

Tabla 2-4. Coeficientes típicos de pérdida localizada en sistemas pluviales

Tipo de pérdida	Rango de K
Salida Libre	1.0
Curvas Horizontales	0.17 – 0.5
Expansiones Bruscas	0.2 – 0.6
Uniones en cámaras	0.2 – 0.6
Entradas sumergidas	0.2

Fuente. Adaptado de Federal Highway Administration. 2009.

El análisis detallado de las pérdidas localizadas es clave para garantizar que la línea de energía no sobrepase límites críticos, especialmente en zonas donde varias tuberías confluyen, donde hay curvas cerradas o donde existen transiciones abruptas. Si estas pérdidas no son consideradas adecuadamente, se puede subestimar la carga hidráulica requerida y generar errores de diseño significativos.

En la siguiente sección se aborda de manera más específica el procedimiento propuesto por la FHWA para estimar pérdidas de energía en estructuras de conexión, como cámaras de unión, el cual se detalla en la sección 7.1.6.7 de la *HEC-22* y es de particular interés en esta tesis.

2.2.4 Cálculo de pérdidas de energía en estructuras de unión

Las estructuras de acceso, como cámaras de unión, son puntos críticos en los sistemas de alcantarillado pluvial, donde confluyen múltiples conductos o se producen cambios bruscos de dirección o pendiente. En estos puntos, la interacción entre los flujos y las características geométricas internas de la estructura puede provocar importantes pérdidas de energía localizada, que, si no son correctamente estimadas, pueden inducir a errores en el trazado hidráulico de la red.



La HEC-22 (FHWA, 2009) reconoce que los métodos simplificados para el cálculo de estas pérdidas, basados únicamente en coeficientes fijos (ver Ecuación 2-9), resultan insuficientes en configuraciones urbanas complejas. Por ello, propone una metodología en tres pasos, especialmente diseñada para estimar la línea de energía (EGL) y la línea piezométrica (HGL) en tramos de entrada a cámaras de acceso. Esta metodología considera de forma explícita la geometría interna, el número de entradas, los ángulos de conexión y la condición del flujo (sumergido o en caída), lo que la convierte en una herramienta más representativa y robusta para el diseño.

2.2.4.1 Paso 1: Determinación de la energía inicial en la cámara (Eai)

La energía inicial en la cámara (Eai) representa el nivel hidráulico al interior de la estructura antes de considerar las pérdidas internas. Su cálculo parte de identificar qué componente del sistema controla el flujo en ese nodo. Existen tres tipos posibles de control, y se debe elegir el que resulte en la mayor energía disponible, ya que será el dominante para el diseño. De forma, que se puede plantear la siguiente ecuación como base para el Paso 1:

Ecuación 2-10. Ecuación para determinar energía inicial en estructuras de unión

$$E_{ai} = \max(E_{aio}, E_{ais}, E_{aiu})$$

A continuación, se presentará a qué tipo de control corresponde cada uno de los términos en la Ecuación 2-10, así como la metodología para su evaluación. La HEC-22 (FHWA, 2009) enfatiza que las condiciones de control se aplican específicamente a la tubería de salida de la cámara de unión, lo que significa que dicha tubería puede estar controlada por su entrada (justo al salir de la cámara) o por su salida (antes de ingresar a otra estructura o llegar a un punto de descarga).

- Control en la salida (Eaio): Esta condición puede presentarse en dos situaciones. La primera ocurre cuando la tubería de salida opera a flujo lleno, lo cual es común en sistemas de drenaje sobrecargados o cuando el caudal está limitado por la capacidad hidráulica de la conducción. La segunda situación corresponde al flujo parcial, el cual se considera cuando la tubería de salida transporta el agua parcialmente llena y bajo régimen subcrítico.

Ecuación 2-11. Ecuación de energía con control en la salida (Eaio)

$$E_{aio} = E_i + 0.2 \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$E_i = EGL_i - Z_i$$

Donde:

- Eaio: Energía en la estructura para control en la salida [m]
- Ei: Altura de Energía Total en la tubería de salida [m]
- EGLi: Línea de Energía en la tubería de salida [m]
- Zi: Cota de Batea de la tubería de salida [m]



- Control a la entrada sumergida (Eais): Se presenta cuando la abertura en la estructura de unión hacia la tubería de salida limita el flujo y el nivel del agua dentro de la cámara es suficientemente alto como para que el flujo se comporte como a través de un orificio.

Ecuación 2-12. Ecuación de energía con control a la entrada sumergida (Eais)

$$E_{ais} = d \cdot \left(\frac{Q}{A(gd)^{0.5}} \right)^2$$

Donde:

- Eais: Energía en la estructura para control en la entrada sumergida [m]
 - d: diámetro de tubería de salida de la cámara de unión [m]
 - A: área de sección transversal de tubería de salida [m²]
- Control a la entrada no sumergida (Eaiu): Se presenta cuando la abertura en la estructura de unión hacia la tubería de salida limita el flujo, pero el nivel del agua en la cámara requiere que el flujo se trate como a través de un vertedero.

Ecuación 2-13. Ecuación de energía con control a la entrada no sumergida (Eaiu)

$$E_{aiu} = 1.6d \cdot \left(\frac{Q}{A(gd)^{0.5}} \right)^{0.67}$$

2.2.4.2 Paso 2: Ajuste de la energía inicial por pérdidas en la estructura (Ea)

Una vez estimado el valor inicial de energía, se procede a ajustarlo para considerar tres factores adicionales que influyen en la pérdida de energía dentro de la cámara: la configuración del piso/cañuela (benching), los ángulos de entrada de las tuberías influyentes, y la presencia de flujos en caída (plunging flows).

Ecuación 2-14. Ecuación de energía ajustada en la estructura de unión

$$E_a = E_{ai} + h_B + h_\theta + h_p$$

El efecto de la cañuela (h_B) puede incrementar o reducir las pérdidas de energía, dependiendo de su forma y grado de inmersión. El ajuste se calcula con base en un coeficiente C_B , que puede tomar valores, lo que significa que la profundidad del agua disminuirá en vez de aumentar (FHWA, 2009). Este se aplica como:

Ecuación 2-15. Ecuación de pérdidas por cañuela

$$h_B = C_B(E_{ai} - E_i)$$

El segundo ajuste se refiere al ángulo de entrada de las tuberías influyentes, el cual afecta el momentum del flujo dentro de la cámara. Se define un ángulo ponderado θ_w en función del caudal entrante por cada tubería y su orientación respecto a la tubería de salida, y con este, se calcula un coeficiente angular C_θ y su correspondiente pérdida de energía:

**Ecuación 2-16. Ecuaciones de pérdidas por ángulos de entrada**

$$\theta_w = \frac{\sum Q_j \theta_j}{\sum Q_j}$$

$$C_\theta = 4.5 \frac{\sum Q_j}{Q_o} \cos\left(\frac{\theta_w}{2}\right) \rightarrow h_\theta = C_\theta (E_{ai} - E_i)$$

El tercer ajuste considera los flujos en caída, es decir, aquellos que ingresan desde una cota superior al nivel del agua estimado en la cámara. Se define una altura relativa de caída h_k y un coeficiente C_p en función del caudal:

Ecuación 2-17. Ecuaciones de pérdidas por flujos en caída

$$h_k = \frac{z_k - E_{ai}}{d}$$

$$C_p = \frac{\sum Q_k h_k}{Q_o} \rightarrow h_p = C_p (E_{ai} - E_i)$$

Finalmente, el nivel de energía ajustado en la cámara se encuentra utilizando la Ecuación 2-14. En caso de que este valor resultante sea inferior al nivel de energía de la tubería de salida (E_i), se corrige adoptando el mayor de ambos valores, para garantizar consistencia física (FHWA, 2009).

2.2.4.3 Paso 3: Cálculo de la EGL en entradas a la cámara de unión

El paso final del procedimiento consiste en estimar la línea de energía (EGL) en cada una de las tuberías que desembocan en la cámara, a partir del nivel de energía calculado en el paso anterior.

Para las tuberías no en caída, es decir, aquellas conectadas hidráulicamente con el nivel de agua en la cámara, se considera una pérdida de salida tradicional que depende de la velocidad en la tubería. La línea de energía se calcula como:

Ecuación 2-18. Ecuación de energía para las tuberías entrantes sin caída

$$EGL_o = E_a + Z_a + 0.4 \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- EGL_o : Línea de energía en la tubería de entrada a la cámara [m]
- E_a : Energía ajustada en el interior de la cámara [m]
- Z_a : Cota de batea de la cámara (se asume igual que la cota de batea de la tubería de salida) [m]
- v : velocidad del flujo en la tubería de entrada a la cámara [m]



En el caso de tuberías en condición de caída, la energía de salida no depende de la cámara, sino que se toma directamente de los cálculos hidráulicos del tramo influyente, siguiendo los principios generales de conservación de energía. Esta línea de energía estimada se utiliza como condición aguas abajo para el siguiente tramo de la red, repitiendo el procedimiento para cada estructura de acceso en el sistema.

2.2.5 Proceso de diseño según HEC-22

Una vez definidos los fundamentos teóricos del diseño hidráulico de sistemas pluviales, incluyendo el dimensionamiento de conductos, las pérdidas de energía, la evaluación de estructuras de unión y el trazado de la línea de energía, la HEC-22 propone un procedimiento sistemático que permite integrar estos elementos en un proceso coherente de diseño. Este procedimiento, expuesto en el capítulo 7.4 y 7.5 del manual, está concebido como una secuencia lógica e iterativa de pasos, aplicable tanto a proyectos nuevos como a la rehabilitación de redes existentes.

El enfoque propuesto tiene como objetivo asegurar que el sistema cumpla con los criterios de capacidad, estabilidad hidráulica, economía constructiva y seguridad urbana. En esencia, el proceso de diseño no solo busca garantizar que las tuberías evacúen el caudal de diseño, sino que lo hagan respetando la geometría del terreno.

2.2.5.1 Proceso preliminar de diseño

El Capítulo 7.4 de la HEC-22 (FHWA, 2009) presenta un proceso estructurado en seis pasos fundamentales para el diseño de sistemas de drenaje pluvial. Estos pasos representan la secuencia lógica que debe seguirse en cualquier proyecto de diseño, desde la definición del trazado hasta la evaluación hidráulica completa del sistema. Este proceso preliminar tiene como propósito determinar los diámetros y pendientes del diseño. La HEC-22 propone un formato que puede ser de ayuda para el seguimiento de los pasos (ver Tabla 2-5). A continuación, se detallan estos pasos conforme al manual:

Paso 1: Preparar un plano de planta y un perfil de trabajo del sistema de drenaje pluvial, estableciendo la siguiente información de diseño:

- a. Ubicación de los colectores pluviales
- b. Dirección del flujo
- c. Ubicación de las cámaras de unión y otras estructuras
- d. Número o etiqueta asignada a cada estructura
- e. Ubicación de todos los servicios públicos existentes (agua, alcantarillado, gas, cables subterráneos, etc.)

Paso 2: Determinar los siguientes parámetros hidrológicos para las áreas de drenaje que tributan a cada captación del sistema:

- a. Áreas de drenaje



- b. Coeficientes de escorrentía
- c. Tiempo de recorrido

Los pasos 1 y 2 se asocian a la recopilación de información necesaria para el posterior diseño del sistema de alcantarillado

Paso 3: Utilizando la información recopilada en los pasos 1 y 2, completar los siguientes datos en el formulario de diseño (Tabla 2-5) para cada tramo de tubería, iniciando desde el tramo más aguas arriba:

- a. Estructura de origen y destino ("Desde" y "Hasta"), Columnas 1 y 2
- b. Longitud del tramo, Columna 3
- c. Área de drenaje incremental ("Inc."), Columna 4
 - Área de drenaje incremental que tributa a la captación en el extremo aguas arriba del tramo considerado.
- d. Coeficiente de escorrentía "C", Columna 6
 - Coeficiente de escorrentía correspondiente al área que tributa a la captación en el extremo aguas arriba del tramo considerado. En algunos casos será necesario calcular un coeficiente compuesto.
- e. Tiempo de concentración en la captación ("Entrada"), Columna 9
 - Tiempo requerido para que el agua viaje desde el punto hidráulicamente más alejado del área de drenaje hasta la captación ubicada en el extremo aguas arriba del tramo considerado.
- f. Tiempo de concentración del sistema ("Sistema"), Columna 10
 - Tiempo que tarda el agua en viajar desde el punto más remoto del sistema de drenaje hasta el extremo aguas arriba del tramo considerado. Para el tramo más aguas arriba, este valor será igual al de la Columna 9. Para todos los demás tramos, este valor se calcula sumando el tiempo de concentración del sistema (Columna 10) y el tiempo de concentración de la sección (Columna 17) del tramo anterior, obteniendo así el tiempo de concentración del sistema en el extremo aguas arriba del tramo en cuestión.

Paso 4: Haciendo uso de la información del paso 3, completar en el formato (Tabla 2-5) la siguiente información:

- a. Área "Total", Columna 5
 - Sumar el área incremental registrada en la Columna 4 con el área total acumulada de la sección anterior, y colocar el resultado en la Columna 5.
- b. Área "Inc." \times "C", Columna 7
 - Multiplicar el área de drenaje en la Columna 4 por el coeficiente de escorrentía en la Columna 6. El producto, denominado CA, se registra en la Columna 7.



-
- c. Área "Total" \times "C", Columna 8
- Sumar el valor obtenido en la Columna 7 con el valor correspondiente en la Columna 8 del tramo anterior y registrar el resultado en la Columna 8.
- d. Intensidad "I", Columna 11
- Utilizando el mayor de los dos tiempos de concentración (Columnas 9 y 10) y una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), determinar la intensidad de lluvia "I" y colócala en la Columna 11.
- e. Caudal "Q", Columna 12
- Calcular el caudal como el producto entre los valores de las Columnas 8 y 11. Colocar este valor en la Columna 12.
- f. Pendiente, Columna 21
- Registrar el valor de la pendiente de la tubería en la Columna 21. Esta pendiente será, aproximadamente, igual a la pendiente del nivel terminado del terreno. Puede ajustarse según se requiera.
- g. Diámetro de tubería, Columna 13
- Dimensionar la tubería utilizando la ecuación de Manning (Ecuación 2-6). La tubería debe dimensionarse lo más cercano posible a flujo a gravedad a tubo lleno. Dado que la mayoría de los diámetros calculados no están disponibles comercialmente, se seleccionará un tamaño nominal. El diseñador decidirá si se adopta un tamaño mayor (lo que resultará en flujo parcial) o un tamaño menor (lo que podría generar flujo presurizado).
- h. Capacidad a tubo lleno, Columna 14
- Calcular la capacidad de flujo a tubo lleno para la tubería seleccionada utilizando la ecuación de Manning (Ecuación 2-6) y el diámetro nominal seleccionado y registrar este valor en la Columna 14.
- i. Velocidades, Columnas 15 y 16
- Calcular las velocidades para flujo a tubo lleno y para flujo de diseño (si son diferentes) y colócalas en las Columnas 15 y 16. Si la tubería opera a tubo lleno, la velocidad puede determinarse mediante $V=Q/A$. Si la tubería opera parcialmente llena, la velocidad debe determinarse usando gráficas dadas en el manual.
- j. Tiempo de la sección, Columna 17
- Calcular el tiempo de recorrido en la sección de tubería dividiendo la longitud (Columna 3) entre la velocidad de diseño (Columna 16). Colocar este valor en la Columna 17.
- k. Caída en la cota de corona, Columna 20
- Calcular una caída aproximada en la clave superior de la tubería en la estructura para compensar las posibles pérdidas de energía en la estructura, utilizando la Ecuación 2-9. Registrar este valor en la Columna 20.



1. Cotas de batea, Columnas 18 y 19
 - Calcular las elevaciones del fondo de la tubería aguas arriba y aguas abajo de la sección, incluyendo cualquier cambio de diámetro que se haya producido a lo largo del tramo.

Paso 5: Repetir los Pasos 3 y 4 para todos los tramos de tubería hasta llegar al punto de descarga del sistema. Utilizar ecuaciones y nomogramas para llevar a cabo el diseño.

Paso 6: Verificar el diseño calculando la línea de energía (Energy Grade Line, EGL) y la línea piezométrica (Hydraulic Grade Line, HGL). Procedimiento que se describirá en la siguiente sección.

2.2.5.2 Procedimiento para determinar la Línea de Energía

La sección 7.5 de la HEC-22 (FHWA, 2009) presenta un procedimiento detallado para la evaluación de la línea de energía (EGL) y la línea hidráulica (HGL) en sistemas de alcantarillado pluvial. Aunque en la práctica el análisis se realiza comúnmente mediante herramientas computacionales, esta sección tiene el propósito de proporcionar un entendimiento profundo del proceso analítico manual. Conocer cada paso permite al diseñador interpretar adecuadamente los resultados obtenidos por software, identificar errores potenciales y verificar el cumplimiento hidráulico del sistema bajo diversas condiciones de operación.

El procedimiento se basa en la estimación de las pérdidas de energía a lo largo del sistema mediante ecuaciones de pérdida por fricción y por otros factores, iniciando desde el punto de descarga (outfall) y avanzando aguas arriba, tramo por tramo y estructura por estructura. Se utilizan dos tablas de cálculo: la Tabla 2-6 (Tabla A) para documentar los niveles de EGL y HGL, y la Tabla 2-7 (Tabla B) para calcular las pérdidas por fricción, codos, contracciones, expansiones y estructuras. A continuación, se detallan los pasos establecidos en manual:

Paso 1: La primera línea de la Tabla 2-6 debe incluir información sobre el sistema más allá del tubo de descarga. Se debe determinar la Línea de Energía (EGL) y la Línea Piezométrica (HGL) para el sistema receptor aguas abajo. Si se trata de un cuerpo de agua natural, la HGL estará en la superficie del agua. La EGL también estará en la superficie del agua si no se asume una velocidad; de lo contrario, estará un valor de cabeza de velocidad por encima de la HGL si existe velocidad en el cuerpo de agua. Si el nuevo sistema se conecta a un sistema de alcantarillado pluvial existente, la EGL y la HGL serán las del sistema receptor. Se debe ingresar la EGL en la Columna 9A y la HGL en la Columna 10A de la primera fila de la Tabla 2-6.

Nota: La notación utilizada en este procedimiento establece que una fila de la Tabla A (Tabla 2-6) se dedica a cada estructura y a su respectiva tubería de salida. La EGL aguas abajo (EGLo) y la HGL aguas abajo (HGLo) del conducto de salida de la estructura de unión se colocan en las Columnas 9A y 10A. La EGL de entrada (EGLi) y la HGL de entrada (HGLi) en el extremo aguas arriba del conducto de salida de la estructura se colocan en las Columnas 13A y 14A. La EGL dentro de la estructura de unión (EGLa) se coloca en la Columna 16A.



La Figura 2-2 presenta en forma gráfica los términos mencionados anteriormente, con el fin de clarificar su uso.

Paso 2: Identificar el número de estructura en el punto de descarga (outfall) y colocarlo en la Columna 1A. Determinar:

- Nivel del agua aguas abajo (HGL, la cuál será la elevación o el promedio entre la profundidad crítica y el diámetro del conducto, lo que sea mayor). Colocar en la Columna 9A.
- La EGL. Colocar en la Columna 10A.
- La cota de corona en el extremo de descarga. Colocar en la Columna 17A.
- La elevación del terreno en ese punto. Colocar en la Columna 18A.

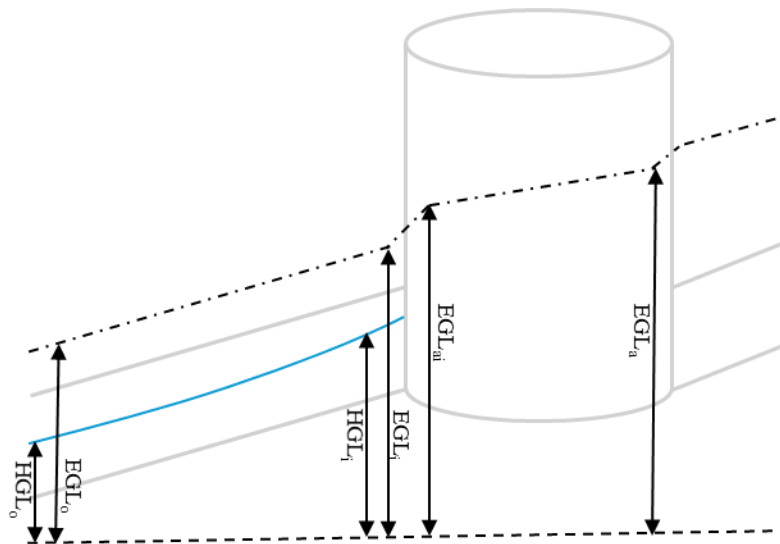


Figura 2-2. Representación de términos de EGL y HGL según su ubicación

Paso 3: Identifique el ID de la estructura correspondiente a la cámara de unión ubicada inmediatamente aguas arriba del conducto de salida (para el primer conducto) o inmediatamente aguas arriba de la última estructura (si se está trabajando con líneas subsiguientes) e ingrese este valor en las Columnas 1A y 1B de la siguiente línea en las hojas de cálculo. Ingrese el diámetro del conducto (D) en la Columna 2A, el caudal de diseño (Q) en la Columna 3A y la longitud del conducto (L) en la Columna 4A.



Paso 4: Suposición de flujo lleno. Determinar la EGLo y HGLo del conducto de salida de la estructura identificada en el paso 3.

Nota: Si se asume flujo lleno en el extremo de descarga, el diseñador debe verificar más adelante la HGLi en la entrada del conducto para confirmar que el conducto no se despresurice y pase a condiciones de flujo parcial (ver Paso 14).

Caso A: Si la elevación del nivel de agua en la descarga del conducto es mayor que la cota de corona (conducto sumergido), se asume que el conducto está en flujo subcrítico y completamente lleno.

- Coloque la velocidad a flujo lleno en la Columna 5A, y la altura de velocidad en la Columna 8A.
- Calcule la pérdida de salida (H_o) usando la altura de velocidad, y colóquela en la Columna 2B.
- La EGLo será la EGL de la línea 2 (de la anterior estructura) más la pérdida de salida (Columna 2B). El resultado va en la Columna 9A.
- La HGLo será la EGLo (Col. 9A) menos la altura de velocidad (Col. 8A) El resultado va en la Columna 10A.
- Continuar con el Paso 11.

Caso B: Si la EGLa en la estructura de unión es mayor que la cota de corona, también se asume flujo subcrítico y lleno.

- Coloque la velocidad a flujo lleno en la Columna 5A, y la altura de velocidad en la Columna 8A.
- La pérdida de salida (H_o) es 0.4 veces la altura de velocidad. El resultado va en la Columna 2B.
- La EGLo será la EGLa (Col. 14A de la estructura anterior) más H_o (Col. 2B). El resultado va en la Columna 9A.
- La HGLo será la EGLo (Col. 9A) menos la altura de velocidad (Col. 8A). El resultado va en la Columna 10A.
- Continuar con el Paso 11.

Caso C: Si ningún de los dos casos anteriores sucede se continua con el paso 5.

Paso 5: Suposición de flujo parcial. Utilizando las gráficas proporcionadas por la HEC-22 de elementos hidráulicos y con la relación de flujo parcial a flujo lleno (Tabla 2-5) calcular: la velocidad, en la columna 5A, la profundidad normal del flujo en el conducto en la columna 6A y la altura de velocidad en la columna 8A.

Nota: No use la velocidad de flujo lleno de la Columna 15 de la Tabla 2-5 para condiciones de flujo parcial. Las velocidades reales deben usarse para los cálculos de EGL/HGL.



Paso 6: Mediante gráficas proporcionadas por la HEC-22 determine la profundidad crítica del conducto y colóquelo en la columna 7A.

Nota: Los valores para la profundidad crítica (y_c) no pueden ser superiores a la altura (diámetro) del conducto

Paso 7: Todavía se está determinando la EGL aguas abajo (EGLo) y la HGL aguas abajo (HGLo) al final del conducto. La información requerida depende del régimen y condición de flujo tanto en la estructura como en el conducto. Esto requiere considerar varias alternativas (Nota: BOC se refiere a la cota de batea del conducto de salida de la estructura de unión aguas abajo)

Caso A: Si la elevación del nivel de agua en la descarga del conducto o si la línea de energía en la cámara de acceso (EGLa) es menor que la cota de batea del conducto (es decir, una descarga en caída libre o conducto sumergido parcialmente):

- La pérdida por salida (H_o) no afecta la hidráulica del conducto. Coloque un valor de cero (0) para H_o en la Columna 2B.
- La EGLo será la elevación del flujo normal (Columna 6A + BOC) más la cabeza de velocidad del flujo en el conducto (Columna 8A). Colóquela en la Columna 9A.
- La HGLo será simplemente la elevación del flujo normal (Columna 6A + BOC). Colóquela en la Columna 10A.

Caso B: Si la elevación del nivel de agua en la descarga del conducto o si la EGLa es igual o menor que la elevación de la profundidad crítica del conducto (Columna 7A + BOC):

- La pérdida por salida (H_o) no afecta la hidráulica del conducto. Coloque un cero (0) en la Columna 2B.
- La EGLo será la elevación del flujo normal (Columna 6A + BOC) más la cabeza de velocidad (Columna 8A). Colóquela en la Columna 9A.
- La HGLo será la elevación del flujo normal (Columna 6A + BOC). Colóquela en la Columna 10A.

Caso C: Si la elevación del nivel de agua en la descarga del conducto es mayor que la elevación crítica (Columna 7A + BOC) pero menor o igual a la elevación de la profundidad normal (Columna 6A + BOC):

- La pérdida por salida (H_o) se calcula mediante la altura de velocidad del flujo en el conducto (Columna 8A). Coloque H_o en la Columna 2B.
- La EGLo será el mayor valor entre: a) la elevación del nivel de agua en la descarga del conducto + H_o o b) profundidad del flujo normal (Columna 6A + BOC) + altura de velocidad (Columna 8A). Coloque el valor en la Columna 9A.



- La HGLo será la EGLo (Columna 9A) menos la altura de velocidad (Columna 8A). Colóquela en la Columna 10^a

Caso D: Si la EGLa es mayor que la elevación de la profundidad crítica (Columna 7A + BOC) pero menor o igual a la elevación de la profundidad normal (Columna 6A + BOC):

- La pérdida de salida (H_o) es 0.4 veces la altura de velocidad. El resultado va en la Columna 2B.
- La EGLo será el mayor valor entre: a) EGLa (Columna 8A) + pérdida de salida (Columna 2B) o b) profundidad del flujo normal (Columna 6A + BOC) + altura de velocidad (Columna 8A). Coloque el valor en la Columna 9A.
- La HGLo será la EGLo (Columna 9A) menos la altura de velocidad (Columna 8A). Colóquela en la Columna 10A.

Caso E: Si la elevación del nivel de agua en la descarga del conducto es mayor que la elevación de la profundidad normal (Columna 6A + BOC), pero menor que la cota de corona:

- Establezca la profundidad en la cara del conducto aguas abajo como: la elevación del nivel de agua en la descarga del conducto - BOC.
- Usando los gráficos proporcionados por la HEC-22 y usando la razón entre la profundidad parcial y el diámetro, determinar el área mojada en el conducto. Usando el caudal (Columna 3A) la ecuación de continuidad determine la velocidad en esta sección. Calcule la altura de velocidad.
- La pérdida por salida (H_o) se calcula mediante la altura de velocidad del flujo en el conducto (Columna 8A). Coloque H_o en la Columna 2B.
- La EGLo será la elevación del nivel de agua a la descarga del conducto + la altura de velocidad + H_o . Coloque este valor en la Columna 9A.
- La HGLo será la EGLo (Columna 9A) menos la altura de velocidad (Columna 8A). Colóquela en la Columna 10A.

Caso F: Si la EGLa es mayor que la elevación de la profundidad normal (Columna 6A + BOC), pero menor que la cota de corona:

- Establezca la profundidad en la cara del conducto aguas abajo como: EGLa - BOC.
- Usando los gráficos proporcionados por la HEC-22 y usando la razón entre la profundidad parcial y el diámetro, determinar el área mojada en el conducto. Usando el caudal (Columna 3A) la ecuación de continuidad determine la velocidad en esta sección. Calcule la altura de velocidad.
- La pérdida de salida (H_o) es 0.4 veces la altura de velocidad. El resultado va en la Columna 2B.
- La EGLo será EGLa + H_o . Coloque este valor en la Columna 9A.



- La HGLo será la EGLo (Columna 9A) menos la cabeza de velocidad (Columna 8A). Colóquela en la Columna 10A.

Paso 8: Compare la profundidad de flujo indicada en la Columna 6A con la profundidad crítica en la Columna 7A para determinar el régimen de flujo dentro del conducto:

Caso A: Si la profundidad de flujo en la Columna 6A es mayor que la profundidad crítica en la Columna 7A, el flujo es subcrítico. Continúe con el Paso 11.

Caso B: Si la profundidad de flujo en la Columna 6A es menor o igual a la profundidad crítica en la Columna 7A, el flujo es supercrítico. Continúe con el Paso 9.

Nota: En cualquiera de los casos, recuerde que la EGL debe ser mayor aguas arriba para que ocurra el flujo. Si después de verificar que el flujo es supercrítico en la sección aguas arriba del conducto, asegúrese de que la EGL dentro del conducto sea mayor que en la estructura.

Paso 9: Las pérdidas en un conducto con flujo supercrítico no se propagan aguas arriba. Por lo tanto, ingrese un valor de cero (0) en la Columna 8B para esta estructura.

Paso 10: Asuma que la línea de gradiente hidráulico aguas arriba del conducto (HGLi) es igual a la profundidad normal (Columna 6A) más la cota de batea del conducto aguas arriba. Coloque este valor en la Columna 14A. La línea de energía (EGLi) será entonces HGLi más la cabeza de velocidad del conducto (Columna 8A). Después de añadir el valor de EGLi en la Columna 13A, salte directamente al Paso 15.

Paso 11: Calcule la pendiente de fricción (S_f) mediante la Ecuación 2-8. Ingrese este valor en la Columna 11A. La Ecuación 2-8 asume flujo lleno en el conducto. Si no hay flujo lleno, defina la pendiente de fricción igual a la pendiente del conducto.

Paso 12: Calcule las pérdidas por fricción (H_f) multiplicando la longitud (L) del conducto en la Columna 4A por la pendiente de fricción (S_f) de la Columna 11A. Ingrese este valor en la Columna 3B. Calcule las otras pérdidas a lo largo de la tubería asociadas a codos, contracciones, expansiones y uniones. Colóquelas en las Columnas 4B, 5B, 6B y 7B. Sume todas las pérdidas (incluyendo H_f) y coloque el total en la columna 8B y 12A.

Paso 13: Calcule el valor de la línea de energía en el extremo aguas arriba del conducto (EGLi) como la EGLo del extremo aguas abajo (Columna 9A) más las pérdidas totales del conducto (Columna 12A). Ingrese la EGLi en la Columna 13A. Calcule ahora el valor de la línea de gradiente hidráulico en el extremo aguas arriba del conducto (HGLi) como la EGLi menos la altura de velocidad. Coloque el resultado en la Columna 13A.



Paso 14: Verifique las condiciones de flujo en el extremo de entrada del conducto:

Caso A: Si HGL_i es mayor o igual a la cota de corona del extremo de entrada del conducto, el conducto está en flujo lleno. Escriba “lleno” en la Columna 6A (profundidad normal) y “n/a” (no aplica) en la Columna 7A (profundidad crítica), y continúe con el Paso 15.

Caso B: Si HGL_i es menor que la cota de corona, pero mayor que la profundidad normal y mayor que la profundidad crítica (ver procedimientos de los Pasos 5 y 6), el conducto no tiene flujo lleno, pero el nivel del agua en el extremo de descarga o las condiciones en la cámara de unión aguas abajo siguen controlando. Escriba la profundidad normal en la Columna 6A y la profundidad crítica en la Columna 7A, y continúe con el Paso 15.

Caso C: Si HGL_i es menor que la cota de corona, pero mayor que la profundidad crítica y menor o igual a la profundidad normal (ver procedimientos de los Pasos 5 y 6), esto indica flujo parcial subcrítico. Coloque la profundidad normal en la Columna 6A y la profundidad crítica en la Columna 7A. Revise la EGL_i (Columna 12A) sumando la profundidad normal más la cabeza de velocidad a la elevación de la solera del conducto. Luego continúe al Paso 15.

Caso D: Si HGL_i es menor que la profundidad crítica (ver procedimientos de los Pasos 5 y 6), el conducto está en flujo parcial supercrítico. Coloque la profundidad normal en la Columna 6A y la profundidad crítica en la Columna 7A, y vuelva al Paso 9.

Paso 15: Estime la energía del conducto a la salida (E_i) restando la elevación de cota de batea conducto (tomada del Formulario Preliminar de Cálculo de Drenaje Pluvial, ver Tabla 2-5) a la EGL_i (Columna 13A). Ingrese este valor en la Columna 9B. Determine la suma de altura de presión y altura potencial restando la altura de velocidad de E_i (Columna 9B). Coloque este valor en la Columna 10B. Calcule la intensidad de descarga usando el termino elevado al cuadrado de la Ecuación 2-12 y ubique el valor en la Columna 11B.

Paso 16: Determine el nivel inicial de energía en la cámara de acceso (E_{ai}) como el máximo entre los siguientes tres niveles de energía:

Caso A: Control a la salida – flujo parcial o lleno (E_{aio}): Si el conducto de descarga está en flujo supercrítico, entonces E_{aio} es igual a cero. Si no, E_{aio} es igual a E_i (Columna 8B) más la altura de velocidad del conducto (Columna 8A) multiplicada por 0.2.

Caso B: Control a la entrada – sumergido (E_{ais}): Calcular utilizando Ecuación 2-12

Caso C: Control a la entrada – no sumergido (E_{aiu}): Calcular utilizando Ecuación 2-13



Coloque el valor máximo entre E_{aio} , E_{ais} y E_{aiu} en la Columna 12B. Sin embargo, si este valor es menor que el valor de la Columna 9B, la pérdida de carga a través de la cámara de acceso será cero (Columna 16B), y E_a será igual a E_i (Columna 9B). Ingrese E_a en la Columna 17B y en la Columna 15A, y salte directamente al Paso 22.

Paso 17: Obtenga el coeficiente de pérdida de energía por perfilado del fondo (C_B) de las tablas proporcionadas por la HEC-22

Paso 18: Para conductos de entrada no en caída libre (es decir, cuando el valor de la Columna 9B es mayor que la elevación de la solera del conducto de entrada), utilice la Ecuación 2-18 para obtener el coeficiente de pérdida de energía por flujo en ángulo (C_θ) y colóquelo en la Columna 14B.

Paso 19: Para conductos de entrada en caída libre, utilice la Ecuación 2-17 para calcular el coeficiente de pérdida de energía por flujo en caída libre (C_P) y colóquelo en la Columna 15B.

Paso 20: Reste el valor de E_i (Columna 9B) al valor de E_{ai} (Columna 12B). Si el resultado es menor que cero, coloque el valor de E_i (Columna 9B) en la Columna 17B y en la Columna 15A, y pase al Paso 22. De lo contrario, multiplique el valor restante por la suma de los valores de las Columnas 13B, 14B y 15B. Si el resultado es mayor que cero, colóquelo en la Columna 16B.

Paso 21: Sume los valores de la Columna 12B y la Columna 16B. Si el resultado es mayor que E_i (Columna 9B), coloque el valor resultante en las Columnas 17B y 15A (este valor es E_a). Si es menor o igual a E_i , coloque el valor de E_i en las Columnas 17B y 15A.

Paso 22: Sume el valor de la Columna 15A a la cota de batea del conducto de salida para calcular EGLa. Coloque este valor en la Columna 16A. (Agregue la anotación “energía en cámara de unión” en esa fila). Suponga que la línea de gradiente hidráulico en la cámara de acceso (HGLa) es igual a la EGLa (Columna 16A).

Paso 23: Determine el valor de la cota de corona para el conducto de entrada (usando la información del Formulario Preliminar de Cálculo de Drenaje Pluvial, ver Tabla 2-5) y colóquelo en la Columna 17A.

Paso 24: Ingrese en la Columna 18A la elevación del terreno, la cota superior de la reja u otro límite de nivel alto de agua en la estructura. Si el valor de EGLa en la Columna 16A excede esta elevación límite, se requerirán modificaciones en el diseño.

Paso 25: Continúe calculando la Línea de Energía (EGL) a lo largo del sistema repitiendo los Pasos 3 al 24 para cada cámara de acceso o estructura de entrada subsiguiente aguas arriba. Para cada conducto de entrada, la información hidráulica y de elevaciones asociada a la cámara de unión se transferirá repetidamente a las columnas correspondientes en las Tablas A (Tabla 2-6) y B (Tabla 2-7).



2.3 Metodología optimizada de diseño (UTOPIÍA)

El diseño hidráulico tradicional de redes de alcantarillado, como el propuesto por la HEC-22, se basa en una lógica secuencial que define el trazado y el dimensionamiento de los elementos de forma progresiva, evaluando tramo a tramo sin considerar el comportamiento global del sistema. Este enfoque, aunque riguroso, puede conducir a sobredimensionamientos, especialmente en redes urbanas complejas, donde las decisiones locales afectan el desempeño y costo del sistema completo.

En contraste, el modelo UTOPIÍA propone un enfoque de diseño basado en optimización matemática, que considera simultáneamente todos los tramos y nodos del sistema para determinar la configuración hidráulica más eficiente. Este programa fue desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillado (CIACUA) de la Universidad de los Andes, y su lógica se basa en algoritmos de optimización iterativa que minimizan el costo total del sistema, sujeto a restricciones hidráulicas, geométricas y constructivas.

UTOPIÍA permite diseñar sistemas de drenaje considerando los siguientes elementos:

- Objetivo principal: Minimización del costo total del sistema, que incluye el costo de tuberías en función del diámetro, longitud y profundidad de excavación.
- Variables de decisión: Diámetros de tubería y cotas de clave en cada nodo del sistema.
- Restricciones hidráulicas: Capacidad de conducción suficiente, cumplimiento de la ecuación de continuidad y restricciones de velocidad mínima y máxima.
- Restricciones geométricas: Profundidad mínima de recubrimiento, cotas topográficas, pendiente mínima y máxima por tramo, y cotas de salida.

El modelo requiere como entrada:

- La red geométrica, es decir, la ubicación espacial de cada estructura de conexión y los tramos que las conectan.
- Los caudales tributarios en cada nodo, calculados a partir de la lluvia de diseño, áreas de aporte y coeficientes de escorrentía.
- Una función de costos paramétrica para las tuberías, generalmente basada en ecuaciones obtenidas empíricamente, como las propuestas por Li & Matthew (1990) o Saldarriaga et al. (2023).

Adicionalmente, UTOPIÍA permite incluir restricciones avanzadas, como la imposibilidad de excavar por debajo de un cierto umbral, o la obligación de respetar cotas fijas en algunos puntos del sistema, lo que resulta útil en entornos urbanos con redes existentes o condicionantes topográficos.



La metodología implementada en UTOPIA ha sido validada en múltiples estudios y casos reales, mostrando reducciones significativas en el costo total del sistema frente a metodologías tradicionales, manteniendo al mismo tiempo las condiciones hidráulicas de operación. Su flexibilidad, capacidad de modelación y orientación hacia la eficiencia lo convierten en una herramienta valiosa para el diseño contemporáneo de infraestructura urbana.

2.4 Metodología de aplicación parcial HEC-22.

Como se ha venido mencionando a lo largo del presente marco teórico, si bien la metodología HEC-22 constituye una referencia integral para el diseño hidráulico de sistemas de alcantarillado, su aplicación completa no ha sido adoptada de manera generalizada por las empresas prestadoras del servicio público de alcantarillado en Colombia. En la práctica, dichas entidades han optado por una aplicación parcial de la metodología, enfocándose principalmente en el cálculo de pérdidas de energía localizadas en estructuras de unión, tal como se describe en la Sección 2.2.4 de esta tesis.

Esta adopción parcial responde tanto a criterios operativos como a limitaciones prácticas en los procesos de diseño convencionales, en los cuales se privilegia la evaluación puntual de las pérdidas de energía en cámaras de unión, sin integrar de forma sistemática la totalidad del proceso iterativo propuesto por HEC-22 para redes complejas.

En este contexto, se ha generalizado el uso de herramientas de cálculo simplificadas, entre las cuales destaca la hoja de cálculo desarrollada por PAVCO, utilizada en el medio técnico para el diseño hidráulico de alcantarillado bajo los estándares de la empresa de acueducto de Bogotá. Dicha plantilla permite implementar de manera directa las expresiones y coeficientes asociados al cálculo de pérdidas de energía en el interior de las cámaras de unión, integrando estos resultados dentro del proceso convencional de dimensionamiento hidráulico de conducciones.

La hoja de cálculo de PAVCO estructura el proceso de diseño mediante el ingreso de los parámetros geométricos e hidráulicos relevantes de cada estructura de unión, tales como diámetros de entrada y salida, ángulos de confluencia, caudales circulantes y niveles hidráulicos. A partir de esta información, la plantilla aplica las ecuaciones correspondientes al cálculo de pérdidas locales, permitiendo estimar la variación de la línea de energía a través de cada cámara de unión y verificar el cumplimiento de los criterios hidráulicos establecidos.

No obstante, es importante señalar que, en su estado actual, esta herramienta presenta una limitación estructural relevante: su aplicación se restringe al diseño de sistemas de alcantarillado en serie, en los cuales las cámaras de unión se analizan de manera secuencial e independiente. En consecuencia, la hoja de cálculo no permite abordar de forma integral el diseño hidráulico de redes complejas tipo árbol, donde confluyen múltiples ramales y donde las interdependencias hidráulicas requieren un análisis simultáneo de todo el sistema.

Esta limitación implica que el uso de la plantilla de PAVCO, si bien resulta adecuado para evaluaciones parciales o diseños lineales, no permite capturar plenamente los efectos acumulativos



ni las interacciones hidráulicas presentes en redes de alcantarillado de mayor complejidad, tal como lo contempla la metodología HEC-22 en su formulación completa.

En la aplicación parcial de la metodología HEC-22, el proceso de diseño hidráulico no se encuentra completamente automatizado, por lo que ciertas decisiones fundamentales quedan en manos del diseñador. En particular, la selección de la pendiente de las tuberías debe realizarse de manera iterativa, ajustando este parámetro hasta cumplir simultáneamente con los criterios hidráulicos y constructivos establecidos, tales como límites de velocidad, relación de llenado, profundidades de instalación y esfuerzo cortante mínimo.

Este enfoque contrasta con metodologías de aplicación completa o con herramientas de diseño optimizado, en las cuales la pendiente de las tuberías es determinada de forma automática como parte del proceso de diseño, ya sea siguiendo una secuencia metodológica predefinida o mediante algoritmos de optimización global. En dichos casos, el rol del diseñador se orienta principalmente a la definición de restricciones, validación de resultados y toma de decisiones a nivel de sistema, mientras que el proceso iterativo de ajuste geométrico es asumido por la herramienta computacional.

La diferencia en el grado de automatización entre estos enfoques tiene implicaciones directas en la reproducibilidad de los resultados, la eficiencia del proceso de diseño y la dependencia del criterio del diseñador, aspectos que resultan relevantes al momento de evaluar comparativamente su desempeño técnico, económico y ambiental.

2.5 Determinantes de Impacto Ambiental

En el contexto actual de crisis climática y necesidad de sostenibilidad, el impacto ambiental de las infraestructuras urbanas debe considerarse como un componente central en los procesos de planificación, diseño y evaluación. En el caso de los sistemas de alcantarillado pluvial, este impacto no se limita a la operación de estaciones de bombeo, sino que también incluye las emisiones generadas por la producción y transporte de materiales, la excavación y la construcción de estructuras de conexión. Esta sección describe los principales determinantes del impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), centrándose en tres conceptos clave: el carbono equivalente, el análisis de ciclo de vida y la huella de carbono.

2.5.1 Carbono Equivalente

En las últimas décadas, la evaluación del impacto ambiental de infraestructuras urbanas ha ganado protagonismo en el marco de la lucha contra el cambio climático, impulsada por acuerdos internacionales y normativas locales orientadas hacia la sostenibilidad. En este contexto, el uso de indicadores estandarizados que permitan medir, comparar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se ha convertido en una necesidad técnica y política (Wiedmann & Minx, 2008; IPCC, 2021).



El carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$) es una unidad de medida ampliamente utilizada para expresar de manera uniforme el impacto climático de los GEI. Su valor se obtiene a partir del potencial de calentamiento global (GWP) de cada gas, que indica cuántas veces es más potente que el dióxido de carbono en términos de su contribución al calentamiento global durante un período de referencia (IPCC, 2021)

2.5.1.1 Carbono equivalente en infraestructura

En proyectos de infraestructura urbana, como los sistemas de alcantarillado pluvial, el uso del $\text{CO}_2\text{-eq}$ permite estimar de forma unificada las emisiones derivadas de procesos como:

- La producción de materiales (concreto, acero, PVC, PEAD), que conllevan emisiones directas e indirectas por consumo energético y procesos químicos industriales.
- La construcción y excavación, que implican el uso de maquinaria pesada con combustibles fósiles.
- El transporte de materiales, cuyos impactos dependen de las distancias, los modos de transporte y la eficiencia logística.
- La operación del sistema, particularmente en los casos que requieren bombeo de aguas lluvias, generando emisiones por consumo eléctrico.

Por ejemplo, la industria del cemento, insumo fundamental en la construcción de cámaras de unión, es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de CO_2 , en gran parte debido al proceso de calcinación en la producción de clínker (IEA, 2018). Asimismo, bases de datos como Ecoinvent (2022) permiten estimar que la excavación de un metro cúbico de suelo con maquinaria pesada puede generar entre 10 y 25 kg de $\text{CO}_2\text{-eq}$, dependiendo del tipo de suelo y equipo empleado.

La cuantificación en unidades de $\text{CO}_2\text{-eq}$ permite integrar estos distintos factores en un solo análisis, especialmente útil cuando se comparan alternativas de diseño que implican diferencias en profundidad de excavación, tipo de material estructural o necesidad de estaciones de bombeo. Esto es clave para el enfoque de esta tesis, centrada en estructuras de conexión y sus efectos indirectos sobre el perfil hidráulico y la sostenibilidad del sistema.

2.5.1.2 Relevancia en diseños hidráulicos

Incorporar el análisis en $\text{CO}_2\text{-eq}$ al diseño hidráulico permite vincular de forma directa decisiones técnicas con su impacto ambiental. Una cámara de unión sobredimensionada, por ejemplo, puede no alterar significativamente el caudal conducido, pero sí demandar excavaciones más profundas, mayor volumen de concreto, uso de grúas o bombas adicionales, y, por tanto, un aumento significativo en las emisiones de GEI. Asimismo, el uso innecesario de bombeo para superar pérdidas de energía en estructuras mal diseñadas puede implicar emisiones sostenidas año tras año, que se acumulan durante toda la vida útil del sistema.

Por tanto, el análisis en términos de carbono equivalente permite identificar puntos críticos en el diseño donde es posible implementar medidas de mitigación:



- Optimizar diámetros para evitar sobreexcavación,
- Diseñar estructuras con cañuelas eficientes que reduzcan pérdidas de energía,
- Evitar el bombeo cuando sea posible mediante diseño adecuado de cotas y pendientes,
- Seleccionar materiales con menor huella de carbono incorporada.

2.5.2 Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) constituye una herramienta fundamental dentro del marco de los determinantes de impacto ambiental, al permitir evaluar de manera sistemática los efectos ambientales asociados a un producto, proceso o sistema a lo largo de todas las etapas de su existencia (ISO, 2006a; ISO, 2006b). En el contexto de la infraestructura de saneamiento, y particularmente en el diseño y construcción de sistemas de alcantarillado, el ACV se consolida como un enfoque idóneo para estimar impactos ambientales acumulativos, entre ellos el carbono equivalente, más allá de una evaluación limitada a una sola fase del proyecto.

Desde esta perspectiva, el análisis de ciclo de vida busca identificar y cuantificar las cargas ambientales generadas desde la obtención de materias primas, pasando por los procesos de fabricación, transporte e instalación, hasta las etapas finales de disposición o reciclaje de los materiales que conforman el sistema (Guinée et al., 2011). Este enfoque integral permite comparar alternativas de diseño no solo en términos técnicos o económicos, sino también en función de su desempeño ambiental global.

Para el caso específico de los sistemas de alcantarillado, el presente trabajo considera como etapas relevantes del ciclo de vida las siguientes: fabricación de los materiales, transporte hasta el sitio de obra, instalación en campo y reciclaje o disposición final de los componentes. Estas fases concentran la mayor proporción de emisiones asociadas al uso de materiales como tuberías y estructuras de unión, y son determinantes en la estimación del impacto ambiental total del sistema (Huang et al., 2009; Petit-Boix et al., 2017).

La etapa de fabricación incluye los procesos industriales necesarios para la producción de tuberías, cámaras de unión y demás elementos estructurales, los cuales suelen representar una fracción significativa del carbono incorporado debido al consumo energético y al uso de materias primas (Guinée et al., 2011). Por su parte, el transporte considera las emisiones generadas por el traslado de dichos materiales desde los centros de producción hasta el sitio de construcción, variable que depende tanto de la distancia recorrida como del tipo de medio de transporte utilizado.

La fase de instalación comprende las actividades constructivas requeridas para la puesta en obra del sistema de alcantarillado, incluyendo excavaciones, manejo de materiales y ensamblaje de los componentes. Finalmente, la etapa de reciclaje o disposición final contempla el tratamiento de los materiales al final de su vida útil, reconociendo que ciertos componentes pueden reincorporarse a nuevos ciclos productivos, reduciendo así el impacto ambiental neto del sistema (ISO, 2006a).



No obstante, es importante señalar que existen otras etapas del ciclo de vida que no son consideradas explícitamente en este análisis. Entre ellas se encuentra el proceso de diseño del sistema, el cual, si bien implica consumo de recursos y energía asociados a actividades técnicas, administrativas y computacionales, presenta generalmente una contribución marginal en comparación con las emisiones derivadas de la fabricación, transporte e instalación de los materiales (Petit-Boix et al., 2017). De igual forma, la fase de operación y mantenimiento no se aborda de manera detallada en el presente marco teórico, dado que su impacto depende en gran medida de condiciones específicas de explotación, horizontes temporales y prácticas operativas que exceden el alcance del estudio.

En consecuencia, el análisis de ciclo de vida aquí descrito se concibe como una aproximación enfocada en las etapas con mayor incidencia ambiental, permitiendo incorporar criterios de sostenibilidad y reducción de carbono equivalente en la evaluación de alternativas de diseño de sistemas de alcantarillado, manteniendo coherencia con los objetivos técnicos y económicos del proyecto.



3. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe la metodología adoptada para evaluar y comparar el diseño hidráulico de estructuras de conexión en sistemas de alcantarillado pluvial, a partir de un análisis técnico integral orientado a identificar diferencias en términos de desempeño hidráulico, costos de infraestructura e impacto ambiental. La metodología se fundamenta en la Hydraulic Engineering Circular No. 22 (HEC-22), en su tercera edición, ampliamente reconocida como un referente técnico para el diseño de sistemas de drenaje urbano, y se complementa con el uso de herramientas computacionales y enfoques de aplicación parcial empleados en la práctica profesional.

El análisis metodológico contempla la comparación de tres enfoques de diseño aplicados a un mismo conjunto de condiciones hidráulicas y topográficas, con el fin de garantizar la consistencia y trazabilidad de los resultados.

- El primer enfoque corresponde a la aplicación completa de la metodología HEC-22, siguiendo de manera secuencial los procedimientos descritos en sus capítulos 7.4 y 7.5, incluyendo el cálculo detallado de pérdidas de energía, la definición del perfil hidráulico y el trazado del sistema.
- El segundo enfoque se basa en el diseño optimizado generado mediante el programa UTOPIA, desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillado (CIACUA) de la Universidad de los Andes, el cual implementa algoritmos de optimización orientados a minimizar costos y asegurar el cumplimiento de las condiciones hidráulicas y constructivas del sistema.
- Finalmente, se incorpora un tercer enfoque correspondiente a la aplicación parcial de la metodología HEC-22, limitada al cálculo de pérdidas de energía en el interior de las estructuras de conexión, reflejando el procedimiento adoptado por diversos manuales técnicos de empresas prestadoras del servicio público de alcantarillado en Colombia.

Los resultados obtenidos a partir de cada metodología se comparan en función de parámetros técnicos relevantes, tales como pendientes adoptadas, profundidades de excavación, dimensiones de las estructuras de conexión y configuración general del sistema. A partir de esta información, se aplican las ecuaciones de costo descritas en el Capítulo 2, permitiendo estimar el costo relativo de cada alternativa de diseño y evaluar sus implicaciones económicas.

Adicionalmente, la metodología incorpora un análisis ambiental comparativo, basado en la estimación del impacto ambiental en términos de carbono equivalente (CO₂-eq) mediante un enfoque de análisis de ciclo de vida. Para cada una de las metodologías de diseño consideradas, se evalúan las emisiones asociadas a las etapas de fabricación, transporte, instalación y disposición o reciclaje de los componentes del sistema, de acuerdo con los lineamientos establecidos en el marco teórico. Este análisis permite integrar criterios de sostenibilidad ambiental al proceso de comparación, proporcionando una evaluación más completa del desempeño global de cada enfoque de diseño.



En conjunto, la metodología propuesta permite analizar de forma simultánea los aspectos técnicos, económicos y ambientales del diseño de estructuras de conexión en sistemas de alcantarillado, contribuyendo a una evaluación integral de las ventajas y limitaciones de cada metodología considerada.

3.1 Caso de Estudio 1: Ejemplo Circular No. 22

Con el fin de aplicar de manera consistente las metodologías de diseño descritas en el presente capítulo y establecer una base común de comparación, se adopta como primer caso de estudio el ejemplo propuesto en la Hydraulic Engineering Circular No. 22 (HEC-22), en su tercera edición. Este caso, desarrollado originalmente con fines didácticos, corresponde a una red de alcantarillado pluvial de pequeña escala y configuración lineal, lo cual permite ilustrar con claridad el procedimiento completo de diseño hidráulico, así como las diferencias conceptuales y operativas entre los enfoques metodológicos considerados.

La selección de este caso de estudio responde a la necesidad de contar con un sistema de referencia plenamente documentado, que facilite la aplicación íntegra de la metodología HEC-22, el diseño optimizado mediante el programa UTOPIA y la aplicación parcial de la metodología centrada en el cálculo de pérdidas de energía en estructuras de conexión. Al tratarse de un sistema de complejidad controlada, este ejemplo permite evaluar de manera directa el impacto de cada enfoque sobre las variables hidráulicas, geométricas, económicas y ambientales, sin introducir incertidumbres adicionales asociadas a configuraciones más complejas.

En las secciones siguientes se presentan los datos técnicos del caso de estudio, así como la aplicación detallada de cada metodología de diseño sobre este sistema base. Los resultados obtenidos servirán como punto de partida para el análisis comparativo desarrollado en los capítulos posteriores y para la extensión de la metodología a casos de estudio de mayor complejidad.

3.1.1 Datos técnicos del caso de estudio

El caso de estudio seleccionado corresponde al presentado en la HEC-22 en el Capítulo 7.6, el cual presenta un diseño preliminar de un sistema de alcantarillado pluvial. La red está compuesta por cuatro tramos de tubería (identificados entre las estructuras 40 a 44) y cinco estructuras de unión (estructuras 40, 41, 42, 43 y 44), distribuidas en una configuración descendente. Al ser una primera aproximación a los métodos de diseño, el ejemplo no plantea que sea necesario bombear en ningún momento. A continuación, se presentará la información requerida para poder aplicar de forma adecuada los métodos de diseño.

Tabla 3-1. Información de Intensidad/Duración – Caso 1

Tiempo [min]	5	10	15	20	30	40	50	60	120
Intensidad [mm/hr]	180	150	130	115	90	75	65	60	35

Fuente. Adaptado de Federal Highway Administration. 2009.


Tabla 3-2. Información de área de drenaje – Caso 1

Estructura	Área de Drenaje	Coef. Escorrentia “C”	Tiempo de Concentración
[-]	[ha]	[-]	[min]
40	0.26	0.73	3
41	0.14	0.73	2
42	0.13	0.73	2
43	-	-	-
44	-	-	-

Fuente. Adaptado de Federal Highway Administration. 2009.

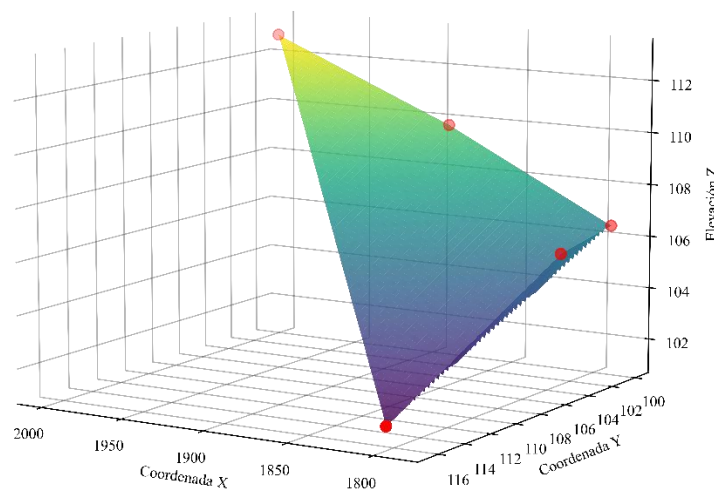
Adicionalmente, se otorga la información relacionada con la ubicación de los pozos. La cual se presenta en la Tabla 3-3. Donde la coordenada Z representa el nivel de terreno en los puntos donde se ubicarán los pozos.

Tabla 3-3. Coordenadas espaciales de la red de alcantarillado – Caso 1

Estructura	X [m]	Y [m]	Z [m]
40	2000	100	112.77
41	1890	100	109.77
42	1790	100	106.47
43	1790	104.3	106.00
44	1802.02	116.32	101.50

Fuente. Elaboración propia con base en Figuras 7-13 y 7-14 de la HEC-22 (FHWA,2009)

Con el fin de hacer una mejor visualización de las coordenadas presentadas anteriormente, se realiza la Figura 3-1


Figura 3-1. Presentación 3D de las coordenadas de las estructuras – Caso 1

Fuente. Elaboración propia con base en la Tabla 3-3.

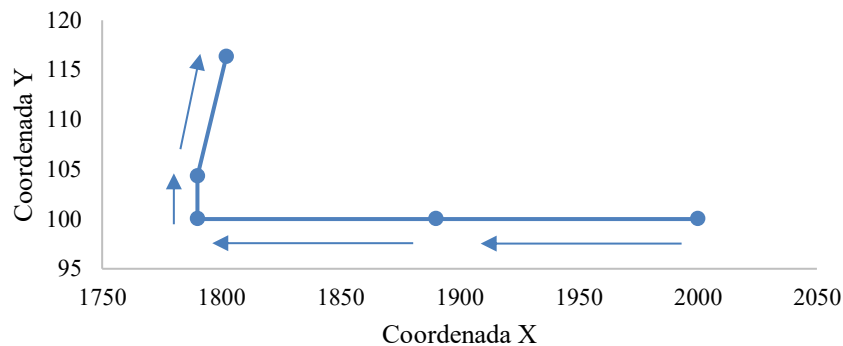


Figura 3-2. Presentación 2D de las coordenadas de las estructuras – Caso 1

Fuente. Elaboración propia con base en la Tabla 3-3.

A partir de la Tabla 3-3 y de la Figura 3-1, se puede determinar las longitudes de las tuberías y la pendiente del terreno (que podría coincidir con la pendiente de las tuberías).

Tabla 3-4. Longitud de tramos y pendientes del terreno – Caso 1

Tramo	De estructura	A estructura	Longitud [m]	Pendiente [m/m]
Tramo 1	40	41	110.0	0.03
Tramo 2	41	42	100.0	0.03
Tramo 3	42	43	4.3	0.001
Tramo 4	43	44	17.0	0.01

Fuente. Elaboración propia con base en la Tabla 3-3 y Figura 3-1.

Finalmente, también se brinda información como el material de las tuberías (concreto reforzado), su n de Manning (0.013), el diámetro mínimo (460 mm), y que la cota de batea de la última tubería (en su lado aguas abajo) está a 100.80 m.

En cada tramo se calcularon los respectivos caudales de escorrentía incremental, las velocidades de flujo, los diámetros necesarios según la fórmula de diseño (Ecuación 2-6), y los perfiles de energía y carga hidráulica. Estos datos se utilizarán para aplicar paso a paso tanto el enfoque manual basado en la metodología HEC-22, como el diseño automatizado a través del software UTOPIA.

3.1.2 Aplicación de metodología HEC-22

En esta sección se presenta la aplicación detallada de la metodología de diseño propuesta en la tercera edición de la (HEC-22), específicamente los pasos descritos en los capítulos 7.4 y 7.5, correspondientes al diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano y que fueron descritos en la sección 2.2 de esta tesis. El procedimiento se aplicará al caso de estudio previamente descrito, siguiendo de forma secuencial el enfoque planteado por la circular, el cual incluye la estimación de caudales, la determinación de diámetros, el cálculo de pérdidas de energía, tanto por fricción como en las estructuras de unión, y la definición del perfil hidráulico a lo largo del sistema.



3.1.2.1 Proceso preliminar de diseño

A continuación, se presentará la aplicación del proceso preliminar de diseño establecido en la sección 2.2.5.1. En la sección se resultados se podrá encontrar una tabla que resume todo lo encontrado en esta sección

3.1.2.1.1 Tramo 1: Estructura 40 a 41

3.1.2.1.1.1 Información general del tramo

Tabla 3-5. Información tramo 1 - Caso 1

Concepto	Valor	Fuente
Longitud del tramo (L)	110 m	Tabla 3-4
Área de drenaje (Ai)	0.26 ha	Tabla 3-2
Área Total (At)	0.26 ha	$\sum A_i$
Coefficiente de escorrentía (C)	0.73	Tabla 3-2
Tiempo de concentración (ti)	3 min	Tabla 3-2
Intensidad de lluvia (I)	180 mm/h	Tabla 3-1 (para 5 min)
Coef. Escorrentía x Área (CA)	0.19 ha	$CA = 0.26 \times 0.73$
CA Acumulado	0.19 ha	$\sum CA$
Caudal de escorrentía (Q)	0.10 m ³ /s	$Q = (\sum CA \times I) / 360$
Pendiente seleccionada (S)	0.03 m/m	Tabla 3-4

3.1.2.1.1.2 Cálculo del diámetro mínimo requerido

Se emplea una ecuación empírica derivada de la ecuación de Manning y propuesta por la HEC-22:

$$d = \left(\frac{Q \cdot n}{K_Q \cdot \sqrt{S}} \right)^{0.375} = \left(\frac{0.10 \cdot 0.013}{0.312 \cdot 0.03} \right)^{0.375} = 0.25 \text{ m}$$

Se adopta un diámetro mínimo de diseño de 0.46 m (criterio de mantenimiento).

3.1.2.1.1.3 Cálculo de capacidad y velocidad a flujo lleno

$$Q_f = \frac{K_Q}{n} \cdot d^{2.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.312}{0.013} \cdot 0.46^{2.67} \cdot 0.03^{0.5} = 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_f = \frac{K_V}{n} \cdot d^{0.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.397}{0.013} \cdot 0.46^{0.67} \cdot 0.03^{0.5} = 3.14 \text{ m/s}$$

3.1.2.1.1.4 Velocidad de diseño y tiempo de tránsito

- Relación de caudal: $Q/Q_f = 0.10/0.52 = 0.19$
- De acuerdo con la Gráfica 24 (FHWA, 2009): $v/v_f = 0.74 \rightarrow v = 0.74 \cdot 3.14 = 2.32 \text{ m/s}$
- Tiempo de tránsito: $t_s = L/v = 110/2.32/60 = 0.8 \text{ min} \rightarrow \text{usar } 1 \text{ min}$



3.1.2.1.1.5 Cálculo de elevaciones y cotas

- Elevación del terreno en estructura 40: 112.77 m
- Profundidad de recubrimiento mínima: 0.90 m
- Cota de Batea Aguas Arriba (estructura 40): $112.77 - 0.90 - 0.46 = 111.41$ m
- Cota de Batea Aguas Abajo (estructura 41): $111.41 - (110)(0.03) = 108.11$ m

3.1.2.1.2 Tramo 2: Estructura 41 a 42

3.1.2.1.2.1 Información general del tramo

Tabla 3-6. Información tramo 2 – Caso 1

Concepto	Valor	Fuente
Longitud del tramo (L)	100 m	Tabla 3-4
Área de drenaje (Ai)	0.14 ha	Tabla 3-2
Área Total (At)	0.40 ha	ΣAi
Coefficiente de escorrentía (C)	0.73	Tabla 3-2
Tiempo de concentración (ti)	2 min	Tabla 3-2
Intensidad de lluvia (I)	180 mm/h	Tabla 3-1 (para 5 min)
Coef. Escorrentía x Área (CA)	0.10 ha	$CA = 0.14 \times 0.73$
CA Acumulado	0.29 ha	ΣCA
Caudal de escorrentía (Q)	0.15 m ³ /s	$Q = (\Sigma CA \times I) / 360$
Pendiente seleccionada (S)	0.03 m/m	Tabla 3-4

3.1.2.1.2.2 Cálculo del diámetro mínimo requerido

Se emplea una ecuación empírica derivada de la ecuación de Manning y propuesta por la HEC-22:

$$d = \left(\frac{Q \cdot n}{K_Q \cdot \sqrt{S}} \right)^{0.375} = \left(\frac{0.15 \cdot 0.013}{0.312 \cdot 0.03} \right)^{0.375} = 0.29 \text{ m}$$

Se adopta un diámetro mínimo de diseño de 0.46 m (criterio de mantenimiento).

3.1.2.1.2.3 Cálculo de capacidad y velocidad a flujo lleno

$$Q_f = \frac{K_Q}{n} \cdot d^{2.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.312}{0.013} \cdot 0.46^{2.67} \cdot 0.03^{0.5} = 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_f = \frac{K_V}{n} \cdot d^{0.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.397}{0.013} \cdot 0.46^{0.67} \cdot 0.03^{0.5} = 3.14 \text{ m/s}$$

3.1.2.1.2.4 Velocidad de diseño y tiempo de tránsito

- Relación de caudal: $Q/Q_f = 0.15/0.52 = 0.29$



- De acuerdo con la Gráfica 24 (FHWA, 2009): $v/v_f = 0.84 \rightarrow v = 0.84 \cdot 3.14 = 2.64 \text{ m/s}$
- Tiempo de tránsito: $t_s = L/v = 100/2.64/60 = 0.6 \text{ min} \rightarrow \text{usar } 1 \text{ min}$

3.1.2.1.2.5 Cálculo de elevaciones y cotas

- Caída de Corona: $H_a = K_{ah} \cdot v^2/2g = 0.5 \cdot 2.64^2/2 \cdot 9.81 = 0.18 \text{ m}$
- Cota de Batea Aguas Arriba (estructura 41): $108.11 - 0.18 = 107.93 \text{ m}$
- Cota de Batea Aguas Abajo (estructura 42): $107.93 - (100)(0.03) = 104.93 \text{ m}$

3.1.2.1.3 Tramo 3: Estructura 42 a 43

3.1.2.1.3.1 Información general del tramo

Tabla 3-7. Información tramo 3 – Caso 1

Concepto	Valor	Fuente
Longitud del tramo (L)	4.3 m	Tabla 3-4
Área de drenaje (Ai)	0.13 ha	Tabla 3-2
Área Total (At)	0.53 ha	ΣA_i
Coefficiente de escorrentía (C)	0.73	Tabla 3-2
Tiempo de concentración (ti)	2 min	Tabla 3-2
Intensidad de lluvia (I)	180 mm/h	Tabla 3-1 (para 5 min)
Coef. Escorrentía x Área (CA)	0.09 ha	$CA = 0.13 \times 0.73$
CA Acumulado	0.38 ha	ΣCA
Caudal de escorrentía (Q)	0.19 m ³ /s	$Q = (\Sigma CA \times I) / 360$
Pendiente seleccionada (S)	0.001 m/m	Tabla 3-4

3.1.2.1.3.2 Cálculo del diámetro mínimo requerido

Se emplea una ecuación empírica derivada de la ecuación de Manning y propuesta por la HEC-22:

$$d = \left(\frac{Q \cdot n}{K_Q \cdot \sqrt{S}} \right)^{0.375} = \left(\frac{0.19 \cdot 0.013}{0.312 \cdot 0.001} \right)^{0.375} = 0.59 \text{ m}$$

Se adopta el diámetro nominal más cercano de 0.61 m.

3.1.2.1.3.3 Cálculo de capacidad y velocidad a flujo lleno

$$Q_f = \frac{K_Q}{n} \cdot d^{2.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.312}{0.013} \cdot 0.61^{2.67} \cdot 0.001^{0.5} = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_f = \frac{K_V}{n} \cdot d^{0.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.397}{0.013} \cdot 0.61^{0.67} \cdot 0.001^{0.5} = 0.69 \text{ m/s}$$



3.1.2.1.3.4 Velocidad de diseño y tiempo de tránsito

- Relación de caudal: $Q/Q_f = 0.19/0.20 = 0.95$
- De acuerdo con la Gráfica 24 (FHWA, 2009): $v/v_f = 1.15 \rightarrow v = 1.15 \cdot 0.69 = 0.79 \text{ m/s}$
- Tiempo de tránsito: $t_s = L/v = 4.3/0.79/60 = 0.09 \text{ min} \rightarrow \text{usar } 0 \text{ min}$

3.1.2.1.3.5 Cálculo de elevaciones y cotas

- Caída de Corona: $H_a = K_{ah} \cdot v^2/2g = 1.5 \cdot 0.79^2/2 \cdot 9.81 = 0.048 \text{ m}$
- Cota de Batea Aguas Arriba (estructura 42): $104.93 - 0.048 = 104.88 \text{ m}$
- Cota de Batea Aguas Abajo (estructura 43): $104.88 - (4.3)(0.001) = 104.87 \text{ m}$

3.1.2.1.4 Tramo 4: Estructura 43 a 44

3.1.2.1.4.1 Información general del tramo

Tabla 3-8. Información tramo 4 – Caso 1

Concepto	Valor	Fuente
Longitud del tramo (L)	17 m	Tabla 3-4
Área de drenaje (Ai)	0.00 ha	Tabla 3-2
Área Total (At)	0.53 ha	ΣA_i
Coefficiente de escorrentía (C)	-	Tabla 3-2
Tiempo de concentración (ti)	-	Tabla 3-2
Intensidad de lluvia (I)	180 mm/h	Tabla 3-1 (para 5 min)
Coef. Escorrentía x Área (CA)	0.0 ha	$CA = 0 \times 0.73$
CA Acumulado	0.38 ha	ΣCA
Caudal de escorrentía (Q)	0.19 m ³ /s	$Q = (\Sigma CA \times I) / 360$
Pendiente seleccionada (S)	0.01 m/m	Tabla 3-4

3.1.2.1.4.2 Cálculo del diámetro mínimo requerido

Se emplea una ecuación empírica derivada de la ecuación de Manning y propuesta por la HEC-22:

$$d = \left(\frac{Q \cdot n}{K_Q \cdot \sqrt{S}} \right)^{0.375} = \left(\frac{0.19 \cdot 0.013}{0.312 \cdot 0.01} \right)^{0.375} = 0.39 \text{ m}$$

Se adopta el diámetro nominal más cercano (no se pueden reducir tamaño entre estructuras) 0.61 m.

3.1.2.1.4.3 Cálculo de capacidad y velocidad a flujo lleno

$$Q_f = \frac{K_Q}{n} \cdot d^{2.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.312}{0.013} \cdot 0.61^{2.67} \cdot 0.01^{0.5} = 0.64 \text{ m}^3/\text{s}$$



$$v_f = \frac{K_V}{n} \cdot d^{0.67} \cdot S^{0.5} = \frac{0.397}{0.013} \cdot 0.61^{0.67} \cdot 0.01^{0.5} = 2.19 \text{ m/s}$$

3.1.2.1.4.4 Velocidad de diseño y tiempo de tránsito

- Relación de caudal: $Q/Q_f = 0.19/0.64 = 0.30$
- De acuerdo con la Gráfica 24 (FHWA, 2009): $v/v_f = 0.84 \rightarrow v = 0.84 \cdot 2.19 = 1.84 \text{ m/s}$
- Tiempo de tránsito: $t_s = L/v = 17/1.84/60 = 0.15 \text{ min} \rightarrow \text{usar } 0 \text{ min}$

3.1.2.1.4.5 Cálculo de elevaciones y cotas

- Cota de Batea Aguas Abajo (descarga): 100.80 (valor dado)
- Cota de Batea Aguas Arriba (estructura 43): $100.80 + (17)(0.01) = 100.97 \text{ m}$
- Caída de Corona: $104.87 - 100.97 = 3.90 \text{ m}$

Con esto se finaliza la primera parte de la metodología HEC-22. En la sección de resultados se podrá encontrar la Tabla 4-1 que resume lo encontrado hasta este punto.

3.1.2.2 Determinación de la Línea de Energía

A continuación, se presentará la aplicación del proceso para determinar la línea de energía (EGL) establecido en la sección 2.2.5.2. En la sección de resultados se podrá encontrar una tabla que resume todo lo encontrado en esta sección

3.1.2.2.1 Outlet (Descarga del sistema)

Paso 1

- HGL = 101.65 m (Col. 10A): elevación de la lámina de agua en el cuerpo receptor.
- EGL = 101.65 m (Col. 9A): se asume sin velocidad en el cuerpo receptor.

3.1.2.2.2 Estructura 44

Paso 2

- ID = 44 (Col. 1A).
- HGL = 101.65 m (Col. 10A).
- Cota de Batea = 100.80 m
- TOC = Cota de Batea + D = $100.80 + 0.61 = 101.41 \text{ m}$ (Col. 17A).
- Elevación Terreno = 101.41 m (Col. 18A)

3.1.2.2.3 Estructura 43

Paso 3



- ID = 43 (Cols. 1A y 1B).
- Diámetro D = 0.61 m (Col. 2A).
- Caudal Q = 0.19 m³/s (Col. 3A).
- Longitud L = 17.0 m (Col. 4A).

Paso 4 – Verificación del Caso

- ¿HGL > Cota Corona (TOC)? → 101.65 m > 101.41 m ✓ → Se aplica el Caso A.
- Velocidad $V = Q / A = 0.19 / [(\pi/4)(0.61)^2] = 0.65$ m/s (Col. 5A).
- Cabeza de velocidad $V^2/2g = (0.65)^2 / (2 \times 9.81) = 0.022$ m (Col. 8A).
- Pérdida de salida $H_o = 1.0 \times V^2/2g = 0.022$ m (Col. 2B).
- $EGL_o = HGL + H_o = 101.65 + 0.022 = 101.672$ m (Col. 9A).
- $HGL_o = EGL_o - V^2/2g = 101.672 - 0.022 = 101.650$ m (Col. 10A).
- Se continua con el paso 11

Paso 11 – Pérdidas por fricción

- $S_f = [(0.19)(0.013)/(0.312)(0.61)^{2.67}]^2 = 0.00088$ m/m (Col. 11A).

Paso 12 – Pérdidas totales en el tramo

- $H_f = S_f \times L = 0.00088 \times 17.0 = 0.015$ m (Col. 3B).
- Otras pérdidas (H_b, H_c, H_e, H_j) = 0.0 → Total de pérdidas = 0.015 m (Col. 12A).

Paso 13 – EGL aguas arriba

- $EGL_i = EGL_o + \text{pérdidas} = 101.672 + 0.015 = 101.687$ m (Col. 13A).

Paso 14– HGL aguas arriba

- $HGL_i = EGL_i - V^2/2g = 101.687 - 0.022 = 101.665$ m.
- Cota de Corona (TOC) = Cota de Batea (BOC_i) + D = 100.97 + 0.61 = 101.58 m → $HGL_i > TOC_i$ ✓

Paso 15 – Energía en entrada de la tubería

- $E_i = EGL_i - BOC_i = 101.687 - 100.97 = 0.717$ m (Col. 9B).
- $y + P/\gamma = E_i - V^2/2g = 0.717 - 0.022 = 0.695$ m (Col. 10B).

Paso 16 – Determinación de E_{ai} (entrada aguas arriba)

- $DI = 0.19 / [(\pi/4)(0.61)^2 \times \sqrt{(0.61 \times 9.81)}] = 0.266$ (Col. 11B).
- Caso A: ¿ $y + P/\gamma > D$? → 0.695 > 0.61 ✓



- $H_i = (0.2)(0.022) = 0.00431 \text{ m}$
- $E_{aio} = E_i + H_i = 0.717 + 0.004 = 0.721 \text{ m}$
- $E_{ais} = (1.0)(DI)^2(D) = (0.266)^2(0.61) = 0.043 \text{ m}$
- $E_{aiu} = (1.6)(DI)^{0.67}(D) = 1.6(0.266)^{0.67}(0.61) = 0.402 \text{ m}$
- $E_{ai} = \max(E_{aio}, E_{ais}, E_{aiu}) = 0.721 \text{ m (Col. 12B)}$

Paso 17 – Coeficiente de cañuela

- $C_B = -0.05 \text{ (Col. 13B)}$

Paso 18 – Coeficiente de ángulo

- $C_\theta = 0.0 \text{ (Col. 14B)}$

Paso 19 – Altura de caída y C_p

- $z_k = 104.87 - 100.97 = 3.90 \text{ m}$
- $h_k = (z_k - E_{ai})/D = (3.90 - 0.721)/0.61 = 5.21$
- $C_p = (\sum Q_k \times h_k)/Q_o = (0.19 \times 5.21)/0.19 = 5.21 \text{ (Col. 15B)}$

Paso 20 – Pérdida adicional por caída

- $H_a = (E_{ai} - E_i)(C_B + C_\theta + C_p) = (0.721 - 0.717)(-0.05 + 0 + 5.21) = 0.021 \text{ m (Col. 16B)}$

Paso 21 – Energía ajustada en la cámara

- $E_a = E_{ai} + H_a = 0.721 + 0.021 = 0.742 \text{ m (Col. 17B)}$

Paso 22 – EGL en la cámara

- $EGL_a = E_a + BOC_i = 0.742 + 100.97 = 101.712 \text{ m (Col. 16A)}$

Paso 23 – TOC aguas arriba

- $TOC = \text{Cota de Batea} + D = 104.87 + 0.61 = 105.48 \text{ m (Col. 17A)}$

Paso 24 – Elevación del terreno

- Elevación Terreno = 106.00 m (Col. 18A) → mayor que EGL, condición aceptable

3.1.2.2.4 Estructura 42

Paso 3

- $ID = 42 \text{ (Cols. 1A y 1B)}$
- $D = 0.61 \text{ m (Col. 2A)}$



- $Q = 0.19 \text{ m}^3/\text{s}$ (Col. 3A)
- $L = 4.3 \text{ m}$ (Col. 4A)

Paso 4 – Verificación del caso

- ¿ $HGL_a > TOC_o$? $\rightarrow 101.72 \text{ m} > 104.87 + 0.61 = 105.48 \text{ m} \rightarrow X$
- No se cumple Caso A \rightarrow Se aplica Case A

Paso 5 – Velocidad y profundidad normal

- $V = 0.79 \text{ m/s}$ (Col. 5A)
- $Q/Q_f = 0.19 / 0.20 = 0.95 \rightarrow$ usar con grafica del manual
- $dn = 0.48 \text{ m}$ (Col. 6A)
- $V^2/2g = (0.79)^2 / (2 \times 9.81) = 0.032 \text{ m}$ (Col. 8A)

Paso 6 – Profundidad crítica

- $dc = 0.29 \text{ m}$ (Col. 7A)

Paso 7 – Confirmación del caso de flujo

- ¿ $HGL_a \leq BOC_o$? $\rightarrow 101.72 \text{ m} \leq 104.87 \text{ m} \checkmark$
- Se aplica Caso A
- $H_o = 0.0$ (Col. 2B)
- $EGL_o = BOC_o + dn + V^2/2g = 104.87 + 0.48 + 0.032 = 105.382 \text{ m}$ (Col. 9A)
- $HGL_o = EGL_o - V^2/2g = 105.382 - 0.032 = 105.35 \text{ m}$ (Col. 10A)

Paso 8 – Régimen de flujo

- ¿ $y_n > y_c$? $\rightarrow 0.48 \text{ m} > 0.29 \text{ m} \checkmark \rightarrow$ Flujo subcrítico \rightarrow continuar
- Continuar con el paso 11

Paso 11 – Pérdidas por fricción

- $S_f = (104.88 - 104.87) / 4.3 = 0.0023 \text{ m/m}$ (Col. 11A)

Paso 12 – Pérdidas totales en el tramo

- $H_f = S_f \times L = 0.0023 \times 4.30 = 0.01 \text{ m}$ (Col. 3B)
- $H_b, H_c, H_e, H_j = 0 \rightarrow$ Total = 0.01 m (Col. 12A)

Paso 13 – EGL aguas arriba

- $EGL_i = EGL_o + \text{pérdidas} = 105.382 + 0.010 = 105.392 \text{ m}$ (Col. 13A)

Paso 14 – HGL aguas arriba



- $HGL_i = EGL_i - V^2/2g = 105.392 - 0.032 = 105.36 \text{ m}$
- $TOC_i = 104.88 + 0.61 = 105.49 \text{ m}$
- $\text{¿}HGL_i > TOC_i? \rightarrow \text{X}$
- $\text{¿}HGL_i > y_n + BOC_i? \rightarrow 105.36 > 105.36 \text{ X}$
- $\text{¿}HGL_i > y_c + BOC_i? \rightarrow 105.36 > 105.16 \checkmark \rightarrow \text{Se aplica Caso C}$

Paso 15 – Energía en la entrada de la tubería

- $E_i = EGL_i - BOC_i = 105.392 - 104.88 = 0.512 \text{ m (Col. 9B)}$
- $y + P/\gamma = E_i - V^2/2g = 0.512 - 0.032 = 0.480 \text{ m (Col. 10B)}$
- $DI = 0.19 / [(\pi/4)(0.61)^2 \sqrt{(0.61 \times 9.81)}] = 0.266 \text{ (Col. 11B)}$

Paso 16 – Determinación de Eai

- Check A: $y + P/\gamma < D? \rightarrow 0.480 < 0.61 \checkmark$
- Check B: $HGL_i < d_c + BOC_i? \rightarrow 105.36 < 105.16 \text{ X}$
- $H_i = 0.2 \times 0.032 = 0.0064 \text{ m}$
- $E_{aio} = E_i + H_i = 0.512 + 0.0064 = 0.518 \text{ m}$
- $E_{ais} = DI^2 \times D = (0.266)^2 \times 0.61 = 0.043 \text{ m}$
- $E_{aiu} = 1.6 \times DI^{0.67} \times D = 0.402 \text{ m}$
- $E_{ai} = \text{máx}(E_{aio}, E_{ais}, E_{aiu}) = 0.518 \text{ m (Col. 12B)}$

Paso 17 – Coeficiente de cañuela

- $CB = -0.05 \text{ (Col. 13B)}$

Paso 18 – Coeficiente de ángulo

- $C_\theta = 4.5(0.15/0.19)\cos(90^\circ/2) = 2.50 \text{ (Col. 14B)}$

Paso 19 – Altura de caída y Cp

- $z_k = 106.47 - 104.88 = 1.59 \text{ m}$
- $h_k = (z_k - E_{ai})/D = (1.59 - 0.518)/0.61 = 1.76$
- $C_p = (0.047 \times 1.76) / 0.19 = 0.44 \text{ (Col. 15B)}$

Paso 20 – Pérdida adicional por caída

- $E_{ai} > E_i \checkmark$
- $H_a = (0.518 - 0.512)(-0.05 + 2.50 + 0.44) = 0.02 \text{ m (Col. 16B)}$

Paso 21 – Energía ajustada en la cámara

- $E_a = E_{ai} + H_a = 0.518 + 0.02 = 0.538 \text{ m (Col. 17B)}$



Paso 22 – EGL en la cámara

- $EGL_a = E_a + BOC_i = 0.538 + 104.88 = 105.42$ m (Col. 16A)

Paso 23 – TOC aguas arriba

- $TOC = \text{Cota de Batea} + D = 104.93 + 0.46 = 105.39$ m (Col. 17A)

Paso 24 – Elevación del Terreno

- Elevación Terreno. = 106.47 m (Col. 18A) → mayor que EGL, condición aceptable

El procedimiento continuo para las estructuras 41 y 40, siguiendo la misma línea de pasos. Los resultados se encuentran en el Capítulo 4

3.1.3 Aplicación de metodología UTOPIÁ

En esta sección se presenta la aplicación del programa UTOPIÁ, una herramienta computacional desarrollada por el Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillado (CIACUA) de la Universidad de los Andes, que permite realizar el diseño optimizado de redes de alcantarillado pluvial mediante algoritmos que minimizan costos y aseguran el cumplimiento de condiciones hidráulicas y topográficas. Para su funcionamiento, el programa requiere como entrada la ubicación espacial de las estructuras de conexión (pozos o cámaras de unión), es decir, las coordenadas y relaciones geométricas entre los nodos y las tuberías, información que ha sido consolidada en la Tabla 3.3. Adicionalmente, UTOPIÁ solicita el caudal de entrada en cada estructura, el cual ha sido calculado previamente con base en la intensidad de precipitación, el área de drenaje y el coeficiente de escorrentía correspondiente a cada punto, según lo presentado en la sección 3.1.1. El procedimiento completo para el cálculo de estos caudales puede consultarse en la sección 3.1.2, donde se desarrolla paso a paso la metodología HEC-22. La Tabla 3-9 resume los datos de entrada requeridos por el programa para la ejecución del diseño optimizado en el caso de estudio seleccionado.

Tabla 3-9. Información requerida por el programa UTOPIÁ – Caso 1

Estructura	Caudal [m³/s]	Caudal Acumulado [m³/s]	X [m]	Y [m]	Z [m]
40	0.10	0.10	2000	100	112.77
41	0.15	0.25	1890	100	109.77
42	0.19	0.44	1790	100	106.47
43	0.19	0.63	1790	104.3	106.00
44	0	-0.63	1802.02	116.32	101.50

Cabe señalar que, en la Tabla 3-9, la estructura 44 presenta un caudal incremental igual a cero y un caudal acumulado con signo negativo. Esta condición obedece a dos razones: en primer lugar, en esta estructura no ingresa ningún caudal adicional proveniente de aportes superficiales; y, en segundo lugar, la estructura funciona como punto de descarga del sistema, es decir, el caudal acumulado



representa el flujo que ha sido recogido por las estructuras anteriores y que es evacuado hacia el cuerpo receptor o sistema de disposición final. El signo negativo simplemente indica que se trata de una salida del sistema.

Internamente, el programa UTOPÍA ha sido configurado para que el diseño hidráulico se realice con base en la ecuación de Manning, dado que se proporciona el coeficiente de rugosidad correspondiente y se requiere garantizar la compatibilidad con la metodología HEC-22, con la cual se efectuará la comparación. Asimismo, se ha definido que el conjunto de diámetros comerciales disponibles sea equivalente al utilizado en el diseño con HEC-22, asegurando así condiciones de análisis consistentes. En cuanto a las restricciones de diseño, se han aplicado los mismos criterios utilizados en el enfoque tradicional: una profundidad mínima de recubrimiento de 0.90 m y una relación de llenado máxima permitida del 93%.

Por otro lado, el programa permite realizar una estimación del costo asociado a las tuberías, pero no incluye el costo de las estructuras de conexión. Por esta razón, es necesario seleccionar una función de costos representativa para este componente. En este caso, se ha optado por utilizar la Ecuación 2.2, propuesta por Li & Matthew (1990), la cual fue presentada previamente en la sección correspondiente del capítulo 2. En el siguiente capítulo se podrá encontrar una tabla que presenta los resultados del programa.

3.2 Caso de Estudio 2: Series de Tubos

Este caso de estudio corresponde a la aplicación comparativa de las tres metodologías de diseño descritas en secciones previas —aplicación completa de la metodología HEC-22, diseño optimizado mediante el programa UTOPÍA y aplicación parcial de la metodología HEC-22— al diseño de sistemas de alcantarillado en serie. Para efectos de este análisis, se entiende por sistemas en serie aquellos conformados por tuberías dispuestas de manera continua una tras otra, con una única entrada aguas arriba y una única salida aguas abajo, sin ramificaciones intermedias.

Con el propósito de evaluar el comportamiento de cada metodología bajo distintas condiciones topográficas, se construyeron diez configuraciones de terreno caracterizadas por pendientes longitudinales diferentes: 0.000, 0.003, 0.006, 0.010, 0.030, 0.050, 0.070, 0.100, así como dos configuraciones mixtas correspondientes a 0.000–0.005 y 0.000–0.050, en las cuales la primera mitad del terreno es horizontal y la segunda presenta pendiente constante. Estas configuraciones permiten analizar tanto escenarios de baja pendiente como situaciones más exigentes desde el punto de vista hidráulico y constructivo.

Para todas las simulaciones se adoptaron supuestos comunes, con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados. En todos los casos se consideraron tuberías de concreto, con un coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0.013$, y se aplicaron las mismas restricciones hidráulicas y constructivas: profundidad mínima de instalación de 1.20 m, profundidad máxima de 5.00 m, velocidad mínima de flujo de 0.50 m/s, velocidad máxima de 10.0 m/s, relación de llenado máxima (y/D) del 70%, esfuerzo cortante mínimo de 2 Pa y selección de diámetros comerciales de acuerdo



con los valores propuestos por Li & Matthew (1990). Las siguientes tablas resumen las restricciones de diseño y la base de diámetros utilizada para el diseño, respectivamente.

Tabla 3-10. Restricciones de Diseño Caso 2 y Caso 3

Restricción	Valor
n de Manning	0.013
Profundidad Máxima	5.0 m
Profundidad Mínima	1.2 m
Velocidad Mínima (v_{\min})	0.5 m/s
Velocidad Máxima (v_{\max})	10 m/s
Relación de Llenado Máxima (y/d_{\max})	70%
Esfuerzo Cortante Mínimo (τ_{\min})	2 Pa

Tabla 3-11. Diámetros disponibles para el diseño Caso 2 y Caso 3 (Li & Matthew, 1990)

Diámetros [mm]			
200	450	900	1500
250	500	1000	1600
300	530	1050	1800
350	600	1200	2000
380	700	1350	2200
400	800	1400	2400

Dentro de este caso de estudio se plantean dos configuraciones adicionales, diferenciadas por la cantidad de tramos que conforman la serie: series de 10 tubos y series de 20 tubos. Esta subdivisión permite evaluar el efecto de la longitud total del sistema y de la acumulación progresiva de caudal sobre el desempeño hidráulico, los costos y el impacto ambiental estimado para cada metodología de diseño.

3.2.1 Series de 10 Tubos

El primer subcaso corresponde al análisis de series conformadas por 10 tramos de tubería, en las cuales la longitud entre pozos se mantuvo constante e igual a 100 m. Esta configuración permite evaluar el desempeño de las metodologías de diseño bajo condiciones geométricas controladas, reduciendo la variabilidad asociada a la longitud de los tramos.

Para estas series, los caudales de entrada a cada pozo se seleccionaron de manera aleatoria, manteniéndose dentro de un rango representativo de sistemas reales de alcantarillado, con valores mínimos de $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ y máximos de $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal total de salida del sistema, correspondiente al último tramo de la serie, fue de $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Estas condiciones permiten analizar el efecto acumulativo del caudal a lo largo de la serie y su impacto sobre el dimensionamiento hidráulico y las pérdidas de energía en las estructuras de conexión. La siguiente tabla resume las características de la serie.


Tabla 3-12. Caudal por cámaras y longitud de tubería - Serie 10 Tubos

Cámara de Unión	Caudal Entrada Cámara[m³/s]	Longitud Tubería [m]
1	0.50	-
2	0.20	100
3	0.25	100
4	0.20	100
5	0.30	100
6	0.32	100
7	0.10	100
8	0.08	100
9	0.20	100
10	0.10	100
11	0	100

3.2.1.1 Aplicación de la metodología HEC-22

La aplicación de la metodología HEC-22 para el caso de las series de 10 tubos se realizó siguiendo íntegramente los lineamientos establecidos en la tercera edición de la Hydraulic Engineering Circular No. 22. No obstante, dado el número de configuraciones de terreno evaluadas y la naturaleza repetitiva del procedimiento, no se llevó a cabo el desarrollo manual paso a paso para cada uno de los escenarios analizados.

En su lugar, se optó por el uso de una herramienta computacional especializada que permite implementar de forma automatizada la totalidad del procedimiento de diseño propuesto por la HEC-22. Para este propósito se empleó el software StormCAD, un programa de modelación hidráulica desarrollado para el análisis y diseño de sistemas de drenaje urbano, el cual incorpora de manera explícita los criterios y ecuaciones de la metodología HEC-22.

StormCAD permite modelar redes de alcantarillado pluvial a partir de la definición de nodos, tramos de tubería y condiciones topográficas, y ejecuta de forma automática el cálculo de caudales, el dimensionamiento hidráulico, las pérdidas de energía por fricción y las pérdidas localizadas en estructuras de conexión, así como la determinación de la línea de energía (EGL) y la línea piezométrica (HGL). De esta manera, el software reproduce el proceso secuencial descrito en los capítulos 7.4 y 7.5 de la HEC-22, reduciendo significativamente el esfuerzo manual y la probabilidad de errores de cálculo.

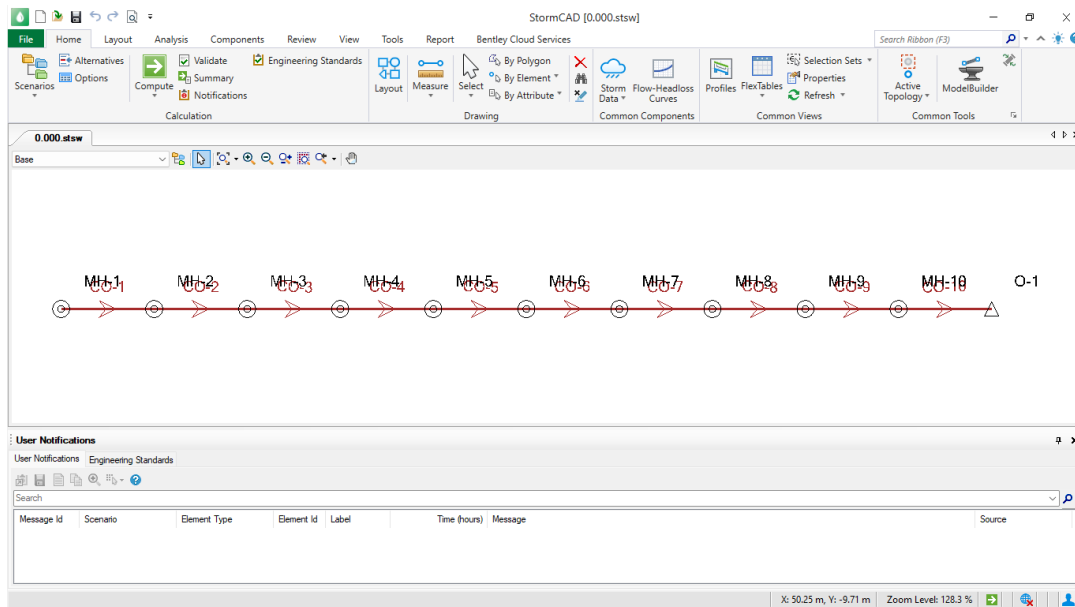


Figura 3-3. Vista general del Programa StormCAD con la serie de 10 tubos creada

Para cada una de las configuraciones de terreno consideradas, se definió una serie compuesta por 10 tramos de tubería, con longitudes uniformes de 100 m entre pozos, utilizando tuberías de concreto con coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0.013. Los caudales de entrada en cada estructura fueron asignados de acuerdo con los valores definidos para este subcaso, permitiendo la acumulación progresiva del caudal a lo largo de la serie hasta alcanzar el caudal total de salida del sistema.

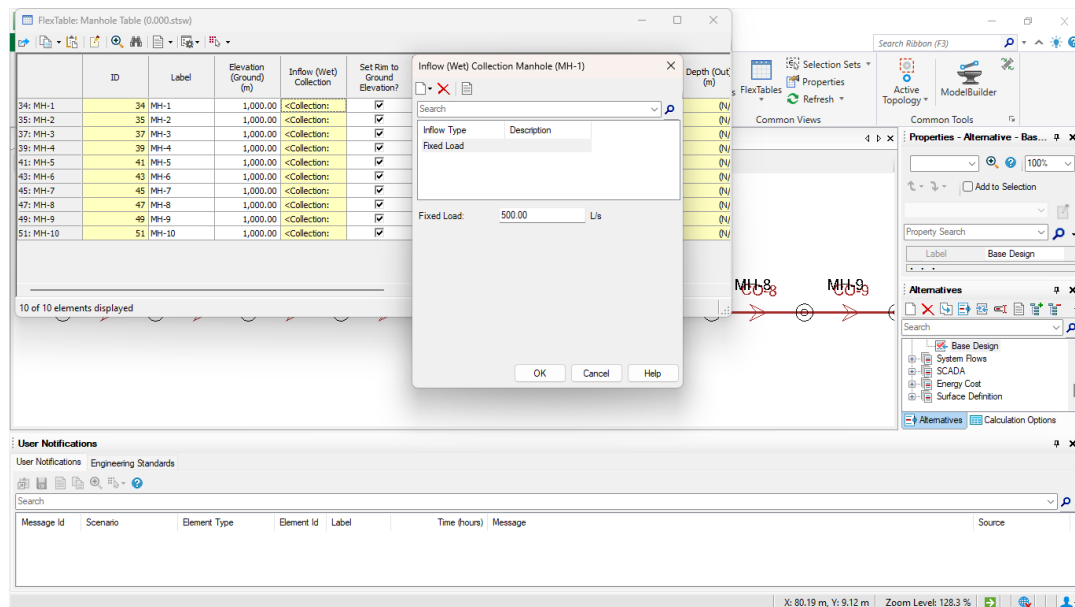


Figura 3-4. Asignación de Terreno (horizontal) y asignación de caudales para cada pozo



En todos los modelos se impusieron las mismas restricciones hidráulicas y constructivas establecidas para el Caso de Estudio 2, incluyendo profundidades mínimas y máximas de instalación, límites de velocidad, relación de llenado máxima, esfuerzo cortante mínimo y selección de diámetros comerciales.

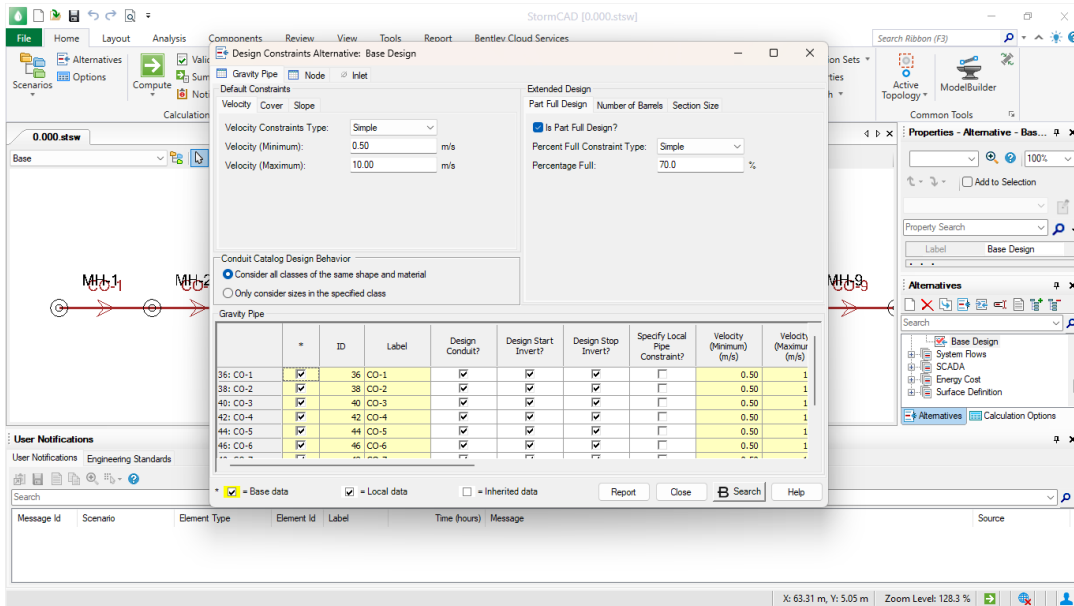


Figura 3-5. Configuración de Velocidad Máxima, Velocidad Mínima y Relación de Llenado Máxima para el diseño

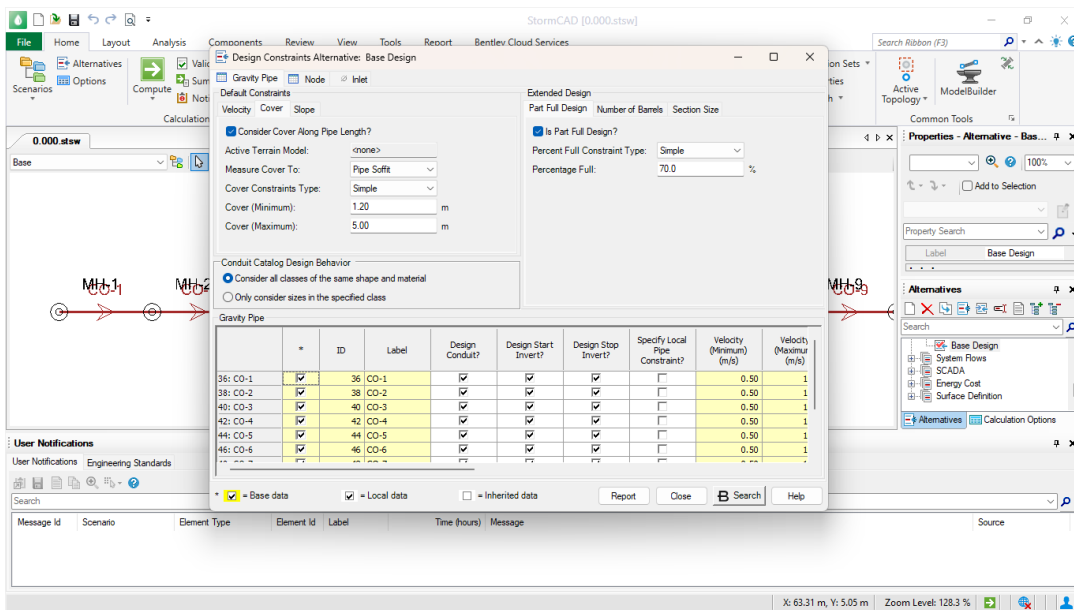


Figura 3-6. Configuración de Profundidad Mínima y Profundidad Máxima de Excavación



De esta forma, se garantiza que los resultados obtenidos mediante StormCAD correspondan estrictamente a la aplicación completa de la metodología HEC-22 y sean directamente comparables con los obtenidos mediante las otras metodologías evaluadas.

El uso de StormCAD permitió así evaluar de manera consistente y eficiente el desempeño de la metodología HEC-22 bajo múltiples condiciones de pendiente y caudal, manteniendo la fidelidad al procedimiento original y asegurando la trazabilidad de los resultados hidráulicos, geométricos, económicos y ambientales derivados de este enfoque de diseño.

3.2.1.2 Aplicación de la metodología UTOPIA

La aplicación de la metodología de diseño optimizado mediante el programa UTOPIA para el caso de las series de 10 tubos se realizó utilizando los mismos datos de entrada y restricciones hidráulicas definidos para la aplicación de la metodología HEC-22, con el fin de garantizar la comparabilidad directa entre los enfoques evaluados. De esta manera, cualquier diferencia observada en los resultados puede atribuirse a la lógica de diseño propia de cada metodología y no a variaciones en las condiciones iniciales del sistema.

UTOPIA es una herramienta computacional orientada al diseño hidráulico optimizado de redes de alcantarillado, la cual implementa algoritmos de optimización que buscan minimizar el costo total del sistema, sujeto al cumplimiento de restricciones hidráulicas, topográficas y constructivas definidas por el usuario. Su funcionamiento es consistente con los principios hidráulicos descritos en la metodología HEC-22, permitiendo una comparación directa entre ambos enfoques.

Para este subcaso, el sistema se modeló como una serie conformada por 10 tramos de tubería, con longitudes uniformes de 100 m entre pozos, utilizando tuberías de concreto con coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0.013$. Los caudales de entrada en cada estructura fueron definidos de manera que representaran valores realistas para sistemas de alcantarillado urbano, permitiendo la acumulación progresiva del caudal a lo largo de la serie hasta alcanzar un caudal total de salida de $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Tabla 3-13 presenta los datos de entrada utilizados para la ejecución del diseño en UTOPIA, incluyendo los caudales incrementales y acumulados, así como la ubicación espacial de cada estructura. En esta configuración base, la coordenada Z se mantiene constante para todas las estructuras, con el fin de aislar el efecto de la pendiente del terreno en el análisis comparativo. Cabe resaltar que, para las diferentes configuraciones de terreno evaluadas en este caso de estudio, la coordenada Z constituye el único parámetro que se modifica, ajustándose de acuerdo con la pendiente longitudinal definida para cada escenario, mientras que los demás datos de entrada permanecen inalterados.


Tabla 3-13. Datos de entrada para la aplicación de UTOPIA – Series de 10 tubos

Estructura	Caudal [m³/s]	Caudal Acumulado [m³/s]	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	0.50	0.50	100	0	1000
2	0.20	0.70	100	100	1000
3	0.25	0.95	100	200	1000
4	0.20	1.15	100	300	1000
5	0.30	1.45	100	400	1000
6	0.32	1.77	100	500	1000
7	0.10	1.87	100	600	1000
8	0.08	1.95	100	700	1000
9	0.20	2.15	100	800	1000
10	0.10	2.25	100	900	1000
11	0	-2.25	100	1000	1000

Nota: El signo negativo del caudal acumulado en la última estructura indica la salida del sistema.

En cuanto a las restricciones de diseño, se aplicaron las mismas condiciones establecidas para las demás metodologías: profundidad mínima de instalación de 1.20 m, profundidad máxima de 5.00 m, velocidad mínima de 0.50 m/s, velocidad máxima de 10.0 m/s, relación de llenado máxima (y/D) del 70%, esfuerzo cortante mínimo de 2 Pa, y selección de diámetros comerciales de acuerdo con los valores propuestos por Li & Matthew (1990). Esta consistencia asegura que las diferencias observadas en los resultados sean atribuibles exclusivamente al enfoque de optimización implementado por UTOPIA.

A diferencia de la metodología HEC-22, en la cual el diseño se desarrolla de manera secuencial tramo a tramo, UTOPIA evalúa el sistema de forma global, considerando simultáneamente todos los tramos y estructuras que conforman la serie. Este enfoque permite identificar configuraciones hidráulicamente viables que minimizan el costo total del sistema, particularmente en términos de profundidades de excavación y selección de diámetros, sin requerir ajustes iterativos manuales por parte del diseñador.

Finalmente, dado que UTOPIA no calcula de forma interna el costo de las estructuras de conexión, estos fueron estimados posteriormente mediante la aplicación de las ecuaciones de costo presentadas en el Capítulo 2, garantizando una evaluación económica completa y consistente con las demás metodologías analizadas.

3.2.1.3 Aplicación parcial de la metodología HEC-22

La aplicación parcial de la metodología HEC-22 para el caso de las series de 10 tubos se desarrolló siguiendo el enfoque comúnmente adoptado en la práctica profesional por diversas empresas prestadoras del servicio público de alcantarillado, el cual se centra exclusivamente en el cálculo de las pérdidas de energía localizadas en las estructuras de conexión, sin implementar de manera integral el proceso secuencial de diseño propuesto por la HEC-22.



Para la implementación de este enfoque se utilizó una hoja de cálculo desarrollada en Excel, diseñada para integrar de forma sistemática las ecuaciones de pérdidas de energía en cámaras de unión descritas en la Sección 2.2.4 de esta tesis. Esta herramienta permite evaluar el comportamiento hidráulico del sistema bajo un conjunto definido de condiciones geométricas e hidráulicas, manteniendo la trazabilidad del cálculo y facilitando su aplicación repetitiva para múltiples escenarios.

En esta metodología, los datos de entrada al modelo corresponden fundamentalmente a las condiciones del terreno y del sistema, las cuales son definidas previamente por el diseñador. Entre estos datos se incluyen: la elevación del terreno y su pendiente longitudinal, el caudal que ingresa a cada pozo, las coordenadas espaciales de las estructuras de conexión, y la pendiente asignada a cada tramo de tubería, la cual es seleccionada explícitamente por el diseñador como parte del proceso de diseño. A partir de estas condiciones, se define el diámetro de la tubería que permita transportar el caudal correspondiente cumpliendo con las restricciones hidráulicas y constructivas establecidas.

La Figura 3-7 presenta un pantallazo de la hoja de cálculo correspondiente al módulo de cálculo de pérdidas de energía en estructuras de conexión, en el cual se determinan las energías específicas iniciales y se aplican los ajustes asociados a la configuración geométrica de la cámara, el ángulo de flujo entrante y las condiciones hidráulicas internas. En este bloque se implementan directamente las expresiones de la metodología HEC-22 para la estimación de pérdidas localizadas.

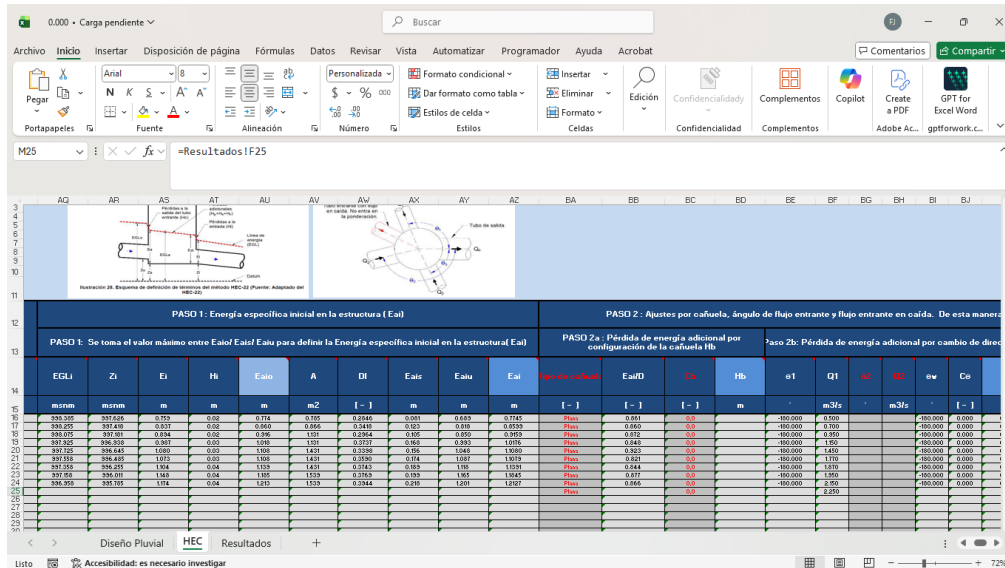
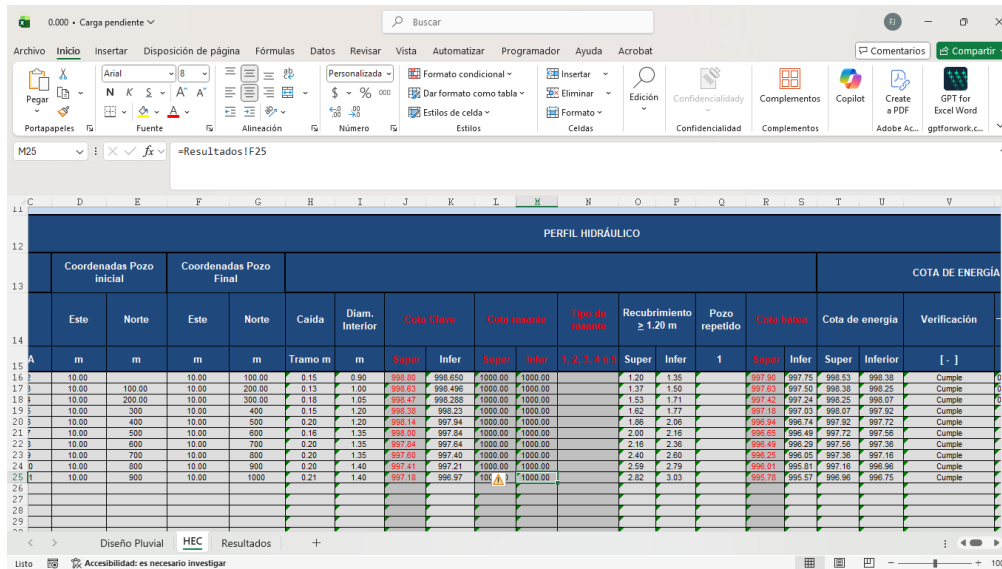


Figura 3-7. Módulo de cálculo de pérdidas de energía en estructuras de conexión

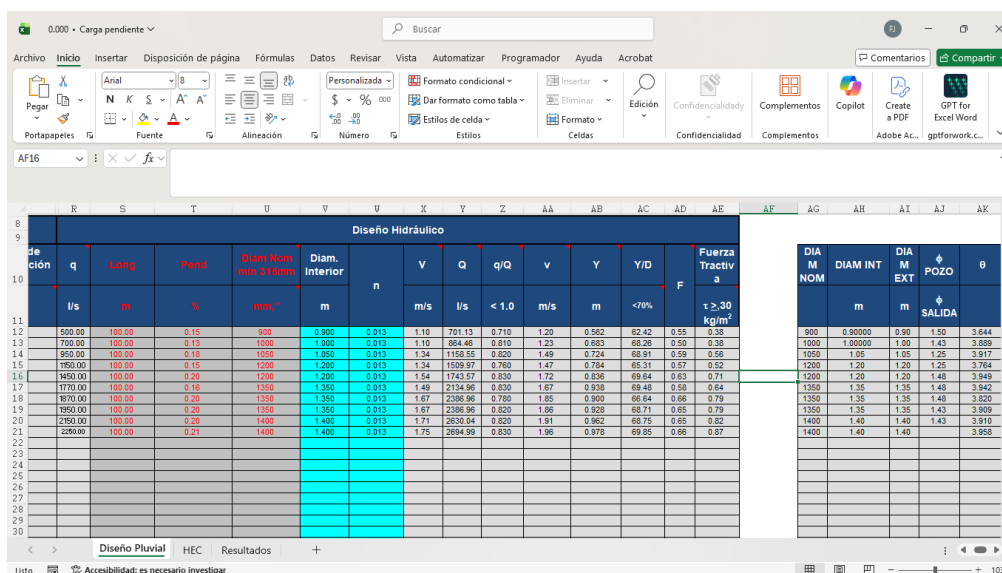
En la Figura 3-8 se muestra el módulo de verificación del perfil hidráulico del sistema, donde, a partir de las coordenadas de los pozos, las elevaciones del terreno y las pendientes adoptadas para las tuberías, se evalúan las profundidades de instalación, los recubrimientos mínimos y el cumplimiento de los criterios geométricos definidos para el diseño. Este análisis permite verificar que la solución propuesta sea compatible con las restricciones constructivas impuestas.

PERFIL HIDRÁULICO																
Coordenadas Pozo inicial				Coordenadas Pozo Final				COTA DE ENERGÍA								
Este	Norte	Este	Norte	Caida	Diam. Interior	Cota Cava Super	Cota Cava Infer	Cota resaca Super	Cota resaca Infer	Tipo de resaca	Recubrimiento ≥ 1.20 m	Pozo repetido	Cota Inverta Super	Cota de energía Inferior	Verificación	
m	m	m	m	Tramo m	m	Super	Infer	Super	Infer	1, 2, 3, 4 o 5	Super	Infer	Super	Inferior	[-]	
10.00	10.00	10.00	100.00	0.15	0.90	998.80	998.650	1000.00	1000.00	1.20	1.35	1	997.90	997.75	998.38	Cumple
10.00	100.00	10.00	200.00	0.13	1.00	998.63	998.496	1000.00	1000.00	1.37	1.50		997.63	997.50	998.30	Cumple
10.00	200.00	10.00	300.00	0.18	1.05	998.47	998.285	1000.00	1000.00	1.53	1.71		997.42	997.24	998.25	Cumple
10.00	300.00	10.00	400.00	0.15	1.20	998.38	998.23	1000.00	1000.00	1.62	1.77		997.18	997.03	997.92	Cumple
10.00	400.00	10.00	500.00	0.20	1.20	998.14	997.94	1000.00	1000.00	1.85	2.06		996.94	996.74	997.92	Cumple
10.00	500.00	10.00	600.00	0.16	1.35	998.00	997.84	1000.00	1000.00	2.00	2.16		996.65	996.49	997.74	Cumple
10.00	600.00	10.00	700.00	0.20	1.35	997.64	997.64	1000.00	1000.00	2.16	2.36		996.49	996.29	997.56	Cumple
10.00	700.00	10.00	800.00	0.20	1.35	997.60	997.40	1000.00	1000.00	2.40	2.60		996.25	996.05	997.16	Cumple
10.00	800.00	10.00	900.00	0.20	1.40	997.41	997.21	1000.00	1000.00	2.59	2.79		996.01	995.81	996.99	Cumple
10.00	900.00	10.00	1000.00	0.21	1.40	997.18	996.97	1000.00	1000.00	2.82	3.03		995.78	995.57	996.96	Cumple

Figura 3-8. Módulo de verificación del perfil hidráulico del sistema

Finalmente, la Figura 3-9 ilustra el módulo de diseño hidráulico de las tuberías, en el cual, para una pendiente definida por el diseñador, se selecciona el diámetro interno que permita transportar el caudal asignado cumpliendo simultáneamente con los límites de velocidad, relación de llenado, esfuerzo cortante mínimo y demás criterios hidráulicos establecidos. Este proceso se realiza de forma iterativa, ajustando la pendiente y el diámetro hasta alcanzar una solución hidráulicamente aceptable.



Diseño Hidráulico														
De	q	Long	Pend	Diam Nom (31.0mm)	Diam. Interior	n	V	Q	q/Q	v	Y	Y/D	Fuerza Tractiva	
cción	l/s	m	%	mm ⁴	m		m/s	l/s	< 1.0	m/s	m	< 70%	F	
													$\tau > 30$ kg/m ²	
12	500.00	100.00	0.15	900	0.900	0.013	1.10	701.13	0.710	1.20	0.562	62.42	0.55	0.38
13	700.00	100.00	0.13	1000	1.000	0.013	1.10	864.46	0.810	1.23	0.683	66.26	0.50	0.38
14	950.00	100.00	0.18	1050	1.050	0.013	1.34	1158.55	0.820	1.49	0.724	68.91	0.59	0.58
15	1250.00	100.00	0.15	1200	1.200	0.013	1.34	1599.97	0.760	1.47	0.794	65.31	0.57	0.52
16	1450.00	100.00	0.20	1200	1.200	0.013	1.54	1743.57	0.830	1.72	0.836	69.64	0.63	0.71
17	1770.00	100.00	0.18	1350	1.350	0.013	1.49	2134.96	0.830	1.67	0.938	69.48	0.59	0.64
18	1970.00	100.00	0.20	1350	1.350	0.013	1.67	2386.96	0.760	1.95	0.900	66.64	0.66	0.79
19	1850.00	100.00	0.20	1350	1.350	0.013	1.67	2386.96	0.820	1.86	0.928	66.71	0.65	0.79
20	2180.00	100.00	0.20	1400	1.400	0.013	1.71	2630.04	0.820	1.91	0.962	66.75	0.65	0.82
21	2260.00	100.00	0.21	1400	1.400	0.013	1.75	2694.99	0.830	1.96	0.976	69.95	0.66	0.87

Figura 3-9. Módulo de diseño hidráulico de las tuberías

A diferencia de las metodologías basadas en herramientas computacionales como StormCAD y UTOPIA, en las cuales la pendiente de las tuberías es determinada automáticamente como parte del



proceso de diseño, en la aplicación parcial de la metodología HEC-22 la definición de la pendiente y del diámetro recae directamente en el criterio del diseñador. En consecuencia, el proceso de diseño depende en mayor medida de ajustes manuales iterativos, lo que introduce una mayor dependencia del criterio técnico y de la experiencia del proyectista.

Si bien este enfoque no permite una optimización global del sistema ni la evaluación simultánea de todas las variables de diseño, su simplicidad operativa y su amplia utilización en la práctica lo convierten en un punto de referencia relevante para evaluar las diferencias entre un diseño basado en criterios manuales y aquellos apoyados en procesos automatizados u optimizados.

3.2.2 Series de 20 Tubos

El segundo subcaso del Caso de Estudio 2 corresponde al análisis de series conformadas por 20 tramos de tubería, con el objetivo de evaluar el comportamiento de las metodologías de diseño frente a un sistema de mayor longitud total y un mayor número de estructuras de conexión. Este subcaso permite analizar el efecto acumulativo de las pérdidas de energía, la variabilidad geométrica y la distribución de caudales sobre el desempeño hidráulico, económico y ambiental de cada enfoque metodológico.

La aplicación de las tres metodologías de diseño consideradas —aplicación completa de la metodología HEC-22, diseño optimizado mediante el programa UTOPIA y aplicación parcial de la metodología HEC-22— se realizó siguiendo exactamente el mismo procedimiento metodológico descrito para las series de 10 tubos en la Sección 3.2.1. En consecuencia, no se repite en esta sección el desarrollo detallado de cada metodología, dado que las diferencias entre ambos subcasos no radican en el enfoque de diseño, sino en las características geométricas e hidráulicas del sistema analizado.

Las condiciones del terreno, incluyendo las elevaciones y las configuraciones de pendiente longitudinal consideradas, se mantuvieron idénticas a las utilizadas en el caso de las series de 10 tubos. De esta manera, se garantiza que las diferencias observadas en los resultados estén asociadas exclusivamente al incremento en la longitud del sistema y a la distribución de caudales, y no a variaciones en las condiciones topográficas.

En este subcaso, la longitud entre pozos se definió de forma variable, adoptando valores comprendidos entre 60 m y 120 m, con el fin de introducir una mayor heterogeneidad geométrica en el sistema y aproximar el análisis a condiciones más representativas de redes reales de alcantarillado urbano. Los caudales de entrada en cada estructura fueron asignados dentro de un rango comprendido entre 0.05 m³/s y 0.10 m³/s, manteniendo un orden de magnitud consistente con sistemas reales. El caudal total de salida del sistema fue de 1.75 m³/s.

Al igual que en el subcaso anterior, se utilizaron tuberías de concreto con un coeficiente de Manning (0.013), y se aplicaron las mismas restricciones hidráulicas y constructivas: profundidad mínima de instalación de 1.20 m, profundidad máxima de 5.00 m, velocidad mínima de 0.50 m/s, velocidad máxima de 10.0 m/s, relación de llenado máxima del 70%, esfuerzo cortante mínimo de 2 Pa y



selección de diámetros comerciales de acuerdo con los valores propuestos por Li & Matthew. Las restricciones del diseño de encuentran en la Tabla 3-10.

De esta manera, el análisis de las series de 20 tubos se concibe como una extensión directa del caso de las series de 10 tubos, orientada a evaluar la robustez y consistencia de las metodologías de diseño frente a un aumento en la complejidad geométrica del sistema, manteniendo inalterado el marco metodológico previamente establecido.

3.2.3 Variantes de aplicación de la metodología HEC-22 en el Caso de Estudio 2

Para el desarrollo del Caso de Estudio 2, la metodología HEC-22 fue aplicada inicialmente mediante el uso del software StormCAD, siguiendo el procedimiento estándar descrito en la Sección 2.2 y sin introducir modificaciones adicionales a los criterios de diseño implementados por el programa. Esta configuración corresponde al caso base de aplicación de la metodología HEC-22 y constituye la referencia principal para la comparación con las demás metodologías.

Adicionalmente, con el fin de evaluar de manera aislada la influencia de ciertas decisiones geométricas sobre los resultados obtenidos, se consideraron dos variantes controladas de la aplicación de la metodología HEC-22 en StormCAD. En la primera variante, se impuso como condición que la cota de batea de salida de la última tubería coincidiera con la obtenida mediante la metodología UTOPIA. En la segunda variante, se fijó la pendiente de las tuberías al valor de pendiente promedio adoptado por la metodología UTOPIA para el mismo escenario.

Estas variantes no constituyen metodologías independientes, sino que corresponden a escenarios de ajuste dentro de la misma metodología HEC-22, cuyo propósito es analizar la sensibilidad de los resultados frente a decisiones específicas de diseño, particularmente aquellas relacionadas con la definición del perfil hidráulico y la pendiente longitudinal del sistema. En todos los casos, el análisis se realizó manteniendo constantes las demás condiciones del diseño, tales como los caudales, el material de las tuberías y las restricciones hidráulicas.

3.3 Caso de Estudio 3: Redes Complejas

El tercer caso de estudio corresponde al análisis de redes de alcantarillado pluvial de configuración compleja, caracterizadas por la presencia de múltiples ramales, nodos de confluencia y estructuras de conexión interdependientes, las cuales representan de manera más fiel las condiciones reales de los sistemas de drenaje urbano. A diferencia de los casos de estudio basados en configuraciones en serie, estas redes no pueden ser descritas mediante una secuencia lineal de tramos, lo que incrementa de forma significativa la complejidad del proceso de diseño hidráulico.

El objetivo de este caso de estudio es evaluar el desempeño de las metodologías de diseño que permiten abordar redes complejas de manera integral, específicamente la aplicación completa de la metodología HEC-22, implementada mediante herramientas computacionales, y el diseño optimizado mediante el programa UTOPIA. Tal como se expuso en la Sección 2.4, la aplicación parcial de la



metodología HEC-22, basada en hojas de cálculo para el análisis de pérdidas de energía en estructuras de conexión, se encuentra limitada a sistemas de alcantarillado en serie. En consecuencia, este enfoque no es aplicable al diseño de redes complejas y no se considera dentro de este caso de estudio.

Para este análisis se emplean tres redes complejas, seleccionadas con el propósito de abarcar distintos contextos y escalas de aplicación. La primera corresponde a la Red Chicó Sur, una red de alcantarillado pluvial localizada en la ciudad de Bogotá, Colombia, representativa de un sistema urbano real con restricciones topográficas, constructivas y operativas propias del contexto local. Las otras dos redes corresponden a redes patrón de referencia internacional, ampliamente utilizadas en la literatura técnica: la Red Moeni y la Red Li & Matthew, las cuales permiten contrastar los resultados obtenidos en un sistema real con aquellos derivados de configuraciones teóricas y estandarizadas.

En este caso de estudio se mantienen los mismos criterios hidráulicos, materiales y restricciones de diseño definidos en los casos anteriores, con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados. No obstante, el énfasis del análisis se centra en la capacidad de cada metodología para gestionar la complejidad del sistema, particularmente en lo relativo a la acumulación simultánea de caudales, la coherencia del perfil hidráulico a nivel de red y las implicaciones técnicas, económicas y ambientales derivadas de las decisiones de diseño adoptadas.

Las secciones siguientes describen las características generales de las redes analizadas y la aplicación de las metodologías de diseño consideradas, sirviendo como base para el análisis comparativo desarrollado en los capítulos posteriores.

3.3.1 Descripción de las redes complejas

Para el desarrollo del Caso de Estudio 3 se seleccionaron tres redes de alcantarillado pluvial de configuración compleja, con el objetivo de evaluar el desempeño de las metodologías de diseño consideradas bajo distintos contextos de aplicación, escalas y niveles de realismo. Las redes analizadas incluyen una red urbana real y dos redes patrón de referencia académica ampliamente utilizadas en la literatura especializada.

Las tres redes fueron modeladas y diseñadas aplicando los mismos criterios hidráulicos, constructivos y de material definidos para el Caso de Estudio 2, con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados. En todos los casos se consideraron tuberías de concreto con coeficiente de Manning $n=0.013$, y se impusieron las siguientes restricciones hidráulicas y constructivas: profundidad mínima de instalación de 1.20 m, profundidad máxima de 5.00 m, velocidad mínima de flujo de 0.50 m/s, velocidad máxima de 10.0 m/s, relación de llenado máxima $y/D = 70\%$, esfuerzo cortante mínimo de 2 Pa y selección de diámetros comerciales de acuerdo con los valores propuestos por Li & Matthew (1990). Ver Tabla 3-10.

A continuación, se describen las características generales de cada una de las redes analizadas.



3.3.1.1 Red Chicó Sur

La Red Chicó Sur corresponde a una red de alcantarillado pluvial real, localizada en la ciudad de Bogotá, Colombia, y representa un sistema urbano con condiciones geométricas, topográficas y operativas propias del contexto local. Esta red está compuesta por 160 tuberías y 108 estructuras de unión, lo que la convierte en el sistema de mayor tamaño y complejidad analizado en esta tesis.

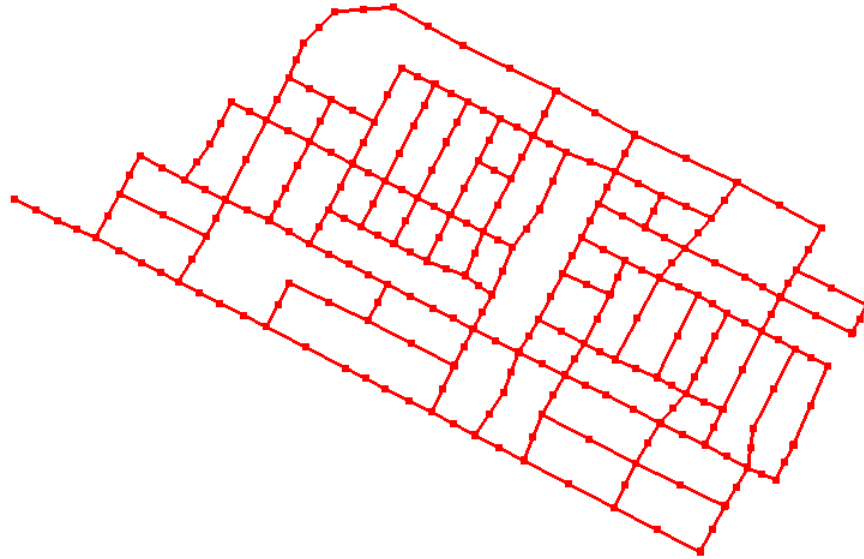


Figura 3-10. Diagrama de la Red Chicó Sur

La configuración de la red presenta múltiples ramales, confluencias y cambios de dirección, reflejando una estructura típica de drenaje urbano consolidado. La inclusión de esta red permite evaluar el desempeño de las metodologías de diseño frente a un sistema real, en el cual las decisiones de diseño tienen implicaciones directas sobre profundidades de excavación, costos de infraestructura y cumplimiento de criterios hidráulicos en un entorno urbano restringido.

3.3.1.2 Red Moeni

La Red Moeni corresponde a una red patrón de referencia internacional, utilizada con fines académicos para la evaluación y comparación de metodologías de diseño de redes de alcantarillado. Este sistema está conformado por 145 tuberías y 82 estructuras de unión, y presenta una configuración regular que facilita el análisis sistemático del comportamiento hidráulico de la red.

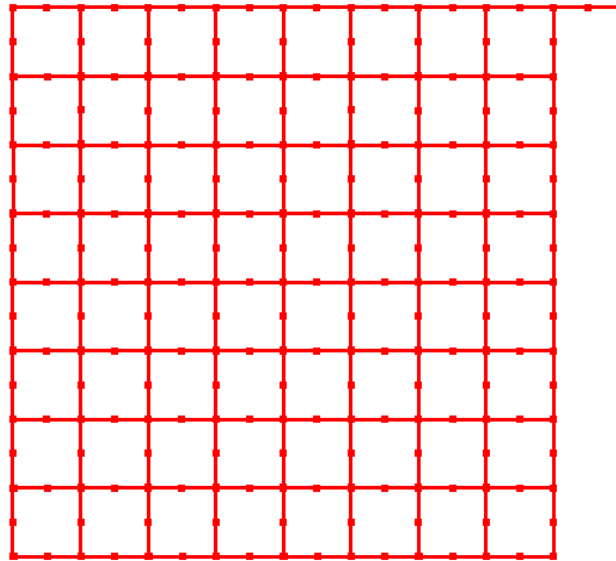


Figura 3-11. Diagrama de la Red Moeni

Al tratarse de una red teórica estandarizada, la Red Moeni permite aislar el efecto de la metodología de diseño sobre los resultados obtenidos, reduciendo la influencia de condicionantes externas propias de redes reales. Su inclusión en el análisis proporciona un punto de comparación intermedio entre un sistema urbano real y una red patrón de menor escala.

3.3.1.3 Red Li & Matthew

La Red Li & Matthew corresponde igualmente a una red patrón de referencia internacional, ampliamente utilizada en estudios académicos relacionados con el diseño y la optimización de redes de alcantarillado. Esta red está compuesta por 79 tuberías y 56 estructuras de unión, constituyendo el sistema de menor tamaño entre los analizados en este caso de estudio.

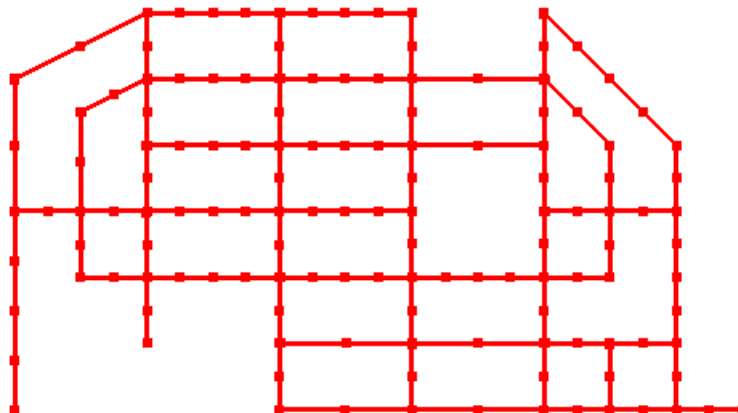


Figura 3-12 Diagrama de la Red Li & Matthew



Su configuración permite evaluar el comportamiento de las metodologías de diseño en una red compleja, pero de escala moderada, facilitando el análisis detallado de las decisiones de diseño adoptadas y sus efectos sobre el desempeño hidráulico, económico y ambiental del sistema.

3.3.1.4 Comentario Final

La utilización conjunta de una red urbana real y dos redes patrón académicas permite evaluar de manera integral la robustez, consistencia y aplicabilidad de las metodologías de diseño consideradas frente a distintos niveles de complejidad y realismo. En todos los casos, la aplicación de criterios hidráulicos homogéneos asegura que las diferencias observadas en los resultados puedan atribuirse principalmente al enfoque metodológico adoptado y no a variaciones en las condiciones de diseño.

3.3.2 Aplicación de la metodología HEC-22

La aplicación de la metodología HEC-22 en el Caso de Estudio 3 se realizó mediante la implementación completa de los procedimientos de diseño descritos en la tercera edición de la Hydraulic Engineering Circular No. 22, utilizando una herramienta computacional que permite abordar redes de alcantarillado de configuración compleja de manera integral. Para este propósito se empleó el software StormCAD, el cual incorpora de forma explícita los criterios hidráulicos y las ecuaciones de cálculo propuestas por la HEC-22.

El diseño de las tres redes complejas consideradas —Red Chicó Sur, Red Moeni y Red Li & Matthew— se llevó a cabo siguiendo un procedimiento metodológico uniforme, con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados. En todos los casos, los datos de entrada incluyeron la geometría completa de la red, las coordenadas y elevaciones de las estructuras de conexión, los caudales asignados a cada nodo, así como las restricciones hidráulicas y constructivas definidas previamente.

Adicionalmente, como parte de la configuración del modelo en el programa StormCAD, se definió de manera explícita el árbol hidráulico del sistema, el cual establece la estructura de conectividad y jerarquía de los tramos que conforman la red. Este árbol fue directamente extraído de los resultados obtenidos mediante la metodología UTOPIA, correspondiendo al árbol optimizado de cada red. De esta forma, el modelo implementado en StormCAD utiliza una topología previamente definida, lo que permite concentrar el análisis en el dimensionamiento hidráulico y geométrico del sistema.

Esta decisión metodológica responde a una limitación inherente de StormCAD y de la mayoría de las herramientas de diseño hidráulico disponibles, las cuales no cuentan con la capacidad de generar automáticamente el árbol óptimo de una red compleja. En la práctica profesional, la definición del árbol del sistema es una decisión que recae en el ingeniero diseñador y constituye un insumo previo al proceso de dimensionamiento hidráulico. En este sentido, el uso del árbol optimizado obtenido con UTOPIA no introduce un sesgo metodológico, sino que reproduce una condición habitual de diseño y permite asegurar la consistencia topológica entre las metodologías comparadas..



StormCAD permite modelar simultáneamente todos los tramos y nodos que conforman la red, ejecutando de manera automática el cálculo de caudales acumulados, el dimensionamiento hidráulico de las tuberías, las pérdidas de energía por fricción y las pérdidas localizadas en las estructuras de conexión. De esta forma, el software reproduce el proceso secuencial descrito en los capítulos 7.4 y 7.5 de la HEC-22, garantizando la coherencia del perfil hidráulico a nivel de red.

En el caso de redes complejas, una característica fundamental del proceso de diseño es la evaluación simultánea de múltiples confluencias y ramales, donde las decisiones adoptadas en un tramo influyen directamente en el comportamiento hidráulico de otros sectores de la red. La implementación de la metodología HEC-22 mediante StormCAD permite gestionar estas interdependencias de forma sistemática, asegurando el cumplimiento de los criterios hidráulicos establecidos en todos los tramos y estructuras del sistema.

Durante el proceso de diseño, el software determina automáticamente las pendientes, profundidades y diámetros de las tuberías, dentro de los límites definidos por el diseñador, ajustando iterativamente la solución hasta alcanzar un perfil hidráulico consistente y compatible con las restricciones impuestas. Este enfoque reduce la necesidad de ajustes manuales y permite analizar redes de gran tamaño sin comprometer la trazabilidad del proceso de cálculo.

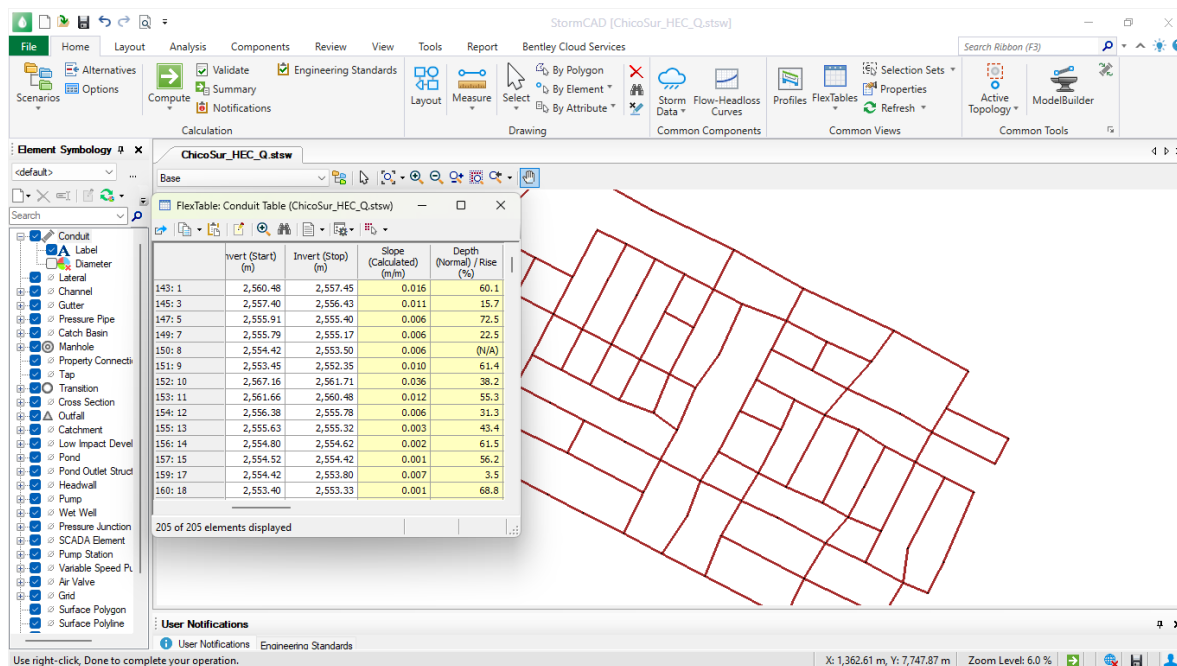


Figura 3-13. Vista general de la Red Chicó Sur

Como apoyo a la descripción del procedimiento, en la Figura 3-13 se presenta una vista general de la Red Chicó Sur modelada en StormCAD, en la cual se aprecia la configuración espacial de la red, la presencia de múltiples ramales y nodos de confluencia, así como la magnitud del sistema analizado.



Esta representación permite visualizar la complejidad geométrica que caracteriza a las redes evaluadas en este caso de estudio.

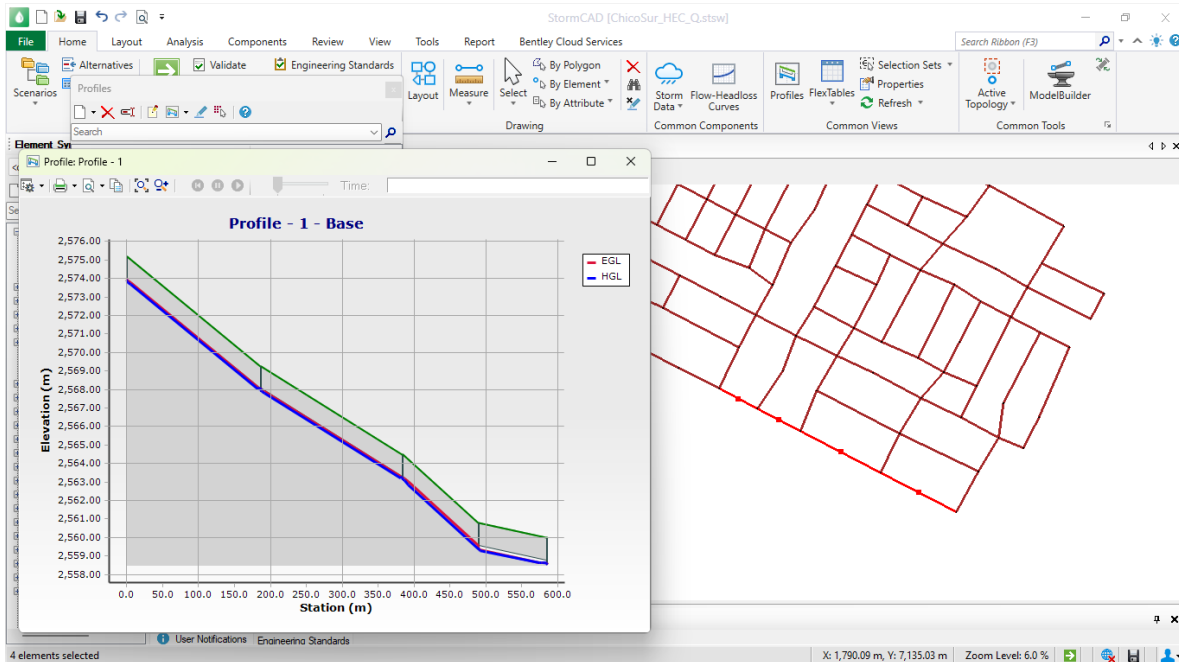


Figura 3-14. Perfil hidráulico de un tramo de la Red Chicó Sur

Adicionalmente, la Figura 3-14 muestra un ejemplo del perfil hidráulico obtenido para uno de los tramos de la red, donde se ilustran la línea de energía y la línea piezométrica calculadas de acuerdo con los criterios de la metodología HEC-22. Estas visualizaciones evidencian la capacidad de la herramienta para evaluar de forma simultánea el comportamiento hidráulico de la red y verificar el cumplimiento de las restricciones de diseño establecidas.

De esta manera, la aplicación de la metodología HEC-22 en redes complejas constituye un referente robusto para la comparación con otros enfoques de diseño, al permitir una evaluación integral del desempeño hidráulico, económico y ambiental de sistemas de alcantarillado pluvial de alta complejidad.

3.3.3 Variantes de aplicación de la metodología HEC-22 en el Caso de Estudio 3

De manera análoga a lo realizado en el Caso de Estudio 2, para el Caso de Estudio 3 se consideraron variantes controladas en la aplicación de la metodología HEC-22, con el propósito de evaluar la sensibilidad de los resultados frente a decisiones específicas de diseño geométrico. En primer lugar, se definió un caso base, correspondiente a la aplicación estándar de la metodología HEC-22 mediante StormCAD, sin introducir modificaciones adicionales a los criterios de diseño implementados por el programa.



Adicionalmente, se analizó uno variante de la aplicación de la metodología HEC-22. En esta se impuso como condición que la cota de batea de salida del sistema coincidiera con la obtenida a partir del diseño optimizado mediante UTOPIA. Las condiciones del diseño —incluyendo caudales, material de las tuberías, restricciones hidráulicas y topología del sistema— se mantuvieron constantes.

Esta variante no constituye un enfoque metodológico independiente, sino que corresponde a un escenario de ajuste dentro de la misma metodología HEC-22, cuyo objetivo es aislar el efecto de decisiones geométricas particulares sobre el desempeño hidráulico, económico y ambiental de la red. El resultado asociado a esta variante se presentan de forma diferenciada en el Capítulo 4, permitiendo comparar el comportamiento del caso base de la metodología HEC-22 frente al escenario ajustados y frente a la metodología UTOPIA en el contexto de redes complejas.

3.3.4 Aplicación de la metodología UTOPIA

La aplicación de la metodología de diseño optimizado mediante el programa UTOPIA para el Caso de Estudio 3 se realizó sobre las tres redes complejas analizadas —Red Chicó Sur, Red Moeni y Red Li & Matthew— utilizando un procedimiento metodológico uniforme, con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados frente a la aplicación de la metodología HEC-22 descrita en la Sección 3.3.2.

UTOPIA es una herramienta computacional orientada al diseño hidráulico optimizado de redes de alcantarillado, que implementa algoritmos de optimización global con el objetivo de minimizar el costo total del sistema, sujeto al cumplimiento de restricciones hidráulicas, geométricas y constructivas definidas por el diseñador. A diferencia de los enfoques secuenciales tradicionales, el programa evalúa de manera simultánea todos los tramos y estructuras que conforman la red, permitiendo capturar las interdependencias hidráulicas propias de sistemas de configuración compleja.

Tabla 3-14. Datos de entrada para UTOPIA - Caso 3 Red Chicó Sur

Estructura	Caudal [m ³ /s]	Caudal Acumulado [m ³ /s]	X	Y	Z
1	0.012	0.012	2145.39	7352.39	2561.93
2	0.022	0.034	1982.51	7441.01	2558.90
3	0.022	0.056	1784.49	7532.93	2557.41
4	0.021	0.077	1632.28	7617.99	2557.42
5	0.016	0.093	1452.89	7704.76	2555.87
6	0.012	0.105	1317.86	7779.49	2554.95
7	0.011	0.116	2233.12	7204.60	2568.56
8	0.015	0.131	2097.16	7271.09	2563.11
9	0.013	0.144	1932.99	7372.47	2557.93
10	0.013	0.157	1835.94	7416.57	2557.33



11	0.018	0.175	1747.32	7462.52	2556.90
12	0.014	0.189	1650.50	7499.21	2556.72
13	0.017	0.206	1588.00	7531.50	2556.62
14	0.013	0.219	1524.17	7564.57	2555.87
15	0.013	0.232	1460.84	7597.47	2555.78
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
108	0.017	1.525	667.44	7367.24	2551.46
109	-1.525	0.000	584.86	7408.61	2551.85

Nota: El signo negativo del caudal acumulado en la última estructura indica la salida del sistema.

Para cada una de las redes consideradas, se ingresó al modelo la geometría completa del sistema, incluyendo la disposición de nodos y tramos, las coordenadas y elevaciones de las estructuras de conexión, así como los caudales asignados a cada nodo. Adicionalmente, se definieron las mismas restricciones hidráulicas y constructivas utilizadas en los casos de estudio anteriores: profundidad mínima y máxima de instalación, límites de velocidad, relación de llenado máxima, esfuerzo cortante mínimo, material de las tuberías y conjunto de diámetros comerciales disponibles de acuerdo con los valores propuestos por Li & Matthew (1990).

Una vez definidos los datos de entrada, UTOPIA ejecutó el proceso de optimización considerando de forma conjunta todas las variables de diseño del sistema, tales como pendientes, diámetros y profundidades de excavación. Este enfoque permite identificar configuraciones hidráulicamente viables que satisfacen las restricciones impuestas y, al mismo tiempo, minimizan el costo total del sistema, particularmente en redes complejas donde las decisiones de diseño en un tramo influyen directamente sobre el comportamiento hidráulico de otros sectores de la red.

Es importante destacar que, al igual que en los casos anteriores, UTOPIA calcula de forma interna los costos asociados a las tuberías, mientras que los costos correspondientes a las estructuras de conexión no son estimados directamente por el programa. Por esta razón, una vez obtenidos los resultados hidráulicos del diseño optimizado, los costos de las estructuras de unión fueron determinados mediante la aplicación de las ecuaciones de costo presentadas en el Capítulo 2, garantizando una evaluación económica completa y consistente entre metodologías.

La aplicación de UTOPIA en redes complejas permite analizar de manera explícita las ventajas y limitaciones de un enfoque de diseño basado en optimización global frente a la metodología HEC-22, particularmente en lo relativo a la gestión de sistemas de gran escala, la reducción de profundidades de excavación y la integración simultánea de criterios técnicos, económicos y ambientales. Los resultados obtenidos constituyen una base fundamental para el análisis comparativo desarrollado en los capítulos posteriores.



3.4 Análisis de Ciclo de Vida

Con el fin de incorporar criterios ambientales en la evaluación comparativa de las metodologías de diseño analizadas, se desarrolló un análisis de ciclo de vida (ACV) orientado a la cuantificación de emisiones de carbono equivalente (CO₂-eq) asociadas a la construcción de sistemas de alcantarillado pluvial. El análisis se concibe como un ACV comparativo, cuyo objetivo no es estimar impactos absolutos de un proyecto específico, sino evaluar de manera consistente el efecto que las decisiones de diseño tienen sobre el impacto ambiental de las alternativas estudiadas.

3.4.1 Fuente de Información y cálculo original de las emisiones

Los factores de emisión utilizados en este estudio se derivan del trabajo de tesis de Ariza Mesa (2022), en el cual se desarrolla un análisis detallado del ciclo de vida de tuberías para sistemas hidráulicos urbanos, considerando las etapas de fabricación, transporte, instalación, operación y reciclaje. En dicho trabajo, las emisiones de CO₂-eq son calculadas mediante modelación de procesos productivos, energéticos y logísticos, apoyada en el uso de la herramienta especializada SimaPro y bases de datos de referencia internacional.

Para el caso específico de tuberías de concreto, Ariza estima las emisiones asociadas a la fabricación a partir del consumo energético del proceso productivo, la producción de cemento y acero de refuerzo, y los correspondientes factores de emisión. Las emisiones por transporte se calculan mediante la estimación de distancias recorridas desde el punto de fabricación hasta el sitio de instalación, expresadas en toneladas-kilómetro, y convertidas a CO₂-eq a partir del consumo de combustible. La etapa de instalación incluye el uso de maquinaria pesada y actividades constructivas a cielo abierto, mientras que la etapa de reciclaje considera el transporte del material hasta los puntos de aprovechamiento o disposición final.

Los resultados consolidados de este análisis se presentan en forma de emisiones totales de CO₂-eq por cada 100 m de tubería, para distintos diámetros, tal como se muestra en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15. Resultados de Ariza (2022). Emisiones de CO₂ [kg/100 m]

Diámetro [mm]	Fabricación	Transporte	Instalación	Reciclaje	Total
250	1047.1	10.5	10317	10	11384.6
350	1781.16	17.9	10840	17.1	12656.16
700	8130.27	68.7	12729	64.6	20992.57
900	12875.81	107	13257	101	26340.81

3.4.2 Transformación de los datos y ajuste funcional

A partir de los resultados reportados por Ariza, se realizó una transformación de unidades con el fin de expresar las emisiones en toneladas de CO₂-eq por metro lineal de tubería, lo cual permite su



aplicación directa a las soluciones de diseño obtenidas en esta tesis. La Tabla 3-16 presenta los valores transformados utilizados como base para el análisis.

Tabla 3-16. Datos Transformados. Emisiones de CO2 [Ton/m]

Diámetro [mm]	Fabricación	Transporte	Instalación	Reciclaje	Total
250	0.010471	0.000105	0.10317	0.0001	0.113846
350	0.0178116	0.000179	0.1084	0.000171	0.1265616
700	0.0813027	0.000687	0.12729	0.000646	0.2099257
900	0.1287581	0.00107	0.13257	0.00101	0.2634081

Si bien Ariza incluye la etapa de operación y mantenimiento, en el presente estudio dicha etapa no fue considerada. Esta decisión se fundamenta en que los sistemas analizados corresponden exclusivamente a redes de alcantarillado por gravedad, sin estaciones de bombeo, y en que las emisiones asociadas a la operación dependen fuertemente de supuestos relacionados con la vida útil, los regímenes hidráulicos y las estrategias de mantenimiento. Incluir esta etapa introduciría incertidumbre adicional y afectaría la comparabilidad entre metodologías, sin aportar información relevante para el objetivo central de este estudio, que es evaluar el impacto ambiental asociado a las decisiones de diseño.

En consecuencia, el análisis se limita a las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje, las cuales concentran la mayor proporción de emisiones asociadas a la infraestructura física del sistema.

Dado que los datos originales se encuentran disponibles únicamente para cuatro diámetros discretos, se realizó un ajuste mediante regresión polinómica de segundo grado para cada una de las etapas del ciclo de vida consideradas. La Figura 3-15 muestra las curvas ajustadas, evidenciando que las etapas de fabricación e instalación son las que presentan mayor contribución al impacto ambiental total.

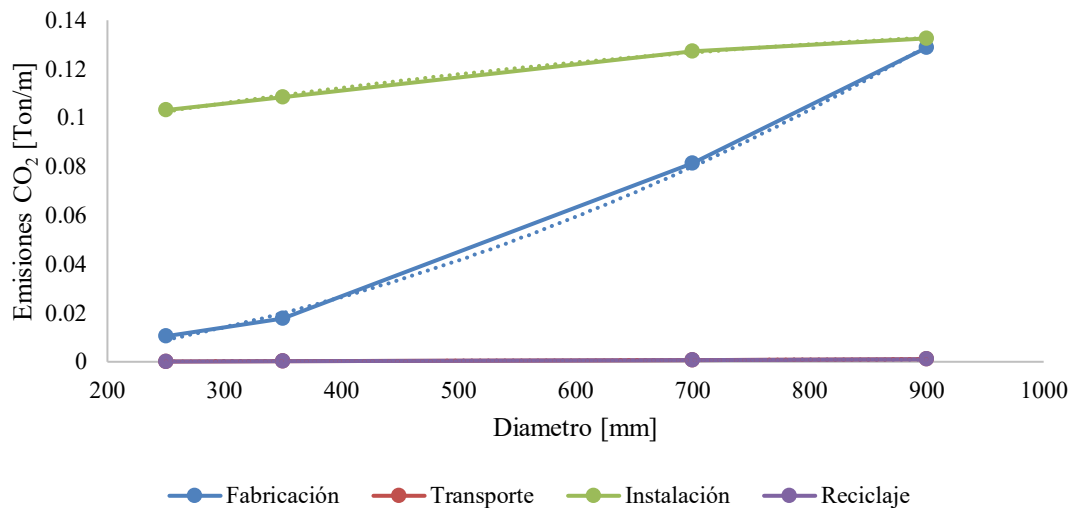


Figura 3-15. Ajuste de curvas de datos de emisión

Las ecuaciones obtenidas de la anterior Figura permiten expresar las emisiones unitarias de CO₂-eq como una función continua del diámetro de la tubería, de la forma:

$$E_i(D) = a_i D^2 + b_i D + c_i$$

donde $E_i(D)$ corresponde a las emisiones de la etapa i por metro lineal de tubería, y D es el diámetro. Los coeficientes de determinación obtenidos son elevados ($R^2 > 0.99$), lo cual indica un excelente ajuste a los datos originales. A continuación, se presentan las ecuaciones para cada etapa del análisis.

Fabricación:	$y = 1E-07x^2 + 3E-05x - 0.0063$	$R^2 = 0.9991$
Transporte:	$y = 1E-09x^2 + 3E-07x - 5E-05$	$R^2 = 0.9996$
Instalación:	$y = -4E-08x^2 + 9E-05x + 0.0828$	$R^2 = 0.9978$
Reciclaje:	$y = 1E-09x^2 + 3E-07x - 4E-05$	$R^2 = 0.9997$

3.4.3 Aplicación a los casos de estudio

Las ecuaciones ajustadas fueron aplicadas exclusivamente a los Casos de Estudio 2 y 3, correspondientes a configuraciones en serie y redes complejas, para las cuales se dispone de información detallada de longitudes y diámetros de tubería. Para cada tramo, las emisiones unitarias estimadas fueron multiplicadas por la longitud real de la tubería, y posteriormente agregadas para obtener las emisiones totales de cada alternativa de diseño.

Este procedimiento permite integrar el análisis de ciclo de vida de manera directa con los resultados hidráulicos y económicos, proporcionando una base cuantitativa para la comparación ambiental de las metodologías evaluadas.



3.5 Relación entre resultados de diseño y evaluación económica

Como resultado de la aplicación de las metodologías de diseño descritas en este capítulo, se obtienen para cada alternativa de diseño un conjunto de variables geométricas e hidráulicas que definen la configuración final del sistema. Entre estas variables se destacan, de manera particular, los diámetros seleccionados para cada tramo de tubería y las profundidades de excavación asociadas a la definición del perfil hidráulico, es decir, la profundidad de excavación de las cámaras de unión que conectan cada tubería entre sí.

Estas variables constituyen los datos de entrada fundamentales para la evaluación económica desarrollada en el capítulo siguiente, dado que los costos de construcción de sistemas de alcantarillado dependen directamente de la selección de diámetros comerciales y de las profundidades de excavación requeridas. En consecuencia, las diferencias observadas en los costos estimados entre metodologías no responden a supuestos económicos arbitrarios, sino que se derivan directamente de las decisiones de diseño adoptadas en cada enfoque metodológico.

De esta manera, la metodología planteada establece un vínculo explícito entre el diseño hidráulico, la configuración geométrica del sistema y la evaluación económica, permitiendo analizar de forma coherente el impacto que cada metodología de diseño tiene sobre los costos de construcción y, posteriormente, sobre el impacto ambiental asociado a la infraestructura resultante.



4. RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías de diseño descritas en el Capítulo 3, organizados de acuerdo con los casos de estudio analizados. Esta estructura permite evaluar de manera sistemática el desempeño de cada metodología bajo distintos niveles de complejidad del sistema, manteniendo la coherencia con el desarrollo metodológico previamente establecido.

Los resultados se agrupan en tres secciones principales correspondientes a: el Caso de Estudio 1, basado en un ejemplo de referencia de la HEC-22; el Caso de Estudio 2, conformado por sistemas en serie de distinta longitud; y el Caso de Estudio 3, correspondiente a redes de alcantarillado de configuración compleja. Dentro de cada caso de estudio se presentan, cuando es aplicable, los resultados asociados a la aplicación de la metodología HEC-22, el diseño optimizado mediante UTOPIA y la aplicación parcial de la metodología HEC-22, así como los resultados del análisis de emisiones de carbono equivalente.

Si bien el proceso de diseño hidráulico permite obtener variables fundamentales como diámetros de tubería, pendientes y profundidades de excavación, estos resultados se presentan en este capítulo principalmente como variables intermedias, en la medida en que constituyen los datos de entrada para la evaluación económica y ambiental. En este sentido, los resultados hidráulicos no se analizan de manera aislada, sino como el vínculo directo entre la metodología de diseño adoptada y los impactos económicos y ambientales asociados a cada alternativa.

El énfasis del capítulo se centra, por tanto, en la comparación de costos de construcción y en la estimación del impacto ambiental en términos de toneladas de carbono equivalente (CO₂-eq) derivadas de cada solución de diseño. Estas dos dimensiones representan los resultados clave de la presente tesis y permiten evaluar de manera integrada las ventajas y limitaciones de cada metodología, más allá del cumplimiento de los criterios hidráulicos tradicionales.

La presentación de los resultados se realiza de forma ordenada y consistente para cada caso de estudio, facilitando la posterior comparación transversal entre metodologías, la identificación de tendencias y la formulación del análisis crítico desarrollado en el Capítulo 5.

4.1 Resultados – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al Caso de Estudio 1, basado en un ejemplo de referencia desarrollado originalmente bajo la metodología HEC-22. Este caso constituye un escenario controlado que permite comparar el desempeño de las distintas metodologías de diseño analizadas bajo condiciones simplificadas, sirviendo como punto de partida para los casos de mayor complejidad abordados posteriormente.



Los resultados se presentan de forma comparativa para la aplicación completa de la metodología HEC-22, el diseño optimizado mediante UTOPIA y la aplicación parcial de la metodología HEC-22. Al igual que en las secciones posteriores, los resultados hidráulicos y geométricos se consideran principalmente como variables intermedias, en la medida en que definen los datos de entrada para la evaluación económica y ambiental.

En consecuencia, el énfasis de esta sección se centra en la comparación de costos de construcción y en la estimación de emisiones de carbono equivalente, manteniendo una presentación sintética de los resultados geométricos necesarios para interpretar dichas comparaciones. Los resultados detallados de cálculo se omiten del cuerpo principal del documento con el fin de privilegiar la claridad del análisis y la coherencia con el enfoque general de la tesis, sin embargo, se podrán encontrar en la sección de Anexos.

4.1.1 Resultados Hidráulicos y Geométricos

En este apartado se presentan los resultados hidráulicos y geométricos obtenidos para el Caso de Estudio 1, considerando la aplicación de la metodología HEC-22 y el diseño optimizado mediante UTOPIA. Tal como se indicó previamente, estos resultados se presentan de forma sintética, en la medida en que constituyen las variables de entrada para la evaluación económica y ambiental desarrollada en las secciones posteriores.

La Tabla 4-1 presenta los rangos de diámetros seleccionados y las pendientes adoptadas por cada metodología, mientras que la Tabla 4-2 resume las profundidades de excavación asociadas a las estructuras de unión. Esta separación permite analizar de forma diferenciada las decisiones de dimensionamiento hidráulico y sus implicaciones geométricas.

Tabla 4-1. Resultados de diámetros y pendientes – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

Metodología	Diámetro Mínimo [m]	Diámetro Máximo [m]	Pendiente Mínima [m/m]	Pendiente Máxima [m/m]	Pendiente Promedio [m/m]
HEC-22	0.46	0.61	0.001	0.030	0.0178
UTOPIA	0.46	0.46	0.027	0.070	0.0550

Tabla 4-2. Resultados de profundidades de excavación – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

Metodología	Profundidad Mínima de Cámara [m]	Profundidad Máxima de Cámara [m]
HEC-22	0.46	0.61
UTOPIA	0.46	0.46

Los resultados evidencian diferencias claras en las estrategias de diseño adoptadas por cada metodología. En el caso de la metodología HEC-22, se observa una mayor variabilidad en los diámetros seleccionados, con valores que oscilan entre 0.46 m y 0.61 m. Esta variabilidad se asocia a un enfoque de diseño que privilegia el cumplimiento de los criterios hidráulicos mediante ajustes



combinados de diámetro y pendiente, permitiendo el uso de pendientes relativamente bajas en algunos tramos del sistema.

Por su parte, el diseño optimizado mediante UTOPIA tiende a seleccionar un diámetro constante mínimo para todos los tramos del sistema, compensando esta decisión mediante la adopción de pendientes significativamente mayores. Este comportamiento se refleja en los valores de pendiente promedio, que para UTOPIA resultan aproximadamente tres veces superiores a los obtenidos con la metodología HEC-22. Esta estrategia permite satisfacer las restricciones hidráulicas impuestas sin incrementar el diámetro de las tuberías.

En términos de profundidades de excavación, ambas metodologías presentan valores máximos similares, del orden de 5 m, lo cual sugiere que, aun cuando las estrategias de diseño difieren, las condiciones geométricas del sistema imponen límites comparables en los puntos más profundos. No obstante, UTOPIA presenta una profundidad mínima de cámara ligeramente menor, lo cual puede traducirse en reducciones puntuales de costos de excavación en algunos tramos del sistema.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que las diferencias entre metodologías se manifiestan principalmente en la combinación de diámetros y pendientes adoptadas, y no tanto en los rangos extremos de profundidad. Estas diferencias geométricas e hidráulicas constituyen la base para las variaciones observadas posteriormente en los costos de construcción y en las emisiones de carbono equivalente asociadas a cada alternativa de diseño.

4.1.2 Resultados Económicos

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación económica correspondiente al Caso de Estudio 1, obtenidos a partir de las configuraciones geométricas y hidráulicas definidas mediante la aplicación de las metodologías HEC-22 y UTOPIA. Tal como se indicó en el Capítulo 3, los costos de construcción se estimaron a partir de los diámetros de tubería seleccionados y las profundidades de excavación resultantes, los cuales constituyen los principales factores que determinan el costo del sistema.

La Tabla 4-3 resume los costos totales asociados a cada metodología, desagregados en los dos componentes principales considerados en este caso de estudio: tuberías y estructuras de unión.

Tabla 4-3. Costos de Construcción – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

Metodología	Costo de Cámara de Unión [¥]	Costo Tuberías [¥]	Costo Total [¥]
HEC-22	1 129	20 675	21 804
UTOPIA	1 472	19 770	21 242

Los resultados muestran que, a pesar de que la metodología UTOPIA presenta mayores costos asociados a las cámaras de unión, el costo total del sistema resulta ligeramente inferior al obtenido mediante la metodología HEC-22. Esta diferencia se explica principalmente por la reducción en el



costo de las tuberías, asociada al uso de un diámetro constante mínimo en todos los tramos del sistema, tal como se evidenció en la Sección 4.1.1.

En contraste, la metodología HEC-22 presenta un mayor costo en el componente de tuberías debido a la selección de diámetros variables, que en algunos tramos alcanzan valores superiores. Sin embargo, esta estrategia se ve parcialmente compensada por menores costos en las estructuras de unión, asociados a pendientes más moderadas y a una menor variabilidad en las profundidades de excavación.

El análisis desagregado de costos pone de manifiesto que las diferencias económicas entre metodologías no obedecen a un único factor, sino a la combinación de decisiones de diseño adoptadas en cada enfoque. En particular, la metodología UTOPIA prioriza la reducción de costos de tubería mediante el uso de diámetros mínimos, mientras que la metodología HEC-22 distribuye el ajuste hidráulico entre diámetro y pendiente, generando un equilibrio distinto entre los componentes del costo total.

4.1.3 Resultados de Emisiones de Carbono

En esta sección se presentan los resultados del análisis de emisiones de carbono equivalente (CO₂-eq) correspondientes al Caso de Estudio 1, obtenidos a partir de la aplicación del análisis de ciclo de vida descrito en la Sección 3.4. Tal como se indicó previamente, las emisiones se estiman como una función directa de los diámetros de tubería seleccionados y de las longitudes de los tramos, por lo que reflejan de manera explícita el efecto de las decisiones de diseño adoptadas por cada metodología.

La Tabla 4-4 presenta las emisiones totales de carbono equivalente asociadas a cada metodología de diseño considerada.

Tabla 4-4. Emisiones totales de carbono equivalente - Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

Metodología	Emisiones Totales [t CO₂-eq]
HEC-22	34.14
UTOPIA	33.54

Los resultados muestran que ambas metodologías producen niveles de emisión comparables, con una ligera reducción en las emisiones totales asociadas al diseño optimizado mediante UTOPIA. Esta diferencia está directamente relacionada con la selección de diámetros de tubería, dado que, como se evidenció en la Sección 4.1.1, UTOPIA tiende a emplear un diámetro constante mínimo en todos los tramos del sistema.

Con el fin de profundizar en la contribución relativa de cada etapa del ciclo de vida, la Tabla 4-5 presenta el desglose de las emisiones totales por etapa para ambas metodologías.

**Tabla 4-5. Emisiones de carbono equivalente por etapa del ciclo de vida - Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22**

Metodología	Fabricación	Transporte	Instalación	Reciclaje
HEC-22	7.07	0.07	26.92	0.08
UTOPIA	6.63	0.07	26.77	0.07

El desglose por etapas evidencia que las fases de fabricación e instalación concentran la mayor proporción de las emisiones de carbono equivalente en ambos diseños, mientras que las contribuciones asociadas al transporte y al reciclaje resultan marginales en comparación. Este comportamiento es consistente con la literatura especializada y refuerza la relevancia de las decisiones de diseño relacionadas con el dimensionamiento de las tuberías.

En términos generales, los resultados indican que, para este caso de estudio, las diferencias en emisiones de carbono entre metodologías son moderadas, lo cual sugiere que la evaluación ambiental debe interpretarse de manera conjunta con los resultados económicos para establecer comparaciones integrales entre alternativas de diseño.

4.2 Resultados – Caso de Estudio 2: Series de Tubos

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al Caso de Estudio 2, el cual analiza sistemas de alcantarillado pluvial configurados como series de tuberías, considerando dos escenarios de complejidad creciente: series conformadas por 10 tubos y series conformadas por 20 tubos. Este caso de estudio permite evaluar de manera sistemática el efecto de la longitud del sistema, la distribución de caudales y la acumulación progresiva de pérdidas de energía sobre los resultados obtenidos mediante las distintas metodologías de diseño.

Los resultados se presentan de forma comparativa para las metodologías de aplicación completa de la HEC-22, diseño optimizado mediante UTOPIA y aplicación parcial de la metodología HEC-22, manteniendo constantes las condiciones de terreno, material y restricciones hidráulicas. De esta manera, las diferencias observadas entre alternativas pueden atribuirse directamente a las decisiones de diseño propias de cada enfoque metodológico.

Si bien se presentan resultados hidráulicos y geométricos básicos, tales como diámetros seleccionados y profundidades de excavación, estos se consideran principalmente como variables intermedias que sirven de base para la evaluación económica y ambiental. En consecuencia, el énfasis del análisis se centra en la comparación de costos de construcción y en la estimación de emisiones de carbono equivalente, las cuales constituyen los indicadores clave para evaluar el desempeño relativo de cada metodología en este caso de estudio.

La sección se organiza en tres partes: en primer lugar, se presentan los resultados hidráulicos y geométricos relevantes; posteriormente, los resultados económicos asociados a cada alternativa de diseño; y finalmente, se exponen los resultados del análisis de ciclo de vida en términos de emisiones de CO₂-eq.



4.2.1 Resultados Hidráulicos y Geométricos

En esta sección se presentan los resultados hidráulicos y geométricos correspondientes al Caso de Estudio 2, el cual analiza sistemas de alcantarillado pluvial configurados como series de tuberías, considerando un conjunto de diez terrenos con pendientes variables. Estos terrenos fueron utilizados como escenarios paramétricos con el fin de evaluar el comportamiento de las distintas metodologías de diseño frente a variaciones en la pendiente longitudinal del terreno.

Dado el volumen de información generado, en el cuerpo del documento se presentan únicamente indicadores geométricos representativos, mientras que los resultados detallados para cada tramo y cada escenario analizado se incluyen en los anexos. Con el fin de ilustrar de manera clara la relación entre pendiente del terreno, selección de diámetros y estrategia de diseño adoptada por cada metodología, la Tabla 4-6 presenta un subconjunto de los resultados obtenidos, correspondiente a los rangos de diámetros seleccionados y la pendiente promedio adoptada para cada terreno y metodología.

Tabla 4-6. Resultados de diámetros y pendiente - Caso de Estudio 2: Serie de 10 Tuberías

Terreno	Metodología	Diámetro Mínimo [m]	Diámetro Máximo [m]	Pendiente Promedio [m/m]
0% - 0.5%	HEC-22	1.0	1.4	0.28%
	UTOPIA	0.8	1.2	0.44%
	HEC-22 PARCIAL	0.90	1.20	0.36%
0% - 5%	HEC-22	1.0	1.4	2.53%
	UTOPIA	0.8	0.9	2.51%
	HEC-22 PARCIAL	0.90	1.20	2.40%
0.0%	HEC-22	1.0	1.8	0.10%
	UTOPIA	0.8	1.4	0.29%
	HEC-22 PARCIAL	0.90	1.40	0.18%
0.3%	HEC-22	0.8	1.4	0.35%
	UTOPIA	0.8	1.2	0.57%
	HEC-22 PARCIAL	0.80	1.35	0.33%
0.6%	HEC-22	0.7	1.2	0.61%
	UTOPIA	0.6	1.0	0.86%
	HEC-22 PARCIAL	0.70	1.20	0.65%
1.0%	HEC-22	0.6	1.0	1.07%
	UTOPIA	0.6	1.0	1.10%
	HEC-22 PARCIAL	0.60	1.05	1.03%
3.0%	HEC-22	0.5	0.9	3.00%
	UTOPIA	0.5	0.8	3.25%



	HEC-22 PARCIAL	0.50	0.90	3.02%
5.0%	HEC-22	0.5	0.8	5.00%
	UTOPIA	0.5	0.8	5.03%
	HEC-22 PARCIAL	0.45	0.80	5.00%
7.0%	HEC-22	0.5	0.8	7.00%
	UTOPIA	0.5	0.7	7.25%
	HEC-22 PARCIAL	0.45	0.80	7.00%
10.0%	HEC-22	0.4	0.7	10.00%
	UTOPIA	0.4	0.7	10.04%
	HEC-22 PARCIAL	0.40	0.70	10.00%

El análisis de la Tabla 4-6 permite identificar diferencias claras en las estrategias de diseño adoptadas por las metodologías evaluadas. En general, para pendientes bajas del terreno, la metodología HEC-22 tiende a emplear diámetros mayores combinados con pendientes reducidas, lo cual conduce a incrementos progresivos en la profundidad de excavación a lo largo del sistema. En contraste, la metodología UTOPIA compensa el uso de diámetros menores mediante la adopción de pendientes promedio más elevadas, manteniendo controladas las profundidades máximas de cámara.

A medida que la pendiente del terreno aumenta, las diferencias entre metodologías se reducen en términos de diámetro máximo, dado que las restricciones hidráulicas pueden satisfacerse con secciones menores. No obstante, persisten diferencias en la pendiente promedio adoptada, lo que refleja enfoques distintos frente al balance entre diámetro y pendiente como variables de diseño.

La aplicación parcial de la metodología HEC-22 presenta un comportamiento intermedio, combinando diámetros moderados con pendientes promedio superiores a las obtenidas mediante la aplicación completa de la metodología, pero inferiores a las adoptadas por UTOPIA. Este comportamiento se traduce en configuraciones geométricas que, en términos generales, limitan el incremento de las profundidades de excavación frente a los valores obtenidos con la metodología HEC-22 completa.

En conjunto, los resultados hidráulicos y geométricos obtenidos para este caso de estudio evidencian que las metodologías analizadas responden de manera distinta a las condiciones topográficas, y que dichas diferencias se manifiestan principalmente en la relación entre diámetro y pendiente adoptada, estableciendo la base para las variaciones observadas posteriormente en los costos de construcción y en las emisiones de carbono equivalente.

Los mismos indicadores fueron evaluados para series de 20 tuberías, manteniendo las mismas pendientes de terreno y restricciones hidráulicas. Dado que las tendencias observadas son consistentes con las presentadas para las series de 10 tuberías, los resultados correspondientes se presentan de manera agregada en las secciones de resultados económicos y ambientales.



4.2.2 Resultados Económicos

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación económica correspondiente al Caso de Estudio 2, el cual considera sistemas de alcantarillado pluvial configurados como series de tuberías, evaluados sobre un conjunto de diez terrenos con pendientes variables. Los costos de construcción se estimaron a partir de los diámetros de tubería seleccionados y de las profundidades de excavación resultantes para cada metodología, de acuerdo con los procedimientos descritos en el Capítulo 3.

Dado el carácter paramétrico del caso de estudio, los resultados económicos se presentan de forma agregada, considerando para cada metodología el costo mínimo, promedio y máximo obtenidos entre los diez terrenos analizados. Este enfoque permite capturar tanto el comportamiento representativo como la variabilidad asociada a los cambios en la pendiente del terreno, evitando una presentación excesivamente detallada de resultados individuales. Los valores completos por escenario se incluyen en los anexos del documento.

La Tabla 4.7 presenta los costos agregados de construcción correspondientes a las series de 10 tuberías, mientras que la Tabla 4.8 resume los resultados obtenidos para las series de 20 tuberías.

Tabla 4-7. Costos de Construcción – Caso de Estudio 2: Serie de 10 Tuberías

Metodología	Costo Mínimo [¥]	Costo Promedio [¥]	Costo Máximo [¥]
UTOPIA	52 435	112 877	202 848
HEC-22	91 230	150 351	240 827
HEC-22 C.B	82 286	147 112	237 783
HEC-22 P.P	80 018	166 655	299 062
HEC-22 Parcial	78 066	133 840	206 376

Tabla 4-8. Costos de Construcción – Caso de Estudio 2: Serie de 20 Tuberías

Metodología	Costo Mínimo [¥]	Costo Promedio [¥]	Costo Máximo [¥]
UTOPIA	58 803	141 066	274 156
HEC-22	136 440	217 936	339 294
HEC-22 C.B	131 743	204 002	337 504
HEC-22 P.P	123 242	319 518	1 250 705
HEC-22 Parcial	80 894	161 805	315 001

Los resultados muestran que, para ambas configuraciones, los costos de construcción presentan una variabilidad significativa en función de la pendiente del terreno y de la metodología de diseño empleada. En general, las metodologías que adoptan pendientes más elevadas y diámetros menores tienden a generar costos promedio inferiores, mientras que aquellas que privilegian pendientes reducidas mediante el uso de diámetros mayores presentan incrementos en el costo total del sistema, principalmente asociados a mayores profundidades de excavación.



Las variantes controladas de la metodología HEC-22 exhiben comportamientos intermedios entre el caso base de HEC-22 y la metodología UTOPIA, lo cual refleja el impacto directo de decisiones geométricas específicas —como la definición de la pendiente o la cota de salida— sobre los costos finales de construcción. Este resultado confirma que una parte significativa de las diferencias económicas observadas no se debe al método hidráulico en sí, sino a la estrategia de diseño geométrico adoptada.

En conjunto, los resultados económicos del Caso de Estudio 2 evidencian que la selección de la metodología de diseño influye de manera directa en el costo de construcción del sistema, y que dicha influencia se ve amplificada a medida que aumenta la pendiente del terreno y la longitud total del sistema. Estas diferencias constituyen un insumo fundamental para la comparación integral de metodologías que se desarrolla posteriormente en el Capítulo 5, en conjunto con los resultados ambientales.

4.2.3 Resultados de Emisiones de Carbono

En esta sección se presentan los resultados del análisis de emisiones de carbono equivalente (CO₂-eq) correspondientes al Caso de Estudio 2, el cual evalúa sistemas de alcantarillado pluvial configurados como series de tuberías, considerando un conjunto de diez terrenos con pendientes variables. Las emisiones se estimaron de acuerdo con el procedimiento descrito en la Sección 3.4, a partir de los diámetros de tubería seleccionados y las longitudes de los tramos, para las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje.

Dado el carácter paramétrico del caso de estudio, los resultados se presentan de forma agregada, considerando para cada metodología las emisiones mínimas, promedio y máximas obtenidas entre los diez terrenos analizados. Este enfoque permite capturar tanto el comportamiento representativo como la variabilidad asociada a la pendiente del terreno, manteniendo una presentación clara y comparable. Los resultados detallados por escenario individual se incluyen en los anexos del documento.

La Tabla 4-9 presenta las emisiones agregadas correspondientes a las series de 10 tuberías, mientras que la Tabla 4-10 resume los resultados obtenidos para las series de 20 tuberías. En ambos casos, se incluye adicionalmente el desglose promedio de emisiones por etapa del ciclo de vida.

Tabla 4-9. Emisiones agregadas de carbono equivalente – Caso 2: Serie de 10 tuberías

Metodología	Emisiones Mín	Emisiones Prom	Emisiones Máx	Fabricación	Transporte	Instalación	Reciclaje
UTOPIA	171.49	226.04	297.16	95.80	0.97	128.29	0.98
HEC-22	171.49	256.47	370.40	125.67	1.27	128.25	1.28
HEC-22 C.B	171.49	260.84	363.77	129.93	1.31	128.28	1.32
HEC-22 P.P	171.49	229.17	304.96	98.92	1.00	128.24	1.01
HEC-22 Parcial	171.49	242.48	317.66	111.25	1.13	128.97	1.14


Tabla 4-10. Emisiones agregadas de carbono equivalente – Caso 2: Serie de 20 tuberías

Metodología	Emisiones	Emisiones	Emisiones	Fabricación	Transporte	Instalación	Reciclaje
	Mín	Prom	Máx				
UTOPIA	290.71	380.61	509.95	131.21	1.34	246.71	1.36
HEC-22	293.99	420.71	575.87	168.35	1.71	248.92	1.73
HEC-22 C.B	296.00	420.49	572.87	168.07	1.71	248.98	1.73
HEC-22 P.P	293.99	387.09	519.83	137.93	1.41	246.33	1.43
HEC-22 Parcial	294.12	403.24	521.63	151.57	1.54	248.57	1.56

En términos generales, los resultados muestran que las emisiones de carbono equivalente aumentan de manera significativa al pasar de series de 10 a series de 20 tuberías, lo cual es consistente con el incremento en la longitud total del sistema. Para ambas configuraciones, la metodología UTOPIA presenta los valores promedio de emisión más bajos entre las metodologías evaluadas, mientras que la aplicación base de la metodología HEC-22 registra los valores promedio más elevados. Las variantes controladas de HEC-22 exhiben comportamientos intermedios, evidenciando la influencia directa de las decisiones geométricas sobre las emisiones de carbono equivalente.

El desglose por etapas evidencia que las fases de fabricación e instalación concentran la mayor proporción de las emisiones de carbono equivalente en todas las metodologías analizadas, mientras que las contribuciones asociadas al transporte y al reciclaje resultan marginales en comparación. Este comportamiento es consistente con lo observado en el Caso de Estudio 1 y con los supuestos del análisis de ciclo de vida adoptado.

En conjunto, los resultados del Caso de Estudio 2 confirman que las decisiones de diseño geométrico, particularmente aquellas relacionadas con el dimensionamiento de las tuberías, influyen de manera directa tanto en los costos de construcción como en las emisiones de carbono equivalente, estableciendo la base para la comparación integral de metodologías que se desarrolla en el Capítulo 5.

4.3 Resultados – Caso de Estudio 3: Redes Complejas

En esta sección se presentan los resultados correspondientes al Caso de Estudio 3, el cual evalúa el desempeño de distintas metodologías de diseño aplicadas a redes de alcantarillado pluvial de geometría compleja. A diferencia de los casos anteriores, este caso de estudio considera redes con múltiples ramificaciones, confluencias y jerarquías hidráulicas, lo que permite analizar el comportamiento de las metodologías en escenarios representativos de sistemas reales y de referencia académica.

El análisis se realizó sobre tres redes complejas: la Red Chicó Sur, correspondiente a una red real de la ciudad de Bogotá (Colombia), y las redes Moeni y Li & Matthew, ampliamente utilizadas como redes patrón en la literatura académica. En todos los casos, se aplicaron las mismas restricciones hidráulicas y constructivas definidas previamente, y se evaluaron la metodología UTOPIA y la metodología HEC-22, incluyendo el caso base y sus variantes controladas descritas en el Capítulo 3.



De manera análoga a los casos de estudio anteriores, los resultados se presentan en términos hidráulicos–geométricos, económicos y ambientales, con el fin de permitir una comparación integral del desempeño de las metodologías evaluadas.

4.3.1 Resultados Hidráulicos y Geométricos

Los resultados hidráulicos y geométricos del Caso de Estudio 3 se presentan de forma agregada por red, considerando las tres redes complejas analizadas: Chicó Sur, Moeni y Li & Matthew. Dado el tamaño y la complejidad de estos sistemas, el análisis se centra en indicadores representativos del diseño, tales como los rangos de diámetros seleccionados, las profundidades de excavación en las cámaras de unión y la presencia de caídas internas, los cuales permiten caracterizar el comportamiento global de cada metodología.

Tabla 4-11. Indicadores hidráulicos y geométricos agregados - Caso de Estudio 3: Redes Complejas

Red	Metodología	Diámetro Min [m]	Diámetro Max [m]	Prof. Cámara Min [m]	Prof. Cámara Max [m]	# Caídas	Caída Min [m]	Caída Max [m]
Chicó Sur	UTOPIÍA	0.20	1.00	1.40	3.80	35	0.10	2.20
	HEC-22	0.20	1.40	1.40	3.20	73	0.01	1.31
	HEC-22 C.B	0.20	1.35	1.40	3.20	73	0.01	1.31
Moeni	UTOPIÍA	0.20	0.70	1.50	4.80	58	0.10	3.6
	HEC-22	0.20	1.00	1.40	3.21	62	0.02	1.01
	HEC-22 C.B	0.20	1.00	1.40	3.21	62	0.02	1.01
Li & Matthew	UTOPIÍA	0.20	0.80	1.40	3.70	26	0.10	1.60
	HEC-22	0.20	0.80	1.40	4.98	25	0.01	2.93
	HEC-22 C.B	0.20	0.80	1.40	4.58	25	0.01	2.93

La Tabla 4-11 resume los principales indicadores hidráulicos y geométricos obtenidos para cada red y metodología. En términos de dimensionamiento, la metodología UTOPIÍA presenta, de manera consistente, diámetros máximos inferiores o iguales a los obtenidos mediante la metodología HEC-22, lo cual se observa con claridad en las redes Chicó Sur y Moeni. En la red Li & Matthew, ambas metodologías convergen hacia rangos de diámetro similares, reflejando una menor flexibilidad geométrica del sistema frente a las restricciones hidráulicas impuestas.

En cuanto a las profundidades de excavación, la metodología UTOPIÍA tiende a generar profundidades máximas de cámara más controladas en comparación con la aplicación base de HEC-22. Este comportamiento es particularmente evidente en las redes Moeni y Li & Matthew, donde la profundidad máxima alcanza valores cercanos a 5.0 m para HEC-22, mientras que se mantiene por debajo de este umbral para UTOPIÍA. En la red Chicó Sur, ambas metodologías presentan profundidades máximas similares, lo cual se asocia a las condiciones topográficas propias de la red real analizada.



Un aspecto relevante que diferencia las metodologías es la presencia de caídas internas en las cámaras de unión. En la red Chicó Sur, la aplicación de la metodología HEC-22 genera un número significativamente mayor de cámaras con caída interna (73) en comparación con UTOPIA (35), manteniendo rangos de caída que alcanzan valores superiores a 1.3 m. Este patrón se repite en la red Moeni, donde HEC-22 presenta 62 cámaras con caída, frente a 58 en el caso de UTOPIA.

Las variantes controladas de la metodología HEC-22 (HEC-22 C.B.) reproducen, en términos generales, los rangos de diámetro y profundidades obtenidos en la aplicación base, lo cual indica que la topología del sistema y las restricciones hidráulicas dominan el comportamiento global del diseño en redes complejas. No obstante, la persistencia de un número elevado de cámaras con caída interna en estas variantes confirma que la estrategia de diseño basada en pendientes reducidas continúa generando desajustes verticales relevantes en el interior de las estructuras.

En conjunto, los resultados hidráulicos y geométricos del Caso de Estudio 3 evidencian que las diferencias entre metodologías se manifiestan no solo en el dimensionamiento de las tuberías y las profundidades de excavación, sino también en la necesidad de incorporar caídas internas en las cámaras de unión, lo cual tiene implicaciones directas sobre los costos de construcción y el desempeño operativo del sistema. Estos aspectos se analizan en mayor detalle en las secciones siguientes del capítulo.

4.3.2 Resultados Económicos

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la evaluación económica del Caso de Estudio 3, el cual analiza el diseño de redes de alcantarillado pluvial complejas. Dado que cada una de las redes consideradas —Chicó Sur, Moeni y Li & Matthew— corresponde a un sistema único y completamente definido, los valores presentados representan el costo total real de construcción asociado a cada metodología de diseño.

Tabla 4-12. Costos de construcción por red y metodología - Caso de Estudio 3: Redes Complejas

Red	Metodología	Costo Tuberías [¥]	Costo Cámaras [¥]	Costo Total [¥]
Chicó Sur	UTOPIA	439 749	539 455	550 285
	HEC-22	23 174	24 343	24 536
	HEC-22 C.B	462 923	563 798	574 821
Moeni	UTOPIA	665 004	758 285	784 825
	HEC-22	22 241	38 396	39 356
	HEC-22 C.B	687 246	796 681	824 181
Li & Matthew	UTOPIA	666 295	821 239	840 537
	HEC-22	12 497	11 189	11 291
	HEC-22 C.B	678 791	832 429	851 827

La Tabla 4-12 resume los costos de construcción obtenidos para cada red y metodología, desagregados en costos de tuberías y cámaras de unión, así como el costo total del sistema. Estos



costos fueron calculados a partir de los diámetros, profundidades de excavación y número de estructuras definidos en el diseño hidráulico de cada red.

Para la red Chicó Sur, se observa que la metodología UTOPIA presenta el menor costo total de construcción, mientras que la aplicación de la metodología HEC-22 y su variante controlada generan costos totales superiores. En este caso, las diferencias se concentran principalmente en el componente de tuberías, coherente con los mayores diámetros y profundidades de excavación identificados previamente en el análisis hidráulico–geométrico.

En la red Moeni, se mantiene una tendencia similar, donde la metodología UTOPIA presenta nuevamente el menor costo total. La metodología HEC-22 y su variante controlada exhiben incrementos en el costo del sistema, asociados tanto al componente de tuberías como al de cámaras de unión, reflejando el impacto de las decisiones de diseño geométrico adoptadas por cada metodología.

Finalmente, para la red Li & Matthew, los resultados económicos muestran un comportamiento consistente con las redes anteriores. Aunque se trata de una red de menor tamaño relativo, la metodología UTOPIA continúa presentando el menor costo total de construcción, mientras que las alternativas basadas en la metodología HEC-22 generan costos superiores, principalmente debido a diferencias en el dimensionamiento de las tuberías y en la configuración vertical del sistema.

En conjunto, los resultados económicos del Caso de Estudio 3 evidencian que las decisiones de diseño asociadas a cada metodología tienen un impacto directo en el costo total de construcción de redes complejas. La comparación detallada entre metodologías, así como el análisis relativo de estos costos, se desarrolla en el Capítulo 5.

4.3.3 Resultados de Emisiones de Carbono

En esta sección se presentan los resultados del análisis de emisiones de carbono equivalente asociados al Caso de Estudio 3, correspondiente al diseño de redes de alcantarillado pluvial complejas. Las emisiones fueron calculadas considerando las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje de las tuberías, de acuerdo con la metodología de análisis de ciclo de vida descrita en el Capítulo 3.

Tabla 4-13. Emisiones de carbono equivalente por red y metodología [t CO₂-eq] – Caso de Estudio 3: Redes Complejas

Red	Metodología	Fabricación	Transporte	Instalación	Reciclaje	Total
Chicó Sur	UTOPIA	284.58	3.05	1 683.74	3.21	1 974.58
	HEC-22	435.53	4.56	1 671.01	4.71	2 115.82
	HEC-22 C.B	450.49	4.71	1 672.52	4.86	2 132.57
Moeni	UTOPIA	184.10	2.03	1 522.41	2.17	1 710.71
	HEC-22	208.33	2.27	1 520.30	2.42	1 733.32
	HEC-22 C.B	222.91	2.43	1 626.72	2.58	1 854.65



Li & Matthew	UTOPIA	184.10	2.03	1 522.41	2.17	1 710.71
	HEC-22	208.33	2.27	1 520.30	2.42	1 733.32
	HEC-22 C.B	222.91	2.43	1 626.72	2.58	1 854.65

La Tabla 4-13 resume las emisiones de carbono equivalente obtenidas para cada red y metodología evaluada. Al igual que en los casos de estudio anteriores, los resultados corresponden a los valores totales reales de cada red, dado que cada sistema posee una configuración única y completamente definida.

Para la red Chicó Sur, se observa que la metodología UTOPIA presenta el menor valor total de emisiones de carbono equivalente, mientras que la aplicación de la metodología HEC-22 y su variante controlada registran valores superiores. En este caso, la mayor contribución a las emisiones totales proviene de las etapas de fabricación e instalación, las cuales concentran la mayor parte del impacto ambiental del sistema.

En la red Moeni, se mantiene un comportamiento similar. La metodología UTOPIA presenta nuevamente el menor valor total de emisiones, seguida por la aplicación base de HEC-22 y su variante controlada. Al igual que en la red Chicó Sur, las emisiones asociadas a la instalación constituyen el componente dominante del total, seguidas por las emisiones de fabricación, mientras que las contribuciones del transporte y el reciclaje resultan comparativamente marginales.

Finalmente, para la red Li & Matthew, se observa un patrón consistente con los casos anteriores. La metodología UTOPIA presenta el menor nivel de emisiones totales de carbono equivalente, mientras que las alternativas basadas en la metodología HEC-22 generan mayores emisiones. La similitud entre los resultados de las redes Moeni y Li & Matthew se explica por la correspondencia en los rangos de diámetros utilizados y en la configuración general del sistema.

En conjunto, los resultados del Caso de Estudio 3 confirman que, en redes complejas, las decisiones de diseño geométrico asociadas a cada metodología influyen de manera directa en las emisiones totales de carbono equivalente del sistema. Estas diferencias ambientales, junto con los resultados hidráulicos y económicos, constituyen un insumo fundamental para la comparación integral de metodologías que se desarrolla en el Capítulo 5.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo integral de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, a partir de la aplicación de distintas metodologías de diseño de sistemas de alcantarillado pluvial. A diferencia del capítulo anterior, en el cual se presentaron de manera descriptiva los resultados hidráulicos, económicos y ambientales de cada caso de estudio, en esta sección se aborda la interpretación conjunta de dichos resultados, con el fin de identificar tendencias, relaciones y diferencias relevantes entre metodologías.

El análisis se desarrolla de forma transversal, considerando los tres casos de estudio definidos en esta investigación: (i) un caso base de aplicación directa de la metodología HEC-22, (ii) series de tuberías con variación sistemática de pendientes y configuraciones geométricas, y (iii) redes complejas de referencia real y académica. Esta estructura permite evaluar el desempeño de las metodologías tanto en escenarios controlados como en sistemas representativos de la práctica profesional.

Las metodologías analizadas incluyen la aplicación completa de la metodología HEC-22, sus variantes controladas, la aplicación parcial de la metodología HEC-22, y la metodología de diseño optimizado UTOPIA. La comparación se realiza a partir de tres dimensiones fundamentales del diseño de infraestructura hidráulica urbana: (i) el comportamiento hidráulico y geométrico del sistema, (ii) los costos de construcción asociados, y (iii) las emisiones de carbono equivalente derivadas de las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje de las tuberías.

Con el fin de garantizar la consistencia del análisis, las comparaciones se realizan utilizando indicadores agregados y representativos de cada caso de estudio, tales como rangos de diámetros, pendientes adoptadas, profundidades de excavación, costos totales de construcción y emisiones totales de carbono equivalente. En los casos paramétricos (Casos 1 y 2), el análisis se apoya en valores mínimos, promedios y máximos, mientras que en el caso de redes complejas (Caso 3) se emplean valores absolutos, correspondientes al costo y al impacto ambiental real de cada sistema diseñado.

Es importante destacar que el análisis presentado en este capítulo no busca establecer una metodología “óptima” en términos absolutos, sino evidenciar las implicaciones técnicas, económicas y ambientales de las decisiones de diseño implícitas en cada enfoque metodológico. De esta manera, el capítulo proporciona un marco de referencia para la discusión crítica de los resultados y sienta las bases para las conclusiones y recomendaciones presentadas en los capítulos finales de la tesis.

5.1 Comparación hidráulica y geométrica

La comparación hidráulica y geométrica entre metodologías constituye el primer eje de análisis de los resultados obtenidos, dado que las decisiones asociadas al dimensionamiento, la selección de pendientes y la configuración vertical del sistema condicionan de manera directa tanto los costos de construcción como el impacto ambiental del diseño.



El análisis se desarrolla de forma integrada para los tres casos de estudio presentados en el Capítulo 4. En los Casos 1 y 2, correspondientes a escenarios controlados y paramétricos, la comparación se apoya en indicadores agregados tales como valores mínimos, promedios y máximos de diámetro, pendiente y profundidad de excavación. En el Caso 3, correspondiente a redes complejas, el análisis se realiza a partir de indicadores globales representativos de cada red, tales como rangos de diámetro, profundidades máximas y presencia de caídas internas en las cámaras de unión.

5.1.1 Diámetros y pendientes

Los resultados evidencian diferencias claras en la estrategia de dimensionamiento adoptada por cada metodología. En los Casos 1 y 2, la metodología UTOPIA tiende a seleccionar diámetros más homogéneos y, en promedio, menores que aquellos obtenidos mediante la aplicación de la metodología HEC-22. Esta diferencia se compensa mediante la adopción de pendientes mayores, las cuales permiten satisfacer las restricciones hidráulicas de velocidad, capacidad y esfuerzo cortante sin recurrir a incrementos significativos en el diámetro de las tuberías.

Por el contrario, la aplicación de la metodología HEC-22, particularmente en su versión base, muestra una tendencia a privilegiar pendientes reducidas, lo que conduce a la selección de diámetros mayores, especialmente en los tramos aguas abajo de los sistemas. Este comportamiento se observa de forma consistente tanto en las series de tuberías como en las redes complejas, y responde a la lógica del diseño secuencial implícita en la metodología, en la cual las decisiones se toman de manera local y tramo a tramo.

Las variantes controladas de la metodología HEC-22 presentan un comportamiento intermedio. Cuando se imponen restricciones adicionales, como la igualación de pendientes promedio o de cotas de salida respecto a la solución obtenida con UTOPIA, los diámetros seleccionados se reducen parcialmente, aunque sin alcanzar la homogeneidad observada en los diseños optimizados.

5.1.2 Profundidades de excavación y configuración vertical

Las diferencias en la selección de diámetros y pendientes se reflejan directamente en la configuración vertical del sistema y, en particular, en las profundidades de excavación de las cámaras de unión. En los Casos 1 y 2, los resultados muestran que la metodología UTOPIA tiende a generar profundidades máximas de excavación más controladas, aun en escenarios de pendiente baja o variable.

En contraste, la aplicación de la metodología HEC-22 conduce, en múltiples escenarios, a profundidades máximas superiores, especialmente en terrenos de pendiente reducida o en configuraciones donde la acumulación de caudales ocurre de forma progresiva. Este comportamiento se ve acentuado en las redes complejas del Caso 3, donde las decisiones de diseño adoptadas en tramos individuales tienen efectos acumulativos sobre el perfil longitudinal del sistema.

Las variantes controladas de HEC-22 muestran que ajustes relativamente simples en parámetros geométricos clave pueden reducir las profundidades máximas, lo que pone de manifiesto la sensibilidad del diseño vertical a las decisiones iniciales del proyectista.



5.1.3 Caídas internas en cámaras de unión

Un aspecto distintivo del análisis hidráulico–geométrico es la presencia de caídas internas en las cámaras de unión, particularmente relevante en el Caso de Estudio 3. Los resultados muestran que la metodología HEC-22 presenta, de forma sistemática, un mayor número de cámaras con caídas internas, así como rangos de caída más amplios, en comparación con la metodología UTOPIA.

Este comportamiento se explica por la combinación de pendientes reducidas y diámetros mayores adoptados por HEC-22, lo cual genera desalineaciones verticales entre tramos consecutivos. En contraste, la metodología UTOPIA, al optimizar de manera conjunta la pendiente y el diámetro a lo largo de la red, logra reducir significativamente la necesidad de incorporar caídas internas, simplificando la configuración hidráulica del sistema.

Desde el punto de vista del diseño, la reducción en el número y magnitud de caídas internas no solo tiene implicaciones hidráulicas, sino que también influye directamente en los costos de construcción, la complejidad constructiva y el desempeño operativo del sistema, aspectos que se analizan en las secciones siguientes del capítulo.

5.2 Comparación económica entre metodologías

5.2.1 Casos de estudio 1 y 2: Series de Tubos

La comparación económica de los Casos de Estudio 1 y 2 se realiza a partir de los costos totales de construcción obtenidos para las distintas metodologías de diseño, considerando tanto el costo de tuberías como el de cámaras de unión. Dado el carácter paramétrico de estos casos, el análisis se orienta a identificar tendencias globales en función de la pendiente del terreno y del tamaño del sistema, comparando series de 10 y 20 tuberías.

Las Figuras 5-1 y 5-2 muestran la variación del costo total con la pendiente para series de 10 y 20 tuberías, respectivamente. En ambos escenarios se aprecia una tendencia general a la reducción del costo al aumentar la pendiente, especialmente entre 0% y 3%, consistente con la posibilidad de adoptar pendientes hidráulicas mayores que disminuyen diámetros requeridos y profundidades de excavación. A lo largo de todo el rango de pendientes analizado, la metodología UTOPIA presenta de forma consistente los menores costos totales, mientras que las alternativas basadas en HEC-22 tienden a generar costos superiores, con diferencias más marcadas en condiciones extremas y en el sistema de mayor tamaño (20 tuberías).

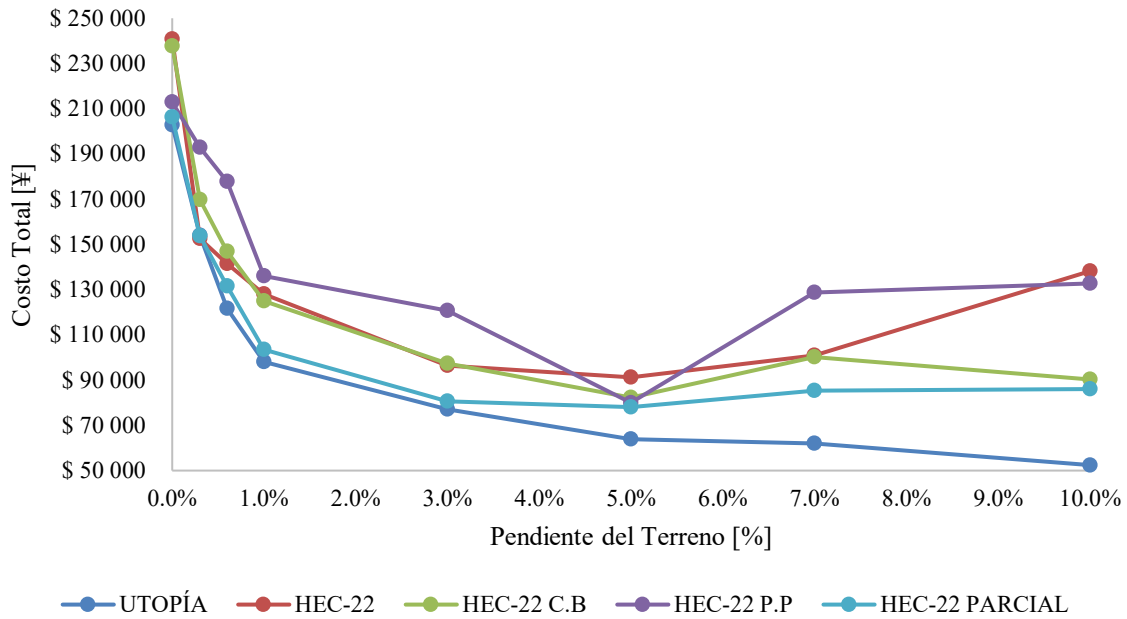


Figura 5-1. Costo total de construcción vs. pendiente del terreno para series de 10 tuberías (Caso de Estudio 2)

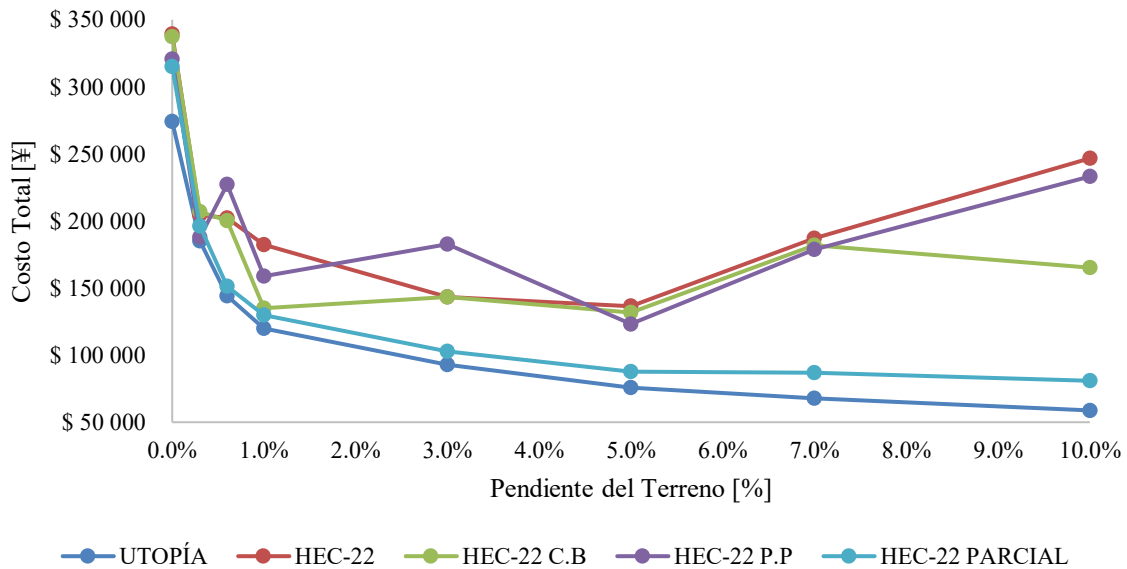


Figura 5-2. Costo total de construcción vs. pendiente del terreno para series de 20 tuberías (Caso de Estudio 2)



La desagregación de costos, ilustrada en las Figuras 5.3 y 5.4 para el terreno con pendiente 0% (series de 10 y 20 tuberías), confirma que el costo de las tuberías constituye el componente dominante del costo total para todas las metodologías. No obstante, el componente asociado a cámaras de unión adquiere relevancia en aquellas metodologías que conducen a mayores profundidades de excavación y configuraciones verticales más exigentes. Las gráficas de desagregación de costos para las demás pendientes se presentan en anexos, con el fin de no recargar el cuerpo principal del documento.

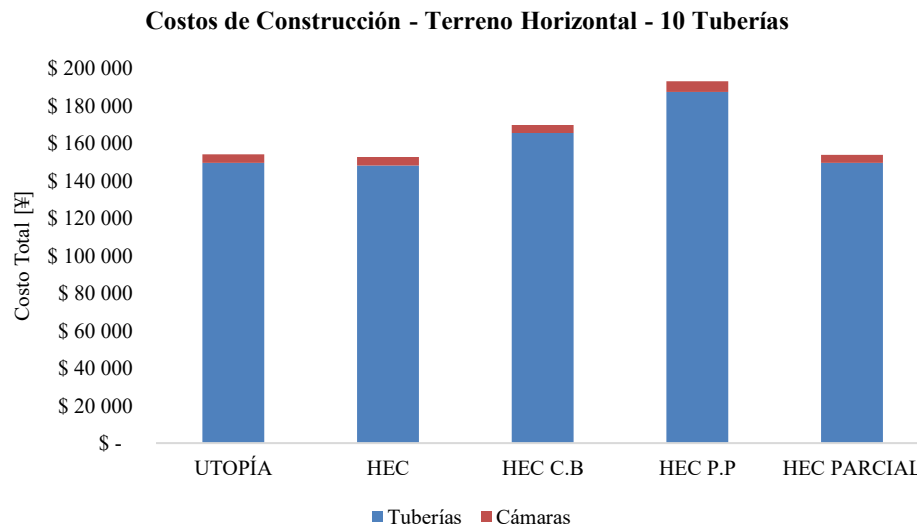


Figura 5-3. Desagregación del costo de construcción (tuberías y cámaras) para terreno con pendiente 0% – Serie de 10 tuberías

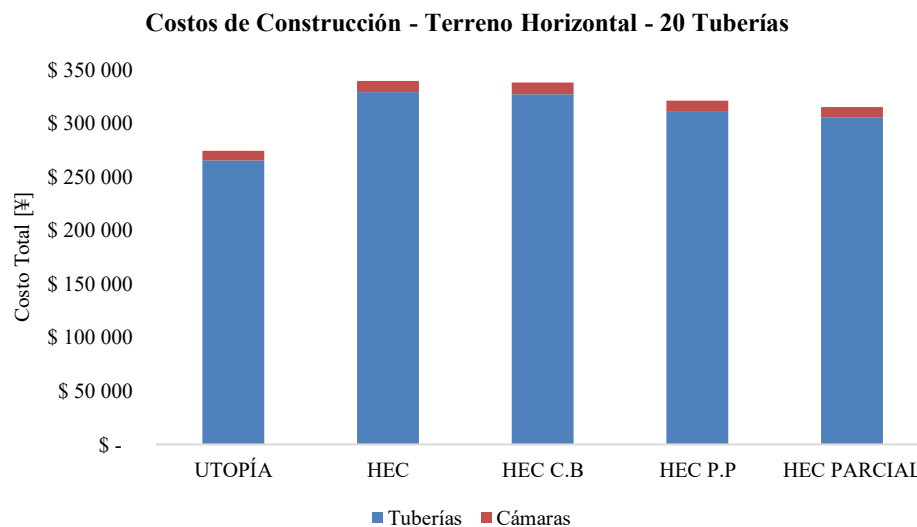


Figura 5-4. Desagregación del costo de construcción (tuberías y cámaras) para terreno con pendiente 0% – Serie de 20 tuberías



Para complementar la lectura en términos relativos, las Figuras 5.5 y 5.6 presentan el incremento porcentual del costo total frente a UTOPIA para series de 10 y 20 tuberías, respectivamente. Estas figuras permiten evidenciar dos aspectos clave: primero, que las metodologías HEC-22 incrementan el costo respecto a UTOPIA en la mayoría de escenarios; y segundo, que dicho incremento tiende a aumentar con el tamaño del sistema, reflejando un efecto acumulativo de la estrategia de diseño cuando se incrementa el número de tramos.

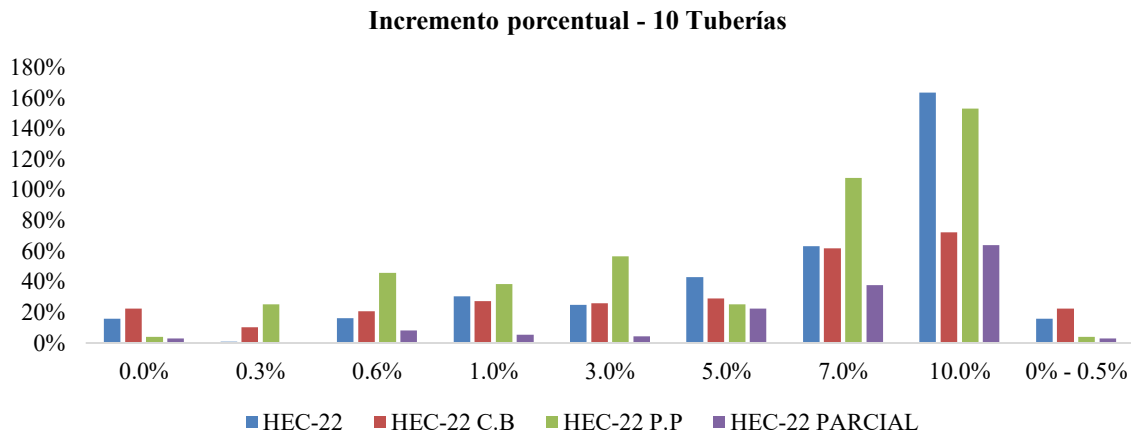


Figura 5-5. Incremento porcentual del costo total frente a UTOPIA por pendiente – Serie de 10 tuberías.

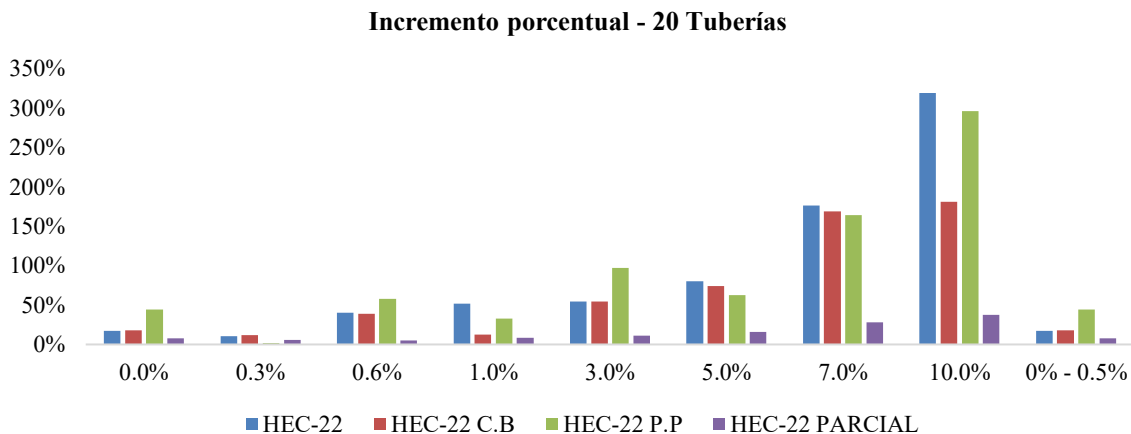


Figura 5-6. Incremento porcentual del costo total frente a UTOPIA por pendiente – Serie de 20 tuberías.

En conjunto, los resultados económicos de los Casos de Estudio 1 y 2 muestran que las diferencias entre metodologías están fuertemente condicionadas por la estrategia de diseño implícita y por su interacción con la pendiente del terreno y el tamaño del sistema. Estos hallazgos constituyen la base para la comparación con el Caso de Estudio 3, donde se evalúa el comportamiento de las metodologías en redes complejas.



Con el fin de complementar la información gráfica presentada anteriormente, a continuación, se incluye una tabla resumen que consolida los costos totales de construcción obtenidos para cada metodología y pendiente del terreno, así como el incremento porcentual respecto a la metodología UTOPIA, considerada como referencia. Esta síntesis permite una comparación directa y sistemática entre metodologías, tanto para series de 10 tuberías como para series de 20 tuberías, facilitando la identificación de tendencias generales asociadas a la pendiente del terreno y al tamaño del sistema.

Tabla 5-1. Resumen de costos totales e incremento porcentual frente a UTOPIA por pendiente del terreno y metodología (series de 10 y 20 tuberías)

Pendiente	Metodología	Costo 10 tuberías [¥]	Incremento % vs UTOPIA	Costo 20 tuberías [¥]	Incremento % vs UTOPIA
0.00%	UTOPIA	202 848	-	274 156	-
	HEC-22	240 827	15.93%	339 294	17.24%
	HEC-22 C.B	237 783	22.44%	337 504	18.07%
	HEC-22 P.P	212 844	4.09%	320 692	44.52%
	HEC-22 Parcial	206 376	2.97%	315 001	7.72%
0.30%	UTOPIA	154 034	-	185 205	-
	HEC-22	152 555	0.96%	204 705	10.53%
	HEC-22 C.B	169 760	10.21%	206 756	11.64%
	HEC-22 P.P	192 931	25.25%	188 018	1.52%
	HEC-22 Parcial	153 625	0.27%	196 252	5.96%
0.60%	UTOPIA	121 734	-	144 234	-
	HEC-22	141 352	16.12%	202 215	40.20%
	HEC-22 C.B	146 845	20.63%	200 119	38.75%
	HEC-22 P.P	177 677	45.95%	227 348	57.62%
	HEC-22 Parcial	131 638	8.14%	151 419	4.98%
1.00%	UTOPIA	98 141	-	119 962	-
	HEC-22	127 941	30.36%	182 108	51.80%
	HEC-22 C.B	124 963	27.33%	135 020	12.55%
	HEC-22 P.P	135 990	38.57%	158 955	32.50%
	HEC-22 Parcial	103 558	5.52%	129 722	8.14%
3.00%	UTOPIA	77 204	-	92 677	-
	HEC-22	96 369	24.82%	143 424	54.76%
	HEC-22 C.B	97 304	26.04%	143 456	54.79%
	HEC-22 P.P	120 816	56.49%	182 667	97.10%
	HEC-22 Parcial	80 601	4.40%	102 748	10.87%
5.00%	UTOPIA	63 833	-	75 796	-
	HEC-22	91 230	42.92%	136 440	80.01%
	HEC-22 C.B	82 286	28.91%	131 743	73.81%



	HEC-22 P.P	80 018	25.36%	123 242	62.60%
	HEC-22 Parcial	78 066	22.30%	87 798	15.83%
	UTOPIA	61 920	-	67 609	-
	HEC-22	100 964	63.06%	187 065	176.69%
7.00%	HEC-22 C.B	100 093	61.65%	182 031	169.24%
	HEC-22 P.P	128 663	107.79%	178 571	164.12%
	HEC-22 Parcial	85 262	37.70%	86 820	28.41%
	UTOPIA	52 435	-	58 803	-
	HEC-22	138 235	163.63%	246 647	319.45%
10.00%	HEC-22 C.B	90 302	72.22%	165 211	180.96%
	HEC-22 P.P	132 664	153.01%	233 162	296.52%
	HEC-22 Parcial	85 977	63.97%	80 894	37.57%
	UTOPIA	178 581	-	229 600	-
	HEC-22	207 021	15.93%	269 190	17.24%
0% - 0.5%	HEC-22 C.B	218 648	22.44%	271 090	18.07%
	HEC-22 P.P	185 884	4.09%	331 825	44.52%
	HEC-22 Parcial	183 877	2.97%	247 330	7.72%
	UTOPIA	118 041	-	162 614	-
	HEC-22	207 021	75.38%	268 272	64.97%
0% - 5%	HEC-22 C.B	203 135	72.09%	267 092	64.25%
	HEC-22 P.P	299 062	153.36%	1 250 705	669.12%
	HEC-22 Parcial	176 666	49.67%	220 072	35.33%

A partir de la información consolidada en la Tabla 5.1, se observa que el comportamiento relativo de los costos entre metodologías depende fuertemente de la pendiente del terreno y del número de tuberías consideradas. En pendientes bajas (0.0 %–1.0 %), las diferencias porcentuales entre metodologías tienden a ser moderadas, especialmente en las series de 10 tuberías, donde algunas variantes del método HEC-22 presentan incrementos reducidos respecto a UTOPIA.

Sin embargo, a medida que la pendiente del terreno aumenta, se evidencia un incremento significativo en los costos relativos de las metodologías basadas en HEC-22, particularmente en las variantes con control explícito de pendientes o bateas (HEC-22 C.B y HEC-22 P.P). Este efecto es más pronunciado en las series de 20 tuberías, donde los incrementos porcentuales alcanzan valores considerablemente superiores, reflejando una mayor sensibilidad del costo total frente a decisiones geométricas y constructivas acumuladas a lo largo del sistema.

En contraste, la metodología HEC-22 Parcial presenta, de forma consistente, incrementos porcentuales menores en comparación con las demás variantes de HEC-22, acercándose en varios escenarios al desempeño económico de UTOPIA. Este comportamiento sugiere que la reducción en



el grado de libertad del diseño —al fijar ciertos parámetros geométricos— contribuye a limitar el crecimiento de costos, especialmente en terrenos con pendientes medias y altas.

En conjunto, la tabla confirma que no existe una metodología económicamente dominante (además de UTOPIA) para todos los escenarios, y que la elección del enfoque de diseño debe considerar simultáneamente la pendiente del terreno, la longitud del sistema y el nivel de automatización o control geométrico impuesto por cada metodología.

5.2.2 Caso de estudio 3: Redes Complejas

En el Caso de Estudio 3, la comparación económica se realiza a partir de los costos totales reales de construcción obtenidos para cada red y metodología. A diferencia de los Casos 1 y 2, no se emplean valores promedio ni análisis paramétricos, dado que cada red corresponde a un sistema único con una topología y configuración hidráulica específica. Por esta razón, el análisis económico se presenta de manera independiente para cada red, permitiendo identificar cómo las decisiones de diseño asociadas a cada metodología se reflejan en el costo total del sistema bajo distintas configuraciones geométricas y topológicas.

5.2.2.1 Red Chicó Sur

Para la red Chicó Sur, correspondiente a una red real de alcantarillado urbano con una elevada complejidad topológica, se observa que la metodología UTOPIA presenta el menor costo total de construcción, seguida por HEC-22 con control de batea y, finalmente, HEC-22 en su aplicación libre.

El análisis desagregado muestra que el costo de las tuberías representa el componente dominante del costo total, superando ampliamente el costo asociado a las cámaras de unión en todas las metodologías. Las diferencias entre metodologías se explican principalmente por los diámetros seleccionados y la configuración vertical resultante, que inciden directamente en el volumen de excavación y en los costos unitarios de los tramos.

En este contexto, UTOPIA logra una solución más eficiente desde el punto de vista económico al optimizar de manera integrada la selección de diámetros y pendientes, reduciendo el costo total del sistema sin comprometer el cumplimiento de las restricciones hidráulicas.

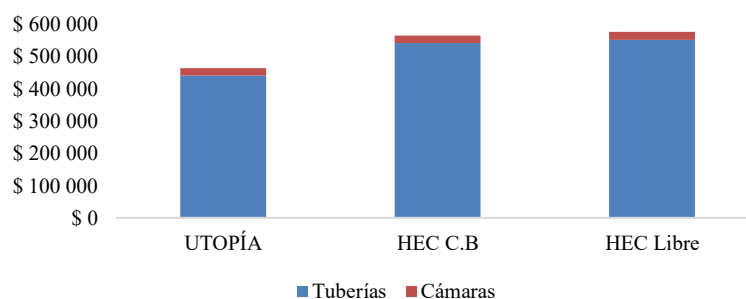


Figura 5-7. Costos desagregados de la Red Chicó Sur - Caso de Estudio 3



5.2.2.2 Red Moeni

En la red Moeni, utilizada como red patrón académica, se mantiene la misma tendencia observada en la red Chicó Sur. La metodología UTOPIÍA presenta nuevamente el menor costo total, mientras que las soluciones obtenidas mediante HEC-22 resultan más costosas, incluso cuando se incorpora el control de batea.

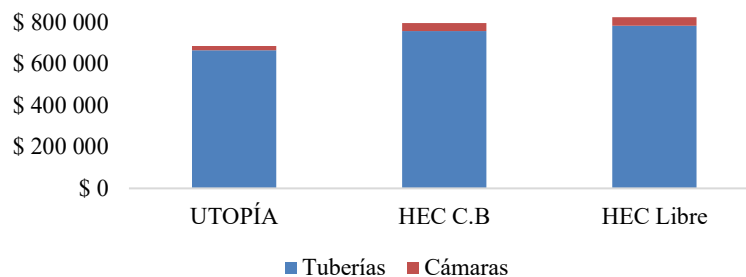


Figura 5-8. Costos desagregados de la Red Moeni - Caso de Estudio 3

Al igual que en el caso anterior, el costo de las tuberías constituye el principal componente del costo total, reflejando la sensibilidad del presupuesto a la selección de diámetros en redes con múltiples trayectorias de flujo. Las diferencias económicas entre metodologías se incrementan debido a la acumulación de decisiones locales de diseño a lo largo de la red, lo que resalta la importancia de enfoques de optimización global como UTOPIÍA en sistemas complejos.

5.2.2.3 Red Li & Matthew

Para la red Li & Matthew, que corresponde a una red patrón internacional de menor tamaño relativo, se observa nuevamente que UTOPIÍA conduce a la alternativa de menor costo total, seguida por HEC-22 con control de batea y HEC-22 libre.

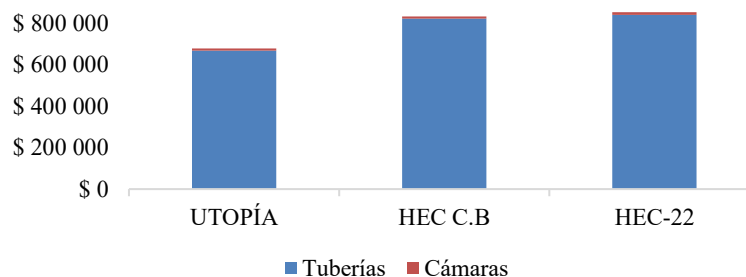


Figura 5-9. Costos desagregados de la Red Li & Matthew - Caso de Estudio 3

Aunque las diferencias absolutas de costo son menores que en las otras redes, la tendencia se mantiene consistente: el costo de las tuberías domina el presupuesto total, y las metodologías basadas en HEC-



22 tienden a seleccionar configuraciones más conservadoras que incrementan el costo final del sistema. Este comportamiento confirma que, incluso en redes de menor escala, las decisiones geométricas tienen un impacto significativo en el resultado económico global.

Desde una perspectiva comparativa, las diferencias porcentuales de costo observadas entre metodologías en las redes complejas confirman las tendencias identificadas en los Casos de Estudio 1 y 2. En términos generales, las soluciones obtenidas mediante metodologías basadas en HEC-22 presentan incrementos de costo respecto a UTOPIA que oscilan entre el orden del 15 % y más del 25 %, dependiendo de la red analizada y del grado de control geométrico incorporado en el diseño. Estas diferencias, aunque variables en magnitud absoluta, reflejan de manera consistente el impacto económico acumulado de decisiones de diseño más conservadoras en sistemas con topologías complejas.

5.3 Comparación ambiental (ACV)

La comparación ambiental entre metodologías se realiza a partir de los resultados del análisis de ciclo de vida desarrollado para los distintos casos de estudio, considerando las emisiones de carbono equivalente asociadas a las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje de las tuberías. Este análisis permite evaluar cómo las decisiones geométricas y constructivas derivadas de cada metodología de diseño se traducen en impactos ambientales diferenciados, complementando el análisis económico presentado previamente.

5.3.1 Casos de Estudio 1 y 2: Series de Tubos

El análisis ambiental de los Casos de Estudio 1 y 2, correspondientes a series de 10 y 20 tuberías, permite identificar de manera clara la relación entre la metodología de diseño adoptada y las emisiones de carbono equivalente generadas a lo largo del ciclo de vida del sistema. Para ambos casos, se evaluaron las emisiones asociadas a las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje, considerando los promedios obtenidos para cada metodología.

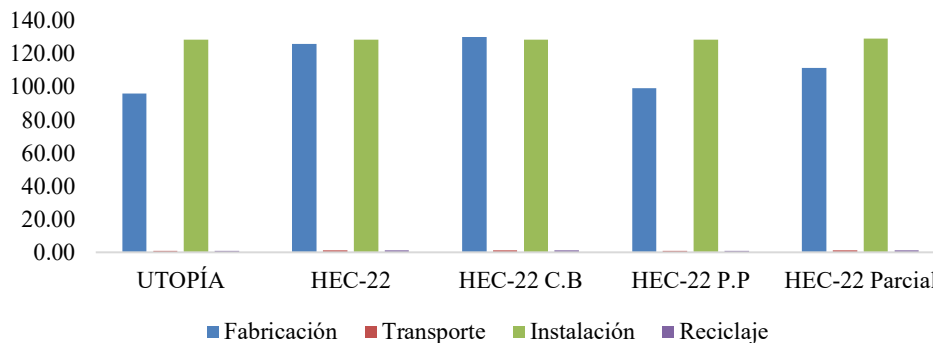


Figura 5-10. Comparación de emisiones por etapa - Caso de Estudio 2: Serie de 10 Tuberías

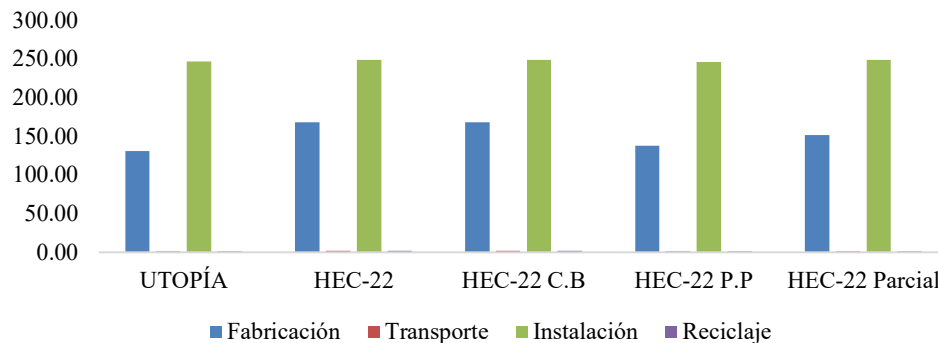


Figura 5-11. Comparación de emisiones por etapa - Caso de Estudio 2: Serie de 20 Tuberías

Los resultados muestran que, independientemente del número de tramos considerados, la etapa de instalación constituye el principal contribuyente a las emisiones totales, seguida por la etapa de fabricación de las tuberías. En contraste, las emisiones asociadas al transporte y al reciclaje presentan una contribución marginal, con valores significativamente menores y sin incidencia relevante en la comparación entre metodologías. Este comportamiento se observa de manera consistente en todas las pendientes analizadas.

Las comparaciones por etapas para las series de 10 y 20 tuberías se ilustran mediante gráficos de barras apiladas, en los cuales se evidencia el peso relativo de cada etapa del ciclo de vida para cada metodología. Con el fin de no sobrecargar el cuerpo del documento, se presenta únicamente una selección representativa de estas gráficas en esta sección, mientras que el conjunto completo de figuras para cada pendiente y número de tuberías se incluye en los Anexos.

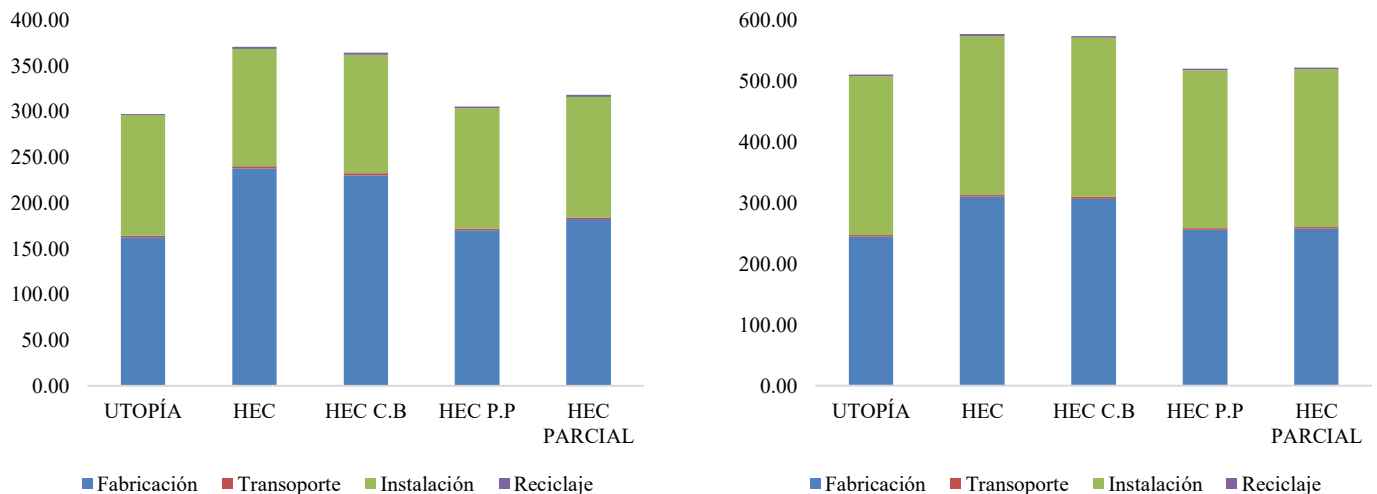


Figura 5-12. Distribución de generación de carbono [t CO₂]. Serie de 10 Tuberías (Izquierda). Serie de 20 Tuberías (Derecha). Correspondiente al terreno horizontal (0.0%)



Asimismo, el incremento del número de tuberías de 10 a 20 genera, como es de esperarse, un aumento en las emisiones absolutas totales; sin embargo, las tendencias relativas entre metodologías se mantienen, confirmando que el efecto de la metodología de diseño sobre el impacto ambiental es consistente frente a cambios en la escala del sistema.

5.3.2 Caso de Estudio 3: Redes Complejas

En el Caso de Estudio 3, el análisis de ciclo de vida se aplicó a las redes complejas Chicó Sur, Moeni y Li & Matthew, evaluando las emisiones totales de carbono equivalente para cada metodología de diseño. A diferencia de los casos de series de tuberías, en este escenario se trabaja con valores absolutos por red, dado que cada sistema presenta una topología y configuración hidráulica única.

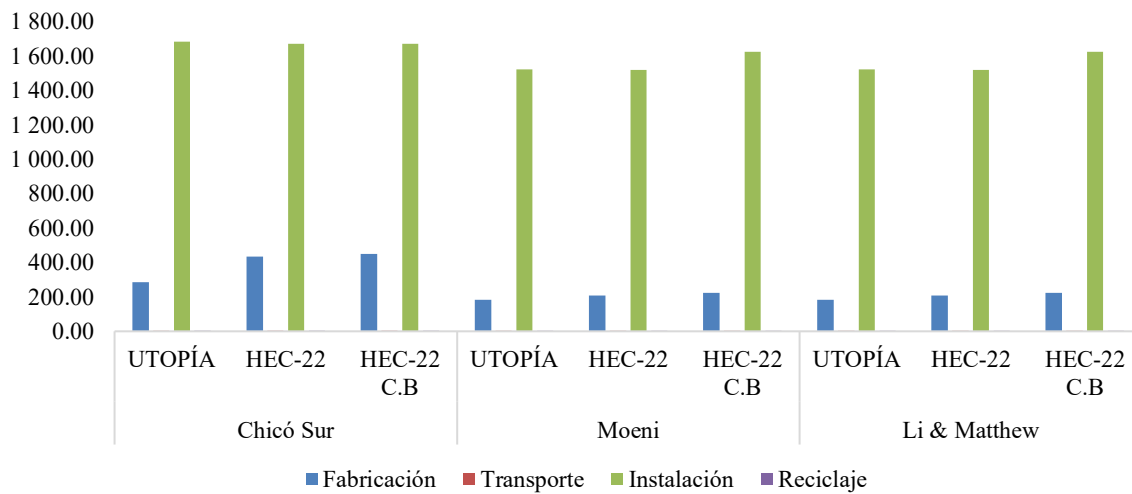


Figura 5-13. Comparación de producción de carbono equivalente [t CO₂] por etapa. Caso de Estudio 3: Redes Complejas

Las gráficas de comparación por etapas para las redes complejas permiten observar, para cada red y metodología, la contribución individual de las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje. En todas las redes analizadas se mantiene un patrón consistente: la instalación es la etapa dominante en la generación de emisiones, seguida por la fabricación de las tuberías. Las contribuciones del transporte y el reciclaje resultan prácticamente despreciables en términos relativos.

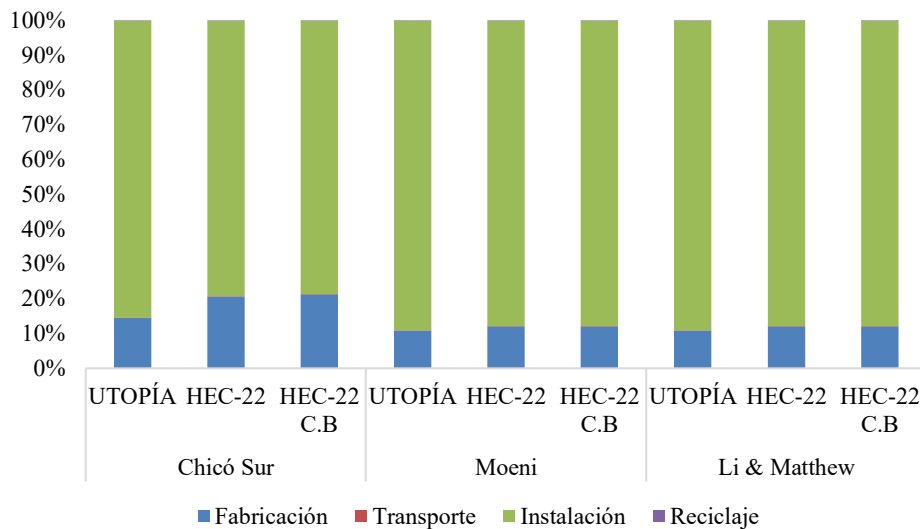


Figura 5-14. Distribución porcentual de las etapas de ACV según metodología de diseño. Caso de Estudio 3: Redes Complejas

Adicionalmente, la representación porcentual de la contribución de cada etapa confirma que, independientemente de la red considerada, más del 80 % de las emisiones totales se concentran en las etapas de instalación y fabricación, lo que refuerza la estrecha relación entre las decisiones geométricas del diseño (diámetros, profundidades de excavación y configuración vertical) y el impacto ambiental del sistema.

Al comparar metodologías dentro de cada red, se observa que UTOPIA presenta sistemáticamente las menores emisiones totales, seguida por HEC-22 con control de batea y, finalmente, HEC-22 en su aplicación libre. Esta jerarquía es coherente con los resultados económicos y se acentúa en redes de mayor complejidad topológica, donde la acumulación de decisiones locales de diseño amplifica las diferencias ambientales entre metodologías.

En conjunto, los resultados del análisis ambiental muestran una correspondencia directa entre desempeño económico y desempeño ambiental en todos los casos de estudio. Las metodologías que conducen a soluciones más conservadoras desde el punto de vista geométrico tienden a incrementar tanto el costo de construcción como las emisiones de carbono equivalente. Por el contrario, la metodología UTOPIA, al optimizar de manera integrada la selección de diámetros y pendientes, logra reducir simultáneamente ambos indicadores, posicionándose como la alternativa más favorable desde una perspectiva de sostenibilidad integral.

5.4 Síntesis comparativa

La evaluación conjunta de los resultados obtenidos en los tres casos de estudio permite realizar una comparación integral de las metodologías analizadas, incorporando de manera simultánea criterios



hidráulicos, geométricos, económicos y ambientales. Esta síntesis tiene como objetivo identificar las principales fortalezas y limitaciones de cada enfoque de diseño, así como establecer su conveniencia relativa en función de los objetivos tradicionales y emergentes del diseño de sistemas de alcantarillado urbano.

5.4.1 Desempeño Hidráulico y control Geométrico

Desde el punto de vista hidráulico, todas las metodologías evaluadas cumplen con las restricciones básicas de diseño, garantizando condiciones adecuadas de capacidad, velocidades y funcionamiento del sistema. No obstante, se identifican diferencias importantes en el grado de control geométrico ejercido por cada metodología sobre variables clave como diámetros, pendientes y profundidades de excavación.

Las metodologías basadas en HEC-22 tienden a adoptar configuraciones más conservadoras, particularmente en tramos aguas abajo y en redes complejas, lo que se traduce en mayores diámetros máximos y profundidades de excavación. Por el contrario, UTOPIA presenta una mayor capacidad para ajustar simultáneamente las variables de diseño dentro del espacio factible de soluciones, evitando sobredimensionamientos innecesarios y logrando configuraciones geométricas más eficientes sin comprometer el desempeño hidráulico.

5.4.2 Comparación económica global

El análisis económico integrado de los Casos de Estudio 1, 2 y 3 muestra de forma consistente que UTOPIA es la metodología que conduce a los menores costos de construcción en todos los escenarios analizados. En los casos de series de tuberías, las diferencias económicas entre metodologías se intensifican con el incremento de la pendiente del terreno, alcanzando incrementos porcentuales significativos para las metodologías tradicionales basadas en HEC-22, especialmente en pendientes medias y altas.

En el caso de las redes complejas, aunque las diferencias absolutas de costo dependen de la topología y extensión de cada red, se mantiene una jerarquía clara entre metodologías, con incrementos de costo del orden del 15 % al 25 % para las soluciones basadas en HEC-22 respecto a UTOPIA. En todos los casos, se confirma que el costo de las tuberías constituye el componente dominante del costo total, lo que pone de manifiesto la sensibilidad del presupuesto a las decisiones de selección de diámetros y pendientes.

5.4.3 Comparación Ambiental

La comparación ambiental, basada en el análisis de ciclo de vida, revela tendencias coherentes con los resultados económicos. En todos los casos de estudio, las etapas de instalación y fabricación de tuberías concentran la mayor proporción de las emisiones de carbono equivalente, mientras que las contribuciones del transporte y el reciclaje resultan marginales.



Las metodologías que conducen a configuraciones más conservadoras desde el punto de vista geométrico presentan mayores emisiones totales, como consecuencia directa del incremento en volúmenes de excavación, longitudes efectivas de obra y diámetros seleccionados. En contraste, UTOPIA logra reducir de manera sistemática las emisiones de carbono, tanto en series de tuberías como en redes complejas, al minimizar el volumen total de obra sin sacrificar el cumplimiento de los criterios hidráulicos.

5.4.4 Balance integral y jerarquización de metodologías

A partir de la integración de los resultados hidráulicos, económicos y ambientales, se establece una jerarquización clara de las metodologías evaluadas. UTOPIA se posiciona como la alternativa con mejor desempeño integral, al ofrecer soluciones hidráulicamente viables con menores costos de construcción y menores impactos ambientales.

Las metodologías basadas en HEC-22, si bien garantizan diseños técnicamente seguros y ampliamente aceptados en la práctica, presentan una tendencia sistemática al sobredimensionamiento cuando se aplican sin mecanismos de optimización global. En este sentido, los resultados de esta tesis evidencian que la incorporación de enfoques de optimización multiobjetivo en el diseño de sistemas de alcantarillado urbano constituye una herramienta clave para avanzar hacia soluciones más eficientes, económicas y ambientalmente sostenibles.

Tabla 5-2. Síntesis comparativa del desempeño de las metodologías evaluadas

Metodología	Desempeño hidráulico	Control geométrico	Costo relativo	Emisiones de carbono	Evaluación global
UTOPIA	Cumple	Alto	Bajo	Bajas	Muy favorable
HEC-22	Cumple	Bajo	Alto	Altas	Desfavorable
HEC-22 C.B	Cumple	Medio	Medio–alto	Medias–altas	Intermedia
HEC-22 Parcial	Cumple	Medio	Medio	Medias	Intermedia

Nota: La evaluación se basa en la comparación integrada de los Casos de Estudio 1, 2 y 3, considerando criterios hidráulicos, geométricos, económicos y ambientales.

La Tabla 5-2 resume de manera integrada el desempeño de las metodologías evaluadas a lo largo de los tres casos de estudio. En ella se evidencia que, si bien todas las metodologías cumplen con los criterios hidráulicos fundamentales, existen diferencias sustanciales en el grado de control geométrico, los costos de construcción y el impacto ambiental asociado a cada enfoque de diseño.

La metodología UTOPIA destaca por ofrecer un alto nivel de control geométrico, lo que se traduce en menores costos y menores emisiones de carbono equivalente, consolidándose como la alternativa más favorable desde una perspectiva integral. Por su parte, las metodologías basadas en HEC-22 presentan diseños técnicamente robustos, aunque con una tendencia al sobredimensionamiento que impacta negativamente tanto el costo como el desempeño ambiental, especialmente en escenarios de mayor complejidad.



6. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo metodológico, la aplicación a los distintos casos de estudio y el análisis comparativo de los resultados hidráulicos, económicos y ambientales, se formulan las siguientes conclusiones:

- Conclusión 1. Cumplimiento hidráulico de las metodologías

Todas las metodologías evaluadas (HEC-22, HEC-22 con control geométrico, aplicación parcial de HEC-22 y UTOPIA) permiten obtener diseños hidráulicamente viables, cumpliendo con las restricciones fundamentales de capacidad, velocidades, profundidades y condiciones operativas establecidas para sistemas de alcantarillado. En este sentido, las diferencias entre metodologías no se manifiestan en el cumplimiento hidráulico básico, sino en la forma en que se alcanza dicho cumplimiento.

- Conclusión 2. Diferencias en el control geométrico del diseño

Las metodologías basadas en HEC-22 tienden a generar configuraciones geométricas más conservadoras, caracterizadas por mayores diámetros, pendientes uniformes y mayores profundidades de excavación, especialmente en tramos aguas abajo y en redes complejas. Por el contrario, UTOPIA demuestra una mayor capacidad de control geométrico, al ajustar simultáneamente diámetros y pendientes dentro del espacio factible de soluciones, evitando sobredimensionamientos innecesarios sin comprometer el desempeño hidráulico.

- Conclusión 3. Uso de caídas en cámaras de unión

El análisis desarrollado en esta tesis demuestra que, tanto en el diseño de series de tuberías como en redes complejas de alcantarillado, la conexión de los tramos a las cámaras de unión mediante la cota de batea constituye, en general, la solución geométrica más eficiente. Los resultados obtenidos muestran que la inclusión sistemática de caídas internas en las cámaras de unión, práctica común en metodologías tradicionales, no resulta necesaria en la mayoría de los casos y conduce a incrementos innecesarios en profundidades de excavación, costos de construcción y emisiones de carbono equivalente.

La metodología UTOPIA evidencia que es posible diseñar sistemas hidráulicamente viables y eficientes sin recurrir a caídas internas, salvo en aquellos casos estrictamente necesarios para cumplir restricciones externas específicas, como limitaciones topográficas, interferencias con otras infraestructuras o condiciones particulares del entorno. Este hallazgo pone de manifiesto que el uso indiscriminado de caídas en cámaras de unión no debe considerarse una regla general de diseño, sino una solución puntual sujeta a criterios técnicos claramente justificados.



- **Conclusión 4. Impacto económico de las decisiones de diseño**

El análisis económico muestra de forma consistente que la metodología UTOPIA conduce a los menores costos de construcción en todos los casos de estudio analizados. En los escenarios de series de tuberías, las diferencias de costo respecto a las metodologías tradicionales basadas en HEC-22 se incrementan con la pendiente del terreno, alcanzando incrementos porcentuales elevados en pendientes medias y altas. En redes complejas, estas diferencias se mantienen en rangos del orden del 15 % al 25 %, dependiendo de la topología de la red.

- **Conclusión 5. Dominancia del costo de las tuberías**

En todos los casos analizados, el costo asociado a las tuberías constituye el componente dominante del costo total del sistema, superando ampliamente el costo de las cámaras de unión. Esto evidencia que las decisiones relacionadas con la selección de diámetros y pendientes son el principal factor determinante del costo global de un sistema de alcantarillado, y refuerza la importancia de metodologías que optimicen estas variables de manera integrada.

- **Conclusión 6. Relación entre desempeño económico y ambiental**

El análisis de ciclo de vida demuestra que existe una relación directa entre las decisiones geométricas del diseño y el impacto ambiental del sistema. Las etapas de instalación y fabricación de tuberías concentran la mayor proporción de las emisiones de carbono equivalente, mientras que el transporte y el reciclaje presentan una contribución marginal. Las metodologías que conducen a mayores diámetros y profundidades de excavación generan, de manera consistente, mayores emisiones de CO₂.

- **Conclusión 7. Ventajas ambientales de UTOPIA**

La metodología UTOPIA presenta sistemáticamente las menores emisiones de carbono equivalente en todos los casos de estudio, tanto en series de tuberías como en redes complejas. Esta reducción del impacto ambiental es coherente con los menores costos de construcción observados y se explica por la disminución del volumen total de obra y la selección de configuraciones geométricas más eficientes.

- **Conclusión 8. Limitaciones de la aplicación parcial de HEC-22**

La aplicación parcial de la metodología HEC-22, basada en hojas de cálculo para el cálculo de pérdidas de energía en cámaras de unión, resulta útil para sistemas en serie y constituye una herramienta práctica ampliamente adoptada por empresas prestadoras del servicio. No obstante, su aplicación se encuentra limitada a configuraciones simples y no permite abordar de manera directa el diseño de redes complejas, lo que restringe su alcance frente a metodologías de optimización global.



- Conclusión 9. Aporte principal de la tesis

El principal aporte de esta tesis radica en demostrar que la incorporación de enfoques de optimización multiobjetivo en el diseño de sistemas de alcantarillado urbano permite mejorar simultáneamente el desempeño hidráulico, reducir los costos de construcción y disminuir el impacto ambiental del sistema. Los resultados obtenidos evidencian que metodologías como UTOPIA constituyen una alternativa técnica y económicamente viable para avanzar hacia diseños más eficientes y sostenibles.

En conjunto, las conclusiones presentadas permiten afirmar que las decisiones geométricas adoptadas durante el diseño de sistemas de alcantarillado tienen un impacto determinante no solo en el desempeño hidráulico del sistema, sino también en sus costos de construcción y en su impacto ambiental. Los resultados de esta tesis evidencian que enfoques de diseño basados en la optimización integrada de variables, como el propuesto por UTOPIA, permiten cuestionar prácticas tradicionales ampliamente aceptadas y avanzar hacia soluciones más eficientes y sostenibles. Estas conclusiones constituyen la base para formular recomendaciones orientadas tanto a la práctica profesional como al desarrollo futuro de metodologías de diseño de redes de alcantarillado, las cuales se presentan en el siguiente capítulo



7. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones formuladas en esta tesis, se presentan a continuación una serie de recomendaciones orientadas tanto a la práctica profesional del diseño de sistemas de alcantarillado como a futuras líneas de investigación que permitan ampliar y profundizar los alcances del trabajo desarrollado.

1. Se recomienda que futuros trabajos de investigación exploren la posibilidad de extender la aplicación parcial de la metodología HEC-22, actualmente limitada a sistemas en serie, hacia el diseño de redes complejas de alcantarillado. El desarrollo de herramientas o procedimientos que permitan aplicar de forma sistemática el cálculo de pérdidas de energía en cámaras de unión dentro de redes ramificadas facilitaría la evaluación del impacto real de este enfoque en configuraciones más representativas de sistemas urbanos, permitiendo comparaciones más directas con metodologías de optimización global como UTOPIA.
2. El análisis de ciclo de vida desarrollado en esta tesis se basa en datos de referencia obtenidos a partir de un caso de estudio específico. Se recomienda que investigaciones futuras incorporen otras fuentes de datos o casos de estudio alternativos, con el fin de evaluar la sensibilidad de los resultados ambientales frente a variaciones en los supuestos de fabricación, transporte, instalación y reciclaje de las tuberías. Este tipo de análisis permitiría determinar la robustez de las conclusiones ambientales y establecer rangos de variación más amplios para la estimación de emisiones de carbono equivalente.
3. Aunque el presente trabajo se centra en las etapas de fabricación, transporte, instalación y reciclaje, se recomienda que futuros estudios consideren la inclusión explícita de la etapa de operación y mantenimiento dentro del análisis de ciclo de vida. La incorporación de esta etapa permitiría evaluar el impacto ambiental acumulado durante la vida útil del sistema y analizar si las decisiones geométricas de diseño influyen en los costos y emisiones asociadas al mantenimiento, la limpieza y la rehabilitación de las redes de alcantarillado.
4. Se recomienda ampliar el análisis incorporando restricciones adicionales de diseño, tales como interferencias con otras infraestructuras urbanas, condiciones geotécnicas específicas, limitaciones constructivas locales o restricciones normativas particulares. La inclusión de estos factores permitiría evaluar el desempeño de las metodologías analizadas en contextos más cercanos a la práctica profesional real y verificar la flexibilidad de los enfoques de optimización frente a condiciones externas más exigentes.
5. El presente estudio se desarrolló considerando tuberías de concreto; por lo tanto, se recomienda que futuros trabajos analicen la aplicación de las metodologías evaluadas a otros materiales de tubería, como PVC, PEAD u otros, incorporando sus propiedades hidráulicas, estructurales, económicas y ambientales específicas. Esto permitiría ampliar la aplicabilidad



de los resultados y evaluar cómo la elección del material interactúa con las decisiones geométricas del diseño.

6. Finalmente, se recomienda que los resultados y conclusiones de esta tesis sean utilizados como base para pilotos de implementación en entidades prestadoras del servicio de alcantarillado, con el fin de evaluar el desempeño de metodologías de optimización en proyectos reales. La aplicación práctica de estos enfoques permitiría validar los beneficios identificados en términos de costos y sostenibilidad, así como facilitar su adopción progresiva dentro de los procesos habituales de diseño y planificación de infraestructura urbana.



8. REFERENCIAS

1. Ariza., A. (2022). *Estado del arte de los costos de toneladas de carbono equivalente para ser incluidos en diseños multiobjetivo de sistemas hidráulicos urbanos* (Tesis de maestría). Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
2. Ecoinvent Centre. (2022). *Ecoinvent Database v3.8*. <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff>
3. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (2024). *Norma técnica NS-029-37-51: Criterios de diseño hidráulico de cámaras y pozos de inspección en redes de alcantarillado* (pp. 37–51). Bogotá, Colombia.
4. Empresas Municipales de Cali (EMCALI). (2021). *Norma técnica NDC-SE-RA-001/V2.0: Criterios para el análisis hidráulico de cámaras de inspección en sistemas de alcantarillado* (pp. 20–28). Cali, Colombia.
5. Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2021). *Normas de diseño de sistemas de alcantarillado. Capítulo 8: Estructuras complementarias. Sección 8.3.6: Pérdidas de energía en estructuras de conexión y/o inspección* (pp. 8-116 a 8-121). Medellín, Colombia.
6. FHWA (Federal Highway Administration). (2009). *Urban Drainage Design Manual – HEC-22* (3rd ed.). U.S. Department of Transportation.
7. Ghimire, S. R., Johnston, J. M., & Ingwersen, W. W. (2014). Life cycle assessment of a sanitary sewer system. *Environmental Research Letters*, 9(2), 024017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/2/024017>
8. IEA - International Energy Agency. (2018). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, IEA. Paris <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
9. International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.
10. International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. ISO.
11. IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report – Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
12. Li, G., & Matthew, R. G. S. (1990). New approach for optimization of urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering*, 116(5), 927–944. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1990\)116:5\(927\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:5(927))
13. Maurer, M., Wolfram, M., & Anja, H. (2010). Factors affecting economies of scale in combined sewer systems. *Water Science and Technology*, 62(1), 36–41. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.241>
14. Mays, L. W. (2011). *Water Resources Engineering* (2nd ed.). Wiley.
15. Metcalf & Eddy. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill.



16. PAVCO Wavin. (s. f.). *Plantilla de cálculo hidráulico para cámaras de inspección basada en HEC-22* [Hoja de cálculo]. PAVCO Colombia. (*Documento técnico de uso profesional*)
17. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO D. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias. -- 2da. Ed. / Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico (Ed.); Universidad de los Andes. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA (consultor). Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2012.
18. Saldarriaga, J. (2024). Optimal design of urban sewer systems [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/202962>
19. Saldarriaga, J., Herrán, J., & Iglesias-Rey, P. L. (2023). Optimal sewer network design for cities in hilly regions. *Urban Water Journal*, 20(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2229303>
20. Tchobanoglous, G., & Burton, F. L. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill.
21. Water Environment Federation (WEF). (2009). *Energy Conservation in Water and Wastewater Facilities* (Manual of Practice No. 32).
22. Wiedmann, T., & Minx, J. (2008) . A Definition of Carbon Footprint. *CC Pertsova, Ecological Economics Research Trends*. 2. 55-65.



9. ANEXOS

Anexo 9-1. Resultados preliminares de diseño HEC-22 – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

Identificación		Longitud [m] (3)	Área de Drenaje		Coef. Escorrentía "C" (6)	"Área" X "C"		T. de Concentración		Lluvia "I" [mm/hr] (11)	Caudal "Q" [m³/s] (12)	Diámetro Tubería [m] (13)	Caudal a tubo lleno [m³/s] (14)	Velocidad		Tiempo Sección [min] (17)	Cota de Batea		Caída de Corona [m] (20)	Pendiente [m/m] (21)
Desde (1)	Hasta (2)		Inc. [ha] (4)	Total [ha] (5)		Inc. [ha] (7)	Total [ha] (8)	Entrada [min] (9)	Sistema [min] (10)					Lleno [m/s] (15)	Diseño [m/s] (16)		Agua Arriba [m] (18)	Agua Abajo [m] (18)		
40	41	110.0	0.26	0.26	0.73	0.19	0.19	3	5	180	0.1	0.46	0.52	3.14	2.32	1	111.41	108.11	-	0.03
41	42	100.0	0.14	0.4	0.73	0.1	0.29	2	5	180	0.15	0.46	0.52	3.14	2.64	1	107.92	104.93	0.18	0.03
42	43	4.3	0.13	0.53	0.73	0.09	0.38	2	5	180	0.19	0.61	0.2	0.69	0.79	0	104.88	104.87	0.048	0.001
43	44	17.0	0.00	0.53	-	-	0.38	-	5	180	0.19	0.61	2.19	2.19	1.84	0	100.97	100.8	3.90	0.01

Fuente. Elaboración propia a partir de la Tabla 2-5

Anexo 9-2. Resultados niveles de EGL y HGL - Tabla A – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

ID Estructura [m] (1)	Diámetro d [m] (2)	Caudal Q [m³/s] (3)	Longitud L [m] (4)	Velocidad V [m/s] (5)	Prof. y [m] (6)	Prof. Crit. y _c [m] (7)	Altura Vel. V²/2g [m] (8)	EGL _o [m] (9)	HGL _o [m] (10)	Pend. Fricción S _f [m/m] (11)	Perdidas Tuberías [m/m] (12)	EGL _i [m] (13)	HGL _i [m] (14)	E _s Tabla B [m] (15)	EGL _a [m] (16)	Cota Corona Agua Arriba [m] (17)	Cota Terreno [m] (18)
Descarga								101.65	101.65								
44									101.65							101.41	101.41
43	0.61	0.19	17	0.65	Full	n/a	0.022	101.672	101.65	0.00088	0.015	101.687	101.665	0.741	101.711	105.48	106.00
42	0.61	0.19	4.3	0.79	0.48	0.29	0.032	105.382	105.35	0.0023	0.01	105.392	105.36	0.538	105.42	105.39	106.47
41	0.46	0.15	100	0.90	Full	n/a	0.041	105.436	105.395	0.00247	0.247	105.683	105.642	Suposición de Flujo Lleno Invalida. No es Caso A			
	0.46	0.15	100	2.64	0.17	0.26	0.36	105.436	105.365	-	0	108.46	108.1	0.53	108.46	108.57	109.77
40	0.46	0.10	110	2.32	0.14	0.21	0.27	108.47	108.442	-	0	111.83	111.55	0.42	111.83	-	112.77

Fuente. Elaboración propia a partir de la Tabla 2-5



Anexo 9-3. Resultados niveles de EGL y HGL - Tabla B – Caso de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

I.D [m] (1)	Salida H _o (2)	Perdidas en Tubería [m]						Perdidas en Estructura [m]										
		H _f (3)	H _b (4)	H _c (5)	H _e (6)	H _i (7)	Total (8)	E _i (9)	y+(P/γ) (10)	DI (11)	E _{ai} (12)	C _B (13)	C ₀ (14)	C _P (15)	H _a (16)	E _a (17)		
44	0.022	Suposición de Flujo Lleno																
		0.015	0	0	0	0	0.015											
43	0	Suposición de Flujo Lleno						0.717	0.695	0.266	0.721	-0.05	0	5.21	0.021	0.742		
		0.01	0	0	0	0	0.01											
42	0.016	Suposición de Flujo Lleno						0.512	0.480	0.266	0.518	-0.05	2.5	0.58	0.02	0.538		
		0.247	0	0	0	0	0.247											
42	0	Suposición de Flujo Parcialmente Lleno - Supercrítico																
		0	0	0	0	0	0.0											
41	0.011	Suposición de Flujo Parcialmente Lleno - Supercrítico						0.53	0.17	0.425	0.415	-0.05	0	1.05	0.0	0.53		
		0	0	0	0	0	0.0											
40								0.42	0.15	0.283	0.316	-0.05	0	2.27	0.0	0.42		

Fuente. Elaboración propia a partir de la Tabla 2-5

Anexo 9-4. Resultados diseño UTOPIA - Caso 1 de Estudio 1: Ejemplo HEC-22

Pozo Inicio	Pozo Final	Diámetro [m]	Cota Inicio [m]	Cota Final [m]	Pendiente [m/m]	Longitud [m]	Relación de Llenado [%]	Profundidad Normal [m]	Theta [rad]	Radio Hidráulico [m]	Área Mojada [m ²]	Velocidad [m/s]	Esfuerzo Cortante [Pa]	Froude [-]
40	41	0.46	111.37	108.37	0.027	110	30.35%	0.140	2.33	0.08	0.043	2.35	21.24	2.36
41	42	0.46	108.37	101.37	0.07	100	38.40%	0.177	2.67	0.10	0.059	4.25	65.63	3.75
42	43	0.46	101.37	101.1	0.063	4.3	54.72%	0.252	3.33	0.12	0.093	4.73	74.83	3.35
43	44	0.46	101.1	100.1	0.059	17	71.42%	0.329	4.03	0.14	0.127	4.96	79.13	2.87

Fuente. Elaboración propia



Anexo 9-5 Archivo con la información del Caso de Estudio 2: Series de Tubos - 10 Tuberías

Archivo M.S Excel – Serie de 10 Tuberías

Anexo 9-6 Archivo con la información del Caso de Estudio 2: Series de Tubos - 20 Tuberías

Archivo M.S Excel – Serie de 20 Tuberías

Anexo 9-7 Archivo con la información del Caso de Estudio 3: Redes Complejas

Archivo M.S Excel – Redes Complejas