

TESIS DE MAESTRÍA

INGENIERÍA CIVIL

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN
DE LA TECNOLOGÍA SIN ZANJA ÓPTIMA PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE REDES URBANAS DE AGUA**

PRESENTADO POR:

JEISSON ORLANDO LEÓN CARVAJAL

ASESOR: JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA

*Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, Departamento
de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
ENERO, 2025**



AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, quien ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto.

Infinitas gracias a mis padres, quienes me han apoyado en todas mis decisiones, quienes me han ayudado a aprender de mis errores y me han enseñado a no rendirme ante nada, por su apoyo y amor incondicional.

Al Ingeniero Juan Guillermo Saldarriaga, asesor del proyecto, por permitirme aprender de él, por la paciencia que tuvo para guiarme en este proceso, por su sabiduría, tiempo y dedicación.

Al Ingeniero Juan José Hoyo, quien fue partícipe del proyecto como asesor externo, dándome la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, esto, mediante el apoyo en el desarrollo de la caracterización de las diferentes tecnologías de instalación de tubería sin zanja desde un aspecto práctico.

Finalmente, agradezco a mis demás familiares, amigos, profesores, compañeros de trabajo y estudio y en especial a mi pareja, quienes me acompañaron a lo largo del desarrollo de mi tesis y cada día me enseñaron cosas nuevas.



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 14 |
| 2.1 Objetivo General | 14 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 15 |
| 3.1 Tecnologías sin zanja o Trenchless | 15 |
| 3.1.1 Clasificación de las tecnologías sin zanja | 15 |
| 3.2 Horizontal Auger Boring | 17 |
| 3.2.1 Tipos de métodos Auger Boring | 18 |
| 3.2.2 Ventajas | 20 |
| 3.2.3 Desventajas | 20 |
| 3.3 Horizontal Directional Drilling | 20 |
| 3.3.1 Tipos de perforación horizontal dirigida | 23 |
| 3.3.2 Ventajas | 24 |
| 3.3.3 Limitaciones | 24 |
| 3.4 Pipe Ramming | 24 |
| 3.4.1 Ventajas | 25 |
| 3.4.2 Limitaciones | 25 |
| 3.5 Método de Microtunelado | 26 |
| 3.5.1 Tipos de microtunelado | 28 |
| 3.5.2 Ventajas | 29 |
| 3.5.3 Limitaciones | 30 |
| 3.6 Método Pilot Tube | 30 |
| 3.6.1 Ventajas | 31 |
| 3.6.2 Limitaciones | 31 |
| 3.7 Direct Pipe o Pipe Thrusting | 31 |
| 3.7.1 Ventajas | 32 |
| 3.7.2 Limitaciones | 33 |
| 3.8 Métodos de Compactación | 33 |



| | | |
|-------------|---|------------|
| 3.8.1 | Tipos de métodos de compactación..... | 34 |
| 3.8.2 | Ventajas | 35 |
| 3.8.3 | Limitaciones | 36 |
| 3.9 | Redes urbanas de agua | 36 |
| 3.10 | Materiales de tubería | 37 |
| 3.11 | Suelo, sus tipos y clasificación | 41 |
| 3.11.1 | Horizontes (capas) del suelo | 41 |
| 3.11.2 | Tipos de suelo | 42 |
| 3.11.3 | Clasificación del suelo | 43 |
| 3.12 | Cantos rodados o bolos | 44 |
| 3.13 | Roca | 44 |
| 4. | METODOLOGÍA..... | 46 |
| 5. | ESTADO DEL ARTE | 48 |
| 5.1 | Diámetro de la tubería a instalar..... | 50 |
| 5.2 | Longitud de instalación | 53 |
| 5.3 | Material de la tubería a instalar | 57 |
| 5.4 | Espacio requerido para la ejecución de los trabajos | 61 |
| 5.5 | Profundidad de instalación | 65 |
| 5.6 | Condiciones de suelo aptas para la instalación | 68 |
| 5.7 | Precisión de la instalación | 73 |
| 5.8 | Productividad o tasa de avance | 75 |
| 5.9 | Emisiones de CO ₂ durante la instalación..... | 78 |
| 5.10 | Costos promedio de instalación..... | 86 |
| 5.11 | Resultados del estado del arte | 95 |
| 6. | CASOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS SIN ZANJA | 109 |
| 6.1 | PERFOTÉCNICA | 109 |
| 6.2 | Instituto de Desarrollo Urbano – IDU | 112 |
| 6.3 | BESSAC ANDINA | 113 |
| 6.4 | PERFHORA | 115 |
| 7. | DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIN ZANJA ÓPTIMA | 116 |



| | |
|--|-----|
| 8. CASO DE ESTUDIO | 123 |
| 9. CONCLUSIONES | 130 |
| 10. RECOMENDACIONES | 133 |
| 11. REFERENCIAS | 134 |
| 12. ANEXOS | 140 |
| 12.1 ANEXO 1. ÍNDICES IPC SERIE DE EMPALME 100 (DIGITAL) .. | 140 |
| 12.2 ANEXO 2. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN TECNOLOGÍA SIN ZANJA (DIGITAL) | 140 |
| 12.3 ANEXO 3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – NIVEL 1 (ASPECTOS DEL SITIO) | 140 |
| 12.4 ANEXO 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – NIVEL 2 (CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA A INSTALAR) | 148 |
| 12.5 ANEXO 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – NIVEL 3 (CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO) | 159 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Divisiones principales de los métodos de excavación sin zanja. Adaptado de: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021) | 16 |
| Figura 2 Métodos de construcción sin zanja. Adaptado de: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021) 16 | |
| Figura 3 Métodos de perforación horizontal de tierra a analizar. Adaptado de: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)..... | 17 |
| Figura 4 Esquema general de aplicación del método Auger Boring. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023) . | 18 |
| Figura 5 Auger Boring tipo Track-Type. Fuente: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021) | 19 |
| Figura 6 Auger Boring tipo Cradle-Type. Fuente: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021) | 20 |
| Figura 7 Proceso de instalación de la perforación piloto. Fuente: (Santiago, 2015)..... | 21 |
| Figura 8 Proceso de ensanchamiento de la perforación piloto. Fuente: (Santiago, 2015) | 22 |
| Figura 9 Eslabón para sujetar la tubería a instalar y ensanchador. Fuente: (Technologies, 2023) | 23 |
| Figura 10 Ejemplo de cabezales de perforación para aplicaciones pequeñas. Fuente: (Wuxi Caston Drill Tools Co., 2023) | 23 |
| Figura 11 Brocas de perforación de diferentes diámetros y formas para realización de la perforación piloto. Fuente: Terra Trenchless Technologies | 23 |
| Figura 12 Esquema del proceso del método Pipe Ramming. Fuente: (Santiago, 2015) | 25 |
| Figura 13 Esquema del sistema de excavación con microtuneladora. Fuente: (Santiago, 2015)..... | 26 |
| Figura 14 Máquina microtuneladora SL60P. Fuente: (Akkerman, 2023) | 27 |
| Figura 15 Aspecto pozo de lanzamiento del método de microtunelado. Fuente: (Santiago, 2015)..... | 27 |
| Figura 16 Aspecto pozo de salida del método de microtunelado. Fuente: (Santiago, 2015) | 28 |
| Figura 17 Sistema de perforación por microtunelado tipo lodo. Fuente: (HERRENKNECHT, 2023) | 29 |
| Figura 18 Sistema de perforación por microtunelado tipo sinfines. Fuente: (HERRENKNECHT, 2023) . | 29 |
| Figura 19 Proceso de perforación de la tubería piloto. Fuente: Obtenido de Akkerman en (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021) | 30 |
| Figura 20 Proceso de instalación tubería final. Fuente: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021) | 31 |
| Figura 21 Esquema del proceso Direct Pipe y sus componentes. Fuente: (HERRENKNECHT, 2023) | 32 |
| Figura 22 Ejemplo de cabezas de perforación. Fuente: (Santiago, 2015)..... | 34 |
| Figura 23 Martillo impactador. Fuente: (COPPARD, 2023)..... | 35 |
| Figura 24 Proceso de ejecución del método de perforación percusiva por impacto. Fuente: (Santiago, 2015)..... | 35 |
| Figura 25 Horizontes (capas) del suelo. Fuente: (Laboratorio, 2024) | 42 |
| Figura 26 Comparación de tamaños entre la arena, limo y arcilla. Fuente: (Laboratorio, 2024) | 43 |
| Figura 27 Diagrama de flujo del proceso metodológico del proyecto | 47 |



| | |
|--|-----|
| Figura 28 Resultados de las emisiones de CO ₂ durante la instalación de tubería mediante el método Auger Boring | 79 |
| Figura 29 Resultados de las emisiones de CO ₂ durante la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling | 82 |
| Figura 30 Resultados de las emisiones de CO ₂ durante la instalación de tubería mediante el método Microtunelado..... | 84 |
| Figura 31 Resultados de las emisiones de CO ₂ durante la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube..... | 85 |
| Figura 32 Costo-efectividad de las tecnologías sin zanja con respecto al zanjado (Dólar del año 1999). Fuente: (Kumar & Patel, 2019)..... | 90 |
| Figura 33 Costo recomendado por pie lineal para los métodos de construcción sin zanja (Dólar del año 2004). Fuente: (Kumar & Patel, 2019) | 90 |
| Figura 34 Comparativo de costos de la instalación y suministro de tubería. Fuente: (Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018)..... | 92 |
| Figura 35 Comparación del costo estimado (US\$/pie lineal) por tecnología para el caso de estudio. Fuente: (Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) | 93 |
| Figura 36 Reporte del proyecto de instalación de tuberías de alcantarillado mediante el método Auger Boring en el Aeropuerto El Dorado. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)..... | 109 |
| Figura 37 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Auger Boring en la Calle 183 de Bogotá. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)..... | 110 |
| Figura 38 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Pipe Ramming en Villavicencio. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023) | 111 |
| Figura 39 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Pipe Ramming en Barranca de Upía. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)..... | 112 |
| Figura 40 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Microtunelado en la Avenida 68 de Bogotá. Fuente: (Instituto de Desarrollo Urbano, 2023) | 113 |
| Figura 41 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Auger Boring en Zamora, España. Fuente: (PERFHORA, 2023) | 115 |
| Figura 42 Información reportada para la tecnología sin zanja Microtunelado | 117 |
| Figura 43 Interfaz gráfica primer nivel de evaluación de las tecnologías sin zanja – Aspectos del sitio . | 118 |
| Figura 44 Interfaz gráfica segundo nivel de evaluación de las tecnologías sin zanja – Características de la tubería a instalar..... | 119 |
| Figura 45 Interfaz gráfica tercer nivel de evaluación de las tecnologías sin zanja – Características del diseño..... | 120 |
| Figura 46 Interfaz gráfica cuarto nivel de la metodología – Aspectos varios..... | 121 |
| Figura 47 Localización del proyecto IDU-1746-2014. Tomado de: (Rodriguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) | 123 |
| Figura 48 Planta del tramo de alcantarillado propuesto para la conexión del Pozo 95 con el Pozo 2, a instalar mediante tecnología sin zanja. Tomado de: (Rodriguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) | 124 |



| | |
|--|-----|
| Figura 49 Perfil del tramo de alcantarillado propuesto para la conexión del Pozo 95 con el Pozo 2, a instalar mediante tecnología sin zanja. Tomado de: (Rodriguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) | 125 |
| Figura 50 Resultados del primer nivel de evaluación del caso de estudio..... | 126 |
| Figura 51 Resultados del segundo nivel de evaluación del caso de estudio | 127 |
| Figura 52 Resultados del tercer nivel de evaluación del caso de estudio | 128 |
| Figura 53 Valores obtenidos en el cuarto nivel de la metodología para el caso de estudio | 129 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Grupos de clasificación del suelo según la Norma ASTM D2487, 2017 | 44 |
| Tabla 2 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Auger Boring | 50 |
| Tabla 3 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Horizontal Directional Drilling | 51 |
| Tabla 4 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Pipe Ramming | 51 |
| Tabla 5 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Microtunelado | 52 |
| Tabla 6 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Pilot Tube | 52 |
| Tabla 7 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Direct Pipe | 52 |
| Tabla 8 Rango de diámetros de aplicación en milímetros de los Métodos de Compactación | 53 |
| Tabla 9 Longitud de instalación en metros del método Auger Boring | 53 |
| Tabla 10 Longitud de instalación en metros del método Horizontal Directional Drilling | 54 |
| Tabla 11 Longitud de instalación en metros del método Pipe Ramming | 54 |
| Tabla 12 Longitud de instalación en metros del método Microtunelado | 55 |
| Tabla 13 Longitud de instalación en metros del método Pilot Tube | 56 |
| Tabla 14 Longitud de instalación en metros del método Direct Pipe | 57 |
| Tabla 15 Longitud de instalación en metros de los Métodos de Compactación | 57 |
| Tabla 16 Material de tubería instalable mediante el método Auger Boring | 58 |
| Tabla 17 Material de tubería instalable mediante el método Horizontal Directional Drilling | 58 |
| Tabla 18 Material de tubería instalable mediante el método Pipe Ramming | 59 |
| Tabla 19 Material de tubería instalable mediante el método Microtunelado | 59 |
| Tabla 20 Material de tubería instalable mediante el método Pilot Tube | 60 |
| Tabla 21 Material de tubería instalable mediante el método Direct Pipe | 60 |
| Tabla 22 Material de tubería instalable mediante los Métodos de Compactación | 60 |
| Tabla 23 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Auger Boring | 61 |
| Tabla 24 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling | 62 |
| Tabla 25 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Pipe Ramming | 63 |
| Tabla 26 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Microtunelado | 63 |
| Tabla 27 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube | 64 |
| Tabla 28 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Direct Pipe | 64 |
| Tabla 29 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante los Métodos de Compactación | 65 |
| Tabla 30 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Auger Boring | 66 |



| | |
|--|----|
| Tabla 31 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling | 66 |
| Tabla 32 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Pipe Ramming | 66 |
| Tabla 33 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Microtunelado | 66 |
| Tabla 34 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube | 67 |
| Tabla 35 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Direct Pipe | 67 |
| Tabla 36 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante los Métodos de Compactación .. | 67 |
| Tabla 37 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Auger Boring | 68 |
| Tabla 38 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling..... | 69 |
| Tabla 39 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Pipe Ramming .. | 70 |
| Tabla 40 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Microtunelado .. | 71 |
| Tabla 41 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube | 71 |
| Tabla 42 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Direct Pipe | 72 |
| Tabla 43 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante los Métodos de Compactación | 72 |
| Tabla 44 Nivel de precisión logrado mediante el método Auger Boring | 73 |
| Tabla 45 Nivel de precisión logrado mediante el método Horizontal Directional Drilling | 73 |
| Tabla 46 Nivel de precisión logrado mediante el método Pipe Ramming..... | 74 |
| Tabla 47 Nivel de precisión logrado mediante el método Microtunelado | 74 |
| Tabla 48 Nivel de precisión logrado mediante el método Pilot Tube..... | 74 |
| Tabla 49 Nivel de precisión logrado mediante el método Direct Pipe | 75 |
| Tabla 50 Nivel de precisión logrado mediante los Métodos de Compactación..... | 75 |
| Tabla 51 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Auger Boring..... | 75 |
| Tabla 52 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Horizontal Directional Drilling | 76 |
| Tabla 53 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Pipe Ramming..... | 76 |
| Tabla 54 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Microtunelado | 76 |
| Tabla 55 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Pilot Tube..... | 77 |
| Tabla 56 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Direct Pipe | 77 |
| Tabla 57 Productividad o tasa de avance lograda mediante los Métodos de Compactación | 77 |
| Tabla 58 Rango de costos de instalación para las tecnologías sin zanja analizadas. Adaptado de: (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) | 87 |
| Tabla 59 Rango de costos de instalación reportados por (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) ajustados a valor presente | 89 |
| Tabla 60 Costo recomendado por metro lineal reportados por (Kumar & Patel, 2019) ajustados a valor presente..... | 91 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 61 Costos reportados por (Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018) ajustados a valor presente | 92 |
| Tabla 62 Costos obtenidos por metro lineal reportados por (Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) ajustados a valor presente | 94 |
| Tabla 63 Costos promedio de instalación mediante Microtunelado según el Sistema de Avalúo e Infraestructura (SAI)..... | 94 |
| Tabla 64 Cuadro comparativo del rango de diámetro de aplicación en milímetros..... | 96 |
| Tabla 65 Cuadro comparativo de la longitud máxima de instalación en metros | 96 |
| Tabla 66 Cuadro comparativo del material de tubería instalable | 97 |
| Tabla 67 Cuadro comparativo del espacio requerido para la instalación | 98 |
| Tabla 68 Cuadro comparativo de la profundidad de instalación en metros | 99 |
| Tabla 69 Cuadro comparativo del tipo de suelo idóneo para la instalación..... | 99 |
| Tabla 70 Cuadro comparativo del nivel de precisión de la instalación | 101 |
| Tabla 71 Cuadro comparativo de la productividad de la instalación | 102 |
| Tabla 72 Cuadro comparativo de las emisiones de CO ₂ generadas durante la instalación de tubería | 102 |
| Tabla 73 Resumen de los costos de instalación por metro lineal indexados según los valores reportados por las diferentes referencias | 103 |
| Tabla 74 Costo promedio de instalación de las diferentes tecnologías sin zanja para diferentes diámetros | 105 |
| Tabla 75 Costo promedio de instalación de cada tecnología sin zanja | 107 |



1. INTRODUCCIÓN

En Colombia y el mundo, actualmente la gran conglomeración de la población en los centros urbanos ha conllevado al crecimiento y desarrollo agigantado de las urbanizaciones. Esta situación genera un incremento en las demandas presentes y futuras del suministro de servicios públicos de las nuevas áreas urbanas, por ende, se genera el requerimiento de la construcción de nuevas redes de suministro de agua, redes de drenaje de aguas residuales y pluviales, redes de gas, redes eléctricas, redes de telecomunicaciones, entre otras; o en su defecto, se requiere realizar la reconfiguración, reemplazo y/o reparación de las redes existentes, con el fin de garantizar una oferta adecuada a la población actual y futura, y generar buenas condiciones de vida a esta misma.

Regularmente en Colombia, este tipo de actividades bien sea la construcción de nuevas redes o la reparación de estas se realiza mediante los procedimientos técnicos de zanjado, en el cual se debe abrir una zanja en el suelo siguiendo el trazado de la tubería para instalar los tramos necesarios de la red, posteriormente, la zanja se rellena y se compacta y, finalmente se construye la estructura final de rasante para finalizar el proceso y dejar funcionales las áreas de trabajo. Estos procedimientos generan grandes afectaciones en el día a día de la población, puesto que, se realizan bloqueos en calles principales o secundarias durante el tiempo de la ejecución de las actividades, lo cual conlleva a la generación de atascos en la malla vial de las ciudades, y causa inconformidades y malestares a todos sus pobladores. Debido a lo anterior, se requiere desarrollar una logística adecuada del tránsito de la ciudad para ejecutar las construcciones y/o reparaciones de las redes enterradas sin presentar inconvenientes durante los procesos de zanjado.

Sin embargo, hoy en día, existen nuevas tecnologías que permiten el desarrollo de estos proyectos de construcción y/o reparación de redes enterradas sin necesidad del uso de zanjado, lo cual permite la ejecución de los trabajos sin afectar de una manera muy directa las actividades diarias de las personas. De igual forma, este tipo de tecnologías, permiten el desarrollo de proyectos de redes enterradas a grandes profundidades con un menor tiempo de construcción, menor requerimiento de movimiento de tierras y en algunos casos con un menor costo.

Cada una de estas tecnologías se desarrolla mediante diferentes procedimientos y con el uso de diversos equipos que permiten la instalación de redes enterradas sin necesidad de zanjado. De igual forma, cada tecnología cuenta con unas condiciones físicas requeridas en el área de estudio y además, cuenta con ciertas limitaciones con relación a la naturaleza de la red, las cuales pueden ser, tipo de suelo (geología), topografía, nivel freático, disponibilidad de espacio, catastro de redes existentes, diámetros y materiales de tuberías, nivel de precisión, profundidades máximas y mínimas, entre otras. El conjunto de las



condiciones encontradas en el sitio de ejecución del proyecto y las premisas del diseño determinarían la factibilidad o imposibilidad del uso de cada una de las tecnologías.

En el presente trabajo se desarrollará un estudio de las diferentes tecnologías sin zanja o Trenchless reportadas en la literatura y las más habituales del mercado regional, sin contar con algunas otras menos usuales. Con esta investigación se busca determinar las características técnicas, los procesos constructivos y las condiciones requeridas para la ejecución de cada una de estas para la construcción de redes urbanas de agua (agua potable y alcantarillado). Se realizará una comparación técnica y económica entre las tecnologías y se desarrollará una metodología para la selección de la tecnología óptima a usar para las condiciones existentes del área y las premisas de diseño de un proyecto específico.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para la selección de la tecnología sin zanja óptima a usar para la construcción de un proyecto de redes urbanas de agua.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica de diferentes tecnologías sin zanja factibles a utilizar para la construcción de redes urbanas de agua.
- Describir las características y requerimientos técnicos de cada una de las tecnologías sin zanja estudiadas de acuerdo con la información recopilada.
- Comparar técnica y económicamente las tecnologías sin zanja estudiadas, mostrando los diferentes parámetros diferenciadores entre estas.
- Describir diferentes casos de implementación de tecnologías sin zanja en la construcción de redes urbanas de agua.
- Desarrollar una metodología de selección de la tecnología sin zanja más apropiada a usar para la construcción de redes urbanas de agua, esta, teniendo en cuenta la información de entrada definida para un proyecto específico y las condiciones presentes en el área de este.
- Establecer un caso de estudio que pueda ser evaluado por medio de la metodología desarrollada.



3. MARCO TEÓRICO

3.1 Tecnologías sin zanja o Trenchless

Las tecnologías sin zanja son un conjunto de metodologías para la instalación de infraestructura subterránea que prescinden de la realización de excavaciones en la longitud del trayecto, evitando así mayores afectaciones en superficie, ya que requieren una excavación mínima en el acceso y en la salida de la tubería (Sánchez, 2018).

Este tipo de tecnologías se utiliza para la renovación, recuperación y/o construcción de redes de servicio enterradas, entre las cuales se pueden mencionar las redes de acueducto, alcantarillado, gas, comunicaciones, eléctricas, oleoductos, entre otros.

Las tecnologías sin zanja permiten optimizar los tiempos y costos de ejecución, al igual que reducir los impactos ambientales y urbanos generados por los métodos tradicionales de excavación a cielo abierto, específicamente en interferencias como: cruces de vías, canales, ríos, humedales, vías férreas, pistas de aterrizaje y calles de rodaje, entre otras interferencias que presentan los trazados de los diferentes servicios enterrados (PERFOTÉCNICA, 2023).

A continuación, se listan algunas ventajas del uso de tecnologías sin zanja en la construcción de nuevas redes de acuerdo con (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

- Minimizan la necesidad de alterar el entorno existente, el tráfico o las áreas de vivienda y trabajo congestionadas.
- Requieren menos espacio subterráneo, lo que minimiza las posibilidades de interferir con los servicios públicos existentes o las tuberías abandonadas.
- Requieren un área de trabajo menos expuesta y, por lo tanto, son más seguras para los trabajadores como para la comunidad.
- Reduce o elimina la necesidad de remoción de desechos y minimiza el daño al pavimento (se ha observado que la esperanza de vida de los pavimentos se reduce hasta en un 60% con las reparaciones por excavación) y la perturbación de otros servicios públicos.

3.1.1 Clasificación de las tecnologías sin zanja

Los métodos de Tecnologías Trenchless, se dividen en 2 áreas principales: Métodos de construcción sin zanja y métodos de renovación sin zanja. Los métodos de construcción sin zanja incluyen todos los métodos para nuevas instalaciones de servicios públicos y tuberías, donde una nueva tubería o servicio público es instalado. Los métodos de renovación sin zanja incluyen todos los métodos de renovación y/o rehabilitación de un



sistema de tuberías o servicio público existente (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021). Cada una de estas categorías principales se divide en subcategorías.

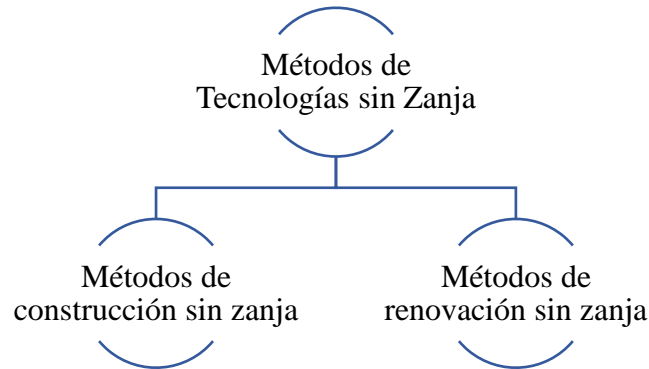


Figura 1 Divisiones principales de los métodos de excavación sin zanja. Adaptado de: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)

El presente trabajo se enfocará en el análisis de las tecnologías sin zanja para la construcción de nuevas redes, por lo cual, a continuación, se muestra la clasificación de los diferentes métodos presentes en esta área.

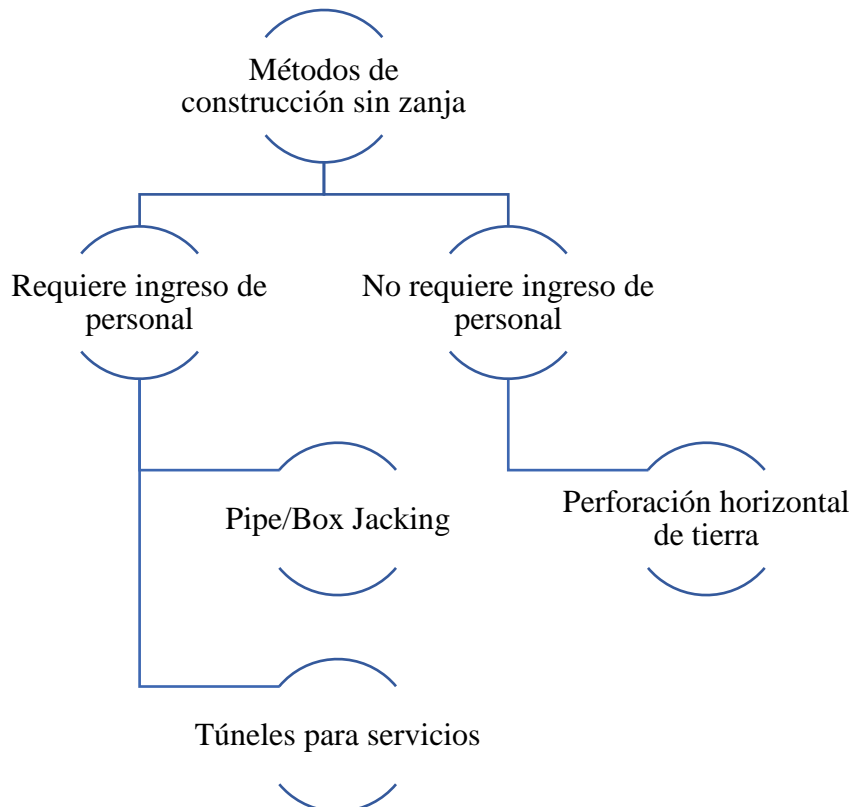


Figura 2 Métodos de construcción sin zanja. Adaptado de: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)

Los métodos de construcción sin zanja que requieren ingreso de personal se usan comúnmente para instalación de sistemas de gran envergadura, donde se manejan



diámetros superiores a 3 m, como puede ser la ejecución de túneles o cajones empujados. Dado que el trabajo se basa en la investigación de tecnologías factibles a usar para la construcción de redes urbanas de agua, se tendrán en cuenta únicamente los métodos de construcción sin zanja que no requieren el ingreso de personal al desarrollo de actividades dentro de las tuberías a instalar. En la siguiente Figura, se muestran los diferentes métodos de construcción sin zanja que se describirán y analizarán en el desarrollo del trabajo.

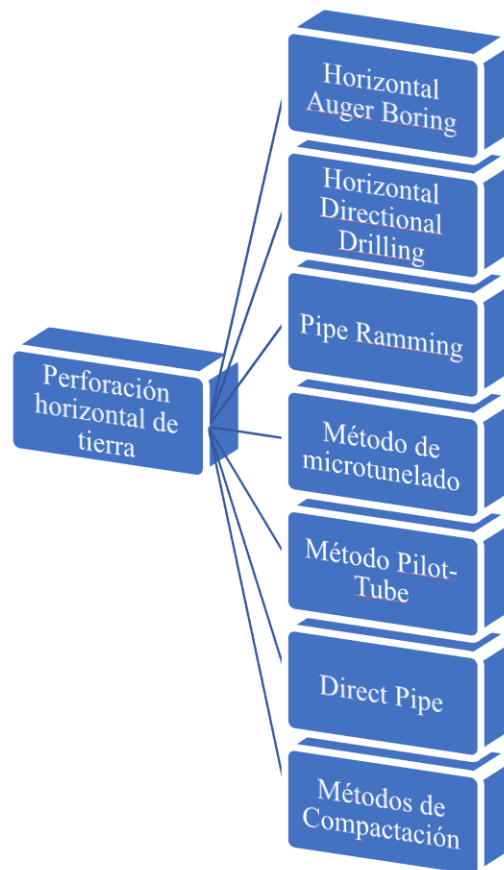


Figura 3 Métodos de perforación horizontal de tierra a analizar. Adaptado de: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)

A continuación, se presenta la descripción de cada una de las tecnologías que se evaluarán en este trabajo de investigación.

3.2 Horizontal Auger Boring

Horizontal Auger Boring es un método bien establecido para la instalación de tubería sin zanja, es ampliamente usado para la instalación de tuberías y carcassas de acero bajo terraplenes de ferrocarriles y carreteras. Es un método económico de instalación de tubería que puede ser usado en una variedad de condiciones de suelo para prevenir el corte en pavimentos y reducir las interrupciones del tráfico. La operación de este método



requiere de un pozo de entrada y de un pozo de salida. El equipo de perforación incluye la máquina perforadora, las carcasas, los sinfines y la cabeza de corte. El alineamiento vertical de la operación del Auger Boring puede ser controlado por el uso de un nivel de agua. Sin embargo, es difícil controlar el alineamiento vertical en la operación sin instrumentación especial (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

La perforación se realiza mediante el corte con un eje de broca equipada con bordes de corte tipo cincel. La perforación se puede realizar en diferentes tipos de suelos (arenosos, arcillosos, canto rodados y roca), y se realiza utilizando una cabeza de corte giratoria que se abre camino entre el suelo, mientras que la fuerza de hincado la proporcionan unos cilindros de empuje hidráulico. La cabeza cortante está unida al extremo delantero de una cadena sinfín. El material sobrante se transporta de vuelta al pozo de entrada por la rotación del tornillo dentro de la tubería de acero. La tubería de acero y las diferentes secciones del tornillo sinfín se van añadiendo a medida que la máquina avanza (Santiago, 2015). En la siguiente figura se puede observar el esquema general del método.



Figura 4 Esquema general de aplicación del método Auger Boring. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)

3.2.1 Tipos de métodos Auger Boring

Existen dos tipos de métodos Auger Boring, uno es el método Track-Type y el otro es el método Cradle-Type.

Track-Type

Este método emplea otros equipos aparte de la máquina perforadora, las carcasas, los sinfines y la cabeza de corte. Los equipos adicionales pueden ser un sistema de lubricación de la carcasa, un sistema de dirección, un sistema de localización y una banda de borde de ataque para la operación de la carcasa. La máquina perforadora está ubicada en la oruga o el carril y se mueve hacia adelante y hacia atrás a lo largo de este, mientras proporciona fuerza de empuje y rotación a los sinfines y a la carcasa durante la perforación (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021). En la siguiente figura se puede observar la operación del método Auger Boring tipo Track-Type.

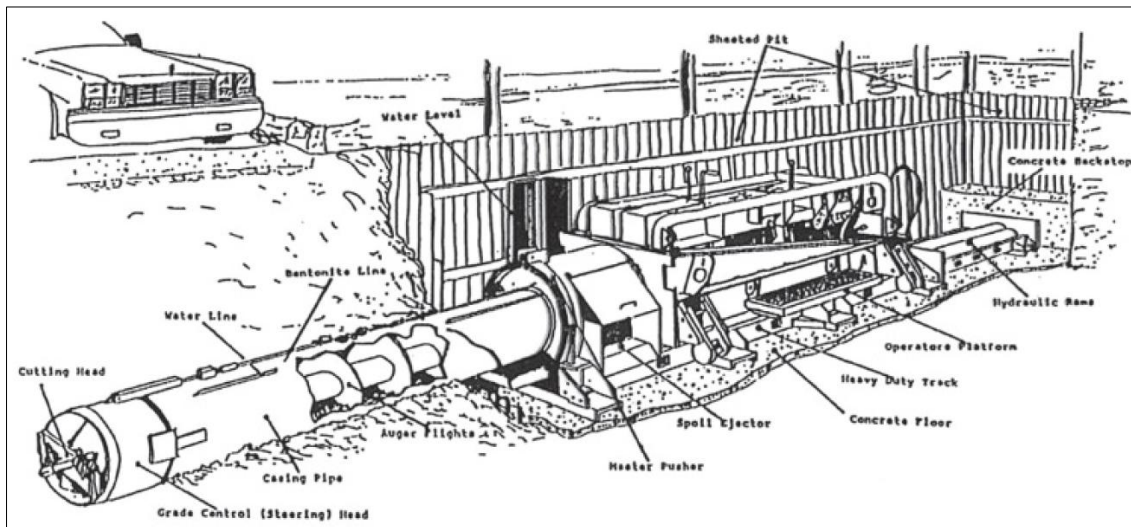


Figura 5 Auger Boring tipo Track-Type. Fuente: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)

Cradle-Type

El método de perforación Auger Boring tipo Cradle-Type es adecuado para proyectos que cuentan con una servidumbre adecuada (espacio disponible). El tamaño del pozo de perforación (pozo de entrada) está en función del diámetro de la carcasa a instalar. Este método se utiliza comúnmente en proyectos de oleoductos a campo traviesa donde se encuentran disponibles grandes derechos de vía.

Este método ofrece la ventaja de que todo el trabajo se realiza a nivel del suelo en lugar de en el pozo. El pozo de perforación se excava varios pies más profundo que la parte inferior de la tubería de revestimiento para dejar espacio para la recolección de desechos y agua a medida que se va perforando. El método no requiere estructuras de empuje, sin embargo se debe instalar de forma segura un sistema de soporte que está sostenido por una grúa ubicada en el terraplén del pozo de entrada, el cual realiza el empuje de tubería (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021). En la siguiente figura se puede observar la operación del método Auger Boring tipo Cradle-Type.

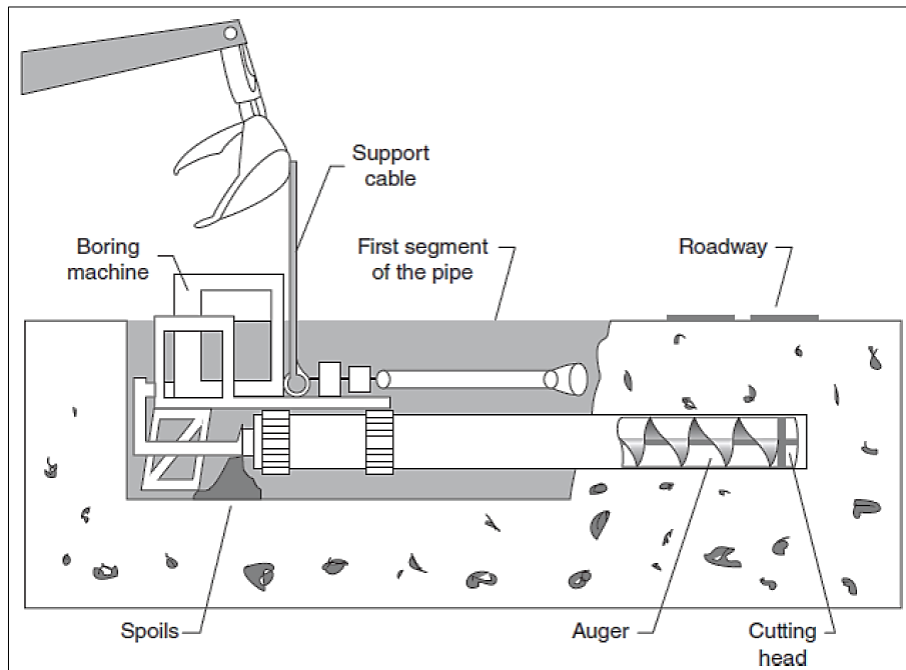


Figura 6 Auger Boring tipo Cradle-Type. Fuente: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)

3.2.2 Ventajas

La principal ventaja del método Auger Boring es que la carcasa es instalada a medida que se va realizando la perforación. Por eso, no hay perforación que no se encuentre revestida, lo cual reduce sustancialmente la probabilidad de derrumbe, lo que a su vez podría causar hundimiento de la superficie. Además, este método se puede utilizar en una amplia variedad de tipos de suelo, lo que lo convierte en un método versátil (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.2.3 Desventajas

El método Auger Boring requiere diferentes tamaños de cabezas de corte y sinfines para cada carcasa, lo cual implica una inversión sustancial en equipo. Este método requiere la construcción de un pozo de perforación y una configuración inicial precisa. La operación puede no ser exitosa en arenas corrientes y suelos inestables y puede requerir la extracción de agua por debajo del nivel freático (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.3 Horizontal Directional Drilling

El método Horizontal Directional Drilling (Perforación Horizontal Dirigida) es una técnica para instalar tubos o acometidas subterráneas, utilizando un taladro o plataforma de perforación superficial desde donde se proyecta un cable de perforación en un ángulo suave respecto a la superficie y que posee capacidad de seguimiento y dirección. El cable de perforación crea un núcleo piloto de perforación vacío en una trayectoria



esencialmente horizontal o en arco suave, que puede posteriormente ampliarse a un diámetro mayor durante la operación secundaria, la cual incluye básicamente la excavación y retirada del material que conforma el tubo o acometida (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2012). Los equipos utilizados son hidráulicos y son capaces de generar 3 fuerzas: empuje, rotación y tiro (Sánchez, 2018).

El sistema permite el cruce de grandes ríos, carreteras, autopistas, montañas y cualquier obstáculo natural, puesto que, al utilizar lodos de perforación, puede perforar bajo nivel freático de forma rápida y eficaz. Se debe tener cuidado para no interferir con las redes de otros servicios como energía, gas, acueducto y alcantarillado existentes (Empresas Públicas de Medellín (EPM), 2017).

El método se puede describir como un proceso de dos etapas. A continuación, se evidencia la descripción de cada una de estas, las cuales fueron tomadas de (Santiago, 2015).

En la primera etapa se realiza un sondeo piloto a lo largo de una trayectoria planificada, usando tanto el empuje en la plataforma de perforación, como la rotación de las varillas de perforación para avanzar poco a poco en esa dirección. La perforación piloto se va monitorizando y maniobrando por un detector que va recibiendo la señal por una sonda que se encuentra instalada en un portasonda ubicado en la parte de atrás de la broca. Ésta se va guiando de acuerdo con un diseño realizado con anterioridad, y le da los datos necesarios para realizar el cruce sin afectar ningún servicio público existente en el sitio del cruce. El sondeo piloto se perfora con un diámetro de 2,5 a 12,5 cm a lo largo de la línea central del diseño propuesto. A continuación, se puede observar el proceso de la perforación piloto.

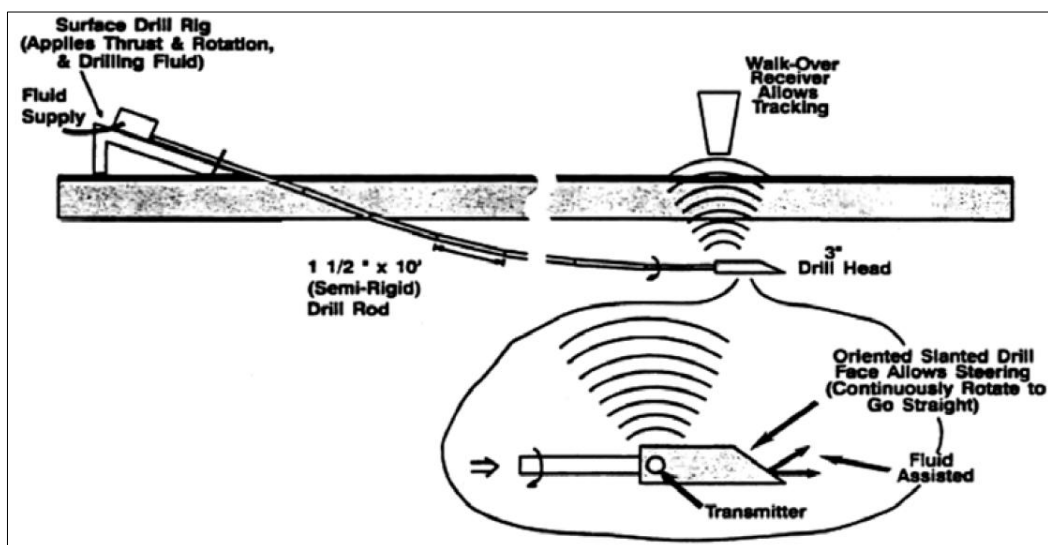


Figura 7 Proceso de instalación de la perforación piloto. Fuente: (Santiago, 2015)



En la segunda etapa del proceso, tras completarse la perforación piloto, se une un retroensanchador o escarificador al extremo de la sarta de perforación, seguida del tubo flexible o semiflexible que quiere instalarse. Pueden ser necesarias varias pasadas sucesivas del escarificador o de ensanchadores de diferentes tamaños para instalar la tubería deseada. El tubo se instala a lo largo de una vía que contiene una suspensión de bentonita que se va vertiendo a medida que pasa el retroensanchador. La bentonita actúa como lubricante facilitando el paso de la tubería. Se realiza un seguimiento tanto de la perforación piloto como del proceso de ensanchamiento mediante una sonda de radio que está alojada dentro de la cabeza de perforación. A continuación, se puede observar el proceso de ensanchamiento de la perforación piloto.

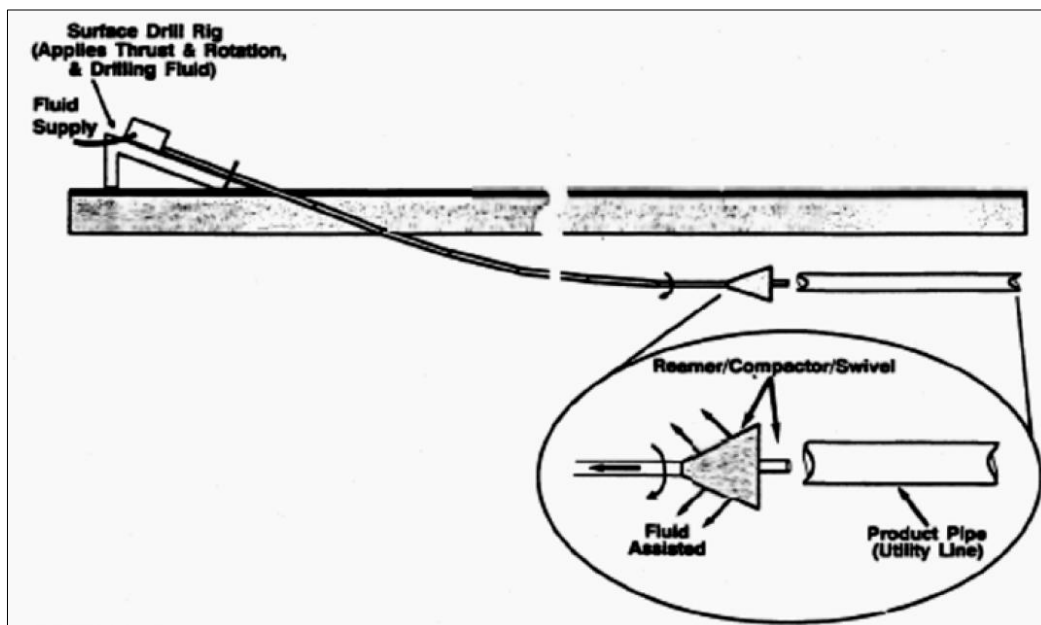


Figura 8 Proceso de ensanchamiento de la perforación piloto. Fuente: (Santiago, 2015)

La tubería se conecta al extremo de la varilla de perforación mediante un eslabón especial (ver Figura 9) y se tira de ella a través de la perforación piloto mientras se va ampliando. Las brocas de perforación pueden variar desde un cabezal de corte estrecho biselado para aplicaciones pequeñas y de pequeño calibre, a útiles de corte con diamantes montados sobre rodillos que se utilizan con fluidos de perforación en acometidas grandes (ver Figura 10 y Figura 11).



Figura 9 Eslabón para sujetar la tubería a instalar y ensanchador. Fuente: (Technologies, 2023)



Figura 10 Ejemplo de cabezales de perforación para aplicaciones pequeñas. Fuente: (Wuxi Caston Drill Tools Co., 2023)



Figura 11 Brocas de perforación de diferentes diámetros y formas para realización de la perforación piloto. Fuente: Terra Trenchless Technologies

3.3.1 Tipos de perforación horizontal dirigida

La industria del Horizontal Directional Drilling se divide en tres grandes sectores, perforación de gran diámetro (maxi-HDD), perforación de mediano diámetro (midi-HDD) y perforación de pequeño diámetro (mini-HDD, también llamado perforación guiada). Hay algunas diferencias significativas en los mecanismos de operación entre



estos sistemas, lo que requiere modificaciones en la configuración y las capacidades del sistema, el modo de eliminación de desechos y los métodos de control direccional para lograr una relación costo-eficiencia óptima (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.3.2 Ventajas

La principal ventaja del método de perforación horizontal dirigida es su capacidad de dirección. En caso de chocar con obstáculos, el cabezal de perforación se puede retirar y guiar alrededor del obstáculo. Como el sistema HDD puede lanzarse desde la superficie del suelo, no se requieren pozos de entrada ni de salida, por lo tanto, el tiempo de preparación es relativamente más corto que el de otros métodos de construcción sin zanjas y además, los costos del proyecto se reducen. La longitud máxima de perforación e instalación de una tubería que se puede lograr es mayor que la de cualquier otro método sin zanja (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.3.3 Limitaciones

Se requiere de una investigación exhaustiva del sitio, ya que las medidas correctivas aplicadas a mitad de camino de la operación de perforación o ensanchamiento pueden llevar mucho tiempo y ser costosas. Al perforar debajo de carreteras u otras áreas ambientalmente sensibles, el uso de fluido a presión puede causar serias preocupaciones con respecto al posible efecto nocivo de la bentonita a través de la migración lateral y vertical de la lechada. También se debe tener cuidado para evitar posibles movimientos del suelo y pérdida de lechada en el pavimento para instalaciones con cobertura de suelo poco profunda (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.4 Pipe Ramming

Pipe Ramming es una técnica de instalación de tuberías sin zanja utilizada para hincar horizontalmente tuberías de acero de diferentes diámetros (Santiago, 2015). Esta tecnología utiliza martillos hidráulicos o neumáticos y es semejante al utilizado en pilotaje. Para soportar las cargas producidas por dichos martillos las tuberías hincadas deben ser de acero por sus características de resistencia. Se puede lubricar la superficie de la tubería para reducir la fricción externa durante el proceso de instalación (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016).

Se debe construir un pozo de lanzamiento para instalar una a una las secciones del tubo de acero, el martillo neumático se acopla a cada sección a hincar y posterior a realizar el hincado se van uniendo estas mediante obra mecánica hasta alcanzar la longitud de cruce requerida; una vez finalizada esta actividad se realiza la extracción del suelo alojado dentro de la carcasa a través de algún medio mecánico o manualmente, lo anterior de



acuerdo con el diámetro instalado (AINPRO S.A. Tecnología sin Zanja, 2023). En la siguiente Figura se puede observar el esquema del método.

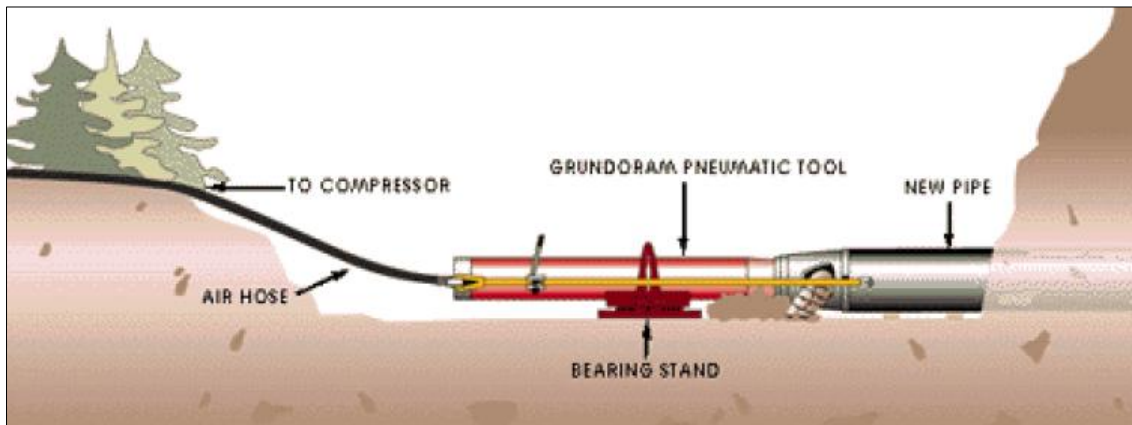


Figura 12 Esquema del proceso del método Pipe Ramming. Fuente: (Santiago, 2015)

Existen dos variantes para el método Pipe Ramming: con frente cerrado o frente abierto. En la técnica de frente cerrado se suelda una cabeza en forma de cono al extremo delantero del primer segmento de tubería que se hinca. Este penetra y comprime el suelo circundante a medida que se empuja la carcasa hacia adelante. Con la técnica de frente abierto la parte frontal del extremo principal de la carcasa o conducto de acero permanece abierta para que se realice una excavación del mismo diámetro de la tubería a colocar, esto permite que las condiciones iniciales del suelo se mantengan y que solo una pequeña proporción de este sufra compactación durante el hincado (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.4.1 Ventajas

Este es un método eficaz para instalar tuberías de diámetro mediano a grande. Los tamaños versátiles del pozo de lanzamiento, la longitud máxima permitida y la capacidad de manejar diferentes condiciones de suelo hacen de este, un método práctico y económico para instalar tuberías de acero (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.4.2 Limitaciones

La principal desventaja del método es la mínima capacidad de control sobre la línea y la pendiente. Por lo tanto, la configuración inicial es de gran importancia. Además, en el caso de presentar obstrucciones en el trazado, como cantos rodados o adoquines, especialmente en diámetros pequeños, la tubería puede deformarse. De acuerdo con lo anterior, se debe tener información suficiente sobre las condiciones existentes del suelo para determinar el tamaño adecuado de la carcasa que se utilizará (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).



3.5 Método de Microtunelado

El microtunelado, también conocido como Pipe Jacking, es un método que consiste en la instalación de tuberías bajo tierra, mediante el empuje de tuberías detrás de una máquina perforadora de microtúneles, la cual es articulada, guiada y controlada. La máquina perforadora que está conectada y seguida por la tubería que se está instalando, garantiza que los suelos que se excavan estén totalmente controlados con la velocidad de avance de la máquina en todo momento. La máquina perforadora se controla desde un panel, normalmente situado en la superficie. El sistema instala tuberías simultáneamente a medida que se excavan y eliminan los escombros. La entrada de personal es necesaria únicamente para trabajar dentro del pozo de lanzamiento. El sistema de guía generalmente hace referencia a un rayo láser proyectado sobre un objetivo en la máquina perforadora, la cual es capaz de instalar alcantarillas por gravedad y otro tipo de tuberías con la tolerancia requerida (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021). En la siguiente Figura se puede observar el esquema del método.

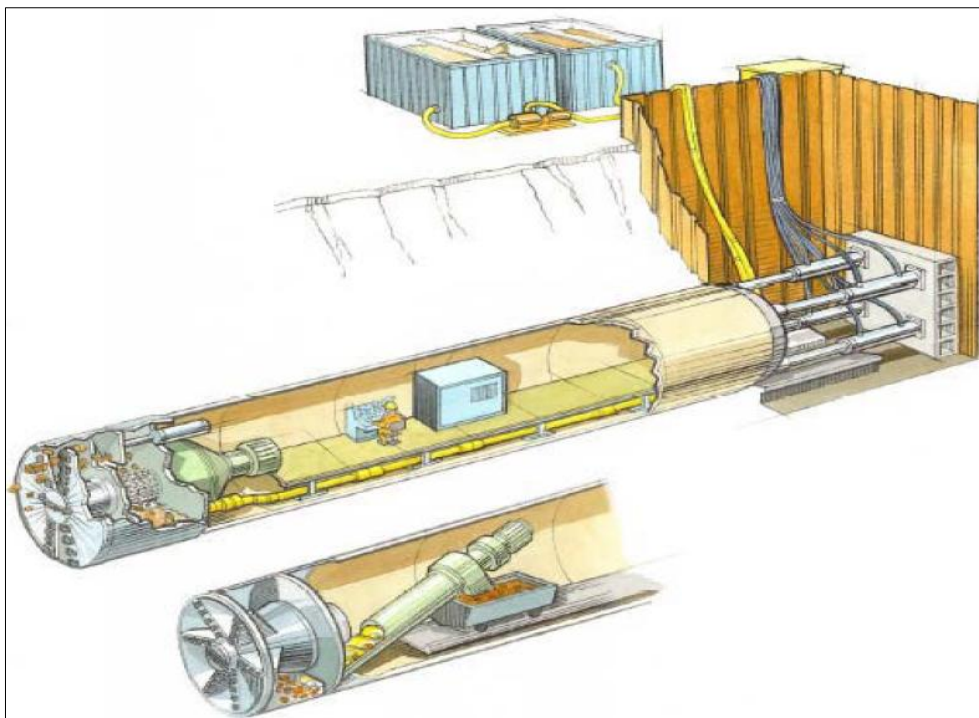


Figura 13 Esquema del sistema de excavación con microtuneladora. Fuente: (Santiago, 2015)

La tubería se instala entre dos pozos verticales, denominados pozo de lanzamiento y pozo de salida, el proceso implica empujar la tubería con el corte simultáneo del suelo en la cara de la máquina perforadora y la remoción continua de suelo hacia el pozo de lanzamiento y luego hacia la superficie. Las tuberías son empujadas hacia el pozo de salida mediante una estructura de empuje situada en la horizontal de la excavación, el pozo de lanzamiento. Al mismo tiempo se lleva a cabo el desplazamiento del terreno o la



excavación completa del frente del túnel (Santiago, 2015). A continuación, se puede observar una máquina perforadora de microtúneles.



Figura 14 Máquina microtuneladora SL60P. Fuente: (Akkerman, 2023)

En las siguientes Figuras se muestra el pozo de lanzamiento y el pozo de salida en un sistema de microtunelado.

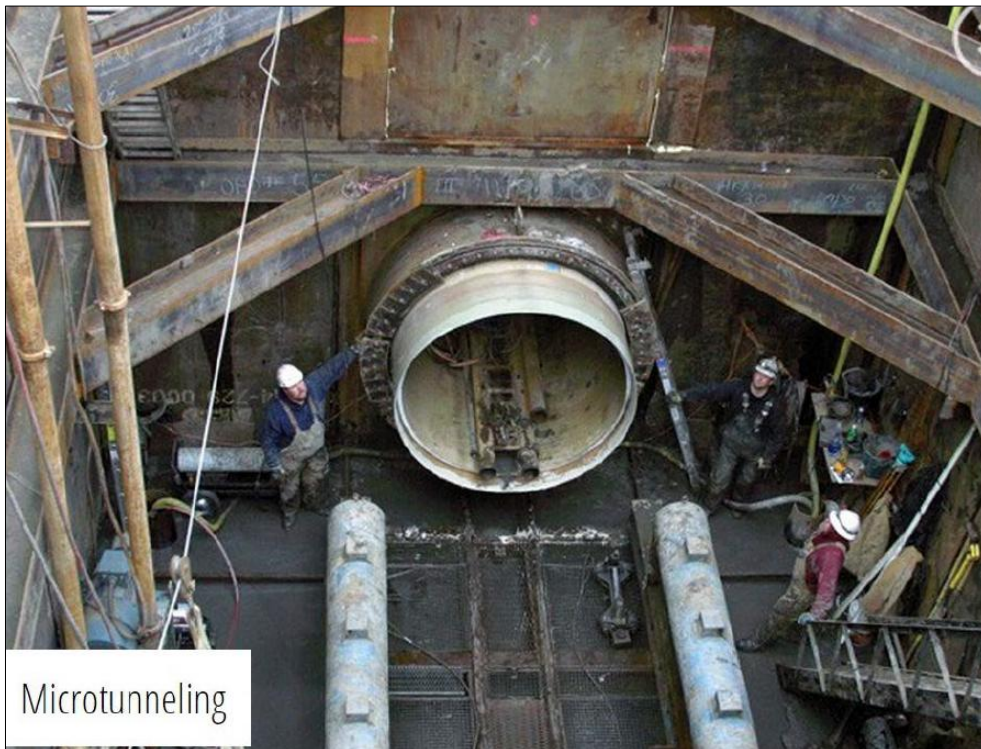


Figura 15 Aspecto pozo de lanzamiento del método de microtunelado. Fuente: (Santiago, 2015)

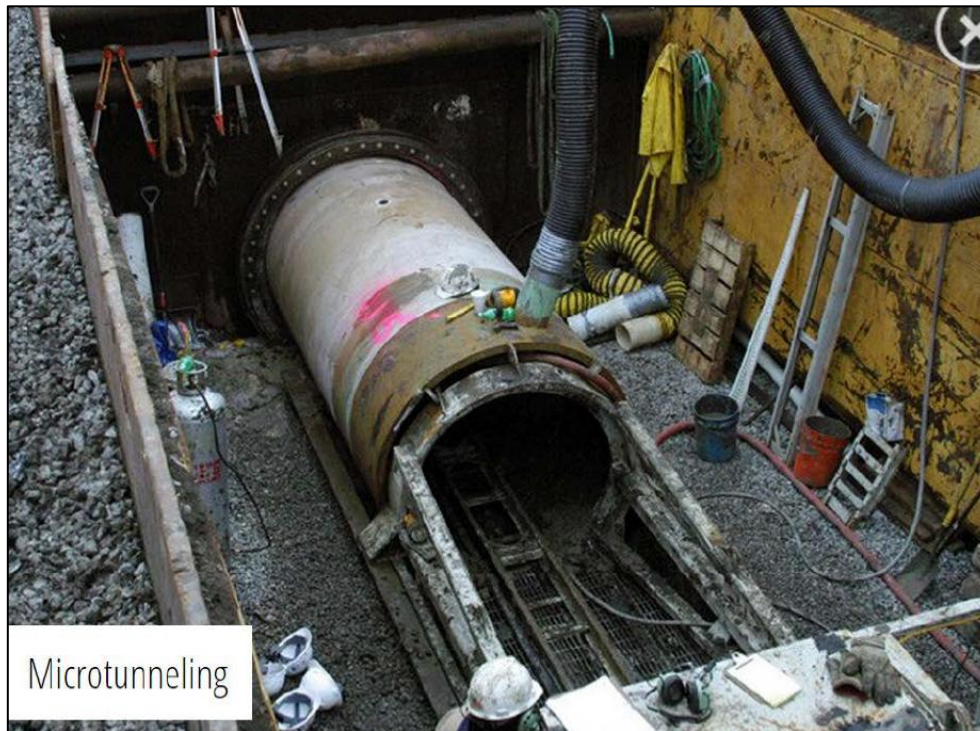


Figura 16 Aspecto pozo de salida del método de microtunelado. Fuente: (Santiago, 2015)

3.5.1 Tipos de microtunelado

Según el modo de operación, el método de microtunelado se puede subdividir en dos grupos principales: método de lodo (sistema tipo hidroescudo) y método de sinfines (sistema tipo EPB) (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

En el método de lodo, se utiliza un cabezal hermético en el frente de la microtuneladora para prevenir la entrada del suelo o líquidos. El lodo se bombea hacia la cara de la máquina perforadora. Los materiales excavados son mezclados con lodo y se transportan hacia el pozo de lanzamiento, donde se descargan en una unidad de separación de sólidos. Este sistema permite reciclar el lodo para ser reutilizado en el proceso. Este proceso de excavación se puede utilizar en condiciones en las que existan elevados niveles freáticos y en suelos blandos, ya que la presión del lodo se usa para equilibrar la presión del frente y del agua subterránea (Santiago, 2015).

En el método de sinfines, los materiales excavados se transportan al pozo de lanzamiento mediante cintas transportadoras con sinfines en un tubo de revestimiento y luego se elevan a la superficie del suelo mediante una grúa o excavadora (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021). Este tipo de microtunelado no puede controlar la presión en la máquina perforadora, ni puede trabajar con suelos granulares más duros y niveles freáticos altos (Santiago, 2015).



A continuación, se muestran los esquemas de los sistemas para cada tipo de microtunelado.

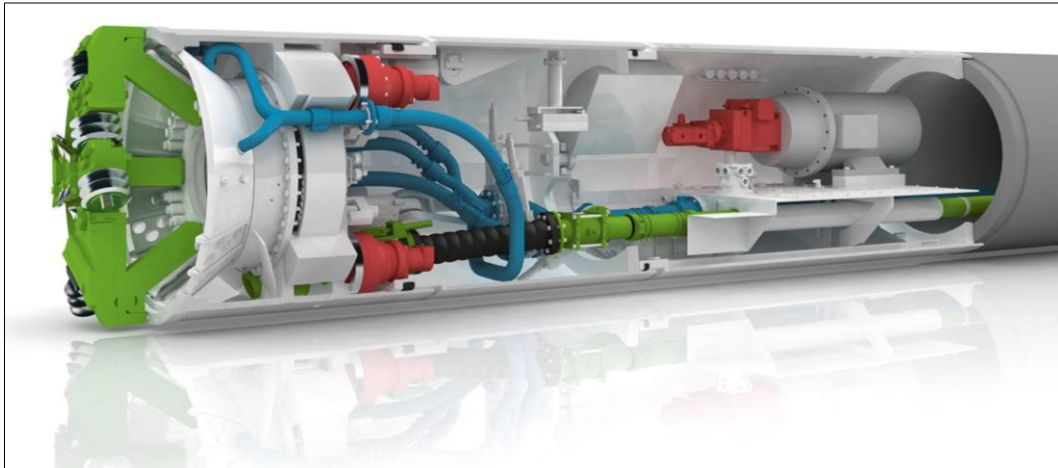


Figura 17 Sistema de perforación por microtunelado tipo lodo. Fuente: (HERRENKNECHT, 2023)

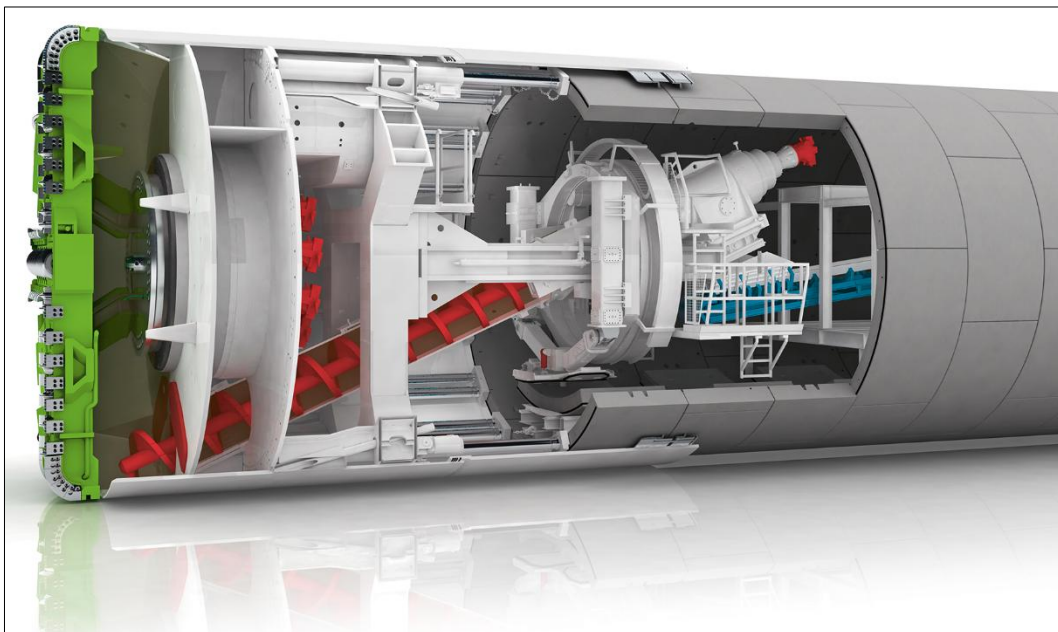


Figura 18 Sistema de perforación por microtunelado tipo sinfines. Fuente: (HERRENKNECHT, 2023)

3.5.2 Ventajas

Los métodos de microtunelado son capaces de instalar tuberías con tolerancias precisas. Tienen la capacidad de funcionar en condiciones de suelo difíciles sin costosos sistemas de deshidratación ni aire comprimido. Las tuberías pueden ser instaladas a grandes profundidades sin un efecto drástico en el costo. Si la tubería final cuenta con la capacidad de carga axial se puede hincar directamente sin necesidad de una tubería de revestimiento separada (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).



3.5.3 Limitaciones

El costo de capital en equipo es alto. Algunos sistemas de microtunelado tienen dificultades con cantos rodados que miden más del 20 o 30% del diámetro de la máquina. Una de las principales limitaciones del método ha sido su inhabilidad para usar tubería flexible o de baja resistencia como el PVC (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.6 Método Pilot Tube

La (American Society of Civil Engineers, 2015) define el método Pilot Tube como un método de varias etapas para instalar con precisión una tubería, mediante el uso de un tubo piloto guiado, seguido de un aumento de tamaño para instalar la tubería final.

El método Pilot Tube es una versión híbrida del método de microtunelado convencional. Este combina la precisión del microtunelado, el mecanismo de dirección de la perforación dirigida y el sistema de perforación y eliminación de desechos del método Auger Boring. El método emplea sinfines para transportar desechos y un sistema de guía que incluye un teodolito montado en una cámara. Cuando las condiciones del proyecto son adecuadas, este método puede ser una herramienta rentable para la instalación de tuberías de alcantarillado de pequeño diámetro (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

Este método va perforando con un cabezal de dirección conectado a tubos piloto, cuyo tamaño es más pequeño que el tamaño del tubo a instalar. Luego, un escarificador y una carcasa con sinfines en su interior agrandan la perforación. Finalmente, los tubos a instalar en el suelo siguen la carcasa del sinfín (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021). A continuación, se puede observar un esquema del proceso de perforación de la tubería piloto.

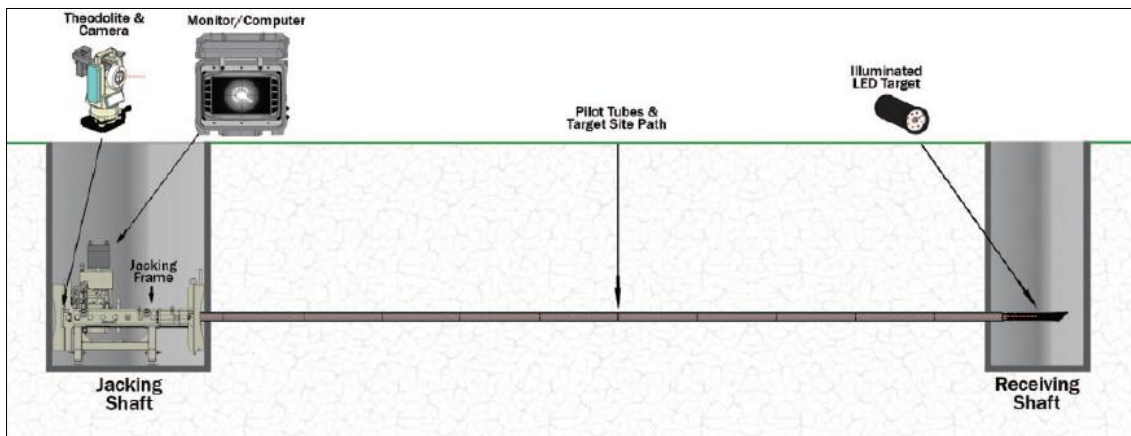


Figura 19 Proceso de perforación de la tubería piloto. Fuente: Obtenido de Akkerman en (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)

El proceso de la escarificación, remoción de sólidos e instalación de la tubería final se muestra a continuación.

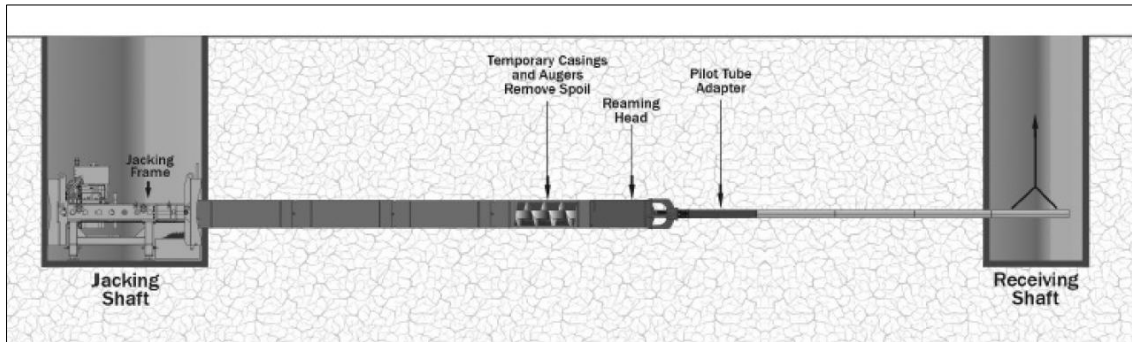


Figura 20 Proceso de instalación tubería final. Fuente: (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021)

3.6.1 Ventajas

El método Pilot Tube es muy preciso y se puede utilizar debajo del nivel freático, hasta 4,50 m por debajo mediante el uso de accesorios especiales. Se requiere un pequeño espacio de trabajo. Es posible elegir entre unidades de energía hidráulica, diésel o eléctrica (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.6.2 Limitaciones

Se requieren pozos de entrada y salida (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

3.7 Direct Pipe o Pipe Thrusting

Direct Pipe, también conocido como “Pipe Thrusting” (empuje de tuberías) es un método de excavación sin zanja para instalar tuberías que combina las ventajas del microtunelado y la perforación horizontal dirigida tradicional para superar condiciones de instalación desafiantes en donde las excavaciones tradicionales a cielo abierto no son viables por razones medioambientales o logísticas. Normalmente, el método se utiliza para grandes cruces de tuberías de gas, agua y aguas residuales bajo ríos y grandes obstáculos naturales (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

El método Direct Pipe se puede utilizar para la instalación de tuberías de superficie a superficie. En algunos casos, es posible que se requieran pequeños pozos de entrada y salida para instalar la tubería de revestimiento. En el pozo de entrada, la máquina Direct Pipe (Microtuneladora tipo lodo) y las tuberías de acero (carcasas) se sueldan y colocan para su instalación en un equipo especial llamado “Pipe Thruster” (propulsor de tubería). El propulsor se utiliza para empujar tanto la máquina tuneladora como la tubería de acero a través del suelo con una fuerza de empuje de hasta 750 toneladas. La fuerza de empuje se transfiere a la tubería mediante una unidad de sujeción situada en la parte posterior del propulsor de tubería. El suelo excavado se bombea mediante líneas de lodo umbilicales conectadas a la máquina microtuneladora y preinstalada dentro de la tubería de acero que se instalará. El fluido de perforación circula a través de una planta de separación de lodos



ubicada sobre el suelo (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021). A continuación, se puede observar un esquema del proceso Direct Pipe y sus componentes.

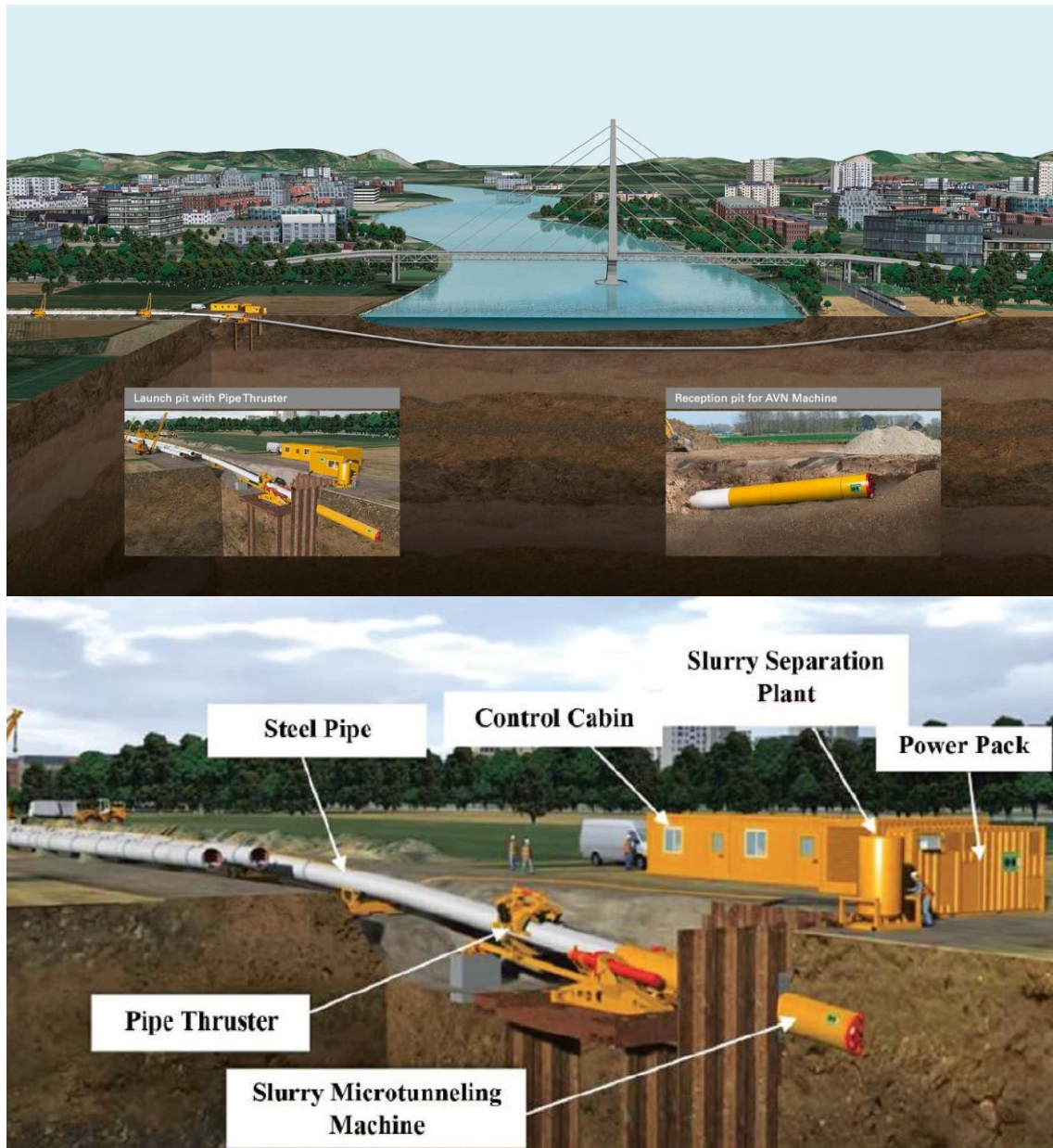


Figura 21 Esquema del proceso Direct Pipe y sus componentes. Fuente: (HERRENKNECHT, 2023)

3.7.1 Ventajas

A continuación, se describen las principales ventajas del método, las cuales son tomadas de (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

- Todos los equipos necesarios, tuberías de revestimiento y tuberías finales se ubican en el punto de entrada.



- No es necesario mantener la perforación abierta con fluidos de perforación durante la instalación de la tubería, ya que el método va instalando la tubería de acero utilizada como carcasa.
- Puede instalarse de forma segura en terrenos heterogéneos y en diferentes formaciones geológicas.
- Mayor precisión de la trayectoria en comparación con el método de perforación horizontal dirigida.
- Pozos de entrada y salida menos profundos en comparación con el método de microtunelado.
- No es necesaria la estabilización del suelo.
- No requiere láser para controlar la trayectoria de la perforación, ya que se utiliza un giroscopio con sistema de navegación universal.

3.7.2 Limitaciones

A continuación, se describen las principales limitaciones del método, las cuales son tomadas de (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

- Los ángulos de inserción pronunciados no son factibles, por lo que el método requiere suficiente espacio desde el borde del cruce hasta los pozos de entrada y salida.
- Para la mayoría de los proyectos el método es un sistema de doble paso, en el que se requiere una tubería de revestimiento de acero antes de instalar la tubería final.
- Requiere múltiples estudios de control para garantizar la precisión.
- Si se requiere una reparación de los conductos umbilicales o las líneas de lodo, es posible que se requiera la entrada de personal por una tubería de diámetro pequeño. Esto puede ser un gran desafío considerando que la máquina Direct Pipe puede estar a cientos de metros del pozo de entrada.
- Una fuerza de empuje excesiva puede cortar o desprender el exterior de la carcasa.
- Las tuberías instaladas se limitan a acero.

3.8 Métodos de Compactación

Esta tecnología sin zanja se basa en que la perforación para la tubería se realiza por desplazamiento del suelo por medio de un mecanismo de empuje. Lo que genera consecuentemente la compactación del suelo (Sánchez, 2018). La energía de impacto puede ser estática o dinámica. Los métodos de compactación del suelo se conocen como perforación empujada “Thrust Boring” y perforación percusiva por impacto o martillo impactador “Impact Moling” (Santiago, 2015).

Para estos métodos se realiza una perforación piloto horizontal empujando una cabeza de compactación con forma cónica y puntiaguda (ver Figura 22) a través del suelo usando una sarta de barras sólidas. El extremo posterior de la sarta de empuje está conectado a



una fuente de energía hidráulica o de otro tipo, situada en el pozo de lanzamiento, y esta empuja la sarta de perforación hacia adelante.

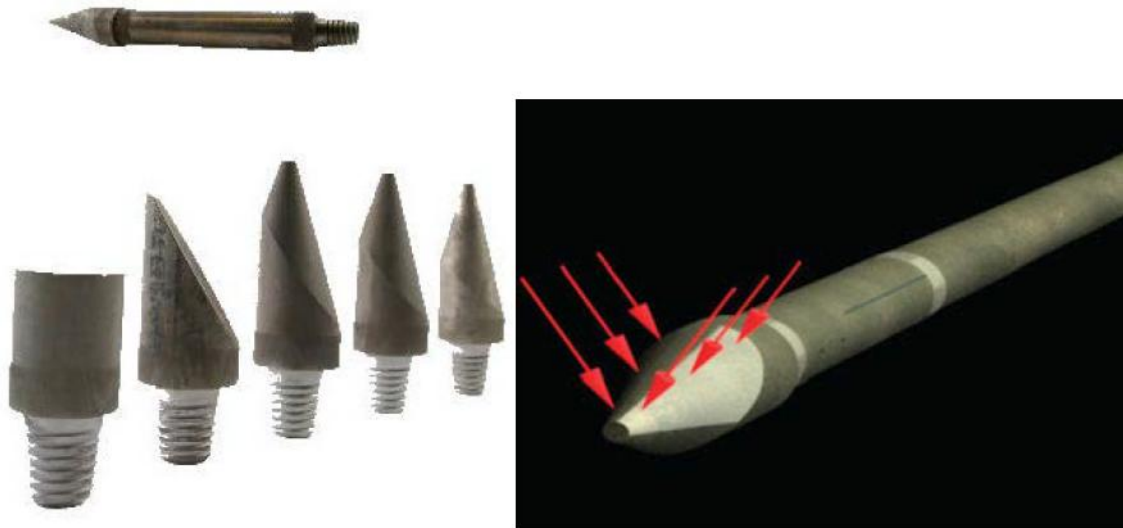


Figura 22 Ejemplo de cabezas de perforación. Fuente: (Santiago, 2015)

3.8.1 Tipos de métodos de compactación

Perforación empujada

En la perforación empujada la energía de perforación es estática, la cual se transmite por medio de un varillaje conectado a un gato hidráulico (Sánchez, 2018). El diámetro de la cabeza generalmente es ligeramente mayor o igual al de las varillas de empuje. Cuando el cabezal de compactación alcanza el pozo de recepción, se reemplaza con un eslabón giratorio para tirar las líneas de servicio a través de la perforación realizada. Durante el proceso de retirada se puede usar un ensanchador para ampliar la excavación piloto. Las nuevas tuberías pueden colocarse al mismo tiempo que se tira la sarta de perforación, con o sin el ensanchador (Santiago, 2015).

Perforación percusiva por impacto

En la perforación percusiva por impacto se utiliza la energía dinámica, esta se obtiene por medio de un martillo autopropulsado, el cual empuja la cabeza de compactación (Sánchez, 2018). Este método cuenta con un pistón conectado a través de una manguera flexible a la fuente de energía exterior, que es la que provoca el movimiento alternativo del pistón a lo largo del eje. La energía transferida desde el pistón produce el impacto en la cabeza y ésta a su vez sobre el suelo, lo cual genera el movimiento de avance dinámico de la perforación (Santiago, 2015). En la siguiente Figura se puede observar el equipo de impacto usado en el método.



Figura 23 Martillo impactador. Fuente: (COPPARD, 2023)

A continuación, se puede ver un esquema del proceso de ejecución del método de perforación percusiva por impacto.

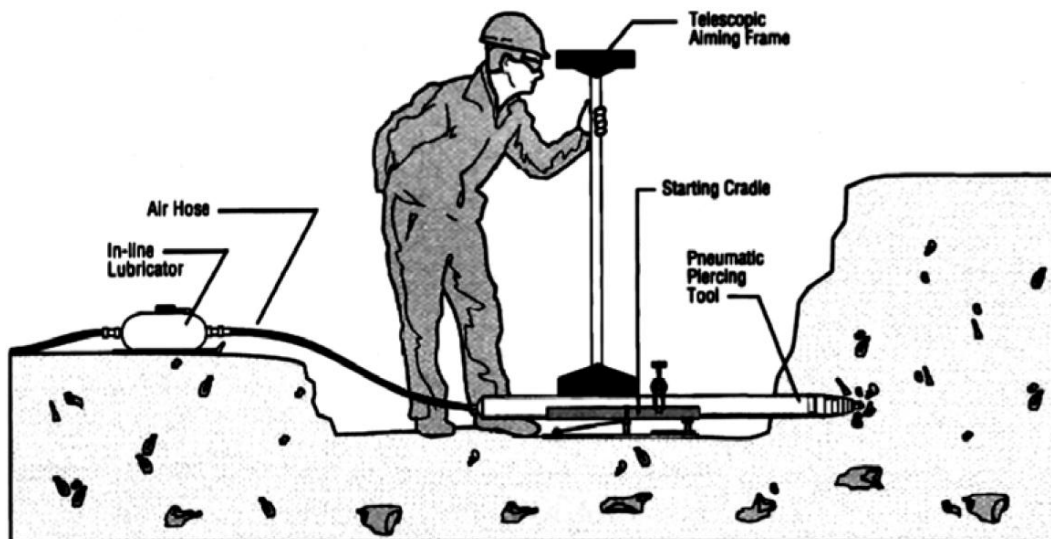


Figura 24 Proceso de ejecución del método de perforación percusiva por impacto. Fuente: (Santiago, 2015)

3.8.2 Ventajas

A continuación, se describen las principales ventajas del método, las cuales son tomadas de (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

- Los pozos de entrada y salida para la operación de los métodos son pequeños.
- Estos métodos no requieren la eliminación de escombros para formar el orificio, lo cual resulta útil y genera menos proceso para la operación.
- La aplicación de estos métodos es popular para la instalación de cables de telecomunicaciones y conexiones de servicio residenciales debido a la simplicidad de su equipo y operación.



- La operación de estos métodos es simple. Normalmente se pueden realizar por un equipo de dos personas.

3.8.3 Limitaciones

A continuación, se describen las principales limitaciones del método, las cuales son tomadas de (Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021).

- Estos métodos se utilizan para la instalación únicamente de tuberías y cables de diámetros pequeños.
- Cuenta con una longitud de aplicación típica que oscila entre 12 a 24 m.
- La aplicación de estos métodos en suelos mal graduados o suelos densos es muy difícil.
- La capacidad de control direccional de estos métodos es muy limitada en comparación con otros métodos.
- En suelos no homogéneos, la cabeza tiene tendencia a desviarse hacia el camino de menor resistencia. Este aspecto debe tenerse en cuenta durante la fase de planificación del proyecto.
- Las operaciones que implican una herramienta de percusión pueden ser ruidosas.

3.9 Redes urbanas de agua

Según (Agua, 2024) el uso del agua en el medio urbano constituye la relación más directa de la gestión del agua con el ser humano en su condición de ciudadano. En las ciudades se concentran principalmente el uso doméstico y el uso industrial del agua y, aunque estos no representan un volumen importante de utilización en relación con otros usos, son sin duda los que están vinculados con un porcentaje mayoritario de la sociedad, asentada en las ciudades.

Las redes de agua presentes en el entorno urbano se resumen en las redes de acueducto y las redes de alcantarillado, bien sea, pluvial, residual y combinado. De acuerdo con la (COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO, 2019) en el artículo 2.3.1.1.1 del Decreto 1077 de 2015 estas redes se definen de la siguiente manera.

Redes de acueducto

- Red matriz o red primaria de acueducto: Es el conjunto de tuberías, accesorios, estructuras y equipos que conducen el agua potable desde las plantas de tratamiento o tanques hasta las redes de distribución locales o secundarias. Su diseño, construcción y mantenimiento está a cargo de la empresa prestadora del servicio, quien debe recuperar su inversión a través de tarifas de servicios públicos.



- Red de distribución, red local o red secundaria de acueducto: Es el conjunto de tuberías, accesorios, estructura y equipos que conducen el agua desde la red matriz o primaria hasta las acometidas domiciliarias del respectivo proyecto urbanístico. Su diseño y construcción corresponde a los urbanizadores.

Redes de alcantarillado

- Red secundaria o red local de alcantarillado: Es el conjunto de tuberías, accesorios, estructura y equipos que conforman el sistema de evacuación y transporte de las aguas lluvias, residuales o combinadas de una comunidad y al cual descargan las acometidas de alcantarillado de los inmuebles y llega hasta la red matriz o primaria de alcantarillado. Su diseño y construcción corresponde a los urbanizadores.
- Red matriz o red primaria de alcantarillado: Es el conjunto de tuberías, accesorios, estructuras y equipos que reciben el agua procedente de las redes secundarias o locales y las transporta hasta las plantas de tratamiento de aguas residuales o hasta el sitio de su disposición final. Su diseño, construcción y mantenimiento está a cargo de la empresa prestadora del servicio, la cual debe recuperar su inversión a través de tarifas de servicios públicos.

3.10 Materiales de tubería

Para las redes de acueducto y alcantarillado se pueden implementar diferentes materiales de tubería. A continuación, se realiza una descripción general de algunos de estos.

Acero

Esta tubería es una solución robusta y versátil, diseñada para una variedad de aplicaciones industriales y comerciales que requieren mayor resistencia y durabilidad. De acuerdo con (FERROSPLANES, 2024), las principales ventajas de este tipo de tubo son las siguientes:

- Bajo nivel de corrosión: Este metal mantendrá su apariencia, libre de óxido, durante años, aunque transporten agua constantemente en su interior. Es muy poco probable que las partículas del metal penetren en el agua, por lo que la tasa de contaminación del agua de este metal es prácticamente inexistente.
- Resistencia: El tubo de acero es robusto y resistirá a factores de riesgo que pueden dañar otro tipo de tubos, como raíces de árbol, errores humanos o inclemencias del tiempo. Puede resistir altas presiones y cambios de temperatura extremos.
- Son reciclables: Las tuberías de acero son totalmente reciclables. Cuando los tubos ya no son necesarios, se pueden fundir y volver a usar en otras piezas de metal de otras industrias.



- Son durables: El tubo de acero presenta deterioro a lo largo de los años dependiendo del entorno y los esfuerzos. Se verán iguales las tuberías de hace 20 años que las actuales. No cederán y no necesitarán tantos puntos de sujeción como los tubos de plástico.

Policloruro de Vinilo (PVC)

Este material plástico es ampliamente utilizado en aplicaciones de agua potable, sistemas de drenaje y alcantarillado debido a su bajo costo, ligereza y resistencia a productos químicos no agresivos (BAROIG, 2024). Según (ROTOLIA, 2024), entre las principales características del PVC destacan:

- Gran resistencia al impacto.
- Gran resistencia a la corrosión provocada por productos químicos agrícolas o por sustancias naturales del suelo.
- Gran capacidad hidráulica, pudiendo transportar en el mismo diámetro, mayor cantidad de agua que tuberías de otro tipo de material.
- Menor costo de mantenimiento.
- Gran longevidad en perfecto estado, con una larga vida útil de hasta más de 50 años.

Igualmente, las características del material permiten que este pueda reciclarse. Por otro lado, la ligereza del material lo hace más propenso a roturas, luego, tuberías de este material no pueden implementarse para la instalación de manera directa mediante tecnologías sin zanja para la construcción de redes nuevas.

Polietileno de Alta Densidad (HDPE)

Este material es adecuado para aplicaciones de agua potable y sistemas de riego, debido a su flexibilidad, resistencia a la corrosión y a las sustancias químicas, y durabilidad en condiciones climáticas extremas (BAROIG, 2024). Según (PAVCO, 2024), las ventajas que presenta este material son:

- Mayor flujo de caudal.
- Más fácil y rápido de instalar.
- Más económicas: Transportan un mayor volumen de agua que las tuberías convencionales. Las obras de ejecución son rápidas y se minimiza el uso de accesorios.
- Amigables con el medio ambiente: Dado que las uniones son totalmente monolíticas, esto impide la contaminación del agua conducida. Además, también impiden la erosión de los suelos y el hundimiento de vías, debido a exfiltraciones.



- Sismo-Resistentes: Por su flexibilidad, tienen un excelente comportamiento en zonas altamente sísmicas.

Concreto Reforzado (RCP)

Este material de tubería es usado para la conducción de aguas lluvias, residuos líquidos industriales, drenajes en vías y en general en conductos no sometidos a presión hidrostática (JAMAR, 2024). Según (Tododren, 2024), las ventajas de la tubería en concreto son las siguientes:

- Presenta cero flotabilidad en niveles freáticos altos.
- Ofrece una excelente resistencia estructural.
- Ofrece larga durabilidad, versatilidad y adaptabilidad en terrenos complejos.
- Garantiza un alto desempeño en situaciones críticas y en el transporte de elementos agresivos.

Adicionalmente, se puede mencionar que este material se puede implementar para la instalación mediante tecnologías sin zanja, dado que la resistencia de este soporta las fuerzas de hincado.

Fibra de Vidrio Reforzada (GRP)

Este material es resistente a la corrosión y es usado para tuberías de sistemas de suministro de agua a alta presión o gravedad. Cuenta con una resistencia comprobada a medios ácidos, por lo tanto, es perfecto para aplicaciones en sistemas de aguas residuales (MORENO, 2024). Para su fabricación, son necesarios, frecuentemente, tres elementos básicos: resina de poliéster, la cual es la matriz del material, fibra de vidrio, que actúa como refuerzo, y aditivos que mejoran las propiedades mecánicas (Cosmos, 2024). Algunas de las ventajas de este material se describen a continuación.

- Requiere de bajo mantenimiento, dado que disminuye la acumulación de lodos en el interior.
- Disminuye las pérdidas por rozamiento.
- Cuenta con propiedades hidráulicas que se mantienen constantes.



Arcilla vitrificada (VCP)

El tubo de gres vitrificado es resistente a la corrosión y a la abrasión, de gran durabilidad y con importantes propiedades mecánicas. Es el producto ideal para redes de saneamiento, además su componente principal, la arcilla, lo convierte en un producto 100% ecológico (Jannone, 2024). A continuación, se muestran las principales ventajas de este material.

- Es resistente a los agentes químicos de las zonas industriales, al H₂S presente en las bacterias de aguas residuales, y a todos los elementos agresivos de la tierra y el agua subterránea.
- Es resistente a la abrasión, permitiendo más flexibilidad en velocidades y pendientes.
- Su rugosidad es muy baja y jamás se deforma ni se daña con los equipos de limpieza.
- Las juntas de unión son resistentes a las raíces.
- Tiene una larga vida útil.

Hierro Dúctil (DIP)

El hierro dúctil es un tipo de hierro fundido, el cual se utiliza en la fabricación de tuberías para agua potable o agua residuales, estas tuberías son más fuertes y más fáciles de conectar, además, requieren menos apoyos y ofrecen la mayor área de flujo en comparación con las tuberías de otros materiales como PVC, HDPE o Acero (Corporation, 2024).

Las características del hierro dúctil se muestran a continuación, estas, basadas en lo reportado por (INTERNATIONAL, 2024).

- Alta resistencia a la tensión, buena elasticidad y excelente ductilidad.
- Alta resistencia a la corrosión producida por ambientes salinos, corrientes eléctricas del subsuelo o ataques químicos.
- Excelente flujo hidráulico, gracias a su textura interna homogénea y lisa.
- Altas presiones de trabajo para cubrir las aplicaciones más exigentes de transporte de agua.
- Facilidad en la instalación, gracias a su peso ligero y resistencia a los imprevistos de la obra.
- Larga vida útil por ser el material con mejores propiedades para soportar más de 1 siglo de servicio.
- Se acomoda a los movimientos del suelo gracias a la deflexión de las uniones.



3.11 Suelo, sus tipos y clasificación

El suelo es una estructura compleja que está compuesta por materiales minerales, materia orgánica, organismos vivos, agua y aire. Además, este no es una estructura continua, está formado por distintas capas u horizontes (Laboratorio, 2024). Los suelos se forman por la destrucción de la roca y la acumulación de materiales distintos a lo largo de los siglos, en un proceso que involucra numerosas variantes físicas, químicas y biológicas, que da como resultado una disposición en capas bien diferenciadas, como las de una torta, observables en los puntos de falla o fractura de la corteza terrestre (Universidad Nacional de La Plata, 2024).

3.11.1 Horizontes (capas) del suelo

Según (Laboratorio, 2024) se llama horizonte a cada una de las capas que contiene el suelo, con unas características diferentes debido a su composición mineral, cantidad de materia orgánica, grado de descomposición de la roca, textura granulométrica, entre otros. A continuación, se describen los diferentes horizontes del suelo.

- Horizonte 0: Este horizonte es la capa superficial del Horizonte A. Está compuesto por hojas, ramas y restos vegetales (detrito). Llamado también capa orgánica.
- Horizonte A: En este horizonte enraízan las especies herbáceas. Es rico en materia en descomposición y humus. Su color es más oscuro que el de los horizontes inferiores. Muchos de sus materiales (orgánicos y minerales) son susceptibles de ser arrastrados hacia abajo por el agua.
- Horizonte B: En este horizonte no hay humus prácticamente, por eso el color es más claro que el del horizonte superior. En este se depositan los materiales arrastrados desde arriba, sobre todo, materiales arcillosos, óxidos e hidróxidos.
- Horizonte C: También conocido como subsuelo. Está compuesto por material rocoso más o menos fragmentado.
- Horizonte D o R: Llamado Roca Madre o Material Rocoso. En él encontramos el material rocoso que compone el suelo inalterado.

En la siguiente Figura se muestra esquemáticamente la proyección de los diferentes horizontes presentes en el suelo, la cual es tomada de (Laboratorio, 2024).

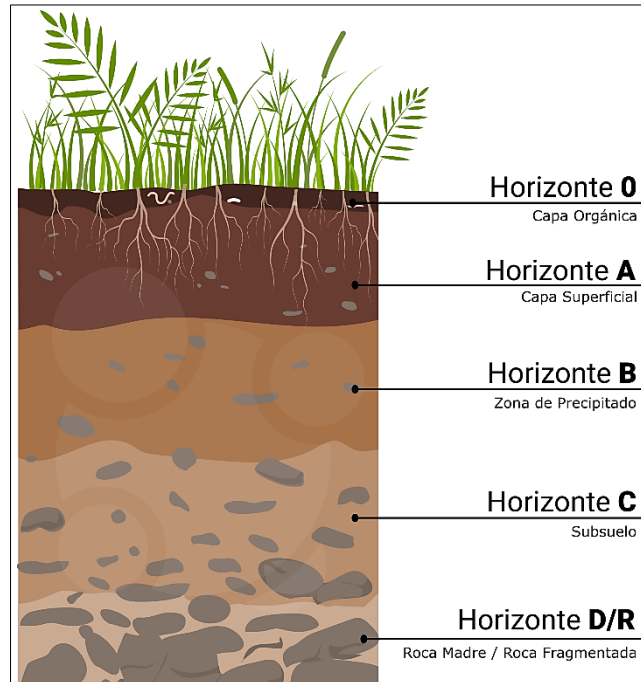


Figura 25 Horizontes (capas) del suelo. Fuente: (Laboratorio, 2024)

3.11.2 Tipos de suelo

El suelo se puede dividir en cuatro tipos, esto, de acuerdo con su textura, es decir, el tamaño de las partículas que lo componen. La textura se expresa como la cantidad relativa entre la arena, el limo y la arcilla de una porción de suelo. Los tipos de suelo son: suelos arenosos, suelos limosos, suelos arcillosos y suelos francos (Laboratorio, 2024). A continuación, se describe cada uno de estos.

- Suelos arenosos: Compuestos principalmente por partículas de arena, que se pueden apreciar a simple vista. Las partículas se separan con facilidad, se saturan con poca agua y se seca rápidamente al aire. Poca adhesividad.
- Suelos limosos: Compuestos mayormente por partículas más grandes que la arcilla, pero 50 veces más pequeñas que la arena. Su aspecto en seco es como polvo (talco) y cuando se humedece es suave. Cuando está humedecido es adhesivo, pero no retiene el agua por mucho tiempo.
- Suelos arcillosos: Están compuestos principalmente de arcilla, que son silicatos de aluminio y otros cationes. Son suelos que cuando se humedecen se vuelven más plásticos, retienen mucha agua. Cuando se secan quedan muy cohesionados y es difícil de disgregar.
- Suelos francos: Estos suelos son mezclas de varios tipos de materiales y presentan propiedades mixtas con respecto a las mencionadas anteriormente.



En la siguiente Figura se muestra una comparación gráfica de los tamaños de la arena, limo y arcilla.



Figura 26 Comparación de tamaños entre la arena, limo y arcilla. Fuente: (Laboratorio, 2024)

Adicionalmente, de acuerdo con (American Society for Testing and Material, 2017) otro tipo de suelo según su tamaño puede ser la grava, la cual cuenta con partículas de roca que pasan por una malla de 3" (75 mm) y son retenidas en la malla No. 4 (4,75 mm) y se puede subdividir de la siguiente manera.

- Grava gruesa: Pasa la malla de 3" (75 mm) y se retiene en la malla de ¾" (19 mm).
- Grava fina: Pasa la malla de ¾" (19 mm) y se retiene en la malla No. 4 (4,75 mm).

3.11.3 Clasificación del suelo

En campo, se puede encontrar una variedad de suelos que, dependiendo del lugar y de la profundidad en la que se formaron, variarán sus características. Por ello es importante determinar el tipo de suelo para conocer sus principales características y a partir de esta información, tomar decisiones adecuadas en el momento del diseño de la obra (Aguilar, Figueras, & Quezada). El sistema más común para la clasificación de suelos empleado en ingeniería geotécnica es el SUCS (*Unified Soil Classification System*), el cual se describe en la norma ASTM D2487 "*Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*".

De acuerdo con (ingeotecnica, 2024) el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) es una herramienta esencial que nos permite entender y categorizar los suelos de



manera eficiente. Esta clasificación organiza los suelos en cinco tipos principales: Gravass (G), Arenas (S), Arcillas (C), Limos (M) y Orgánicos (O).

Posteriormente, el sistema determina la clasificación final de los grupos de suelo con base en las propiedades (graduación y plasticidad) de los cinco tipos principales de suelo, obteniendo los siguientes grupos.

Tabla 1 Grupos de clasificación del suelo según la Norma ASTM D2487, 2017

| GRUPO | NOMBRES TÍPICOS DEL MATERIAL |
|--------------|---|
| GW : | Grava bien gradada, mezclas gravosas, poco o ningún fino. |
| GP : | Grava mal gradada, mezclas grava – arena, poco o ningún fino. |
| GM : | Grava limosa, mezclas grava, arena, limo. |
| GC : | Grava arcillosa, mezclas grava – arena arcillosas. |
| SW : | Arena bien gradada. |
| SP : | Arena mal gradada, arenas gravosas, poco o ningún fino. |
| SM : | Arenas limosas, mezclas arena – limo. |
| SC : | Arenas arcillosas, mezclas arena – arcilla. |
| ML : | Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso, poco plástico, arenas finas limosas, arenas finas arcillosas. |
| CL : | Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras (pulpa) |
| OL : | Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad. |
| MH : | Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos (ambiente marino, naturaleza orgánica silíceo), suelos elásticos. |
| CH : | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas. |
| OH : | Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos. |
| Pt : | Turba (carbón en formación) y otros suelos altamente orgánicos. |

3.12 Cantos rodados o bolos

Los cantos rodados o guijarros (chinas o chinarras, cuando son de pequeño tamaño) son fragmentos de roca pulidos y sueltos, susceptibles de ser transportados por medios naturales, como las corrientes de agua, los corrimientos de tierra, etc. En general, un canto rodado adquiere una morfología más o menos redondeada, subredondeada u oblonga, sin aristas y con la superficie lisa, debido al desgaste sufrido por los procesos erosivos durante el transporte, generalmente causados por la corrosión o las corrientes de agua (erosión hídrica). Según (American Society for Testing and Material, 2017), los cantos rodados son partículas de roca que no pasarán una abertura cuadrada de 12 pulgadas (300 mm).

3.13 Roca

Una roca es un agregado de uno o más minerales sólidos, con propiedades físicas y químicas definidas, que se agrupan de forma natural. Forman la mayor parte de la Tierra y su importancia en el área geocientífica, radica en que contienen el registro del ambiente geológico del tiempo en el que se formaron. Las rocas se clasifican según su modo de formación y origen en tres grupos: Ígneas, Sedimentarias y Metamórficas; y cada grupo



contiene a su vez gran variedad de tipos de roca que difieren entre sí por su composición y textura (Servicio Geológico Mexicano, 2024).

A continuación, se muestra una descripción general de cada tipo de roca según la (Universidad Nacional Autónoma de México, 2024).

- Rocas Ígneas: Se originan a partir del magma de los volcanes; están compuestas en su mayoría por minerales de silicatos.
- Rocas Sedimentarias: Se forman por la acumulación de sedimentos detríticos que pueden provenir de una diversidad de fuentes distales (como las capas de arenisca y lutita) o locales (como los carbonatos que se depositan en zonas tropicales o subtropicales).
- Rocas Metamórficas: Se forman a partir de la transformación de otras rocas, ya sea ígneas, sedimentarias o metamórficas, debido a incrementos de temperatura o presión.



4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio y el cumplimiento de los objetivos planteados se espera realizar una revisión de literatura e informes investigativos referentes a cada una de las tecnologías sin zanja estudiadas, esta revisión de literatura sería sistemática, la cual según (Snyder, 2019) puede ser explicada como un método de investigación y proceso para identificar y evaluar críticamente la investigación relevante, así como para recopilar y analizar datos de dicha investigación, el objetivo de la revisión sistemática es el de identificar toda la evidencia empírica que encaja con el criterio de inclusión preespecificado para responder una pregunta en particular de investigación o hipótesis.

Con la revisión de la información mencionada se busca establecer algunos criterios de identificación de las condiciones técnicas que comúnmente se requieren para la proyección y uso de las tecnologías sin zanja estudiadas, esto, con el fin de lograr una caracterización detallada de cada una de estas, y así, finalmente, poder ejecutar el ejercicio de comparación de los parámetros o criterios técnicos diferenciadores entre estas tecnologías.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso metodológico a seguir para el desarrollo del trabajo de grado.

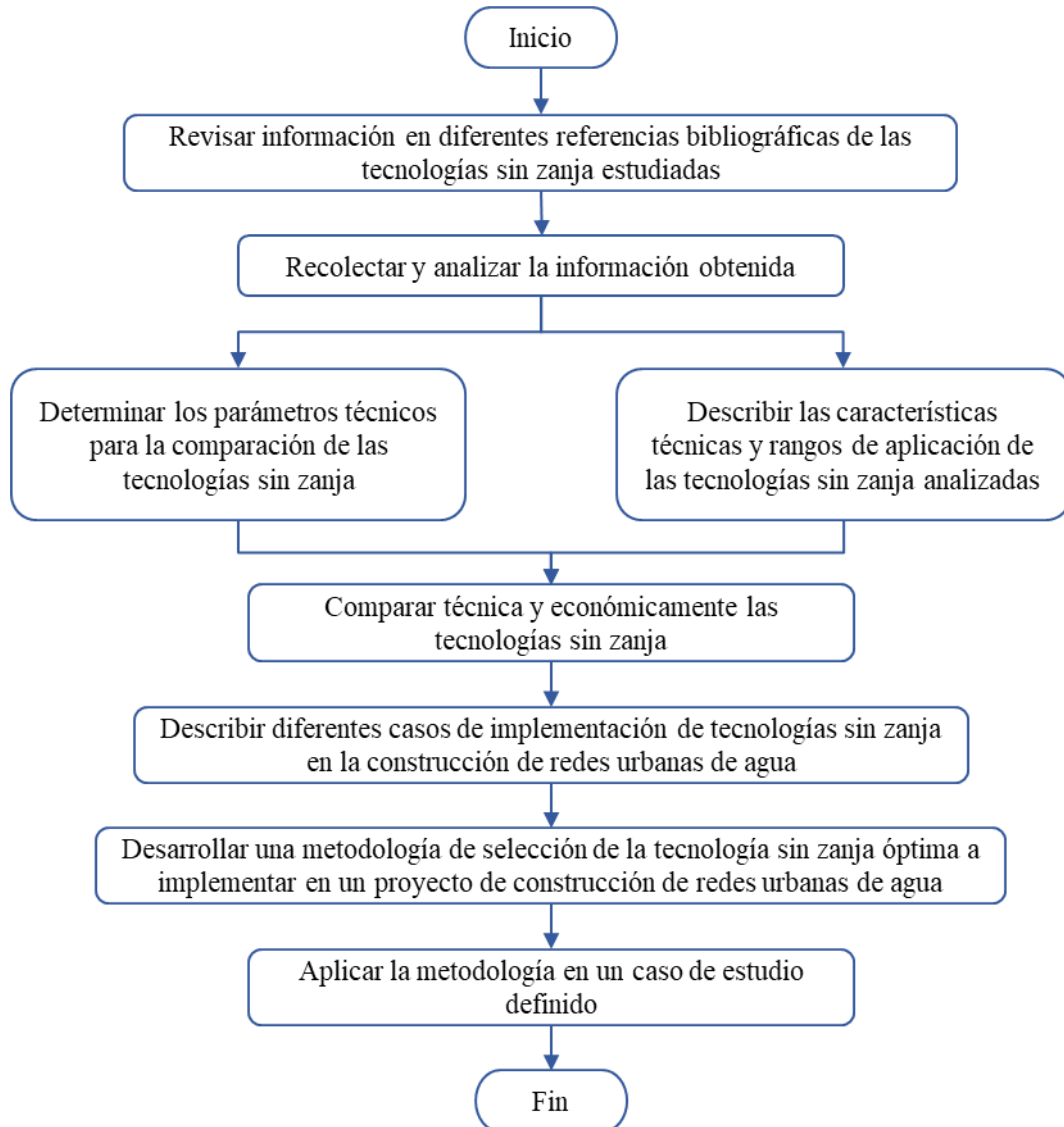


Figura 27 Diagrama de flujo del proceso metodológico del proyecto



5. ESTADO DEL ARTE

La aplicabilidad de las diferentes tecnologías sin zanja estudiadas para la construcción de redes urbanas de agua se ve determinada por diferentes parámetros técnicos que permiten concluir si una tecnología es adecuada a usar o, en su defecto, si esta no es viable a implementar. El presente trabajo de investigación busca generar la revisión de los diferentes reportes encontrados con relación a las características técnicas y rangos de aplicación de las tecnologías analizadas, esto, con el fin de calificar cada una de estas y lograr compararlas técnicamente. Los parámetros técnicos que se tendrán en cuenta para realizar el estudio de la aplicabilidad de las tecnologías serán los siguientes:

- Diámetro de la tubería a instalar.
- Longitud de instalación.
- Material de la tubería a instalar.
- Espacio requerido para la ejecución de los trabajos.
- Profundidad de instalación.
- Condiciones de suelo aptas para la instalación.
- Precisión de la instalación.
- Productividad o tasa de avance.

De igual forma, dado que hoy en día, las diferentes ingenierías se enfocan en ser amigables con el medio ambiente, es decir, generar menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, se realizará una revisión bibliográfica de los diferentes antecedentes que se obtengan referentes al indicador de las emisiones de CO₂ que se generan durante la instalación de tubería mediante las diferentes tecnologías analizadas y compararlas entre sí. Sin embargo, cabe mencionar que este parámetro no inviabiliza el uso de cualquier tecnología, ya que, por más de que una tecnología genere altas emisiones de CO₂, no implica que esta no se pueda aplicar en algún proyecto que cuente con condiciones favorables para su uso.

Por último, se realizará la revisión de la información reportada en bibliografía, documentos técnicos, listados de precios, entre otros, de los costos generados por la instalación de tubería a través de las diferentes tecnologías sin zanja, lo anterior, con el propósito de establecer costos promedio de instalación y comparar económicamente las tecnologías entre sí.

De acuerdo con lo mencionado, a continuación se presenta una descripción detallada de las diferentes referencias usadas para realizar el estado del arte de cada uno de los parámetros técnicos, ya que, las referencias son comunes entre estos.



(Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021) elaboraron un libro en el cual se presenta una descripción completa y detallada de la industria de soluciones técnicas para proporcionar métodos seguros y económicos para enfrentar desafíos cada vez mayores de la construcción de servicios públicos subterráneos. La información proporcionada se basa en la profunda participación en la industria. El libro es utilizado internacionalmente como un recurso importante para académicos, ingenieros de diseño, estudiantes, propietarios, contratistas, etc.

(Abraham, Baik, & Gokhale, 2002) desarrollaron un estudio para identificar tecnologías sin zanja que se han utilizado con éxito para la instalación de nuevos conductos subterráneos de servicios públicos y para desarrollar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la selección de tecnologías sin zanja. El estudio tuvo como base una extensa revisión de literatura, conversaciones con contratistas y visitas a sitios de ejecución de proyectos con tecnologías sin zanja. Se seleccionaron 5 tecnologías sin zanja para un análisis más detallado, estas fueron: Auger Boring, Horizontal Directional Drilling, Microtunelado, Pipe Ramming y Pipe Bursting, la última tecnología corresponde a un método de renovación de tubería sin zanja. Además, en el informe se describen las características clave del método Pilot Tube.

(Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021) desarrolló una norma técnica (NS-079), en la cual se establecen algunos parámetros de apoyo para la toma de decisiones durante la selección de la tecnología sin zanja adecuada para la construcción o intervención de tramos completos de tubería principal de las redes menores de distribución, acometidas domiciliarias y redes matrices de acueducto de la ciudad de Bogotá, así como las de los municipios anexos.

(Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2020) desarrolló una norma técnica (NS-189), en la cual se establecen algunos parámetros de apoyo para la toma de decisiones durante la selección de la tecnología sin zanja adecuada para la construcción, reposición y rehabilitación de tramos completos de tubería principal de las redes locales y troncales de alcantarillado de la ciudad de Bogotá, así como las de los municipios anexos.

(Santiago, 2015) llevó a cabo una descripción de diferentes métodos de excavación sin zanja que existían en la época en el mercado nacional e internacional, al mismo tiempo desarrolló una clasificación y evaluación de estos. La evaluación se enfocó en la determinación de los materiales de uso común y las técnicas de perforación que maneja cada método.

Adicionalmente, se llevaron a cabo diferentes reuniones con el profesional Juan José Hoyo, quien es Ingeniero Geólogo de la Universidad de Salamanca, España, con Máster de Túneles y Obras Subterráneas que imparte la Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas. El ingeniero Juan José cuenta con experiencia en trabajos de investigación



en el campo de las tecnologías sin zanja, también cuenta con nueve años de trabajo en distintos cargos como Director de Obra y Producción alrededor de seis países distintos. Ha participado en proyectos importantes de instalación de tubería sin zanja como lo son el emisario submarino más largo del mundo y la nueva construcción de la red de acueducto más larga del mundo, instalada mediante Microtunelado. Además del papel como constructor, es asesor de proyectos internacionales de tecnologías sin zanja. Las reuniones con el ingeniero se desarrollaron con el fin de lograr validar las diferentes condiciones óptimas que requieren las diferentes tecnologías analizadas en el trabajo para ser técnicamente viables, esto, con base en el criterio técnico y la experiencia propia de este.

Posterior a la descripción de las diferentes referencias usadas para el desarrollo del trabajo, en los siguientes capítulos se muestra el estado del arte de cada uno de los parámetros técnicos.

5.1 Diámetro de la tubería a instalar

Las tecnologías analizadas se pueden implementar en un amplio rango de diámetros, sin embargo, no todas manejan el mismo rango de aplicación, esto se debe principalmente a la diferencia de los equipos y procesos que se usan para realizar la perforación y eliminación del suelo, como también a las diferentes fuerzas requeridas para la instalación de la tubería final en el tramo perforado. A continuación, se muestra la descripción de los diferentes rangos de diámetros reportados en las referencias bibliográficas o técnicas para cada una de las tecnologías sin zanja analizadas.

- Auger Boring

Tabla 2 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Auger Boring

| REFERENCIA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) | | OBSERVACIONES |
|--|---|-------------|---|
| | Rango máximo | Rango común | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 200 a 1500 | 200 a 900 | Cuando el diámetro de la tubería a instalar es menor a 200 mm, otras tecnologías sin zanja se vuelven más económicas y apropiadas. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 100 a 1500 | 200 a 900 | Para diámetros mayores, donde el alineamiento y la precisión son más críticos, el microtunelado puede ser una mejor alternativa. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 300 a 1800 | | - |
| Santiago, 2015 | 100 a 1500 | 200 a 900 | - |
| Ing. Juan José Hoyo | 200 a 1500 | 200 a 1000 | Para diámetros más grandes, se pueden presentar fuerzas de fricción del suelo bastante significativas, por lo cual, no se recomienda usar el método para estos casos. |



- Horizontal Directional Drilling

Tabla 3 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) | | OBSERVACIONES |
|--|---|-------------|---|
| | Rango máximo | Rango común | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 50 a 1500 | | El tamaño máximo de tubería que puede instalar el sistema Mini-HDD es de 300 mm de diámetro, mientras que, el sistema Maxi-HDD puede variar hasta 1500 mm. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 75 a 1200 | | Se puede llevar a cabo la instalación de múltiples líneas mediante un único halado o tirón, pero solamente en el caso de instalación de tuberías de pequeño diámetro. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 50 a 1200 | | Mini 2” – 12” (50 – 300 mm), Midi 12” – 24” (300 – 600 mm), Maxi 24” – 48” o mayores (600 – 1200 mm). |
| Santiago, 2015 | 75 a 1600 | | - |
| Ing. Juan José Hoyo | 50 a 1500 | 100 a 1000 | - |

- Pipe Ramming

Tabla 4 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Pipe Ramming

| REFERENCIA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) | | OBSERVACIONES |
|--|---|-------------|--|
| | Rango máximo | Rango común | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 100 a 4000 | 100 a 1500 | Los diámetros típicos de tubería instalada mediante Pipe Ramming son de hasta 60” (1500 mm) con la técnica de frente abierto y de 4 a 8” (100 a 200 mm) mediante la técnica de frente cerrado. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 100 a 3000 | 100 a 1500 | - |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 100 a 2000 | | Este rango se toma de acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica <i>DWA-A 125E “Pipe Jacking and Related Techniques”</i> . |
| Santiago, 2015 | 150 a 3700 | 150 a 1500 | - |
| Ing. Juan José Hoyo | 100 a 1300 | 200 a 800 | Para diámetros más grandes, se pueden presentar fuerzas de fricción del suelo bastante significativas, por lo cual, no se recomienda usar el método para estos casos. |



- Microtunelado

Tabla 5 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Microtunelado

| REFERENCIA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) | | OBSERVACIONES |
|--|---|-------------|--|
| | Rango máximo | Rango común | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 300 a 3500 | 600 a 1200 | - |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 250 a 3500 | 600 a 1200 | El sistema de perforación por microtunelado tipo lodo puede ser aplicado para tuberías de mayor diámetro que el método de microtunelado tipo sinfines. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 250 a 2500 | | Depende del tipo de máquina tuneladora y del sistema de transporte de detritus. |
| Santiago, 2015 | 250 a 3000 | 600 a 1200 | - |
| Ing. Juan José Hoyo | 400 a 3500 | 500 a 2000 | Las máquinas de microtunelación cuentan con diferentes diámetros instalables: Las máquinas EPB o tipo sinfines pueden manejar diámetros mayores o iguales a 1600 mm, mientras que, las máquinas de hidroescudo o tipo lodo pueden instalar diámetros desde los 500 mm en adelante. |

- Pilot Tube

Tabla 6 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Pilot Tube

| REFERENCIA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) | | OBSERVACIONES |
|--|---|-------------|---------------|
| | Rango máximo | Rango común | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 100 a 1200 | | - |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 100 a 600 | | - |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 100 a 1200 | | - |
| Ing. Juan José Hoyo | 200 a 1200 | 200 a 900 | - |

- Direct Pipe

Tabla 7 Rango de diámetros de aplicación en milímetros del método Direct Pipe

| REFERENCIA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) | | OBSERVACIONES |
|--|---|--|--------------------------------------|
| | Rango común | | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 750 a 1500 | | - |
| Ing. Juan José Hoyo | 762 a 1524 | | Según ficha técnica de Herrenknecht. |



- Métodos de Compactación

Tabla 8 Rango de diámetros de aplicación en milímetros de los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) | | OBSERVACIONES |
|--|---|-------------|---|
| | Rango máximo | Rango común | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | < 200 | | - |
| Santiago, 2015 | < 300 | | Estos métodos se han hecho populares para la instalación de cables de telecomunicaciones y conexiones de servicio residenciales debido a la simplicidad de su equipo y operación. |
| Ing. Juan José Hoyo | < 200 | < 160 | - |

5.2 Longitud de instalación

La máxima longitud que se puede lograr mediante el uso de los diferentes métodos de excavación sin zanja analizados varía dependiendo de ciertas características del sitio del proyecto y de las condiciones del diseño (diámetro de tubería, precisión, entre otros). A continuación, se muestra la descripción de las diferentes longitudes alcanzadas para cada una de las tecnologías sin zanja, esto, con base en lo reportado en las referencias bibliográficas o técnicas.

- Auger Boring

Tabla 9 Longitud de instalación en metros del método Auger Boring

| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|-------------------------|---|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 274 | 182 | El método fue desarrollado inicialmente para cruzar por debajo de una calzada de dos carriles con una longitud promedio de 12 m y una longitud máxima de 21 m. Sin embargo, con la creciente demanda de instalaciones más largas, el método se ha aplicado para mayores longitudes. El rango de longitud típico de los proyectos va de 30 a 182 m. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 270 | 91,5 | El rango de longitud típico de los proyectos va de 30 a 91,5 m. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 80 | | Depende del diámetro, torque y empuje del equipos. Este valor se toma de acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica <i>DWA-A 125E "Pipe Jacking and Related Techniques"</i> . |
| Santiago, 2015 | 270 | 90 | Las longitudes típicas de proyectos van desde 30 a 90 m. |



| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|---------------------|---------------------------------------|-------------------------|--|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Ing. Juan José Hoyo | 180 | 120 | No se recomienda limitar la longitud a una mínima aplicable, ya que esta depende del cliente al cual se realizará el trabajo de instalación de la tubería. |

- Horizontal Directional Drilling

Tabla 10 Longitud de instalación en metros del método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|--|--|
| | Máxima común instalable | | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 1830 | | El tipo de suelo, las características específicas del proyecto y las condiciones del sitio determinan la longitud de perforación. El rango de longitud puede oscilar entre 183 y 1830 m. Longitudes pequeñas no son económicamente viables debido a los altos costos operativos. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 1800 | | El rango de longitudes va desde 120 a 1800 m para el caso de Midi y Maxi HDD. Mini HDD puede ejecutar la instalación de tuberías de hasta 180 m. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 1800 | | Longitud de instalación: Mini HDD, tramos menores o iguales a 180 m, Midi HDD, tramos menores iguales a 270 m y Maxi HDD tramos menores o iguales a 1800 m. |
| Santiago, 2015 | 2000 | | Esta tecnología ha pasado de hacer perforaciones de 70 m de longitud hasta 2000 m. |
| Ing. Juan José Hoyo | 1500 | | Longitud de instalación: Mini HDD, tramos menores o iguales a 200 m, Midi HDD, tramos menores o iguales a 400 m y Maxi HDD tramos menores o iguales a 1500 m. |

- Pipe Ramming

Tabla 11 Longitud de instalación en metros del método Pipe Ramming

| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|-------------------------|---|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 120 | 60 | Se deben considerar las condiciones del sitio y del proyecto, así como el diámetro de la tubería a instalar, para determinar la longitud posible que se puede desarrollar mediante esta tecnología. |



| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 120 | 60 | Se deben considerar el diámetro de la tubería y las condiciones del suelo para determinar la longitud instalable. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 80 | | Depende del diámetro a instalar (Longitud = Diámetro x 0,1). |
| Santiago, 2015 | 250 | | Las longitudes de instalación son muy variables, llegando a superar los 250 m. |
| Ing. Juan José Hoyo | 120 | 60 | - |

- Microtunelado

Tabla 12 Longitud de instalación en metros del método Microtunelado

| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|-------------------------|---|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 450 | | Las longitudes más comunes para el sistema de microtunelado de lodo son de 150 a 450 m, mientras que para el sistema de microtunelado con sinfines es de 60 a 150 m. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 475 | 303 | La máxima instalación realizada en Estados Unidos mediante microtunelado desde el pozo de lanzamiento hasta el pozo de recepción es de 475 m. El rango más común de longitud va desde 150 a 303 m para microtunelado tipo lodo y de 61 a 122 m para microtunelado con sinfines. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 500 | 300 | Generalmente entre 150 y 300 m. Máximo 500 m, dependiendo del diámetro y el tipo de suelo. |
| Santiago, 2015 | 2500 | | El método microtunelado con sinfines puede instalar tuberías de hasta 150 m de longitud, mientras que el método microtunelado tipo lodo logra distancias por encima de los 2500 m. |
| Ing. Juan José Hoyo | 1000 | 600 | La máxima longitud alcanzada no se divide normalmente de acuerdo con la máquina de microtunelación (Tipo lodo o Sinfines), esta depende del diámetro que se va a instalar. Valores máximos de longitud alcanzada de acuerdo con el diámetro instalado: <1200 mm de diámetro, longitudes de hasta 120 m. |



| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|------------|---------------------------------------|-------------------------|--|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| | | | Diámetro entre 1200 y 1500 mm, longitudes de hasta 420 m. Diámetro entre 1600 y 2000 mm, longitudes de hasta 600 m. |

De acuerdo con lo conversado con el ingeniero Juan José Hoyo, la longitud máxima de instalación que se puede lograr mediante el método microtunelado cuenta con ciertas limitantes, las cuales se describen a continuación.

- a. La máxima fuerza de empuje que puede resistir la tubería a instalar, a mayor longitud, mayor fricción del suelo con la tubería y por ende, mayor fuerza. Para generar menor presión durante la instalación, se deben instalar estaciones intermedias para distribuir las fuerzas de empuje en los tramos de tubería, las cuales se recuperan posterior a la instalación de la tubería. Estas estaciones están disponibles únicamente a partir de 1200 m de diámetro.
- b. La pérdida de carga por longitud para alimentar la máquina microtuneladora. Para garantizar la carga requerida, se utiliza una estación *Power Pack* que genera la potencia necesaria en la cabeza perforadora. Esta máquina se puede ubicar únicamente en tuberías con diámetros mayores o iguales a 1200 mm.
- c. Durante los trabajos de perforación se pueden encontrar diversos tipos de suelo en un solo tramo, esto puede implicar en el desgaste de los útiles de corte, por lo cual, en algunos casos se requiere acceder al frente de excavación para realizar el cambio de estos, esta actividad se puede realizar únicamente a partir de diámetros mayores o iguales a 1200 mm. Debido a lo anterior, se podrán alcanzar mayores longitudes a partir de este diámetro.
- d. De acuerdo con ciertos reglamentos, los trabajos dentro de las tuberías se recomiendan que se desarrollen para diámetros mayores a 1200 mm, por esto, para diámetros menores, las longitudes alcanzadas son bajas, puesto que, el proceso de alineación de la perforación requiere de una visual no tan lejana.

- Pilot Tube

Tabla 13 Longitud de instalación en metros del método Pilot Tube

| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|-------------------------|---|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 150 | 90 | La longitudes más largas se logran en condiciones de terreno adecuadas y con la última tecnología disponible. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 80 | | - |



| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------------|---|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| EAAB NS-079 y NS-189 | 100 | | Este valor se toma de acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica DWA-A 125E “Pipe Jacking and Related Techniques”. |
| Ing. Juan José Hoyo | 130 | 90 | - |

- Direct Pipe

Tabla 14 Longitud de instalación en metros del método Direct Pipe

| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|-------------------------|--|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 2000 | 1500 | La longitud alcanzada depende del diámetro de la tubería a instalar y del equipo que se use para la perforación. |
| Ing. Juan José Hoyo | 1321 | | Según ficha técnica de Herrenknecht. |

- Métodos de Compactación

Tabla 15 Longitud de instalación en metros de los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | LONGITUD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|-------------------------|--|
| | Máxima instalable | Máxima común instalable | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 60 | | - |
| Santiago, 2015 | 24 | | La capacidad de control direccional de estos métodos es muy limitada en comparación con otros métodos, esta limitación también restringe su aplicación a longitudes de perforación cortas. |
| Ing. Juan José Hoyo | 35 | 25 | - |

5.3 Material de la tubería a instalar

En las siguientes Tablas se presentan los diferentes materiales de tubería factibles a instalar mediante cada una de las tecnologías sin zanja y para cada una de las referencias bibliográficas o técnicas revisadas.



- Auger Boring

Tabla 16 Material de tubería instalable mediante el método Auger Boring

| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|--|--------------------------------------|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Camisa en tubería de acero | La tubería y el material de revestimiento deben resistir el potencial daño causado por la rotación de los sinfines. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Camisa en tubería de acero | La tubería debe ser resistente al daño causado por la rotación de los sinfines. La tubería producto a instalar dentro de la carcasa o camisa de acero puede estar fabricada en cualquier material, adecuándose al producto que se transporta. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Camisa en tubería de acero | Tubería producto en otros materiales, dentro de la camisa de acero. |
| Santiago, 2015 | Camisa en tubería de acero | Debido a que los sinfines giran dentro de la tubería, el material de la tubería y el recubrimiento debe resistir el daño potencial causado por estos, por lo tanto, el tubo típico de excavación está hecho de acero. La tubería producto instalada dentro de la carcasa puede estar hecha en cualquier material. |
| Ing. Juan José Hoyo | Camisa en tubería de acero | Dentro de la tubería de acero se puede instalar cualquier tipo de tubería. |

- Horizontal Directional Drilling

Tabla 17 Material de tubería instalable mediante el método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | HDPE y acero | En general, la tubería a instalar se limita a una que pueda unirse entre sí de forma continua, manteniendo al mismo tiempo una resistencia suficiente a las altas tensiones de tracción impuestas durante la operación de retroceso. Los materiales más comunes son el HDPE y el acero. Sin embargo, actualmente, también se puede usar tubería PVC fusible, tubería de hierro dúctil y tubería PVC con junta restringida. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | HDPE y acero | El material más común es el acero, sin embargo, la tubería HDPE también puede ser usada. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | HDPE, acero, PVC (termofusión) y hierro dúctil | Las tuberías de hierro dúctil para instalación mediante HDD son especialmente diseñadas y no corresponde a la misma tubería que se instala a zanja abierta. |



| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|---|--------------------------------------|---|
| Santiago, 2015 | HDPE y acero | El revestimiento más utilizado se realiza con tubos de acero. Sin embargo, también puede usarse tubería HDPE, material cada vez más tecnológicamente avanzado, que va ganando terreno en este tipo de procesos. |
| Ing. Juan José Hoyo | HDPE y acero | - |
| HDPE: Tubería de polietileno de alta densidad. PVC: Policloruro de vinilo. | | |

- Pipe Ramming

Tabla 18 Material de tubería instalable mediante el método Pipe Ramming

| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|--|--------------------------------------|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Camisa en tubería de acero | El tipo de carcasa y conducto se limita a tubería de acero. La tubería debe poder soportar las repetidas cargas de impacto del martillo de percusión. Por lo tanto, el espesor de la pared de la tubería es una consideración de diseño muy importante. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Camisa en tubería de acero | - |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Camisa en tubería de acero | Tubería producto en otros materiales, dentro de la camisa de acero. |
| Santiago, 2015 | Camisa en tubería de acero | La fuerza de golpeo hasta la que se llega ronda las 2000 toneladas y requiere de una fuente de aire comprimido. Una vez se ha instalado el encamisado de acero, puede utilizarse como tubería en sí mismo o como un ducto para diámetros más pequeños de tuberías o cables. |
| Ing. Juan José Hoyo | Camisa en tubería de acero | Dentro de la tubería de acero se puede instalar cualquier tipo de tubería. |

- Microtunelado

Tabla 19 Material de tubería instalable mediante el método Microtunelado

| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|--|--|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Concreto reforzado (RCP), fibra de vidrio reforzada (GRP), arcilla vitrificada (VCP), hierro dúctil, acero y PVC | - |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Acero, concreto reforzado (RCP), arcilla vitrificada (VCP) y fibra de vidrio reforzada (GRP) | A través de este método también se han instalado tuberías de hierro dúctil y PVC, pero estas son poco comunes. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Acero, concreto reforzado (RCP), arcilla vitrificada (VCP) y fibra de vidrio reforzada (GRP). Posible con tuberías de hierro dúctil y PVC especiales | Las instalaciones de tubería con microtunelación para redes de acueducto no son una actividad común. |



| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|-----------------------------|---|--|
| Ing. Juan José Hoyo | Acero, concreto reforzado (RCP) y fibra de vidrio reforzada (GRP) | Las tuberías de PVC no pueden instalarse adecuadamente mediante este método debido a que estas no cuentan con la resistencia necesaria para soportar las fuerzas de empuje que se ejercen para su instalación. |
| PVC: Policloruro de vinilo. | | |

- Pilot Tube

Tabla 20 Material de tubería instalable mediante el método Pilot Tube

| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|--|--|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Concreto reforzado (RCP), fibra de vidrio reforzada (GRP), arcilla vitrificada (VCP), hierro dúctil, acero y PVC | - |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Concreto reforzado (RCP), arcilla vitrificada (VCP), fibra de vidrio reforzada (GRP) y hierro dúctil. Posible con tuberías de PVC y Polietileno especiales | - |
| Ing. Juan José Hoyo | Concreto reforzado (RCP), fibra de vidrio reforzada (GRP), arcilla vitrificada (VCP), hierro dúctil y acero | Las tuberías de PVC no pueden instalarse adecuadamente mediante este método debido a que no resisten las fuerzas de instalación. |
| PVC: Policloruro de vinilo. | | |

- Direct Pipe

Tabla 21 Material de tubería instalable mediante el método Direct Pipe

| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|--|--------------------------------------|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Camisa en tubería de acero | La tubería debe poder soportar la fuerza de empuje dada por la unidad propulsora, por ello, este método se limita a tuberías de acero. |
| Ing. Juan José Hoyo | Camisa en tubería de acero | Dentro de la tubería de acero se puede instalar cualquier tipo de tubería. |

- Métodos de Compactación

Tabla 22 Material de tubería instalable mediante los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | MATERIAL DE TUBERÍA TÍPICO INSTALADO | OBSERVACIONES |
|--|--------------------------------------|---------------|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Variedad de materiales | - |
| Ing. Juan José Hoyo | HDPE | - |
| HDPE: Tubería de polietileno de alta densidad. | | |



5.4 Espacio requerido para la ejecución de los trabajos

Durante el proceso de excavación sin zanja mediante los diferentes métodos analizados, se requiere de la disposición de un área en la entrada del tramo de instalación y otra a la salida de este, en estas áreas se posicionan los diferentes equipos usados para realizar la perforación y, así mismo, las secciones o tramos de tubería. Estas áreas se denominan pozo de lanzamiento y pozo de salida. En las siguientes Tablas se presentan las diferentes dimensiones reportadas en las referencias para dichos pozos, según cada uno de los métodos sin zanja.

- Auger Boring

Tabla 23 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Auger Boring

| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|---------------------------|--|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Largo: 11 m Ancho: 3,7 m | - | El pozo de lanzamiento es el pozo principal de trabajo. El tamaño de este pozo se determina de acuerdo con el diámetro de la tubería y por la longitud de los segmentos a usar como carcasa o camisa. Se debe disponer de suficiente espacio para la carga, descarga y almacenamiento de materiales y equipos. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Largo: 10,7 m Ancho: 3,6 m | - | Se requiere pozo al inicio y al final del tramo. El pozo de lanzamiento es el pozo principal de trabajo. El tamaño depende del diámetro y de la longitud de los segmentos a ser usados como carcasa. La longitud más común de los segmento es de 6,1 m. La mínima área de obra en superficie debería ser de 9 m por 25 m. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Largo: 10 m Ancho: 4 m | Largo: 10 m Ancho: 4 m | Depende de la longitud de la tubería de acero. Para tubos de 6 m, generalmente el pozo de lanzamiento cuenta con las medidas reportadas. |
| Santiago, 2015 | Largo: 10,7 m Ancho: 3,6 m | - | El área de trabajo en superficie debe ser de aproximadamente 23 m por 46 m. La superficie mínima absoluta debe ser de unos 200 m ² . |
| Ing. Juan José Hoyo | Largo: 10 m Ancho: 3 m | Largo: 3 m Ancho: 3 m | El pozo de salida puede ser ciego, sin embargo, las dimensiones reportadas suelen ser las mínimas para la ejecución de los trabajos. El área de ocupación de obra en superficie para la zona de lanzamiento debe ser alrededor de 300 m ² , mientras |



| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|------------|---------------------------------------|----------------|--|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| | | | <p>que, para el caso de la zona de salida, se requieren aproximadamente 100 m².</p> <p>Las dimensiones reportadas dependen de los equipos y de la propia operación del contratista.</p> |

- Horizontal Directional Drilling

Tabla 24 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|----------------------------|---|
| | Área de lanzamiento | Área de salida | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Largo: 120 m Ancho: 60 m | - | <p>El método HDD es un método de lanzamiento desde la superficie, por lo que no suele requerir pozos de entrada o de salida. Sin embargo, si se está realizando la instalación de servicios públicos, es posible que se requieran de pozos para realizar conexiones con los servicios públicos existente.</p> <p>El área de trabajo del equipo debe estar nivelada, firme y adecuada para el movimiento de este.</p> |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Largo: 120 m Ancho: 60 m | - | <p>Para los métodos Maxi y Midi HDD, las dimensiones del área de trabajo reportadas se consideran adecuadas.</p> |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Largo: 90 m Ancho: 60 m | Largo: 45 m Ancho: 30 m | <p>Las dimensiones de los pozos de trabajo para HDD son variables para cruces largos con equipo Maxi HDD y dependen de la complejidad del suelo a perforar. Las dimensiones indicadas no contemplan el espacio necesario para ubicar la lingada de tubería.</p> <p>Equipo Mini HDD: Pozo de lanzamiento y salida de 1 x 0,80 m y profundidad de 0,40 m.</p> <p>Equipo Maxi HDD: Pozo de lanzamiento, 30 a 60 m x 60 a 90 m y pozo de salida, 15 a 30 m x 30 a 45 m.</p> |
| Ing. Juan José Hoyo | Largo: 30 m Ancho: 10 m | Largo: 45 m Ancho: 10 m | <p>Área de obra requerida en superficie en la zona de lanzamiento para taladros pequeños: 300 m². Sin embargo, para taladros grandes puede necesitarse un área cerca de 3000 m².</p> |



| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|------------|---------------------------------------|----------------|--|
| | Área de lanzamiento | Área de salida | |
| | | | Área requerida en superficie en la zona de salida: Depende de la longitud total de instalación, ya que, en esta área se dispone de la lingada de tubería a instalar. |

- Pipe Ramming

Tabla 25 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Pipe Ramming

| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|---------------------------|--|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Largo: 10 m Ancho: 3 m | - | Un acceso adecuado al sitio y un espacio de trabajo son esenciales para una instalación exitosa. La longitud del pozo de lanzamiento depende de la longitud de los segmentos de tubería que se instalarán. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Largo: 20 m Ancho: 3,6 m | - | - |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Largo: 20 m Ancho: 4 m | Largo: 20 m Ancho: 4 m | Depende de la longitud del tubo. Generalmente 2 a 4 m de ancho por 10 a 20 m de largo. |
| Ing. Juan José Hoyo | Largo: 10 m Ancho: 3 m | Largo: 3 m Ancho: 3 m | El área de ocupación de obra en superficie para la zona de lanzamiento debe ser alrededor de 300 m ² , mientras que, para el caso de la zona de salida, se requieren aproximadamente 100 m ² . Las dimensiones reportadas dependen de los equipos y de la propia operación del contratista. |

- Microtunelado

Tabla 26 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Microtunelado

| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|----------------|---|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Largo: 34 m Ancho: 8 m | - | Un adecuado espacio de trabajo debe ser proporcionado en el pozo de lanzamiento, con el fin de acomodar el equipo requerido y los materiales para la operación del método. El espacio requerido para el pozo de lanzamiento usualmente es más grande que para el de salida. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Largo: 34 m Ancho: 8 m | - | El espacio de trabajo requerido está determinado por el tamaño del equipo de |



| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------------|--|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| | | | microtunelación, el cual puede oscilar entre 5 x 10 m y 15 x 30 m. También depende del diámetro y longitud de la tubería. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Largo: 30 m Ancho: 10 m | Largo: 15 m Ancho: 5 m | Depende del tamaño de la tuneladora y si es pozo de lanzamiento o de salida. Generalmente se tienen medidas desde 5 a 10 m, hasta 15 a 30 m. |
| Ing. Juan José Hoyo | Largo: 7 m Ancho: 7 m | Largo: 5,5 m Ancho: 5,5 m | <p>El área de ocupación de obra en superficie va relacionada con el diámetro instalado.</p> <p>Diámetros <1200 mm, 400 m² para el área de lanzamiento y 100 m² para el área de salida.</p> <p>Diámetros entre 1200 y 1500 mm, 600 m² para el área de lanzamiento y 150 m² para el área de salida.</p> <p>Diámetros entre 1600 y 2000 mm, 800 m² para el área de lanzamiento y 200 m² para el área de salida.</p> <p>Estas dimensiones de obra son mínimas recomendables. Las dimensiones de los pozos dependen estrictamente del diámetro a instalar.</p> |

- Pilot Tube

Tabla 27 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube

| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------------|--|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Largo: 4 m Ancho: 4 m | Largo: 4 m Ancho: 4 m | Pueden ser de forma rectangular o circular. |
| Ing. Juan José Hoyo | Largo: 5 m Ancho: 5 m | Largo: 3 m Ancho: 3 m | El área de ocupación de obra en superficie para la zona de lanzamiento debe ser alrededor de 300 m ² , mientras que, para el caso de la zona de salida, se requieren aproximadamente 100 m ² . |

- Direct Pipe

Tabla 28 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante el método Direct Pipe

| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|--|---------------------------------------|----------------|---|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Largo: 20 m Ancho: 3,5 m | - | Debido a las ventajas especiales del método, la mayoría de requerimiento de |



| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|---------------------|---------------------------------------|----------------------------|---|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| | | | espacio de trabajo se encuentra en el pozo de entrada. El tendido de la cadena de tuberías requiere la mayor parte del espacio de trabajo en el método. Dependiendo de los requisitos del diseño y las preferencias del contratista, se puede utilizar un pozo de lanzamiento. La longitud y ancho de este deben dimensionarse para acomodar el propulsor de tubería. Por lo general, la longitud del pozo oscila entre 10 y 20 m. |
| Ing. Juan José Hoyo | Largo: 20 m Ancho: 3,5 m | Largo: 25 m Ancho: 10 m | El espacio requerido en superficie dependerá de la longitud total de instalación. |

- Métodos de Compactación

Tabla 29 Espacio requerido para la instalación de tubería mediante los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | | OBSERVACIONES |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------|--|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida | |
| Santiago, 2015 | Largo: 1 m Ancho: 1 m | Largo: 1 m Ancho: 1 m | Las operaciones sobre el terreno requieren pozos de trabajo pequeños, dando lugar a perturbaciones superficiales leves, de aproximadamente 1 m ² . El pozo es lo suficientemente pequeño para ser excavado a mano en vez de por la máquina, haciendo el método apto para lugares de difícil acceso. |
| Ing. Juan José Hoyo | Largo: 1 m Ancho: 1 m | Largo: 1 m Ancho: 1 m | El área de trabajo requerida en superficie es de alrededor de 20 m ² . |

5.5 Profundidad de instalación

Los diferentes métodos de excavación sin zanja utilizan una variedad de procesos para la instalación de los tramos de tubería, cada uno de estos procesos genera ciertas perturbaciones en superficie, por lo cual, con el fin de evitar estas afectaciones, se establece una profundidad mínima para poder aplicar el método, así mismo, de acuerdo con las capacidades de las tecnologías, se establece una profundidad máxima a la cual estas se pueden ejecutar. En las siguientes Tablas se presentan las profundidades reportadas en las referencias para cada uno de los métodos sin zanja.



- Auger Boring

Tabla 30 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Auger Boring

| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|----------------------|--|---|
| EAAB NS-079 y NS-189 | Profundidad mínima 0,80 m o 1,5 veces el diámetro externo | Estos valores se toman de acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica <i>DWA-A 125E "Pipe Jacking and Related Techniques"</i> . |
| Ing. Juan José Hoyo | Profundidad mínima recomendable, 2 veces el diámetro externo. Sin límites máximos | - |

- Horizontal Directional Drilling

Tabla 31 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|--|---|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Mini HDD, hasta 4,60 m, Midi HDD, hasta 23 m y Maxi HDD, hasta 60 m | La limitación de profundidad del equipo Mini HDD proviene de la restricción en la capacidad del sistema de seguimiento. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Mini HDD, hasta 4,50 m. Midi y Maxi HDD hasta 61 m | - |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Mini HDD, hasta 4,50 m, Midi HDD, hasta 23 m y Maxi HDD, hasta 61 m | - |
| Ing. Juan José Hoyo | Profundidad mínima 3,00 m o de 3 a 10 veces el diámetro de escariado máximo, dependiendo del diámetro y tipo de terreno | - |

- Pipe Ramming

Tabla 32 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Pipe Ramming

| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|----------------------|--|---|
| EAAB NS-079 y NS-189 | Profundidad mínima 1,00 m o 1,5 veces el diámetro externo | Estos valores se toman de acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica <i>DWA-A 125E "Pipe Jacking and Related Techniques"</i> . |
| Ing. Juan José Hoyo | Profundidad mínima recomendable, 2 veces el diámetro externo. Sin límites máximos | - |

- Microtunelado

Tabla 33 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Microtunelado

| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|--|---|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Profundidad mínima de 1,80 m o una relación de profundidad a diámetro de 3 (lo que sea mayor) | Como la operación del microtunelado se realiza de manera remota, no hay un límite teórico para la máxima profundidad de instalación. |



| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|-------------------------------|---|--|
| | | La recomendación de la profundidad mínima se da con el fin de evitar la posibilidad de levantamiento o asentamiento de la superficie y evitar que se escape el lodo. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Profundidad mínima de 1,50 m o una relación de profundidad a diámetro de 3 | No hay un límite teórico para la máxima profundidad de instalación. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Profundidad mínima de 2,00 m o 1,5 veces el diámetro externo | Estos valores se toman de acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica <i>DWA-A 125E "Pipe Jacking and Related Techniques"</i> . |
| Santiago, 2015 | Profundidad mínima de 2,00 m o 1,5 veces el diámetro externo | - |
| Ing. Juan José Hoyo | Profundidad mínima recomendable, de 1 a 2 veces el diámetro de excavación, dependiendo del diámetro y tipo de terreno. Sin límites máximos | - |

- Pilot Tube

Tabla 34 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube

| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|----------------------|--|---------------|
| EAAB NS-079 y NS-189 | Profundidad mínima 1,00 m o 1,5 veces el diámetro externo | - |
| Ing. Juan José Hoyo | Profundidad mínima recomendable, 2 veces el diámetro externo. Sin límites máximos | - |

- Direct Pipe

Tabla 35 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante el método Direct Pipe

| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|---------------------|--|---------------|
| Ing. Juan José Hoyo | Profundidad mínima recomendable, 3,00 m o de 1 a 2 veces el diámetro de excavación, dependiendo del diámetro y tipo de terreno. Sin límites máximos | - |

- Métodos de Compactación

Tabla 36 Profundidad permitida para la instalación de tubería mediante los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|----------------|-------------------------------------|---|
| Santiago, 2015 | 0,25 m por cada 0,025 m de diámetro | El valor reportado corresponde a la profundidad mínima, la cual se adopta para prevenir movimientos verticales en |



| REFERENCIA | PROFUNDIDAD INSTALABLE | OBSERVACIONES |
|---------------------|--|---|
| | | la superficie, ya que, las herramientas de desplazamiento del suelo introducen volúmenes extras en el del suelo. En tierra suelta la energía de impacto se traduce en una consolidación del suelo, lo que puede provocar el hundimiento de la superficie. |
| Ing. Juan José Hoyo | Profundidad mínima, al menos 1 m para diámetros pequeños. Sin límites máximos | - |

5.6 Condiciones de suelo aptas para la instalación

Las condiciones del terreno presente en el área donde se llevará a cabo la instalación de tubería permiten o restringen la aplicación de los diferentes métodos de excavación sin zanja, esto se debe a que cada tecnología utiliza diferentes mecanismos de perforación y de eliminación de desechos, por lo cual, algunas manejan un mayor rango de terrenos aplicables y otras cuentan con diversidad de limitaciones. A continuación, se muestran los diferentes terrenos aptos para la aplicación de los métodos sin zanja, basado en las referencias bibliográficas y técnicas.

- Auger Boring

Tabla 37 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Auger Boring

| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Cohesivos (arcillas y limos), arenas medias a densas por encima del nivel freático, gravas de menos de 2 a 4 pulgadas de diámetro, rocas erosionadas y significativamente erosionadas. | En caso de trabajar en suelos inestables se debe tener cuidado con el borde cortante que va hacia el borde de la carcasa, ya que, esto puede provocar que los desechos se eliminen sin ningún avance de la carcasa, lo que significa que se está realizando una eliminación excesiva de desechos. La situación anterior puede crear un vacío entre la carcasa y el terreno perforado, provocando el hundimiento de la superficie. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Aplicable en un amplio rango de condiciones de suelo, desde arena seca, arcilla seca firme, hasta roca sólida. La condición de suelo más compatible con este método es la arcilla arenosa firme. Los cantos rodados o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería también pueden excavar con este método. | - |



| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|----------------------|---|--|
| EAAB NS-079 y NS-189 | Más apropiado para suelos blandos cohesivos: SC (Arenas arcillosas), CL (Arcillas inorgánicas) y ML (Limos inorgánicos y arenas muy finas). Sin nivel freático. Rocas y bolos: Hasta 1/3 del diámetro de la perforación. | Perforación en roca requiere equipos especiales. |
| Santiago, 2015 | Aplicable en un amplio rango de condiciones de suelo, desde arena seca, arcilla seca firme, hasta roca sólida. La condición de suelo más compatible con este método es la arcilla limosa firme. Los cantos rodados o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería también pueden excavar con este método. | - |
| Ing. Juan José Hoyo | Suelos cohesivos (arcillas y limos) y suelos con predominancia de cohesivos (>50%). | Para partículas con tamaños superiores a 1/3 del diámetro de la perforación, se puede presentar atascamiento de los sinfines durante la extracción del suelo perforado. Este método no es aplicable en suelos duros, debido a la incapacidad de perforación usando métodos tradicionales (sin herramientas de corte para roca). |

- Horizontal Directional Drilling

Tabla 38 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|--|---|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | La arcilla es ideal para el método. La arena fina y el limo se comportan de manera fluida. Aplicable en rocas erosionadas. | La tecnología actual permite realizar grandes operaciones de perforación en formaciones de suelo que comprenden hasta un 50% de grava. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Aplicable en un amplio rango de condiciones de suelo, desde arcillas, arenas y gravas, inclusive en condiciones de formaciones rocosas, con base en el uso de adecuadas cabezas de perforación. | La arcilla es considerada ideal para los método HDD. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Más apropiado para suelos blandos cohesivos: SC, CL y ML. Apto para SM, SP y SW. Suelos GC, GM, GP y GW pueden tener alto grado de complejidad. | - |



| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|---------------------|---|--|
| | <p>Con nivel freático para suelos arcillosos y arenosos. Sin nivel freático para otros suelos.</p> <p>Rocas y bolos: Suelos con bolos presentan alto grado de complejidad. Para perforación en roca se requieren equipos especiales.</p> | |
| Santiago, 2015 | <p>Aplicable en un amplio rango de condiciones de suelo, desde arcillas y arenas, hasta en formaciones rocosas blandas y suelos con granulometría de gravas superior al 50%.</p> | <p>Generalmente, los sistemas de perforación mecánicos (Mini HDD) se aplican en una gama más amplia de condiciones de suelo que los métodos de chorro de fluido a presión. Sin embargo, pueden producirse problemas en la eliminación de los detritus de perforación, la estabilización de las paredes de la perforación piloto y las operaciones de ensanchamiento.</p> |
| Ing. Juan José Hoyo | <p>Suelos cohesivos (arcillas y limos), suelos con predominancia de cohesivos (>50%), arenas con matriz de cohesivos y gravas en matriz granular y cohesivos.</p> <p>Rocas con fracturación, meteorización, dureza y abrasividad media o baja.</p> | - |

- Pipe Ramming

Tabla 39 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Pipe Ramming

| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | <p>Adecuado para una amplia gama de condiciones de suelo, con o sin presencia de nivel freático. Las condiciones de suelo más adecuadas para el método son arcillas, limos y depósitos orgánicos, las arenas por encima del nivel freático y suelos con cantos rodados o gravas de tamaño más pequeño que el diámetro de la tubería.</p> <p>No es apto para aplicación en roca sólida.</p> | - |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | <p>Aplicable en un amplio rango de condiciones de suelo, con y sin presencia de nivel freático.</p> | <p>El efecto del martilleo tiende a romper los cantos rodados o a sacarlos del camino, ya sea hacia el exterior o hacia el interior de la carcasa.</p> |
| EAAB NS-079 y NS-189 | <p>Más apropiado para suelos blandos cohesivos: SC, CL, ML, OH y CH. Apto para suelos granulares SM, SP,</p> | - |



| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|---------------------|--|--|
| | SW, GC, GM y GW preferiblemente sin nivel freático. Puede instalarse con nivel freático. No es apto en estrato rocoso. | |
| Santiago, 2015 | Aplicable en un amplio rango de condiciones de suelo. | Muchos contratistas recurren a este método dado a su versatilidad de aplicación. |
| Ing. Juan José Hoyo | Suelos cohesivos (arcillas y limos), suelos con predominancia de cohesivos (>50%), arenas con matriz de cohesivos y gravas en matriz granular y cohesivos. | Este método no es aplicable en suelos duros, debido a la incapacidad de perforación. |

- Microtunelado

Tabla 40 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Microtunelado

| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|--|---|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Se cuenta con disponibilidad de una amplia selección de cabezales de corte para microtunelado que brindan la capacidad de manejar una variedad de condiciones de suelo, incluidos los cantos rodados y roca sólida. | El tipo de suelo más favorable para el sistema de microtunelado tipo lodo es la arena húmeda, mientras que para el caso del sistema de sinfines es la arcilla arenosa estable. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Se cuenta con disponibilidad de una amplia selección de cabezales de corte para microtunelado que brindan la capacidad de manejar una variedad de condiciones de suelo, incluidos los cantos rodados y roca sólida. | El tipo de suelo más favorable para el sistema de microtunelado tipo lodo es la arena húmeda, mientras que para el caso del sistema de sinfines es la arcilla arenosa estable. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Las tuneladoras son configurables para todos los tipos de suelo, incluyendo roca maciza. El nivel freático no es una limitación. Rocas y bolos: Hasta 1/3 del diámetro de la perforación. | Esta tecnología es más apropiada para arenas húmedas. Perforación en roca requiere longitudes cortas. |
| Ing. Juan José Hoyo | La microtunelación puede trabajar en cualquier tipo de terreno y condición del nivel freático. Dependerá del tipo de microtuneladora. | - |

- Pilot Tube

Tabla 41 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube

| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Aplicable en arcillas y limos de medios a muy rígidos, arcillas duras, arenas medias a densas por encima | El suelo duro con cantos rodados y rocas relativamente grandes puede causar algunos desafíos al rendimiento, al igual |



| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|----------------------|---|--|
| | del nivel freático y gravas y adoquines de menos de 2 a 4 pulgadas de diámetro. | que las arenas, los suelos inestables y las instalaciones debajo del nivel freático. Se cuenta con disponibilidad de diferentes tipos de cabezales escarificadores. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | Más apropiado para suelos cohesivos o granulares con al menos 20% de material cohesivo. Sin nivel freático. Rocas y bolos: Bolos hasta 1/3 del diámetro de la perforación. Perforación en roca no es posible. | Se pueden realizar perforaciones bajo nivel freático, siempre y cuando el nivel freático esté hasta 3 metros sobre la clave de la tubería y se utilicen accesorios especiales de control de presión hidrostática durante la instalación de la camisa en acero y los ensanchamientos. |
| Ing. Juan José Hoyo | Suelos cohesivos (arcillas y limos), suelos con predominancia de cohesivos (>50%), arenas con matriz de cohesivos y gravas de tamaño fino (en matriz granular y cohesivos). | Este método no es aplicable en suelos duros, ni en roca. |

- Direct Pipe

Tabla 42 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante el método Direct Pipe

| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|--|---|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | El método se puede emplear en arcilla, limo, arena, grava, guijarros, cantos rodados y rocas, igualmente, se puede emplear para instalaciones por encima y por debajo del nivel freático. Los cantos rodados no pueden ser más grandes que 1/3 del diámetro de la máquina Direct Pipe. | Una ventaja significativa del método es su versatilidad con respecto a la geología y las condiciones del suelo. |
| Ing. Juan José Hoyo | El método se puede trabajar en cualquier tipo de terreno y condición del nivel freático. | - |

- Métodos de Compactación

Tabla 43 Condiciones de suelo aptas para la instalación de tubería mediante los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | TIPO DE SUELO APTO PARA LA INSTALACIÓN | OBSERVACIONES |
|---------------------|--|--|
| Santiago, 2015 | Se requiere de suelos compresibles como limos y arcillas no consolidadas. La presencia de nivel freático puede afectar la operación. | La eficacia del método depende de las propiedades y características del suelo. |
| Ing. Juan José Hoyo | Suelos cohesivos (arcillas y limos), suelos con predominancia de cohesivos (>50%) y suelos con capacidad de consolidarse. | - |



5.7 Precisión de la instalación

En las siguientes Tablas se presentan los niveles de precisión logrados durante la instalación de tubería mediante cada una de las tecnologías sin zanja y para cada una de las referencias bibliográficas o técnicas revisadas.

- Auger Boring

Tabla 44 Nivel de precisión logrado mediante el método Auger Boring

| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | $\pm 1\%$ de longitud total de perforación | Si un cabezal de dirección no es usado en el sistema del método, la precisión depende de las condiciones del agua subterránea, la longitud del trazado, la configuración inicial y las habilidades del operador. La precisión típica alcanzada es la reportada. Para proyectos que requieran mayor precisión, una carcasa de mayor tamaño es instalada para proveer espacio de maniobra para el tubo final dentro de esta y así obtener la tolerancia especificada. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | $\pm 1\%$ de longitud total de perforación | Para proyectos que requieran mayor precisión, una carcasa de mayor tamaño es instalada para proveer espacio de maniobra para el tubo final dentro de esta y así obtener la tolerancia especificada. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | $\pm 1\%$ de longitud total de instalación | - |

- Horizontal Directional Drilling

Tabla 45 Nivel de precisión logrado mediante el método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | $\pm 1\%$ de longitud del tramo a instalar | La precisión para alcanzar un objetivo para los tipos Maxi y Midi HDD depende del sistema de seguimiento que se utilice, el tiempo dedicado a perforar y la habilidad de los operadores. Para el tipo Mini HDD, la precisión depende de los métodos empleados. Por lo general, el método HDD puede alcanzar un objetivo pero tendrá dificultades para mantener la línea y la pendiente. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | $\pm 1\%$ de longitud del tramo a instalar | Si se desea una mayor precisión, se puede lograr reduciendo el intervalo en el que se toman las lecturas de ubicación, pero, este proceso tomará más tiempo. |



| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|----------------------|--------------------------------------|---------------|
| EAAB NS-079 y NS-189 | ±2% de longitud total de instalación | - |

- Pipe Ramming

Tabla 46 Nivel de precisión logrado mediante el método Pipe Ramming

| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|----------------------|--------------------------------------|---------------|
| EAAB NS-079 y NS-189 | ±1% de longitud total de instalación | - |

- Microtunelado

Tabla 47 Nivel de precisión logrado mediante el método Microtunelado

| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--------------------|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | ±0,0254 m | El método es capaz de instalar tuberías para flujo por gravedad con una alta precisión. Por lo tanto, el microtunelado se usa principalmente para la instalación de líneas de flujo por gravedad donde se requiere un alto grado de precisión. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | ±0,025 m | El control de la alineación de la tubería instalada se lleva a cabo mediante un sistema láser. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | ±0,050 m | - |
| Santiago, 2015 | ±0,025 m | - |

- Pilot Tube

Tabla 48 Nivel de precisión logrado mediante el método Pilot Tube

| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--------------------|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | ±0,0254 m | Los equipos usados en el método son precisos y pueden ejecutar la instalación de líneas de flujo por gravedad. Sin embargo, la precisión real lograda depende de la configuración inicial y de las habilidades del operador. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | ±0,006 m | El nivel de precisión logrado es de 6 mm por cada 90 m. Sin embargo, la precisión depende de la capacidad del teodolito y las habilidades del operador. |
| EAAB NS-079 y NS-189 | ±0,025 m | - |



- Direct Pipe

Tabla 49 Nivel de precisión logrado mediante el método Direct Pipe

| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--------------------|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | ±0,003 a 0,0015 m | La precisión depende de la configuración inicial del propulsor de tuberías. La orientación vertical se logra mediante un sistema hidrostático de nivelación de agua. La orientación horizontal la proporciona el giroscopio de la máquina perforadora. |

- Métodos de Compactación

Tabla 50 Nivel de precisión logrado mediante los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | NIVEL DE PRECISIÓN | OBSERVACIONES |
|--|--------------------------------------|---------------|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | ±1% de longitud total de perforación | - |

5.8 Productividad o tasa de avance

En las siguientes Tablas se presentan los rendimientos o tasas de avance logrados en la instalación de tubería mediante cada una de las tecnologías sin zanja y para cada una de las referencias bibliográficas o técnicas revisadas. Las siguientes tasas de avance son promedios referenciales y dependen en gran medida del tipo de terreno, tipo de maquinaria específica y la operación del contratista.

- Auger Boring

Tabla 51 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Auger Boring

| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|--|---|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 0,90 a 3,70 m/hora | Depende de las condiciones del suelo, del diámetro y la longitud de perforación. Los proyectos se ejecutan en jornadas de trabajo de 8 horas. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 1 a 3,60 m/hora | Depende de las condiciones del suelo, del diámetro y la longitud de perforación. Los proyectos se ejecutan en jornadas de trabajo de 8 horas. |
| Santiago, 2015 | 1 a 12 m/hora | Depende de las condiciones del suelo, el diámetro y la longitud de la tubería. |
| Ing. Juan José Hoyo | Cada semana se ejecuta un tramo promedio de 80 m. Aproximadamente 2 m/hora | Se toma como jornada laboral una semana de 5 días por 8 horas de trabajo. |



- Horizontal Directional Drilling

Tabla 52 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Horizontal Directional Drilling

| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | Un tramo de 183 m se instala en un día. Día de trabajo de 8 horas. Aproximadamente 22,87 m/hora | Los sistemas de perforación horizontal dirigida generalmente tienen la tasa de avance de perforación piloto más alta entre todos los métodos de construcción sin zanja. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Un tramo de 180 m se instala en un día. Día de trabajo de 8 horas. Aproximadamente 22,50 m/hora | Regularmente una cuadrilla de 3 personas es suficiente. |
| Ing. Juan José Hoyo | Cada semana se ejecuta un tramo promedio de 150 m. Aproximadamente 3,75 m/hora | Se toma como jornada laboral una semana de 5 días por 8 horas de trabajo. |

- Pipe Ramming

Tabla 53 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Pipe Ramming

| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|--|--|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 0,05 a 0,25 m/minuto. Aproximadamente 3 a 15 m/hora | Usualmente se requiere de una cuadrilla de 2 a 3 para aplicaciones pequeñas. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 0,05 a 0,25 m/minuto. Aproximadamente 3 a 15 m/hora | - |
| Santiago, 2015 | 0,05 a 0,25 m/minuto. Aproximadamente 3 a 15 m/hora | Bajo condiciones de suelo adecuadas. |
| Ing. Juan José Hoyo | Cada semana se ejecuta un tramo promedio de 60 m. Aproximadamente 1,50 m/hora | Se toma como jornada laboral una semana de 5 días por 8 horas de trabajo. |

- Microtunelado

Tabla 54 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Microtunelado

| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|--|--|---|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 9 a 18 m por 8 horas de trabajo. Aproximadamente 1,13 a 2,25 m/hora | Una cuadrilla de 4 a 8 personas puede obtener la tasa de producción reportada. |
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | 9 a 18 m por 8 horas de trabajo. Aproximadamente 1,13 a 2,25 m/hora | Una cuadrilla de 4 a 8 personas puede obtener la tasa de producción reportada. |
| Ing. Juan José Hoyo | 12 m por 24 horas de perforación. Aproximadamente 0,50 m/hora | Para este método se debe realizar doble jornada de perforación, debido a que no se puede dejar la máquina |



| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|------------|--------------------------------|--|
| | | microtuneladora estática por mucho tiempo bajo tierra. |

- Pilot Tube

Tabla 55 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Pilot Tube

| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|-------------------------------|---|---|
| Abraham, Baik & Gokhale, 2002 | Un tramo de 67 m en un día. Día de trabajo de 8 horas. Aproximadamente 8,38 m/hora | - |
| Ing. Juan José Hoyo | Cada semana se ejecuta un tramo promedio de 80 m. Aproximadamente 2 m/hora | Se toma como jornada laboral una semana de 5 días por 8 horas de trabajo. |

- Direct Pipe

Tabla 56 Productividad o tasa de avance lograda mediante el método Direct Pipe

| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|--|---|--|
| Najafi, Gokhale, R. Calderón, & Ma, 2021 | 10,70 a 120 m/día, para una jornada de trabajo de 12 horas. Aproximadamente 0,89 a 10 m/hora | La tasa de productividad del método generalmente depende del tipo de suelo, la longitud de los tramos de tubería de acero preensamblados y el uso final de la tubería. |
| Ing. Juan José Hoyo | 12 m por 24 horas de perforación. Aproximadamente 0,50 m/hora | Para este método se debe realizar doble jornada de perforación, debido a que no se puede dejar la máquina perforadora estática por mucho tiempo bajo tierra. |

- Métodos de Compactación

Tabla 57 Productividad o tasa de avance lograda mediante los Métodos de Compactación

| REFERENCIA | PRODUCTIVIDAD O TASA DE AVANCE | OBSERVACIONES |
|---------------------|---|--|
| Santiago, 2015 | 0,075 a 1,20 m/min. Aproximadamente 4,50 a 72 m/hora | La tasa de avance depende de las características del suelo y de la cabeza de compactación. La selección del tipo correcto de configuración de la cabeza es una cuestión de equilibrar la velocidad de avance deseada y la estabilidad de la perforación. |
| Ing. Juan José Hoyo | En un día se realiza un tramo de 25 m. Aproximadamente 3,13 m/hora | Se toma un día de trabajo de 8 horas. |



5.9 Emisiones de CO₂ durante la instalación

Según la (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023) el dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero que se emite a raíz de las actividades del ser humano. En el año 2017, el CO₂ representó aproximadamente el 81,6% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero en Estados Unidos.

La (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023) establece que el dióxido de carbono se hace presente de manera natural en la atmósfera como parte del ciclo del carbono de la Tierra. Sin embargo, las actividades del ser humano alteran el ciclo del carbono, ya sea porque suman más CO₂ a la atmósfera o porque influyen la capacidad de los disipadores naturales (como los bosques) para eliminar el CO₂ de la atmósfera.

Con base en lo anterior, hoy en día mundialmente se ha optado por desarrollar actividades que generen menores emisiones de gases de efecto invernadero, en este caso, CO₂, el cual es un indicador del impacto generado al medio ambiente. Por ello, se desarrolló una revisión de literatura con el fin de determinar un estimado de las posibles emisiones de CO₂ que se generan durante la instalación de tuberías mediante las diferentes tecnologías sin zanja. A continuación, se presenta la descripción de los estudios y los resultados obtenidos en estos para cada tecnología.

- Auger Boring

Para esta tecnología se encontró un estudio llamado “*Comparison of Trenchless Technologies and Open Cut Methods in New Residential Land Development*”, el cual fue desarrollado en el año 2018 por la Universidad de Alberta. En este se realizó un análisis de los impactos ambientales de dos tecnologías sin zanja con respecto al método de zanjado tradicional, entre las tecnologías sin zanja analizadas se encuentra Auger Boring. El estudio desarrolló una comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero de los diferentes métodos mediante un caso de estudio. Los resultados evidencian que el método Auger Boring genera una reducción aproximada del 70,63% en las emisiones de CO₂ durante el proceso de instalación con respecto al método de zanja abierta, permitiendo concluir que el uso de esta tecnología favorece al medio ambiente. De acuerdo con el estudio, el método Auger Boring genera unas emisiones de 12,01 kg de CO₂ por cada metro de tubería instalada.

Igualmente, (Lu, Matthews, & Iseley, 2020) desarrollaron una comparación del consumo de energía y la huella de carbono de varias tecnologías para la instalación, rehabilitación y renovación de tuberías sin zanja con respecto al zanjado tradicional, lo anterior, teniendo en cuenta diferentes condiciones, como por ejemplo, el rango de diámetros, las características del suelo, el tipo de superficie, la longitud de la tubería y la profundidad



de la instalación. El propósito de este trabajo era el de hacer saber a los diferentes profesionales cuanto beneficio se puede generar al medio ambiente por parte de la aplicación de tecnologías sin zanja, para que más empresas puedan considerar el uso de estas en el futuro. Los autores del estudio se enfocaron en las ecuaciones de cálculo y valores de varios parámetros dados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

Los resultados del estudio permitieron concluir que la instalación de tubería mediante el método Auger Boring puede reducir el consumo de energía y la huella de carbono aproximadamente entre 26% y 56%, comparado con el método de zanja abierta, lo anterior, de acuerdo con las diferentes condiciones analizadas, sin embargo, se menciona que cuando la longitud del tramo a construir es corta o la profundidad de instalación es poca, puede que el método de zanja abierta genere menor consumo de energía y menor huella de carbono.

Para el caso puntual de la instalación de una tubería de 100 m de largo, en un rango de diámetros entre 400 y 1300 mm, se obtuvo una huella de carbono de 16,07 ton, lo cual equivale a aproximadamente 160,70 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

A continuación, se pueden evidenciar los diferentes resultados obtenidos de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Auger Boring para los diferentes estudios analizados.

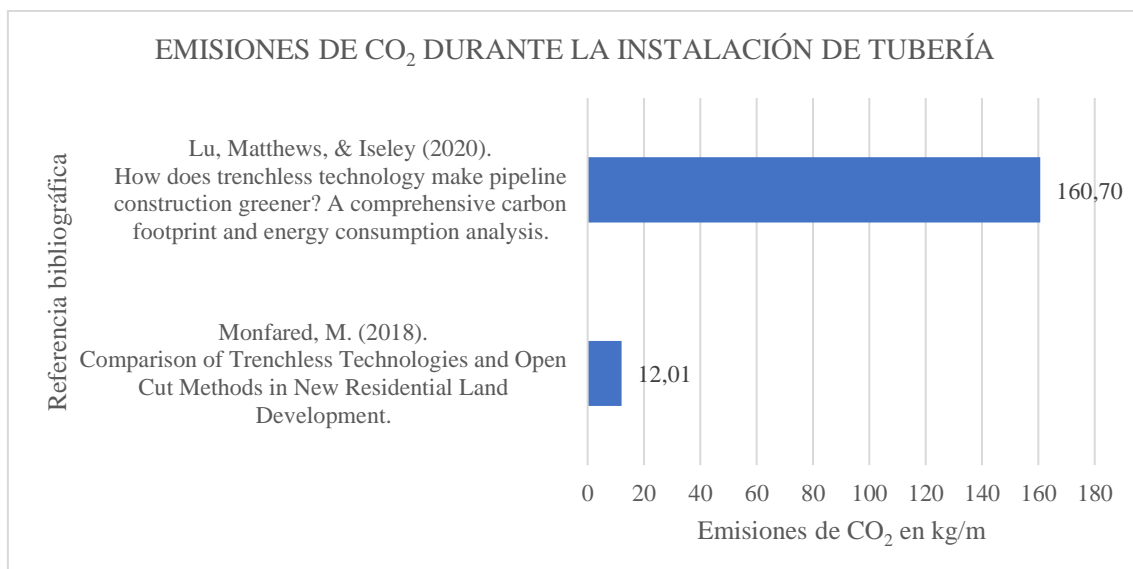


Figura 28 Resultados de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Auger Boring

De acuerdo con los resultados obtenidos de los diferentes estudios investigativos analizados, se puede concluir que el método Auger Boring genera diferentes emisiones de CO₂ durante la instalación de tuberías, esto se debe a que cada proyecto en sí cuenta



con condiciones diferentes que pueden requerir el uso de equipos por mayor o menor tiempo para poder realizar las adecuaciones necesarias para ejecutar la perforación del suelo. Igualmente, se puede evidenciar que para los estudios analizados, se cuenta con un promedio de emisiones de CO₂ en kg/m de tubería instalada de 86,36.

- Horizontal Directional Drilling

Para esta tecnología se encontraron diversos estudios donde se analizaron casos de estudio con el fin de determinar las emisiones de CO₂ durante el proceso de instalación de tuberías mediante este método. A continuación, se realiza una descripción de los estudios encontrados, así como consideraciones importantes que fueron tenidas en cuenta.

(Monfared, 2018) llevó a cabo un análisis de los impactos ambientales de dos tecnologías sin zanja con respecto al método de zanjado tradicional, entre las tecnologías sin zanja analizadas se encuentra el método Perforación Horizontal Dirigida. El estudio desarrolló una comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero de los diferentes métodos mediante un caso de estudio. Los resultados obtenidos indicaron que el método PHD genera una reducción aproximada del 91,64% en la emisiones de CO₂ durante el proceso de instalación con respecto al método de zanjado, esto, teniendo como referencia que el zanjado tradicional genera aproximadamente 40,89 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

(Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) realizaron una comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero, entre estas las emisiones de CO₂ producidas durante la instalación de tubería mediante el uso de zanjado, con respecto a diferentes tecnologías sin zanja. El caso de estudio correspondía a la instalación de una tubería PVC de 400 mm de diámetro, con una longitud de 313 m y una profundidad variable entre 3 y 5 m. Los resultados indicaron que el método PHD generó una reducción del 31,65% en las emisiones de CO₂ con respecto al zanjado, esto, teniendo como referencia que el zanjado tradicional genera aproximadamente 149,80 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

(Piratla, Ariaratnam, & Cohen, 2012) desarrollaron la estimación de los gases de efecto invernadero para todos los ciclos de vida de un proyecto de instalación de una tubería de agua potable de 152,40 m de longitud, un diámetro de 200 mm y a una profundidad de 1,22 m. La tecnología sin zanja de perforación horizontal dirigida fue el método tenido en cuenta para el cálculo de las emisiones producidas durante la fase de instalación de la tubería, Se obtuvo un total de emisiones de CO₂ durante el proceso de instalación de 2830,40 kg.

(Sihabuddin & Ariaratnam, 2009) desarrollaron un estudio para identificar una metodología para determinar las emisiones de contaminantes en los métodos de



construcción bajo tierra. Para demostrar la metodología propuesta, examinaron un caso de estudio, el cual se basaba en la instalación de una tubería de 300 mm de diámetro, para posteriormente instalar 3 líneas eléctricas de 75 mm de diámetro cada una, la longitud de instalación fue de 152 m y se contaba con una profundidad de instalación variable entre 1,70 y 2,08 m. El método de instalación de la tubería escogido para realizar el cálculo de las emisiones fue el de perforación horizontal dirigida. Finalmente, se obtuvo un total de 38195,20 g de CO₂ emitidos mediante este método durante el proceso de instalación.

Adicionalmente, (Lu, Matthews, & Iseley, 2020), en su estudio descrito en el punto del método Auger Boring también tuvieron en cuenta la tecnología HDD en la comparación, los resultados obtenidos permitieron concluir que la instalación de tubería mediante este método puede reducir el consumo de energía y la huella de carbono aproximadamente entre 6% y 56%, comparado con el método de zanja abierta. Sin embargo, se mencionan las siguientes consideraciones:

- a. Cuanto mayor sea el diámetro, menor será la reducción en el consumo de energía y la huella de carbono con respecto al método de zanja abierta.
- b. Cuando el diámetro de la tubería es grande y el terreno es seco, el consumo de energía y la huella de carbono generada mediante la instalación de la tubería mediante el método HDD puede ser mayor que los valores reportados mediante el método de zanja abierta.
- c. Cuando la longitud de la construcción es corta o la profundidad de la tubería es poca, puede que el método de zanja abierta genere menor consumo de energía y menor huella de carbono.

Para el caso puntual de la instalación de una tubería de 100 m de largo, en un rango de diámetros entre 400 y 1300 mm, se obtuvo una huella de carbono de 16,24 ton, lo cual equivale a aproximadamente 162,40 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

A continuación, se pueden evidenciar los diferentes resultados obtenidos de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Perforación Horizontal Dirigida para los diferentes estudios analizados.

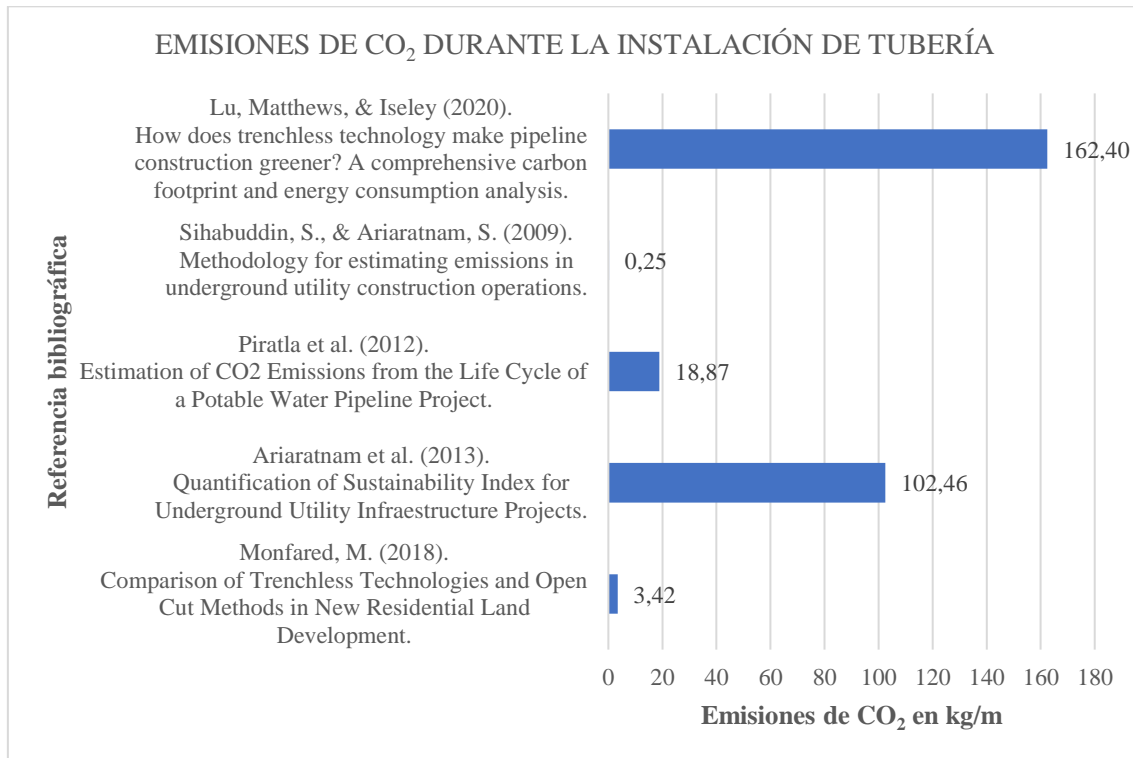


Figura 29 Resultados de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Horizontal Directional Drilling

De acuerdo con los resultados obtenidos de los diferentes estudios investigativos analizados, se puede concluir que el método Horizontal Directional Drilling cuenta con diferentes valores de emisiones de CO₂ durante la instalación de tuberías, esto se debe a que cada proyecto analizado cuenta con características diferentes (diámetro, longitud, profundidad, entre otros) que generan un uso de equipos por mayor o menor tiempo para poder realizar las adecuaciones necesarias para ejecutar la perforación del suelo. Igualmente, se puede evidenciar que se cuenta con un promedio de emisiones de CO₂ en kg/m de tubería instalada de 57,48.

- Pipe Ramming

En el estudio desarrollado por (Lu, Matthews, & Iseley, 2020), el cual se describió en el punto correspondiente a la tecnología Auger Boring, se tuvo en cuenta el método Pipe Ramming en la comparación del consumo de energía y la huella de carbono generada con respecto al zanjado tradicional.

Los resultados del estudio permitieron concluir que la instalación de tubería mediante el método Pipe Ramming puede reducir el consumo de energía y la huella de carbono aproximadamente entre 6% y 62%, comparado con el método de zanja abierta, lo anterior, de acuerdo con las diferentes condiciones analizadas, sin embargo, se menciona que cuando la longitud del tramo a construir es corta o la profundidad de instalación es poca,



puede que el método de zanja abierta genere menor consumo de energía y menor huella de carbono.

Para el caso puntual de la instalación de una tubería de 100 m de largo, en un rango de diámetros entre 400 y 1300 mm, se obtuvo una huella de carbono de 13,71 ton, lo cual equivale a aproximadamente 137,10 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

- Microtunelado

Para esta tecnología se encontraron dos estudios donde se analizaron casos de estudio con el fin de determinar las emisiones de CO₂ durante el proceso de instalación de tuberías mediante este método. A continuación, se realiza una descripción de los estudios encontrados, así como consideraciones importantes que fueron tenidas en cuenta.

(Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) realizaron un estudio comparativo de las emisiones de CO₂ producidas durante la instalación de tubería mediante el uso de zanjado, con respecto a diferentes tecnologías sin zanja. Analizaron un caso de estudio, el cual se describió en el punto correspondiente al método Horizontal Directional Drilling. Los resultados indicaron que el método Microtunelado generó una reducción del 42,68% en las emisiones de CO₂ con respecto al zanjado tradicional, esto, teniendo como referencia que el zanjado tradicional genera aproximadamente 149,80 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

(Calvo, 2023) realizó la comparación de las emisiones de CO₂ generadas por la instalación de una tubería de alcantarillado en un caso de estudio específico. En el caso analizado se proyectó la construcción de un tramo de 12,4 km de largo y de 60” de diámetro, donde la instalación de 8,7 km se planteó mediante el uso del método microtunelado y los 3,7 km restantes serían instalados mediante la técnica tradicional de zanja abierta. Se utilizó un software especializado para estimar la huella de carbono con la información respectiva del proyecto para los dos métodos de instalación y se evidenció que las emisiones de CO₂ equivalente se reducen en un 81,81% mediante el uso de la tecnología sin zanja, esto, teniendo como referencia que el zanjado tradicional genera aproximadamente 493,65 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

A continuación, se pueden evidenciar los diferentes resultados obtenidos de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Microtunelado para los dos estudios analizados.

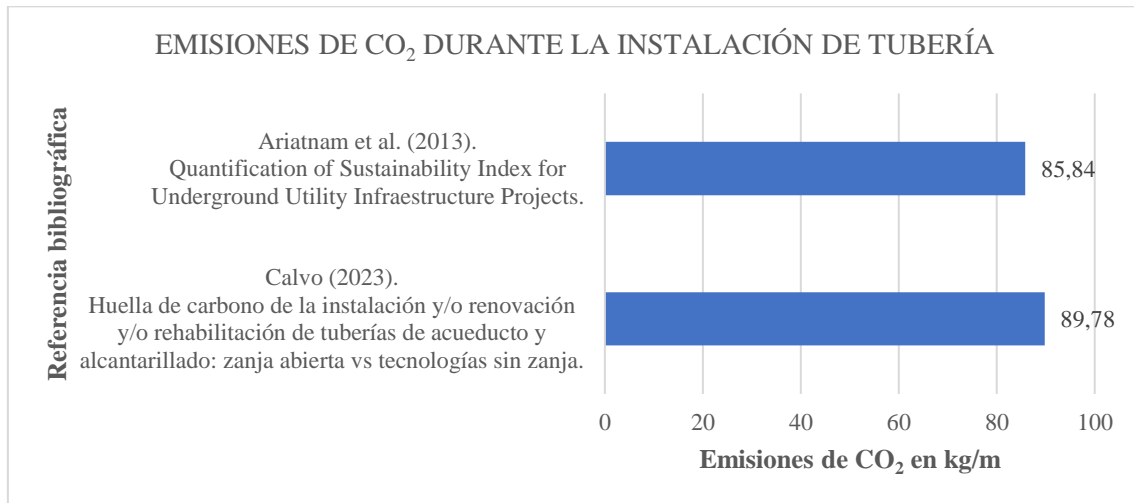


Figura 30 Resultados de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Microtunelado

De acuerdo con los resultados obtenidos de los dos estudios investigativos analizados, se puede concluir que el método Microtunelado cuenta con diferentes valores de emisiones de CO₂ durante la instalación de tuberías, sin embargo, estos se encuentran en un orden de magnitud similar. El promedio de emisiones de CO₂ en kg/m de tubería instalada es de 87,81.

- Pilot Tube

Para esta tecnología se encontraron tres estudios donde se analizaron casos de estudio con el fin de determinar las emisiones de CO₂ durante el proceso de instalación de tuberías mediante este método. A continuación, se realiza una descripción de los estudios encontrados, así como consideraciones importantes que fueron tenidas en cuenta.

(Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) realizaron un estudio comparativo de las emisiones de CO₂ producidas durante la instalación de tubería mediante el uso de zanjado, con respecto a diferentes tecnologías sin zanja. Analizaron un caso de estudio, el cual se describió en el punto correspondiente al método Horizontal Directional Drilling. Los resultados indicaron que el método Pilot Tube generó una reducción del 48,36% en las emisiones de CO₂ con respecto al zanjado tradicional, esto, teniendo como referencia que el zanjado tradicional genera aproximadamente 149,80 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

(Mohit, Nezhad Monfared, Kang, & Bayat, 2017) desarrollaron un estudio comparativo entre los métodos de Tuneleado a mano y el método Pilot Tube en cuanto a las emisiones de CO₂ generadas durante la instalación de una tubería de 68 cm de diámetro, a una profundidad de 12,5 m y una longitud total de 60 m, la duración total del proyecto fue de 15 días. Los resultados obtenidos permitieron concluir que las emisiones de CO₂ se



redujeron en un 32,31% mediante el uso del método Pilot Tube, obteniendo un total de 41146,87 kg de CO₂ emitidos durante el proceso de instalación.

(Avendaño, 2021) analizó un proyecto de construcción de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, donde se requería instalar una longitud total de 1703 m de una tubería de concreto de 30” de diámetro. Mediante zanja abierta se instalaron 215 m durante 3 meses y por el método Pilot Tube se instalaron 1050 m durante 30 meses. Quedaron pendientes por construir 438 m. Cabe resaltar que durante la construcción se presentaron problemas de estabilidad de los pozos y adicionalmente, se taponaron los sinfines por la arena, lo cual incrementó la necesidad de construir pozos de rescate en el método Pilot Tube. De acuerdo con los resultados obtenidos, las emisiones de CO₂ fueron mayores durante la instalación de la tubería mediante la tecnología sin zanja, esto, debido a que este tuvo una mayor duración, sin embargo, la principal conclusión del trabajo fue que en la mayoría de los casos el uso de tecnologías sin zanja es más amigable con el medio ambiente, en comparación con el zanjado tradicional.

A continuación, se pueden evidenciar los diferentes resultados obtenidos de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube para los diferentes estudios analizados.

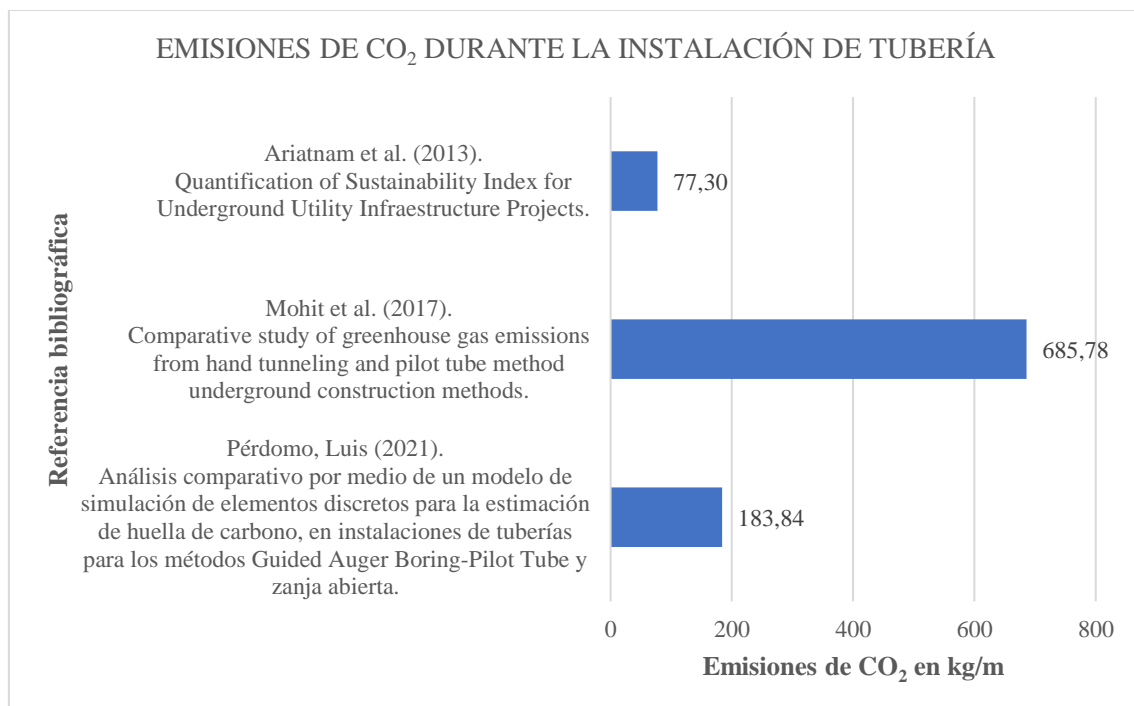


Figura 31 Resultados de las emisiones de CO₂ durante la instalación de tubería mediante el método Pilot Tube

De acuerdo con los resultados obtenidos de los diferentes estudios investigativos analizados, se puede concluir que el método Pilot Tube cuenta con diferentes valores de emisiones de CO₂ durante la instalación de tuberías, esto se debe a que cada proyecto



analizado cuenta con características y condiciones diferentes (diámetro, longitud, profundidad, entre otros) que generan un uso de equipos por mayor o menor tiempo para poder realizar las adecuaciones necesarias para ejecutar la perforación del suelo. Igualmente, se puede evidenciar que se cuenta con un promedio de emisiones de CO₂ en kg/m de tubería instalada de 315,64.

- Métodos de compactación

En el estudio desarrollado por (Lu, Matthews, & Iseley, 2020), el cual se describió en el punto correspondiente al método Auger Boring, también se tuvieron en cuenta los métodos de compactación, específicamente el Impact Molding en la comparación del consumo de energía y la huella de carbono generada con respecto al zanjado tradicional.

Los resultados del estudio permitieron concluir que la instalación de tubería mediante el Impact Molding puede reducir el consumo de energía y la huella de carbono aproximadamente entre 38% y 68%, comparado con el método de zanja abierta, lo anterior, de acuerdo con las diferentes condiciones analizadas. No obstante, se mencionan las siguientes consideraciones:

- a. Aún en el caso de que la instalación sea poco profunda, el método Impact Molding continúa generando menos consumo de energía y huella de carbono con respecto al método de zanja abierta.
- b. Cuando la longitud de la construcción es corta, el consumo de energía y la huella de carbono del método Impact Molding son básicamente los mismos que los valores correspondientes al método de zanja abierta.

Para el caso puntual de la instalación de una tubería de 100 m de largo, en un rango de diámetros entre 50 y 300 mm, se obtuvo una huella de carbono de 7,28 ton, lo cual equivale a aproximadamente 72,80 kg de CO₂ por metro de tubería instalada.

5.10 Costos promedio de instalación

El costo generado por la instalación de tuberías mediante las diferentes tecnologías sin zanja estudiadas es variable, dado que, cada una de estas implementa diferentes equipos y procesos para ejecutar la perforación y eliminación del suelo. Igualmente, para una misma tecnología se puede contar con costos de instalación diferentes, ya que estos dependen de la longitud y nivel de precisión del tramo, del diámetro y material de la tubería a instalar, así como las condiciones del suelo presentes en el sitio de ejecución.

Con base en lo mencionado, se desarrolló una revisión de literatura, documentos técnicos, listados de precios, entre otros de los costos generados por la instalación de tubería



mediante las diferentes tecnologías sin zanja. A continuación, se presenta la descripción de las referencias usadas y los datos reportados.

(Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) desarrollaron el diseño de una matriz cuantitativa que permite seleccionar la tecnología Trenchless más indicada para proyectos específicos de construcción de alcantarillado. Dentro de la matriz, incluyeron el análisis de 5 tecnologías sin zanja, las cuales son, Pipe Jacking, Microtunelado, Pipe Ramming, Auger Boring y Horizontal Directional Drilling. Para el análisis de la viabilidad de estas tecnologías se definieron una serie de variables de diseño, entre estas variables se analizó lo referente a los costos generados por la instalación mediante las diferentes tecnologías.

En el marco del análisis de los costos, llevaron a cabo diferentes consultas de proyectos desarrollados en Colombia y Estados Unidos, así mismo, solicitaron cotizaciones a proveedores técnicos, lo anterior, para establecer un rango de costos de las tecnologías analizadas. En la siguiente Tabla se muestran los valores reportados para las cinco tecnologías que estudiaron.

Tabla 58 Rango de costos de instalación para las tecnologías sin zanja analizadas. Adaptado de: (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016)

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | Ø Nominal tubería de servicio | Ø Nominal encamisado en acero | RANGO DE COSTOS (\$/metro lineal) | | OBSERVACIONES |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|--|
| | | | Valor mínimo | Valor máximo | |
| Auger Boring | 27" | 27" | \$1.230.918,55 | \$2.461.837,10 | Tomado de: Pinter & Associates Ltd., "Trenchless technologies and work practices review for Saskatchewan municipalitie". |
| Microtunelado | 27" | - | \$5.231.403,84 | \$8.000.970,58 | |
| Pipe Jacking | 27" | - | \$2.000.242,65 | \$5.846.863,12 | |
| Horizontal Directional Drilling | 4" | - | \$200.000,00 | | Cotización de Treltec Ingeniería Ltda. |
| | 6" | - | \$220.000,00 | | |
| | 8" | - | \$300.000,00 | | |
| | 10" | - | \$500.000,00 | | |
| | 12" | - | \$600.000,00 | | |
| Pipe Ramming | 6" | 8" | \$800.000,00 | | Cotización de AINPRO S.A. Instalación de tubería NOVAFORT. |
| | 8" | 12" | \$1.200.000,00 | | |
| | 10" | 12" | \$1.200.000,00 | | |
| | 12" | 16" | \$1.500.000,00 | | |
| | 27" | 36" | \$8.648.640,00 | | Cotización de Ingeniería, Construcciones y Servicios S.A. |



| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | Ø Nominal tubería de servicio | Ø Nominal encamisado en acero | RANGO DE COSTOS (\$/metro lineal) | | OBSERVACIONES |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------|
| | | | Valor mínimo | Valor máximo | |
| | | | | | Instalación de tubería PVC. |

NOTA: Los rangos de costos pueden variar de acuerdo con las características particulares del proyecto. Estos están dados en pesos colombianos (COP).

Estos costos de instalación obtenidos en el trabajo investigativo datan del año 2016, por lo cual, con el fin de generar un ajuste de los valores reportados a valor presente se realizó el proceso de indexación. Para el anterior proceso se seleccionó como referencia el índice de precio al consumidor (IPC), el cual sirve como indicador del incremento de bienes y servicios de los colombianos, también marca el crecimiento del producto interno bruto (PIB), la inflación, el incremento del interés corriente, el aumento económico, entre otros.

El IPC usado para indexar un valor es el “IPC serie de empalme 100”, este es un porcentaje que resulta de dividir la inflación a nivel general, es decir, los porcentajes que arroja la suma de las diferentes variables y obedece al sistema de redondeo total. El porcentaje IPC serie de empalme 100 en Colombia es calculado y expedido por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el cual es la entidad responsable de la planeación, levantamiento, procesamiento, análisis y difusión de las estadísticas oficiales del país. Los índices dados por el DANE corresponden a los 12 meses del años, desde el 2003 a la fecha (Agosto 2024) y estos se pueden obtener a través de la página oficial del (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2024).

La fórmula que describe el proceso de indexación de un valor se muestra a continuación.

$$VA = VH * (IPC.F / IPC.I)$$

Donde,

- VA:** Valor actualizado.
VH: Valor histórico (Reportado).
IPC.F: IPC Final (Fecha actual).
IPC.I: IPC Inicial (Fecha del reporte).

En la siguiente Tabla se muestran los valores reportados por (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) ajustados a valor presente, para este ajuste se tuvo en cuenta un IPC de diciembre de 2016 igual a 93,11 y un IPC de agosto de 2024 (actual) de 143,67. Cabe mencionar que se muestran solo los costos indexados para las tecnologías estudiadas en el presente estudio.



Tabla 59 Rango de costos de instalación reportados por (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) ajustados a valor presente

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | Ø Nominal tubería de servicio | Ø Nominal encamisado en acero | RANGO DE COSTOS (\$/metro lineal) | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| | | | Valor mínimo | Valor máximo |
| Auger Boring | 27" | 27" | \$1.899.324 | \$3.798.648 |
| Microtunelado | 27" | - | \$8.072.127 | \$12.345.607 |
| Horizontal Directional Drilling | 4" | - | \$308.603 | |
| | 6" | - | \$339.463 | |
| | 8" | - | \$462.904 | |
| | 10" | - | \$771.507 | |
| | 12" | - | \$925.808 | |
| Pipe Ramming | 6" | 8" | \$1.234.411 | |
| | 8" | 12" | \$1.851.616 | |
| | 10" | 12" | \$1.851.616 | |
| | 12" | 16" | \$2.314.520 | |
| | 27" | 36" | \$13.344.969 | |

De acuerdo con la tabla anterior, se puede visualizar que las tecnologías Pipe Ramming y Microtunelado son las que presentan un costo de instalación por metro lineal más elevado en comparación con los otros métodos.

(Kumar & Patel, 2019) desarrollaron un algoritmo que puede ser usado como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para seleccionar el método de construcción sin zanja óptimo a aplicar, esto, basado en una investigación de los correspondientes parámetros diferenciadores entre las tecnologías, los cuales fueron: consideraciones geotécnicas, profundidad de instalación, longitud de instalación, diámetro de la tubería, tipo de tubería y aplicabilidad. Adicionalmente, revisaron la información disponible respecto al componente económico de las tecnologías sin zanja analizadas en el estudio. De acuerdo con información obtenida del Boletín Técnico de Trabajos Públicos (*Public Works Technical Bulletin*) en 1999, se puede probar que el uso de las tecnologías sin zanja son métodos más costo-efectivos que el método de zanja abierta, tal cual como lo muestra la siguiente Figura.



| Pipe Size (mm) | Open-Cut (\$/LM) | Trenchless (\$/LM) | Trenchless Average (\$/LM) | Cost Savings Trenchless vs open-Cut Cost (%) |
|----------------|------------------|--------------------|----------------------------|--|
| 300 | 275 | 50-175 | 292 | 106.3 |
| 500 | 400 | 200-500 | 345 | 86 |
| 1200 | 800 | 500-1000 | 675 | 84.5 |
| 1800 | 1500 | 850-1600 | 1240 | 82.6 |
| 2500 | 3000 | 1500-3000 | 2545 | 84.8 |

LM= Lineal Meter.

Figura 32 Costo-efectividad de las tecnologías sin zanja con respecto al zanjado (Dólar del año 1999). Fuente: (Kumar & Patel, 2019)

De igual forma, en el artículo reportan algunos costos guía que pueden ser usados para la decisión final a realizar cuando se cuenta con más de una tecnología sin zanja que cumplen con los requerimientos técnicos. A continuación, se muestran los costos mencionados para cada tecnología sin zanja, los cuales están dados en dólares del 2004.

| TRENCHLESS METHOD | DIAMETER RANGE IN INCHES | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 12 | 18 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 | 84 | 96 | 108 | 120 | 132 | 144 | 168 |
| Horizontal | 180 | 215 | 250 | 375 | 500 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Directional Drill (HDD) | | | | | | | | | | | | | | |
| Auger Boring (AB) | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Pipe Ramming (PR) | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 600 | 850 | 1200 | 1700 | 2200 | 2700 | 3200 | 3700 | 4200 |
| Pipe Jacking (PJ) | 140 | 210 | 280 | 425 | 575 | 850 | 1220 | 1710 | 2500 | 3150 | 3850 | 4500 | 5300 | 6000 |
| Microtunneling (MT) | 240 | 360 | 480 | 720 | 1000 | 1200 | 1450 | 1700 | 2000 | 2400 | 3000 | 3500 | 5000 | 8000 |

Figura 33 Costo recomendado por pie lineal para los métodos de construcción sin zanja (Dólar del año 2004). Fuente: (Kumar & Patel, 2019)

Los valores guía reportados por (Kumar & Patel, 2019) están en dólares referentes al año 2004 y equivalen al costo por pie lineal de instalación. Con el fin de generar el ajuste de los valores reportados a valor presente en pesos colombianos (COP) por metro lineal de instalación, se realizó inicialmente la conversión de los dólares a COP con base en la Tasa Representativa del mercado (TRM) a 31 de diciembre de 2004 reportada en (Dolar-Colombia, Dolar-Colombia, 2024), la cual es igual a \$2.389,75 COP por dólar. Luego se



realizó el proceso de indexación descrito anteriormente, teniendo en cuenta un IPC de diciembre de 2004 igual a 55,99 y un IPC de agosto de 2024 (actual) de 143,67. Finalmente, se realizó la conversión de pie a metro mediante la relación de las medidas, donde 1 pie equivale a 0,3048 metros. En la siguiente Tabla se muestran los valores guía ajustados para cada tecnología.

Tabla 60 Costo recomendado por metro lineal reportados por (Kumar & Patel, 2019) ajustados a valor presente

| DIÁMETRO (Pulgadas) | TECNOLOGÍA | | | |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | HDD | Auger Boring | Pipe Ramming | Microtunelado |
| 12 | \$3.621.309 | \$2.011.839 | \$2.011.839 | \$4.828.413 |
| 18 | \$4.325.453 | \$3.017.758 | \$3.017.758 | \$7.242.619 |
| 24 | \$5.029.596 | \$4.023.677 | \$4.023.677 | \$9.656.825 |
| 36 | \$7.544.395 | \$6.035.516 | \$6.035.516 | \$14.485.238 |
| 48 | \$10.059.193 | \$8.047.354 | \$8.047.354 | \$20.118.386 |
| 60 | NA | NA | \$12.071.031 | \$24.142.063 |
| 72 | NA | NA | \$17.100.628 | \$29.171.659 |
| 84 | NA | NA | \$24.142.063 | \$34.201.256 |
| 96 | NA | NA | \$34.201.256 | \$40.236.772 |
| 108 | NA | NA | \$44.260.449 | \$48.284.126 |
| 120 | NA | NA | \$54.319.642 | \$60.355.157 |
| 132 | NA | NA | \$64.378.835 | \$70.414.350 |
| 144 | NA | NA | \$74.438.027 | \$100.591.929 |
| 168 | NA | NA | \$84.497.220 | \$160.947.086 |

Según los valores reportados se puede observar que, los métodos sin zanja que cuentan con un mayor costo de instalación por metro lineal de acuerdo con el análisis realizado son Pipe Ramming y Microtunelado, siendo el Microtunelado el más costoso.

(Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018) llevaron a cabo una comparación técnica y económica de la instalación de redes mediante el método de perforación horizontal “*Ramming*” con respecto al método convencional. Para ello, se tomó como referencia una obra ubicada en el municipio de Tocancipá, donde se realizaron cruces de vía mediante el método sin zanja para evitar generar cierres de estas, usando una camisa de acero de 24” para instalar 6 tuberías de 6”, una camisa de acero de 30” para instalar 9 tuberías de 6” y una camisa de 36” para instalar 12 tuberías de 6”, los cruces contaban con longitudes aproximadas entre 30 y 40 m. Así mismo, también se realizó la instalación de tramos mediante excavación a cielo abierto.



Con base en la información de la obra de referencia, (Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018) analizaron los costos directos (ejecución) e indirectos (prejuicios colaterales) del proyecto, tanto para el método sin zanja como para el método convencional. Los costos directos incluyeron las actividades preliminares, la instalación y suministro de tubería, los rellenos y las actividades de reparación del espacio público. Para el caso puntual de los costos del suministro e instalación de la tubería, la diferencia radica en que con el sistema Pipe Ramming se deben instalar los ductos dentro de la camisa de acero al carbón. En el método sin zanja el costo representativo se incrementa en un 84% más con relación al sistema tradicional a cielo abierto, tal como se puede evidenciar a continuación.

| Actividad | Obra a cielo abierto | | | Obra con sistema <i>ramming</i> | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------|-------------------|---|------------------|--------------------|
| | Cant. | Vlr. unitario | Actividad | Cant. | Vlr. unitario | Actividad |
| Instalación de ductería Ø6" | Tubería PVC TDP 6" | | | Instalación ductería PVC TDP 6" para perforación | | |
| | 1809 | COP 25 166,67 | COP 45 526 500,00 | 1809,0 | COP 7 067,00 | COP 12 784 203,00 |
| Perforación <i>ramming</i> 24" | N/A | | | Perforación <i>ramming</i> 24" incluye tubería en acero al carbón | | |
| | | | COP - | 52,5 | COP 2 179 239,00 | COP 114 410 047,50 |
| Perforación <i>ramming</i> 30" | N/A | | | Perforación <i>ramming</i> 30" incluye tubería en acero al carbón | | |
| | | | COP - | 124,5 | COP 2 974 050,97 | COP 370 269 345,77 |
| Total: | COP 45 526 500,00 | | | COP 497 463 596,27 | | |

Figura 34 Comparativo de costos de la instalación y suministro de tubería. Fuente: (Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018)

De acuerdo con la Figura anterior, se puede concluir que para la obra estudiada, la instalación de tubería mediante el Pipe Ramming tiene un costo promedio por metro lineal entre 2.179.239,00 y 2.974.050,97 COP (pesos colombianos) para las tuberías de 24 y 30" respectivamente.

Dado que los resultados obtenidos en el estudio fueron reportados en el año 2018, se llevó a cabo el proceso de indexación con el fin de traer estos costos a valor presente, para este proceso se tuvo en cuenta un IPC de diciembre de 2018 igual a 100,00 y un IPC de agosto de 2024 (actual) de 143,67. En la siguiente Tabla se muestran los valores ajustados a valor presente para los dos diámetros de tubería instalados mediante el método Pipe Ramming.

Tabla 61 Costos reportados por (Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018) ajustados a valor presente

| TECNOLOGÍA | Ø Perforación | Valor unitario (COP/metro lineal) | OBSERVACIONES |
|--------------|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Pipe Ramming | 24" | \$3.130.913 | Incluye tubería en acero al carbón |
| | 30" | \$4.272.819 | |



(Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) realizaron una comparación de los costos generados por la instalación de tubería mediante el método de zanja abierta con respecto a los métodos sin zanja, Pilot Tube, Horizontal Directional Drilling y Microtunelado, esto, mediante un caso de estudio. Este caso corresponde a la instalación de una tubería PVC de 400 mm de diámetro, con una longitud de 313 m y una profundidad variable entre 3 y 5 m. Los resultados del estudio permiten evidenciar que el método de zanja abierta cuenta con los costos más altos, con US\$311,21 dólares por pie lineal, esto se debe a que el valor se aumenta por el requerimiento de la restauración del área en superficie. Los tres métodos sin zanja cuentan con costos similares, donde el más económico es HDD con un costo aproximado de US\$267,85 dólares por pie lineal. En la siguiente Figura se puede observar la comparación del estimado de costos en dólares por pie lineal para los métodos analizados en el caso de estudio.

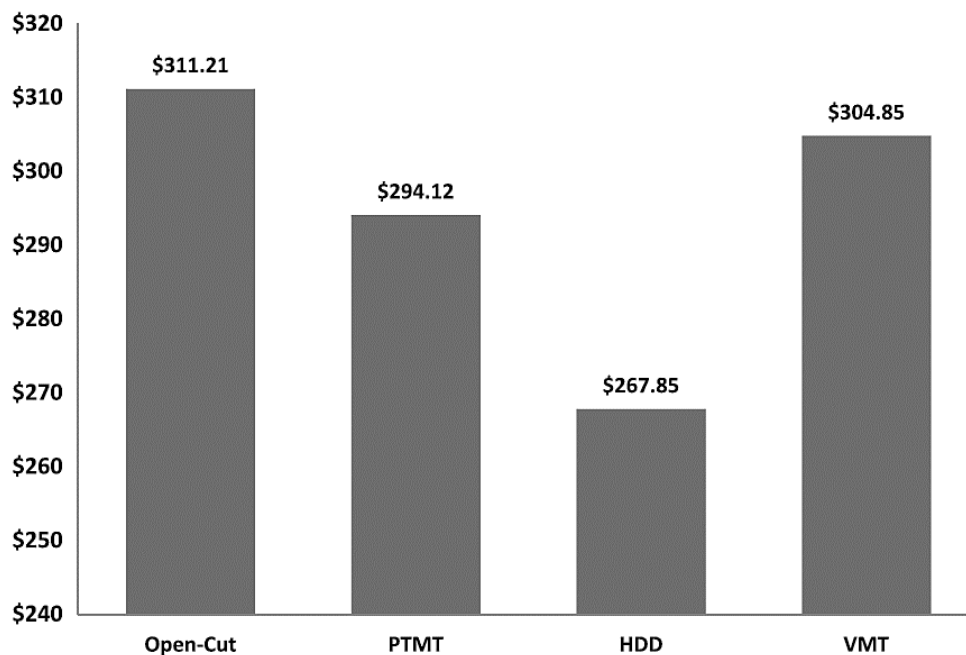


Figura 35 Comparación del costo estimado (US\$/pie lineal) por tecnología para el caso de estudio. Fuente: (Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013)

Los costos obtenidos por (Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) están en dólares referentes al año 2013 y equivalen al costo por pie lineal de instalación. Con el fin de generar el ajuste de los valores reportados a valor presente en pesos colombianos (COP) por metro lineal de instalación, se realizó inicialmente la conversión de los dólares a COP con base en la Tasa Representativa del mercado (TRM) a 31 de diciembre de 2013 reportada en (Dolar-Colombia, Dolar-Colombia, 2024), la cual es igual a \$1.926,83 COP por dólar. Luego se realizó el proceso de indexación, teniendo en cuenta un IPC de diciembre de 2013 igual a 79,56 y un IPC de agosto de 2024 (actual) de 143,67. Finalmente, se realizó la conversión de pie a metro mediante la relación de las medidas,



donde 1 pie equivale a 0,3048 metros. En la siguiente Tabla se muestran los costos obtenidos ajustados a valor presente para cada tecnología.

Tabla 62 Costos obtenidos por metro lineal reportados por (Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013) ajustados a valor presente

| TECNOLOGÍA | Ø Perforación (mm) | Valor unitario (COP/metro lineal) |
|-------------------|---------------------------|--|
| HDD | 400 | \$3.057.676 |
| Pilot Tube | 400 | \$3.357.564 |
| Microtunelado | 400 | \$3.480.054 |

En Colombia, específicamente la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) cuenta con el Listado de precios de referencia del Sistema de Avalúo e Infraestructura (SAI), en el cual se establecen los valores específicos de las diferentes actividades de ejecución de obra que pueden desarrollarse en proyectos de acueducto y alcantarillado, estos se usan por parte de las diferentes empresas constructoras en los procesos licitatorios para contratar con la EAAB.

En este listado, la EAAB cuenta con los precios correspondientes a la instalación de tubería mediante el método de excavación sin zanja Microtunelado (Pipe Jacking), estos precios se discriminan de acuerdo con el diámetro de la tubería a instalar (desde 400 hasta 2750 mm) y con la longitud del tramo (desde 100 hasta 600 m). El costo del Microtunelado varía entre \$4.165.000,00 y \$30.107.000,00 COP (pesos colombianos). Estos valores fueron actualizados el 21 de febrero del año 2022.

A continuación, en la siguiente Tabla se muestran los valores de costo promedio de instalación para cada diámetro de tubería reportados en el SAI y adicionalmente se evidencian los valores indexados a la fecha, para esto se tuvo en cuenta un IPC de febrero de 2022 igual a 115,11 y un IPC de agosto de 2024 (actual) de 143,67.

Tabla 63 Costos promedio de instalación mediante Microtunelado según el Sistema de Avalúo e Infraestructura (SAI)

| DIÁMETRO (mm) | REPORTADO SAI | INDEXADO A LA FECHA |
|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| | (COP/metro lineal) | (COP/metro lineal) |
| 400 | \$4.165.000 | \$5.198.380 |
| 600 | \$4.998.000 | \$6.238.056 |
| 700 | \$5.247.900 | \$6.549.959 |
| 800 | \$5.497.800 | \$6.861.862 |
| 900 | \$5.747.700 | \$7.173.765 |
| 1000 | \$5.997.600 | \$7.485.668 |
| 1100 | \$6.247.500 | \$7.797.570 |



| DIÁMETRO (mm) | REPORTADO SAI | INDEXADO A LA FECHA |
|------------------|--------------------|------------------------|
| | (COP/metro lineal) | (COP/metro lineal) |
| 1200 | \$7.259.000 | \$9.060.034 |
| 1300 | \$7.500.967 | \$9.362.035 |
| 1400 | \$7.871.850 | \$9.824.939 |
| 1500 | \$7.649.320 | \$9.547.197 |
| 1600 | \$15.286.443 | \$19.079.169 |
| 1700 | \$15.639.278 | \$19.519.547 |
| 1800 | \$15.059.533 | \$18.795.962 |
| 1900 | \$15.394.237 | \$19.213.708 |
| 2150 | \$20.079.267 | \$25.061.144 |
| 2200 | \$20.637.178 | \$25.757.479 |
| 2300 | \$21.194.892 | \$26.453.567 |
| 2450 | \$21.752.407 | \$27.149.407 |
| 2750 | \$25.656.797 | \$32.022.517 |

Según los valores reportados en la Tabla anterior se puede evidenciar que, entre 400 y 1500 mm de diámetro, el costo de instalación va aumentando progresiva y mesuradamente, sin embargo, entre 1500 y 1600 mm se presenta un aumento significativo en el costo, para 1600 mm, el costo es aproximadamente 2 veces el costo de instalación de tuberías de 1500 mm de diámetro, esto se debe a que los procesos de instalación para diámetros superior a 1600 mm tienen mayor complejidad. De igual forma, según los diferentes costos reportados en el SAI para cada diámetro, se puede concluir que, los tramos de menor longitud presentan mayor costo que los tramos que son más largos.

5.11 Resultados del estado del arte

En el estado del arte desarrollado se reportaron los diferentes valores asignados a cada uno de los parámetros o variables diferenciadores entre las tecnologías sin zanja, lo anterior, de acuerdo con la información de cada una de las referencias usadas.

No obstante, con el fin de determinar el rango de valores de aplicabilidad adecuada de cada parámetro para comparar las tecnologías entre sí, y para establecer la información base a usar en la metodología de selección a desarrollar más adelante, se realizó la escogencia de los valores con base en ciertas premisas, a continuación se muestran los resultados obtenidos.



- Diámetro de la tubería a instalar

En la siguiente Tabla se muestran los valores seleccionados para el rango de diámetros aplicable de cada una de las tecnologías sin zanja. Estos valores se tomaron como el promedio redondeado a múltiplos de 50 de los valores mínimos y máximos comunes reportados en el capítulo 5.1.

Tabla 64 Cuadro comparativo del rango de diámetro de aplicación en milímetros

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | DIÁMETRO DE APLICACIÓN EN MILÍMETROS (mm) |
|---------------------------------|---|
| | Rango de aplicación |
| Auger Boring | 200 a 1100 |
| Horizontal Directional Drilling | 50 a 1300 |
| Pipe Ramming | 150 a 1450 |
| Microtunelado | 500 a 1600* |
| Pilot Tube | 150 a 1000 |
| Direct Pipe | 750 a 1500 |
| Métodos de Compactación | < 200 |

*De acuerdo con lo reportado por el ingeniero Juan José Hoyo, la tecnología Microtunelado cuenta actualmente en Colombia con máquinas de microtunelación que instalan tuberías de 2000 mm de diámetro. Por esto, para ser acordes con la realidad se tendrá en cuenta este límite máximo en el análisis de esta tecnología dentro de la metodología a desarrollar.

Los resultados para este parámetro permiten evidenciar que la tecnología que cuenta con una mayor aplicabilidad para diferentes diámetros es el Pipe Ramming, mientras que, la que cuenta con mayor restricción de aplicabilidad para este caso corresponde a los Métodos de Compactación. Adicionalmente, la tecnología que cuenta con posibilidad de instalar tuberías de mayor diámetro es el Microtunelado.

- Longitud de instalación

En la siguiente Tabla se muestra el valor seleccionado como longitud máxima de instalación aplicable de cada una de las tecnologías sin zanja. Este valor se toma como el promedio redondeado a múltiplos de 10 de los valores comunes instalables reportados en el capítulo 5.2.

Tabla 65 Cuadro comparativo de la longitud máxima de instalación en metros

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | LONGITUD MÁXIMA DE INSTALACIÓN EN METROS (m) |
|---------------------------------|--|
| Auger Boring | 110 |
| Horizontal Directional Drilling | 1790 |



| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | LONGITUD MÁXIMA DE INSTALACIÓN EN METROS (m) |
|-------------------------|--|
| Pipe Ramming | 100 |
| Microtunelado | 830 |
| Pilot Tube | 90 |
| Direct Pipe | 1410 |
| Métodos de Compactación | 40 |

Los resultados para este parámetro permiten evidenciar que la tecnología que cuenta con un mayor alcance en longitud de instalación es Horizontal Directional Drilling, seguida por Direct Pipe, mientras que, la tecnología que cuenta con un menor alcance en longitud corresponde a los Métodos de Compactación.

- Material de tubería a instalar

En la siguiente Tabla se muestran los diferentes materiales de tubería que pueden instalarse mediante cada una de las tecnologías sin zanja. Estos datos corresponden a la moda de los materiales instalables reportados en el capítulo 5.3.

Tabla 66 Cuadro comparativo del material de tubería instalable

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | MATERIAL DE TUBERÍA INSTALABLE |
|---------------------------------|---|
| Auger Boring | Acero, usado como camisa. Dentro de esta tubería puede instalarse como tubería de servicio cualquier material. |
| Horizontal Directional Drilling | HDPE y acero. |
| Pipe Ramming | Acero, usado como camisa. Dentro de esta tubería puede instalarse como tubería de servicio cualquier material. |
| Microtunelado | Acero, concreto reforzado (RCP), arcilla vitrificada (VCP) y fibra de vidrio reforzada (GRP). |
| Pilot Tube | Acero, concreto reforzado (RCP), arcilla vitrificada (VCP) y hierro dúctil. |
| Direct Pipe | Acero, usado como camisa. Dentro de esta tubería puede instalarse como tubería de servicio cualquier material. |
| Métodos de Compactación | HDPE. |



De acuerdo con los resultados de este parámetro, se puede evidenciar que el material de tubería más común entre las diferentes tecnologías es el acero, ya que seis (6) de las siete (7) tecnologías pueden usarlo sin inconveniente durante la instalación.

Las tecnologías Auger Boring, Pipe Ramming y Direct Pipe solo se pueden aplicar usando el acero como material de la tubería a instalar, ya que las características de este material garantizan la resistencia requerida para las fuerzas ejercidas por los métodos, en estos casos, la tubería de acero se puede usar como tubería final o en su defecto se puede usar como encamisado de la tubería de servicio que puede ser en cualquier otro material.

- Espacio requerido para la ejecución de los trabajos

En la siguiente Tabla se muestran los valores seleccionados para las dimensiones requeridas para los pozos o áreas de trabajo para la instalación de la tubería mediante cada tecnología. Estos valores se tomaron como el promedio de los valores comunes reportados en el capítulo 5.4.

Tabla 67 Cuadro comparativo del espacio requerido para la instalación

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | ESPACIO REQUERIDO PARA LA INSTALACIÓN | |
|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| | Pozo de lanzamiento | Pozo de salida |
| Auger Boring | Largo: 10,5 m Ancho: 3,6 m | Largo: 6,5 m Ancho: 3,5 m |
| Horizontal Directional Drilling | Largo: 90 m Ancho: 47,5 m | Largo: 45 m Ancho: 20 m |
| Pipe Ramming | Largo: 15 m Ancho: 3,5 m | Largo: 11,5 m Ancho: 3,5 m |
| Microtunelado | Largo: 26 m Ancho: 8 m | Largo: 10 m Ancho: 5 m |
| Pilot Tube | Largo: 4,5 m Ancho: 4,5 m | Largo: 3,5 m Ancho: 3,5 m |
| Direct Pipe | Largo: 20 m Ancho: 3,5 m | Largo: 25 m Ancho: 10 m |
| Métodos de Compactación | Largo: 1,0 m Ancho: 1,0 m | Largo: 1,0 m Ancho: 1,0 m |

Según los valores mostrados, la tecnología que requiere un mayor espacio de trabajo para el desarrollo de la instalación de tubería es Horizontal Directional Drilling, mientras que, por el contrario, la que requiere un menor espacio de trabajo es la tecnología correspondiente a los Métodos de Compactación.

- Profundidad de instalación

En la siguiente Tabla se muestran los valores seleccionados como profundidades límites aplicables de cada una de las tecnologías sin zanja. Este valor se toma como el promedio de los valores comunes instalables reportados en el capítulo 5.5.



Tabla 68 Cuadro comparativo de la profundidad de instalación en metros

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | PROFUNDIDAD DE INSTALACIÓN EN METROS (m) | |
|---------------------------------|--|-------------------|
| | Mínima | Máxima |
| Auger Boring | 0,80 m o 1,8 veces el diámetro externo | Sin límite máximo |
| Horizontal Directional Drilling | 3,00 m o 3,0 veces el diámetro externo | Hasta 61 m. |
| Pipe Ramming | 1,00 m o 1,8 veces el diámetro externo | Sin límite máximo |
| Microtunelado | 1,80 m o 1,5 veces el diámetro externo | Sin límite máximo |
| Pilot Tube | 1,00 m o 1,8 veces el diámetro externo | Sin límite máximo |
| Direct Pipe | 3,00 m o 1,5 veces el diámetro externo | Sin límite máximo |
| Métodos de Compactación | 0,25 m por cada 0,025 m de diámetro | Sin límite máximo |

Las tecnologías cuentan con diferentes valores de profundidad mínima requerida para la instalación, esto se debe a que estas realizan la perforación del suelo mediante diferentes procesos y la instalación de la tubería mediante diferentes fuerzas, como empuje, halado o hincado y, de acuerdo con estos se determina la profundidad permitida, con el fin de evitar generar afectaciones en superficie.

- Condiciones de suelo aptas para la instalación

En la siguiente Tabla se muestran las diferentes condiciones de suelo que facilitan la instalación de tuberías mediante cada una de las tecnologías sin zanja. Estos datos corresponden a la moda de los datos reportados en el capítulo 5.6.

Tabla 69 Cuadro comparativo del tipo de suelo idóneo para la instalación

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | CONDICIONES DE SUELO | |
|---------------------------------|--|---|
| | Tipo de terreno aplicable | Condición del nivel freático |
| Auger Boring | Suelos cohesivos: Arcillas y limos (ML, CL, OL, MH, CH y OH). Arenas con presencia de finos (SM y SC). Gravas con presencia de finos (GM y GC). Cantos rodados o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería a instalar. Se deben usar equipos de perforación especiales. | Sin nivel freático. |
| Horizontal Directional Drilling | Suelos cohesivos: Arcillas y limos (ML, CL, OL, MH, CH y OH). | Con o sin nivel freático para suelos arcillosos y |



| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | CONDICIONES DE SUELO | |
|-------------------------|---|---|
| | Tipo de terreno aplicable | Condición del nivel freático |
| | Arenas (SM, SP, SC y SW). Gravas (GM, GP, GC y GW). Aplicable en cantos rodados o bolos de hasta 1/3 del diámetro de perforación, mediante equipos especiales. Aplicable en roca sólida. | arenosos. Sin nivel freático para otros suelos. |
| Pipe Ramming | Suelos cohesivos: Arcillas y limos (ML, CL, OL, MH, CH y OH). Arenas (SM, SP, SC y SW). Gravas (GM, GC y GW). | Preferiblemente sin nivel freático, pero puede instalarse con nivel freático. |
| Microtunelado | Suelos cohesivos: Arcillas y limos (ML, CL, OL, MH, CH y OH). Arenas (SM, SP, SC y SW). Gravas (GM, GP, GC y GW). Aplicable en rocas y bolos de hasta 1/3 del diámetro de la perforación. Aplicable en roca sólida, pero implica longitudes cortas. | Con o sin nivel freático. |
| Pilot Tube | Suelos cohesivos: Arcillas y limos (ML, CL, OL, MH, CH y OH). Arenas con presencia de finos (SM y SC). Gravas con presencia de finos (GM y GC). Cantos rodados o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería a instalar. | Sin nivel freático. |
| Direct Pipe | Suelos cohesivos: Arcillas y limos (ML, CL, OL, MH, CH y OH). Arenas (SM, SP, SC y SW). Gravas (GM, GP, GC y GW). Aplicable en rocas y bolos de hasta 1/3 del diámetro de la perforación. Aplicable en roca sólida. | Con o sin nivel freático. |
| Métodos de Compactación | Suelos cohesivos: Arcillas y limos (ML, CL, OL, MH, CH y OH). | Sin nivel freático. |



Cada tecnología cuenta con condiciones de terreno ideales para su aplicación, sin embargo, algunas de estas pueden trabajarse en un amplio rango de condiciones, como lo son Horizontal Directional Drilling, Microtunelado y Direct Pipe. Por otro lado, la tecnología que cuenta con el menor rango de condiciones de suelo aplicable es la correspondiente a Métodos de Compactación, dado que solo puede ser optada para suelos cohesivos sin presencia de nivel freático y, adicionalmente, que cuente con características de compresibilidad.

- Precisión de la instalación

En la siguiente Tabla se muestra el valor seleccionado como nivel de precisión logrado durante la instalación de tubería mediante cada una de las tecnologías sin zanja. Este valor se toma como el promedio de los valores reportados en el capítulo 5.7.

Tabla 70 Cuadro comparativo del nivel de precisión de la instalación

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | NIVEL DE PRECISIÓN DE LA INSTALACIÓN |
|---------------------------------|---|
| Auger Boring | ±1% de longitud total de perforación |
| Horizontal Directional Drilling | ±1,30% de longitud del tramo a instalar |
| Pipe Ramming | ±1% de longitud total de perforación |
| Microtunelado | ±0,031 m |
| Pilot Tube | ±0,019 m |
| Direct Pipe | ±0,018 m |
| Métodos de Compactación | ±1% de longitud total de perforación |

Según los valores de precisión reportados en la Tabla anterior, se puede evidenciar que las tecnologías que cuentan con una precisión más exacta son Direct Pipe, Pilot Tube y Microtunelado, mientras que, la tecnología que cuenta con el nivel de precisión más bajo es Horizontal Directional Drilling.

En el caso en el que el proyecto de instalación de tubería sea una ampliación de una red existente, es decir, construcción de un segundo tubo en paralelo, las tecnologías que logran mayor precisión de instalación serían las más factibles a aplicar, esto, con el fin de evitar afectaciones en la tubería existente.

- Productividad o tasa de avance

En la siguiente Tabla se muestra el valor seleccionado como productividad o tasa de avance en metros de instalación de tubería por cada hora de trabajo para cada una de las tecnologías sin zanja. Este valor se toma como el promedio de los valores reportados en el capítulo 5.8.



Tabla 71 Cuadro comparativo de la productividad de la instalación

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | PRODUCTIVIDAD (m/hora) |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Auger Boring | 3,28 |
| Horizontal Directional Drilling | 16,37 |
| Pipe Ramming | 7,13 |
| Microtunelado | 1,29 |
| Pilot Tube | 5,19 |
| Direct Pipe | 2,98 |
| Métodos de Compactación | 20,69 |

Las tecnologías con mejor rendimiento en la instalación de tubería son Métodos de Compactación y Horizontal Directional Drilling, las demás tecnologías cuentan con tasas de avance similares entre sí, siendo el método Microtunelado la que presenta el menor valor de productividad reportado.

- Emisiones de CO₂ durante la instalación

En la siguiente Tabla se muestra el valor seleccionado de emisiones de CO₂ generadas durante la instalación de tubería mediante cada una de las tecnologías sin zanja. Este valor se toma como el promedio de los valores reportados en el capítulo 5.9.

Tabla 72 Cuadro comparativo de las emisiones de CO₂ generadas durante la instalación de tubería

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | EMISIONES DE CO₂ (kg/m) |
|---------------------------------|---|
| Auger Boring | 86,36 |
| Horizontal Directional Drilling | 57,48 |
| Pipe Ramming | 137,10 |
| Microtunelado | 87,81 |
| Pilot Tube | 315,64 |
| Direct Pipe | No se reporta en la literatura |
| Métodos de Compactación | 72,80 |

Las tecnologías sin zanja cuentan con un comportamiento más aceptable con el medio ambiente, comparadas con el método convencional de zanjado a cielo abierto, esto se debe a que sus actividades no requieren afectaciones totales de la superficie donde se realiza la instalación de la tubería y, a que no perturban el tráfico en gran medida para la perforación del suelo. Estas condiciones reducen la necesidad de desarrollar actividades como demolición y reposición de la estructura de la superficie, así como la generación de planes de manejo de tránsito de gran envergadura, entre otras.



Según lo reportado en la Tabla 72, los métodos de instalación de tubería sin zanja cuentan con emisiones de CO₂ muy similares entre sí, sin embargo, la tecnología que más emisiones genera durante la instalación de acuerdo con lo reportado en la literatura es Pilot Tube, mientras que, la tecnología Horizontal Directional Drilling es la que menos emisiones genera.

Dado que no se logró obtener un valor de referencia para las emisiones de CO₂ generadas por el método Direct Pipe, se tomará este como el valor del promedio de los datos de las demás tecnologías más la desviación estándar poblacional de los mismos. El promedio de los datos es igual a 126,20 y la desviación de estos corresponde a 88,17, por ende, el valor asumido para las emisiones generadas por la tecnología Direct Pipe será de 214,37 kg de CO₂ por cada metro lineal de tubería instalada. Lo anterior se asumió previendo que este método realiza el uso de una máquina microtuneladora y, a su vez, implementa un equipo de empuje para el desplazamiento de la tubería, los cuales generan emisiones significativas durante su funcionamiento. Este valor también se tomará en cuenta en la metodología de selección a desarrollar.

- Costos promedio de instalación

En la siguiente Tabla se muestra el resumen de los costos de instalación indexados a la fecha según los valores reportados por las diferentes referencias descritas en el capítulo 5.10, estos costos se muestran para cada una de las tecnologías sin zanja y para los diferentes diámetros reportados. Cabe mencionar que, para las referencias que contaban con información del costo de instalación para diferentes diámetros, se reportarán únicamente los diámetros que son aplicables a cada tecnología, según la Tabla 64.

Tabla 73 Resumen de los costos de instalación por metro lineal indexados según los valores reportados por las diferentes referencias

| TECNOLOGÍA | DIÁMETRO (mm) | REFERENCIA (Costo en COP/metro lineal) | | | | |
|--------------|---------------|--|---------------------|--|---|------------|
| | | Rodriguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016 | Kumar & Patel, 2019 | Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018 | Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013 | EAAB, 2022 |
| Auger Boring | 300 | - | \$2.011.839 | - | - | - |
| | 450 | - | \$3.017.758 | - | - | - |
| | 600 | - | \$4.023.677 | - | - | - |
| | 700 | \$2.848.986 | - | - | - | - |
| | 900 | - | \$6.035.516 | - | - | - |
| | 1200 | - | \$8.047.354 | - | - | - |



| TECNOLOGÍA | DIÁMETRO (mm) | REFERENCIA (Costo en COP/metro lineal) | | | | |
|---------------------------------|---------------|--|---------------------|--|---|-------------|
| | | Rodriguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016 | Kumar & Patel, 2019 | Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018 | Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013 | EAAB, 2022 |
| Horizontal Directional Drilling | 100 | \$308.603 | - | - | - | - |
| | 150 | \$339.463 | - | - | - | - |
| | 200 | \$462.904 | - | - | - | - |
| | 250 | \$771.507 | - | - | - | - |
| | 300 | \$925.808 | \$3.621.309 | - | - | - |
| | 400 | - | - | - | \$3.057.676 | - |
| | 450 | - | \$4.325.453 | - | - | - |
| | 600 | - | \$5.029.596 | - | - | - |
| | 900 | - | \$7.544.395 | - | - | - |
| | 1200 | - | \$10.059.193 | - | - | - |
| Pipe Ramming | 200 | \$1.234.411 | - | - | - | - |
| | 300 | \$1.851.616 | \$2.011.839 | - | - | - |
| | 400 | \$2.314.520 | - | - | - | - |
| | 450 | - | \$3.017.758 | - | - | - |
| | 600 | - | \$4.023.677 | \$3.130.913 | - | - |
| | 750 | - | - | \$4.272.819 | - | - |
| | 900 | \$13.344.969 | \$6.035.516 | - | - | - |
| | 1200 | - | \$8.047.354 | - | - | - |
| | 1500 | - | \$12.071.031 | - | - | - |
| Microtunelado | 400 | - | - | - | \$3.480.054 | \$5.198.380 |
| | 450 | - | \$7.242.619 | - | - | - |
| | 600 | - | \$9.656.825 | - | - | \$6.238.056 |
| | 700 | \$10.208.867 | - | - | - | \$6.549.959 |
| | 800 | - | - | - | - | \$6.861.862 |
| | 900 | - | \$14.485.238 | - | - | \$7.173.765 |
| | 1000 | - | - | - | - | \$7.485.668 |



| TECNOLOGÍA | DIÁMETRO (mm) | REFERENCIA (Costo en COP/metro lineal) | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|--|---------------------|--|---|--------------|
| | | Rodriguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016 | Kumar & Patel, 2019 | Chaves Pabón, Cárdenas Moreno, Avilez Romero, & Barajas Bernal, 2018 | Ariaratnam, Piratla, Cohen, & Olson, 2013 | EAAB, 2022 |
| | 1100 | - | - | - | - | \$7.797.570 |
| | 1200 | - | \$20.118.386 | - | - | \$9.060.034 |
| | 1300 | - | - | - | - | \$9.362.035 |
| | 1400 | - | - | - | - | \$9.824.939 |
| | 1500 | - | \$24.142.063 | - | - | \$9.547.197 |
| | 1600 | - | - | - | - | \$19.079.169 |
| Pilot Tube | 400 | - | - | - | \$3.357.564 | - |
| Direct Pipe | No se reporta en la literatura | | | | | |
| Métodos de compactación | No se reporta en la literatura | | | | | |

Luego, con el fin de determinar un costo definitivo de instalación para los diferentes diámetros de las tecnologías analizadas, se calculó el promedio de los valores reportados en la tabla anterior para un mismo diámetro, obteniendo así, los costos promedio de instalación que se muestran a continuación.

Tabla 74 Costo promedio de instalación de las diferentes tecnologías sin zanja para diferentes diámetros

| TECNOLOGÍA | DIÁMETRO (mm) | COSTO PROMEDIO (COP/metro lineal) |
|---------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Auger Boring | 300 | \$2.011.839 |
| | 450 | \$3.017.758 |
| | 600 | \$4.023.677 |
| | 700 | \$2.848.986 |
| | 900 | \$6.035.516 |
| | 1200 | \$8.047.354 |
| Horizontal Directional Drilling | 100 | \$308.603 |
| | 150 | \$339.463 |
| | 200 | \$462.904 |
| | 250 | \$771.507 |
| | 300 | \$2.273.559 |



| TECNOLOGÍA | DIÁMETRO (mm) | COSTO PROMEDIO (COP/metro lineal) |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| | 400 | \$3.057.676 |
| | 450 | \$4.325.453 |
| | 600 | \$5.029.596 |
| | 900 | \$7.544.395 |
| | 1200 | \$10.059.193 |
| Pipe Ramming | 200 | \$1.234.411 |
| | 300 | \$1.931.728 |
| | 400 | \$2.314.520 |
| | 450 | \$3.017.758 |
| | 600 | \$3.577.295 |
| | 750 | \$4.272.819 |
| | 900 | \$9.690.243 |
| | 1200 | \$8.047.354 |
| | 1500 | \$12.071.031 |
| Microtunelado | 400 | \$4.339.217 |
| | 450 | \$7.242.619 |
| | 600 | \$7.947.441 |
| | 700 | \$8.379.413 |
| | 800 | \$6.861.862 |
| | 900 | \$10.829.502 |
| | 1000 | \$7.485.668 |
| | 1100 | \$7.797.570 |
| | 1200 | \$14.589.210 |
| | 1300 | \$9.362.035 |
| | 1400 | \$9.824.939 |
| | 1500 | \$16.844.630 |
| | 1600 | \$19.079.169 |
| Pilot Tube | 400 | \$3.357.564 |
| Direct Pipe | No se reporta en la literatura | |
| Métodos de compactación | No se reporta en la literatura | |



De acuerdo con los valores evidenciados en la Tabla anterior, se puede concluir que, para diámetros entre 100 y 400 mm los costos de instalación son similares entre las diferentes tecnologías, mientras que para diámetros superiores a 400 mm, el método Microtunelado genera unos costos de instalación por metro lineal mucho más altos a las demás tecnologías.

Finalmente, para obtener un valor de referencia a usar en la metodología de selección a desarrollar, y poder determinar el costo estimado de un proyecto específico y comparar las diferentes tecnologías entre sí, se realiza el cálculo del promedio de cada uno de los costos promedio por diámetro de las tecnologías reportados en la Tabla 74, obteniendo los siguientes valores.

Tabla 75 Costo promedio de instalación de cada tecnología sin zanja

| TECNOLOGÍA | COSTO PROMEDIO (COP/metro lineal) |
|---------------------------------|--|
| Auger Boring | \$4.330.855 |
| Horizontal Directional Drilling | \$3.417.235 |
| Pipe Ramming | \$5.128.573 |
| Microtunelado | \$10.044.867 |
| Pilot Tube | \$3.357.564 |
| Direct Pipe | No se reporta en la literatura |
| Métodos de compactación | No se reporta en la literatura |

Dado que no se logró obtener un valor de referencia para el costo de instalación de las tecnologías Direct Pipe y Métodos de compactación, se determinarán estos valores de la siguiente manera:

- a. Direct Pipe: El mayor valor de costo obtenido de las tecnologías más la desviación estándar de los datos de todas las tecnologías. Esto, dado que de acuerdo con conversaciones sostenidas con el Ingeniero Juan José Hoyo, esta tecnología presenta los costos más altos de instalación entre las diferentes tecnologías analizadas, debido a la logística requerida para el transporte de la máquina de empuje de tubería y localización en el sitio del proyecto.
- b. Métodos de compactación: El menor valor de costo obtenido de las tecnologías menos la desviación estándar de los datos de todas las tecnologías. Esto, debido a que según lo reportado en las diferentes referencias, esta tecnología es la que requiere el menor espacio de trabajo en superficie, el menor uso de personal y además, su proceso de instalación es el más simple.

Como la desviación estándar poblacional de los datos de costo obtenidos es igual a \$2.481.552, el costo estimado por metro lineal de instalación del método Direct Pipe será



igual a \$12.526.419, mientras que para la tecnología Métodos de compactación será de \$876.012. Estos valores también se tomarán en cuenta en la metodología de selección a desarrollar.



6. CASOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS SIN ZANJA

Se llevó a cabo una revisión de información de diversas entidades y proveedores de servicios de instalación de redes mediante el uso de tecnologías sin zanja. De esta revisión se extrajeron diferentes casos reportados de la implementación de estas tecnologías para la construcción de redes urbanas de agua. A continuación, se muestran los casos mencionados por cada proveedor.

6.1 PERFOTÉCNICA

La información mostrada a continuación se obtuvo de (PERFOTÉCNICA, 2023).

Proyecto: Aeropuerto El Dorado

- Tipo de tecnología sin zanja: Auger Boring.
- Ciudad: Bogotá D.C.
- Interferencia: Pistas y calles de rodaje.
- Fecha: Enero a diciembre de 2014.
- Servicio: Alcantarillado.
- Material tubería instalada: Acero al carbón.
- Diámetro: 24, 30, 36, 42 y 48 pulgadas.
- Longitud: Tramos de 50 a 110 m (1600 metros en total).
- Complejidades: Operaciones aeronáuticas y presencia de arcillas altamente expansivas.



Figura 36 Reporte del proyecto de instalación de tuberías de alcantarillado mediante el método Auger Boring en el Aeropuerto El Dorado. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)



Proyecto: Calle 183

- Tipo de tecnología sin zanja: Auger Boring.
- Ciudad: Bogotá D.C.
- Interferencia: Vía férrea.
- Fecha: Marzo 2017.
- Servicio: Alcantarillado.
- Material tubería instalada: Acero al carbón.
- Diámetro: 24 pulgadas.
- Longitud: 42 metros.
- Complejidades: Presencia de arcilla.



Figura 37 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Auger Boring en la Calle 183 de Bogotá. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)

Proyecto: Villavicencio

- Tipo de tecnología sin zanja: Pipe Ramming.
- Ciudad: Villavicencio, Meta.
- Interferencia: Vía nacional.



- Fecha: En ejecución.
- Servicio: Alcantarillado.
- Material tubería instalada: Acero al carbón.
- Diámetro: 30 pulgadas.
- Longitud: 30 metros.
- Complejidades: Presencia de arcillas altamente expansivas.



Figura 38 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Pipe Ramming en Villavicencio. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)

Proyecto: Barranca de Upía

- Tipo de tecnología sin zanja: Pipe Ramming.
- Ciudad: Barranca de Upía, Meta.
- Interferencia: Vía nacional.
- Fecha: Mayo 2017.
- Servicio: Alcantarillado.
- Material tubería instalada: Acero al carbón.
- Diámetro: 24 pulgadas.
- Longitud: 12 metros.



- Complejidades: Presencia de piedra rajón.



Figura 39 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Pipe Ramming en Barranca de Upía. Fuente: (PERFOTÉCNICA, 2023)

6.2 Instituto de Desarrollo Urbano – IDU

La información mostrada a continuación se obtuvo de (Instituto de Desarrollo Urbano, 2023).

Proyecto: Avenida 68

- Tipo de tecnología sin zanja: Microtunelado o Pipe Jacking.
- Ciudad: Bogotá D.C.
- Fecha: En ejecución.
- Servicio: Alcantarillado pluvial.
- Diámetro: 2,20 metros.
- Longitud: 950 metros.



Figura 40 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Microtunelado en la Avenida 68 de Bogotá. Fuente: (Instituto de Desarrollo Urbano, 2023)

6.3 BESSAC ANDINA

La información mostrada a continuación se obtuvo de (BESSAC ANDINA, 2023).

Proyecto: Construcción de colector pluvial Calle 183

- Tipo de tecnología sin zanja: Microtunelado o Pipe Jacking.
- Ciudad: Bogotá D.C.
- Fecha: Abril a agosto de 2019.
- Servicio: Alcantarillado pluvial.
- Material tubería instalada: Concreto reforzado.
- Diámetro: 1,20 metros.
- Longitud: 438,43 metros.
- Complejidades: Presencia de arenas.

Proyecto: Alcantarillado aguas residuales Av. Primero de Mayo

- Tipo de tecnología sin zanja: Microtunelado o Pipe Jacking.
- Ciudad: Bogotá D.C.
- Fecha: Junio a diciembre de 2012.



- Servicio: Alcantarillado residual.
- Material tubería instalada: Concreto reforzado.
- Diámetro: 0,40 metros.
- Longitud: 13,40 metros.
- Complejidades: Presencia de arenas.

Proyecto: Alcantarillado sanitario Vereda El Verganzo Fase I

- Tipo de tecnología sin zanja: Microtunelado o Pipe Jacking.
- Ciudad: Tocancipá.
- Fecha: Julio a octubre de 2013.
- Servicio: Alcantarillado.
- Material tubería instalada: Concreto reforzado.
- Diámetro: 0,60 metros.
- Longitud: 356 metros.
- Complejidades: Presencia de arcillas blandas.

Proyecto: Canalización de arroyos Calles 91 y 92

- Tipo de tecnología sin zanja: Microtunelado o Pipe Jacking.
- Ciudad: Barranquilla.
- Fecha: Octubre 2017 a septiembre 2018.
- Servicio: Alcantarillado.
- Material tubería instalada: Concreto reforzado.
- Diámetro: 1,50 y 2,00 metros.
- Longitud: 250 a 1340,97 metros.
- Complejidades: Presencia de calizas y arenas.

Proyecto: Construcción del interceptor de alcantarillado sanitario Zona Franca

- Tipo de tecnología sin zanja: Microtunelado o Pipe Jacking.
- Ciudad: Bogotá D.C.
- Fecha: En ejecución.
- Servicio: Alcantarillado.
- Material tubería instalada: Concreto reforzado.
- Diámetro: 1,20 metros.
- Longitud: 2670 metros.
- Complejidades: Presencia de arenas.



6.4 PERFHORA

La información mostrada a continuación se obtuvo de (PERFHORA, 2023).

Proyecto: Roperuelos del páramo

- Tipo de tecnología sin zanja: Auger Boring.
- Ciudad: Zamora, España.
- Interferencia: Carretera nacional.
- Servicio: Alcantarillado de aguas residuales.
- Material tubería instalada: Hormigón armado.
- Diámetro: 1,20 metros.
- Longitud: 39 metros.
- Maquinaria: Robbins ABM48.



Figura 41 Reporte del proyecto de instalación de tubería de alcantarillado mediante el método Auger Boring en Zamora, España. Fuente: (PERFHORA, 2023)



7. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIN ZANJA ÓPTIMA

En el desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo la generación de una metodología de evaluación de las diferentes tecnologías sin zanja analizadas, esta con el fin de que sirva como apoyo a la toma de decisiones de cualquier profesional del área de ingeniería que tenga como objetivo realizar la construcción de redes urbanas de agua (acueducto y alcantarillado) mediante estas tecnologías.

La metodología fue desarrollada en el software Microsoft Excel y pretende generar recomendaciones sobre la tecnología sin zanja más adecuada a implementar de acuerdo con la evaluación de diferentes aspectos de un proyecto analizado, como las condiciones del sitio, las características de la tubería a instalar, las características del diseño, los costos, tiempos de ejecución y las emisiones de CO₂ equivalente generadas durante la instalación.

Para la evaluación de la viabilidad técnica de cada una de las tecnologías, se utilizaron los resultados obtenidos en el capítulo 5.11 como información base, donde se muestran los rangos de aplicabilidad de estas para los diferentes parámetros técnicos diferenciadores.

La metodología se subdividió en 6 capítulos o apartados, los cuales se describen a continuación.

- Primer capítulo: Información de las tecnologías.

En esta hoja se encuentra la información base referente a las diferentes tecnologías sin zanja analizadas dentro de la metodología, la cual se usa para realizar la evaluación de la aplicabilidad de estas. Igualmente, se muestran tablas de información usadas para el proceso de análisis.

Se incluye la información para las siete (7) tecnologías sin zanja estudiadas en el trabajo, así mismo, se deja la posibilidad de diligenciar la información respectiva de alguna tecnología sin zanja adicional que el usuario quiera evaluar dentro de esta metodología, puntualmente, se podría incluir información para 3 tecnologías adicionales. A continuación, se muestra la información tipo reportada para cada una de las 7 tecnologías sin zanja analizadas con base en el estado del arte desarrollado.




| 4 MICROTUNELADO | | | | | | |
|------------------------|--|--------------------------|---------------------------|-----------------|------------|----|
| a | Rango de diámetro (mm) | Mínimo | 500,00 | Máximo | 2000,00 | |
| b | Longitud máxima (m) | 830,00 | | | | |
| c | ¿Requiere carcasa? | No | | | | |
| d | Material de la carcasa | NA | No aplica | | | |
| e | Tipo de tubería a instalar | Acero | Acero | | | |
| | | RCP | Concreto reforzado | | | |
| | | VCP | Arcilla vitrificada | | | |
| | | GRP | Fibra de vidrio reforzada | | | |
| f | Espacio de trabajo requerido | | | | | |
| | Pozo de entrada | Ancho (m) | 8,00 | Largo (m) | 26,00 | |
| | Pozo de salida | Ancho (m) | 5,00 | Largo (m) | 10,00 | |
| g | Profundidad de instalación (m) | | | | | |
| | Mínima | Valor | 1,80 | Máxima | Sin limite | |
| | | Relación con el diámetro | 1,50 | | | |
| h | Grupos de suelo aplicable | | | | | |
| | ML | CL | OL | MH | CH | OH |
| | SM | SP | SC | SW | GM | GP |
| | GC | GW | | | | |
| | ¿Aplicable en cantos o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería a instalar? | | | Sí | | |
| | ¿Aplicable en roca sólida? | | | Sí | | |
| | ¿Aplicable con nivel freático? | | | Sí | | |
| i | Productividad o tasa de avance (m/hora) | | | | 1,29 | |
| j | Nivel de precisión | | | | | |
| | | Sistema Guiado | | Buena precisión | | |
| | Error máximo durante la instalación | ±0,031 m | | | | |
| k | Costo promedio (COP\$/m) | | \$ 10.044.867,00 | | | |
| l | Emisiones de CO ₂ (kg/m) | | 87,81 | | | |

Figura 42 Información reportada para la tecnología sin zanja Microtunelado

- Segundo capítulo: Nivel 1 – Aspectos del sitio.

En esta hoja se realiza la primera parte de la evaluación de las tecnologías, esta, mediante la identificación de las condiciones presentes en el sitio de ubicación del proyecto de construcción de redes urbanas de agua. Este proceso se lleva a cabo a partir del análisis de distintas variables como el tipo de terreno en el cual se va a realizar la instalación y las características del área disponible. A continuación, se muestra la interfaz gráfica de este nivel.





Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Desarrollo de una metodología para la selección de la tecnología sin zanja óptima para la construcción de redes urbanas de agua

SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIN ZANJA
Nivel 1 - Aspectos del sitio

La identificación de las condiciones presentes en el sitio de ubicación del proyecto de construcción de redes urbanas de agua corresponde a la primera parte de la evaluación de las diferentes tecnologías sin zanja analizadas. Este proceso debe llevarse a cabo a partir del análisis de distintas variables como el tipo de terreno en el cual se va a realizar la instalación y las características del área disponible. En este sentido, esta hoja permite definir las tecnologías sin zanja viables a usar de acuerdo con las condiciones encontradas en el sitio.

Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | |

Limpiar

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | Diligenciar información |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | Diligenciar información |
| PIPE RAMMING | Diligenciar información |
| MICROTUNELADO | Diligenciar información |
| PILOT TUBE | Diligenciar información |
| DIRECT PIPE | Diligenciar información |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |


Siguiente

Figura 43 Interfaz gráfica primer nivel de evaluación de las tecnologías sin zanja – Aspectos del sitio

- Tercer capítulo: Nivel 2 – Características de la tubería a instalar.

En esta hoja se analizan las tecnologías viables obtenidas posterior al Nivel 1, se realiza la evaluación de la aplicabilidad de estas según las características de la tubería de servicio a instalar para la red de acueducto o alcantarillado, como lo son el material, el diámetro y el requerimiento de carcasa. En la Figura 44 se puede observar la interfaz gráfica correspondiente a este nivel.





Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Desarrollo de una metodología para la selección de la tecnología sin zanja óptima para la construcción de redes urbanas de agua

SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIN ZANJA
Nivel 2 - Características de la tubería a instalar

La identificación de las características de la tubería de la red de agua urbana a instalar corresponde a la segunda parte de la evaluación de las diferentes tecnologías sin zanja, en esta parte se analizan las tecnologías viables obtenidas posterior al análisis del Nivel 1. Este proceso debe llevarse a cabo a partir del análisis de algunas variables de la tubería de servicio. En este sentido, esta hoja permite definir las tecnologías sin zanja factibles a usar de acuerdo con la tubería final a instalar.

Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Sí o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.


| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | Diligenciar información |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | Diligenciar información |
| PIPE RAMMING | Diligenciar información |
| MICROTUNELADO | Diligenciar información |
| PILOT TUBE | Diligenciar información |
| DIRECT PIPE | Diligenciar información |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

Figura 44 Interfaz gráfica segundo nivel de evaluación de las tecnologías sin zanja – Características de la tubería a instalar

- Cuarto capítulo: Nivel 3 – Características del diseño.

En esta hoja se analizan las tecnologías viables obtenidas posterior al Nivel 1 y Nivel 2, se realiza la evaluación de la aplicabilidad de estas según ciertas variables del diseño, como son, longitud y profundidad de instalación y la precisión requerida durante la perforación. En la siguiente Figura se muestra la interfaz gráfica de este nivel.





Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
 Desarrollo de una metodología para la selección de la tecnología sin zanja óptima para la construcción de redes urbanas de agua

SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIN ZANJA
Nivel 3 - Características del diseño

La identificación de las características del diseño del tramo de red de agua urbana a instalar corresponde a la tercera parte de la evaluación de las diferentes tecnologías sin zanja, en esta parte se analizan las tecnologías viables obtenidas posterior al análisis del Nivel 2. Este proceso debe llevarse a cabo a partir del análisis de algunas variables del diseño del tramo. En este sentido, esta hoja permite definir las tecnologías sin zanja factibles a usar de acuerdo con los requerimientos del diseño.

Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-------|
| 1 | Longitud de instalación | m | |
| 2 | Precisión requerida | - | |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | Diligenciar información |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | Diligenciar información |
| PIPE RAMMING | Diligenciar información |
| MICROTUNELADO | Diligenciar información |
| PILOT TUBE | Diligenciar información |
| DIRECT PIPE | Diligenciar información |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |


Figura 45 Interfaz gráfica tercer nivel de evaluación de las tecnologías sin zanja – Características del diseño

- Quinto capítulo: Nivel 4 – Aspectos varios.

En este nivel se realiza una comparación de las tecnologías sin zanja técnicamente viables obtenidas posterior a la evaluación de los 3 primeros niveles, se comparan los diferentes valores generados durante la instalación de la tubería, con relación a costos, tiempos de ejecución y los kg de CO₂ emitidos al ambiente. Así mismo, se determinan las tecnologías



óptimas a implementar según cada variable analizada. En la siguiente Figura se visualiza la interfaz gráfica de este nivel.



Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
 Desarrollo de una metodología para la selección de la tecnología sin zanja óptima para la construcción de redes urbanas de agua

SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIN ZANJA

Nivel 4 - Aspectos varios

En este nivel se evalúan las tecnologías sin zanja técnicamente viables obtenidas posterior al análisis del Nivel 3. Se lleva a cabo una comparación entre estas con respecto a aspectos como el costo, tiempo de ejecución e impacto ambiental. Es decisión del usuario realizar la selección de la tecnología a implementar.

| Información final del proyecto | | | |
|--|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| A | Diámetro de tubería a instalar (mm) | | |
| B | Material de tubería a instalar | | |
| C | Longitud de tubería a instalar (m) | | |
| Valores estimados para la perforación del suelo e instalación de la tubería del proyecto | | | |
| TECNOLOGÍAS SIN ZANJA APLICABLES | Costo (COP\$) | Tiempo (horas) | Emisiones de CO ₂ (kg) |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| Tecnología con valor mínimo | | | |

Siguiete

Figura 46 Interfaz gráfica cuarto nivel de la metodología – Aspectos varios

- Sexto capítulo: Consideraciones.

En esta hoja se evidencian ciertas consideraciones de las tecnologías sin zanja técnicamente viables, estas deberán ser tenidas en cuenta por parte del usuario para realizar la selección final de la tecnología a implementar para el proyecto estudiado.



Durante la ejecución de la metodología, se realizó la revisión de las diferentes fórmulas usadas en esta para la evaluación de las tecnologías sin zanja, esta revisión se basó en un análisis de sensibilidad para los niveles 1, 2 y 3, donde se plantearon diversos escenarios y se corroboró que los resultados obtenidos estuvieran acordes con la información base usada. Tanto la metodología de selección como los análisis de sensibilidad desarrollados se muestran en los anexos del presente trabajo.



8. CASO DE ESTUDIO

De acuerdo con información recopilada del trabajo desarrollado por (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016), el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) mediante licitación pública No. IDU-LP-SGI-020-2014 adjudicó el contrato de obra IDU-1746-2014, el cual tuvo por objeto “Complementación o Actualización o Ajustes o Diseños y Construcción de la Avenida Los Cerros (Avenida Circunvalar); desde la Calle 9 hasta la Avenida Los Comuneros, del acuerdo 527 de 2013 de cupo de endeudamiento de Bogotá. En la siguiente Figura se observar la localización del proyecto.



Figura 47 Localización del proyecto IDU-1746-2014. Tomado de: (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016)

El proyecto contemplaba la construcción de un tramo de alcantarillado, en tubería PVC de 600 mm de diámetro y 25,04 m de longitud, este, a una profundidad promedio de 4 m. Debido a que se contaba con una interferencia con la red matriz de acueducto *El Silencio – Vitelma* de 60” de diámetro en la Calle 7 con Carrera 3E, fue sugerido evitar excavaciones a cielo abierto, esto, por parte de los especialistas, ya que, se podrían generar afectaciones en la cimentación y soporte de la red matriz mencionada. Siguiendo las condiciones anteriores, el proyecto evaluó el uso de métodos de instalación de tubería sin zanja, usando para la instalación una camisa de acero.

A continuación, se muestra la planta del tramo de alcantarillado propuesto a instalar mediante tecnología sin zanja.

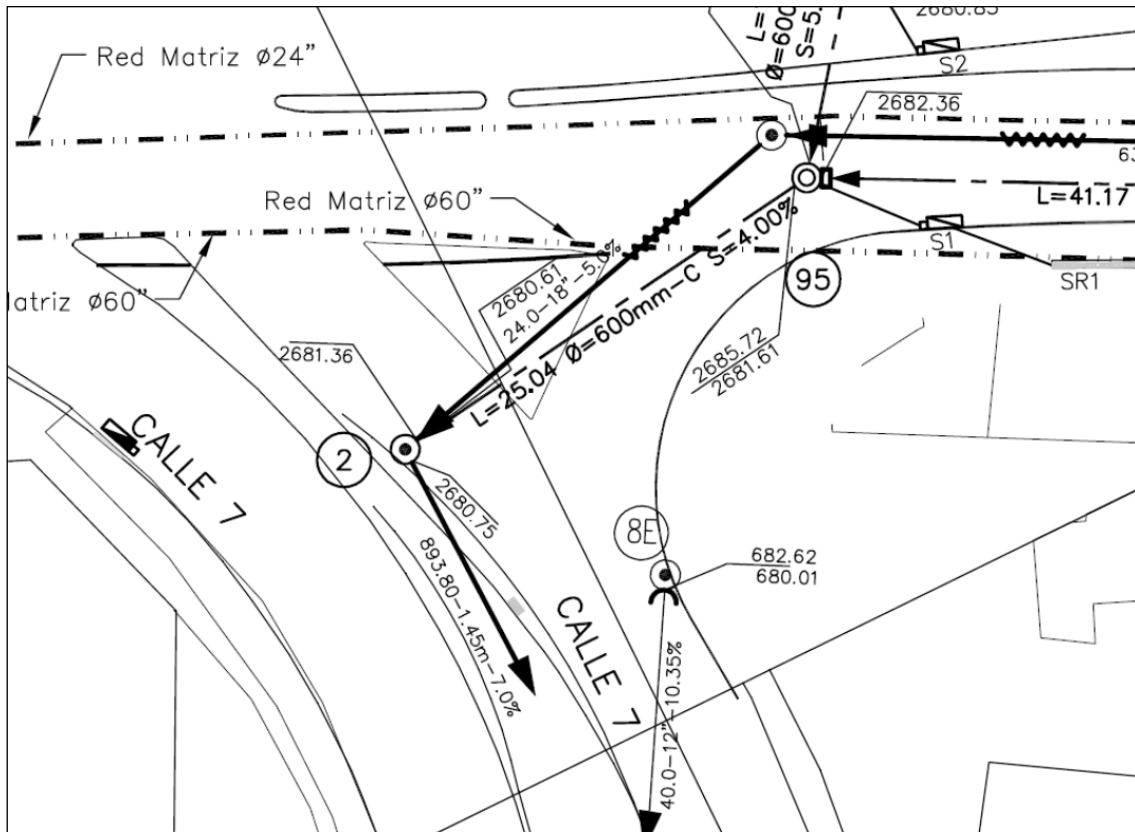


Figura 48 Planta del tramo de alcantarillado propuesto para la conexión del Pozo 95 con el Pozo 2, a instalar mediante tecnología sin zanja. Tomado de: (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016)

En la siguiente Figura se muestra el perfil del tramo de alcantarillado propuesto a instalar mediante tecnología sin zanja.

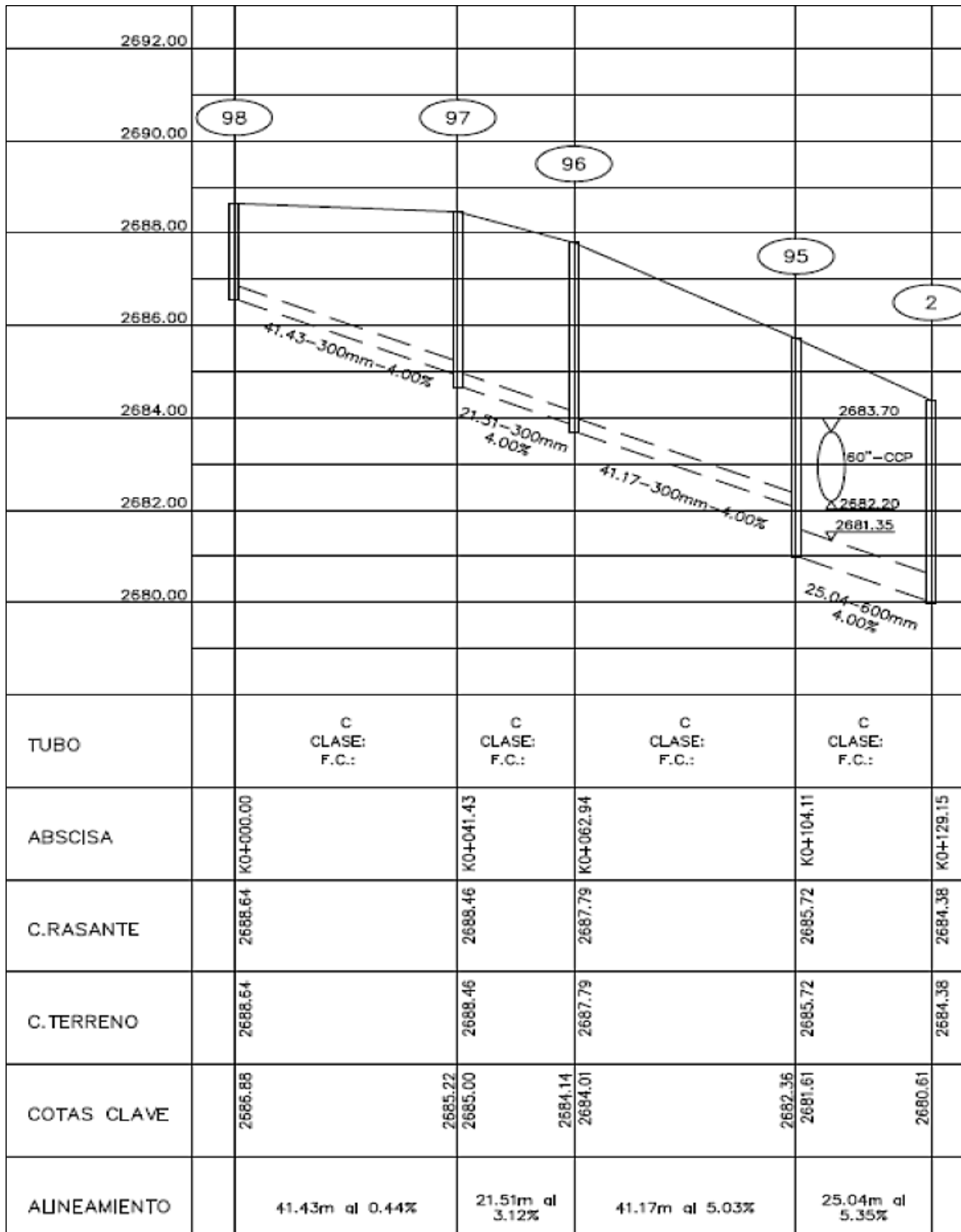


Figura 49 Perfil del tramo de alcantarillado propuesto para la conexión del Pozo 95 con el Pozo 2, a instalar mediante tecnología sin zanja. Tomado de: (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016)

A lo largo de todo el proyecto se ejecutaron cuatro sondeos mecánicos, con el fin de determinar las características específicas del suelo presente en el área. Según los resultados del sondeo realizado por “Echeverry Ingeniería y Ensayos S.A.S.” en cercanías al sitio de ejecución de la instalación del tramo de alcantarillado, se cuenta con un terreno



tipo “Arenisca de color blanco, fracturada con bandeamientos de oxidación y fracturas llenas de arcilla”. Para el análisis puntual de la tecnología sin zanja óptima a aplicar mediante la metodología desarrollada, se tomará este tipo de terreno como “Cantos o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería a instalar”, no como roca sólida.

Adicionalmente, por parte de (Rodríguez Gutierrez, Molano Garay, & Vargas Manrique, 2016) se indica que la zona no cuenta con nivel freático presente, así mismo, se menciona que no se cuenta con mucho espacio disponible para el desarrollo de los trabajos, por lo cual, para el análisis de este caso de estudio, se asumirá un espacio mínimo de área en superficie igual al ancho de la calzada (aproximadamente 6 m) por 10 metros de longitud, esto, tanto para el inicio como para el final del tramo.

Con base en la información descrita del caso de estudio, se procedió a realizar la evaluación de la tecnología sin zanja óptima a implementar para la instalación del tramo de alcantarillado mediante la metodología desarrollada. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los diferentes niveles de evaluación.

| | Variable | Unidad | Valor |
|----------|---|---------------|---|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | Cantos o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería a instalar |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 6,00 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 10,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 6,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 10,00 |

Limpiar

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | NO APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

Figura 50 Resultados del primer nivel de evaluación del caso de estudio



Los resultados obtenidos posterior al primer nivel de evaluación permiten evidenciar que de acuerdo con las condiciones del sitio, la mayoría de las tecnologías sin zanja se descartan, esto debido a que el espacio disponible para la adecuación de pozos es muy reducido, la única tecnología viable es Pilot Tube. En el segundo nivel de evaluación se determinará si esta tecnología continúa siendo viable o en su defecto se descarta.

| | Variable | Unidad | Valor |
|----------|--|---------------|--------------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | PVC |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 600,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | Si |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | 700,00 |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

Limpiar

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | DESCARTADA EN N1 |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | DESCARTADA EN N1 |
| PIPE RAMMING | DESCARTADA EN N1 |
| MICROTUNELADO | DESCARTADA EN N1 |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | DESCARTADA EN N1 |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N1 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

Figura 51 Resultados del segundo nivel de evaluación del caso de estudio

En el segundo nivel de evaluación se pudo determinar que la tecnología Pilot Tube continúa siendo viable a aplicar para la instalación del tramo de alcantarillado, puesto que las características de la tubería permiten la aplicación de esta. En el tercer nivel de evaluación se validará finalmente si esta tecnología cumple con las condiciones del diseño.



| | Variable | Unidad | Valor |
|----------|---|---------------|-----------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 25,04 |
| 2 | Precisión requerida | - | Buena precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 4,00 |

Limpiar

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | DESCARTADA EN N1 |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | DESCARTADA EN N1 |
| PIPE RAMMING | DESCARTADA EN N1 |
| MICROTUNELADO | DESCARTADA EN N1 |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | DESCARTADA EN N1 |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N1 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

Figura 52 Resultados del tercer nivel de evaluación del caso de estudio

Concluidos los tres niveles de evaluación de la aplicabilidad técnica de las tecnologías sin zanja, se evidencia que la tecnología Pilot Tube es la única que cuenta con la posibilidad de implementarse teniendo en cuenta las condiciones del proyecto.

En el cuarto nivel de la metodología, se realiza la determinación del costo promedio de instalación, el tiempo estimado de ejecución y las emisiones estimadas de kg de CO₂ al ambiente, esto, de acuerdo con el estado del arte desarrollado y con la información del proyecto. A continuación, se muestran los valores obtenidos.



| Información final del proyecto | | | | |
|---|---|---------------------|-----------------------|---|
| A | Diámetro de tubería a instalar (mm) | 600,00 | | |
| B | Material de tubería a instalar | PVC | | |
| C | Longitud de tubería a instalar (m) | 25,04 | | |
| Valores estimados para la perforación del suelo e instalación de la tubería del proyecto | | | | |
| | TECNOLOGÍAS SIN ZANJA APLICABLES | Costo (COPS) | Tiempo (horas) | Emisiones de CO₂ (kg) |
| 1 | PILOT TUBE | \$ 84.073.402,56 | 4,82 | 7903,63 |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |
| | Tecnología con valor mínimo | PILOT TUBE | PILOT TUBE | PILOT TUBE |

Figura 53 Valores obtenidos en el cuarto nivel de la metodología para el caso de estudio

El costo estimado de ejecución de los 25,04 m de tubería PVC de 600 mm de diámetro es aproximadamente \$84.073.402,56; dicho tramo puede instalarse en más o menos 4,82 horas, esto, sin contar los tiempos de montaje y desmontaje de los equipos; mientras que, la ejecución de este proyecto puede generar alrededor de 7903,63 kg de CO₂ equivalente.



9. CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente trabajo de investigación se llevó a cabo una revisión de bibliografía con el fin de determinar inicialmente las tecnologías sin zanja que pueden ser usadas para la construcción de redes urbanas de agua. Posteriormente, se realizó un estado del arte, el cual buscaba establecer algunas características técnicas y rangos de aplicación de las tecnologías sin zanja analizadas para compararlas entre sí. De igual forma, con base en los resultados del estado del arte se desarrolló una metodología de selección de la tecnología sin zanja óptima a implementar con base en la información de entrada de un proyecto. Finalmente, se aplicó dicha metodología en un caso de estudio, en donde se determinó la tecnología sin zanja más adecuada a ejecutar. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que:

- Para la construcción de redes urbanas de agua (acueducto y alcantarillado) se tuvieron en cuenta las siguientes tecnologías sin zanja reportadas en la literatura: Auger Boring, Horizontal Directional Drilling (HDD), Pipe Ramming, Microtunelado, Pilot Tube, Direct Pipe y Métodos de Compactación.
- Los parámetros técnicos diferenciadores que se seleccionaron para el desarrollo del estado del arte fueron los siguientes:
 - a. Diámetro de la tubería a instalar.
 - b. Longitud de instalación.
 - c. Material de la tubería a instalar.
 - d. Espacio requerido para la ejecución de los trabajos.
 - e. Profundidad de instalación.
 - f. Condiciones de suelo aptas para la instalación.
 - g. Precisión de la instalación.
 - h. Productividad o tasa de avance.
 - i. Emisiones de CO₂ generadas durante la instalación de tubería.
 - j. Costos de instalación.
- Con base en los resultados del estado del arte, la tecnología Pipe Ramming cuenta con el mayor rango de diámetros aplicables, ya que, puede instalar tuberías desde 150 mm hasta 1450 mm de diámetro. Sin embargo, la tecnología Microtunelado es la que puede instalar diámetros de tubería de mayor orden (2000 mm), mientras que, la que cuenta con mayor restricción de aplicabilidad para este parámetro es la tecnología Métodos de Compactación, dado que el máximo diámetro instalable es 200 mm.
- La máxima longitud de instalación alcanzada por una tecnología sin zanja es de 1790 m, lograda por el método Horizontal Directional Drilling, por otro lado, la tecnología



que cuenta con menor longitud de alcance es Métodos de Compactación, ya que, debido a las características de este método, se pueden lograr longitudes máximas de hasta 40 metros.

- El material de tubería instalable más común entre las tecnologías sin zanja analizadas es el acero, dado que casi todos los métodos pueden instalarlo, exceptuando los Métodos de Compactación. Por otro lado, cabe mencionar que, las tecnologías Auger Boring, Pipe Ramming y Direct Pipe únicamente se pueden ejecutar si y solo si la tubería a instalar es de acero, debido a que las características de este material garantizan la resistencia requerida para las fuerzas ejercidas por estas tecnologías, para estos casos, la tubería de acero puede usarse como tubería final o en su defecto se puede usar como encamisado de la tubería de servicio que puede ser en cualquier otro material.
- La tecnología sin zanja que requiere un mayor espacio de trabajo para el desarrollo de la instalación de tubería es Horizontal Directional Drilling, seguida por el método Direct Pipe, por el contrario, la tecnología que necesita menor espacio de trabajo es Métodos de Compactación.
- Cada una de las tecnologías sin zanja analizadas cuentan con diferentes condiciones de terreno ideales para su aplicación, sin embargo, algunas de estas pueden trabajarse en un amplio rango de condiciones, como lo son Horizontal Directional Drilling, Microtunelado y Direct Pipe. Por otro lado, la tecnología que cuenta con el menor rango de condiciones de suelo aplicable es Métodos de Compactación, dado que solo puede ser implementada en suelos cohesivos sin presencia de nivel freático y, adicionalmente, que el suelo cuente con características de compresibilidad.
- Las diferentes tecnologías de instalación de tubería sin zanja cuentan con un nivel de precisión variable, las que permiten lograr niveles de error más bajos son Direct Pipe, Pilot Tube y Microtunelado, mientras que, la tecnología que cuenta con el nivel de precisión más bajo es Horizontal Directional Drilling. Para los casos donde se requiera instalar redes por gravedad, se recomienda implementar tecnologías que garanticen una mejor precisión.
- En la revisión bibliográfica se identificaron diferentes trabajos donde se desarrolló el cálculo de las emisiones de CO₂ generadas durante la instalación de tubería mediante algunas tecnologías sin zanja y se comparó con respecto al zanjado tradicional, obteniendo resultados que permiten evidenciar que el uso de este tipo de tecnologías presentan un comportamiento más aceptable con el medio ambiente, esto se debe principalmente a que las actividades requeridas no generan afectaciones totales de la superficie donde se desarrollan, evitando la necesidad de actividades como demolición



y reposición de la estructura existente, desarrollo de planes de manejo de tránsito de gran envergadura, entre otras.

- Con base en el estado del arte desarrollado, se logró determinar un estimado del costo de instalación de tubería mediante las tecnologías sin zanja, donde este puede variar entre \$876.012 y \$12.526.419 pesos colombianos (COP), siendo la tecnología Métodos de Compactación la más económica y por el contrario la tecnología Direct Pipe la más costosa. El costo de las demás tecnologías fluctúa entre los \$3.300.000 y los \$10.000.000 COP.
- La metodología de evaluación de las diferentes tecnologías sin zanja analizadas se desarrolló como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones de cualquier profesional del área de ingeniería que tenga como objetivo realizar la construcción de redes urbanas de agua mediante estas tecnologías. La metodología se realizó en el software Microsoft Excel y con esta se generan recomendaciones sobre la tecnología sin zanja más adecuada a implementar de acuerdo con la evaluación de diferentes aspectos de un proyecto analizado, como las condiciones del sitio, las características de la tubería a instalar, las características del diseño, los costos, tiempos de ejecución y las emisiones de CO₂ equivalente generadas durante la instalación.
- Para el caso de estudio analizado mediante la metodología desarrollada se encontró que, con base en las condiciones del sitio de ubicación del proyecto, las características de la tubería a instalar y las características del diseño requerido, la tecnología sin zanja óptima a implementar es Pilot Tube, generando un costo aproximado de ejecución de 25,04 m de tubería PVC de 600 mm de diámetro igual a \$84.073.402,56, el cual se puede instalar en aproximadamente 4,82 horas, lo anterior, sin tener en cuenta los tiempos de montaje y desmontaje de los equipos. Los kg de CO₂ equivalente generados durante el proceso de instalación de la tubería son alrededor de 7903,63.
- La Universidad de los Andes no es responsable sobre el uso que se le dé a la metodología de selección desarrollada. Su construcción hace parte del presente estudio académico y por lo tanto, los resultados que ésta genere están condicionados a la información y a las verificaciones particulares que el usuario utilice. De esta manera, se debe eximir a la Universidad de los Andes de cualquier reclamación o afines que se presenten por la implementación que decida hacer el usuario.



10. RECOMENDACIONES

Con base en el desarrollo del presente trabajo investigativo, se plantean las siguientes recomendaciones para la elaboración de trabajos posteriores:

- La obtención de información primaria para seleccionar el caso de estudio se vio obstaculizada por la confidencialidad con la que cuentan las diferentes empresas ejecutoras de tecnologías de instalación de tubería sin zanja, por lo cual, se recomienda generar un mayor acercamiento entre la academia y las empresas con el fin de lograr objetivos conjuntos que beneficien a ambas partes.
- Dado que la información base encontrada referente a costos y emisiones de CO₂ equivalente generadas durante la instalación de tubería es baja, se recomienda desarrollar trabajos investigativos que se enfoquen en el análisis comparativo de estos parámetros para las diferentes tecnologías, especialmente para las tecnologías Direct Pipe y Métodos de Compactación, las cuales son las que cuentan con menos información o en algunos casos esta es nula.
- Se recomienda generar un uso adecuado de la metodología de selección desarrollada, con el fin de ser tenida en cuenta como apoyo en la toma de decisiones de proyectos de instalación de tubería sin zanja, determinando según las condiciones de estos, las tecnologías sin zanja que son técnicamente viables y así mismo, obteniendo un comparativo entre estas con base en parámetros como el costo y tiempo de ejecución y las emisiones de CO₂ equivalente generadas al medio ambiente.
- Se recomienda retroalimentar la metodología de selección desarrollada con la información de tecnologías sin zanja adicionales a las que se tuvieron en cuenta en el presente trabajo, permitiendo al usuario, generar un análisis actualizado en el tiempo, teniendo en cuenta tecnologías que puedan surgir en un futuro y que se puedan implementar para la ejecución de proyectos de instalación de redes urbanas de agua.
- Dado que el presente trabajo de investigación se basó en las tecnologías sin zanja para la construcción de redes nuevas, se recomienda generar en trabajos posteriores herramientas que permitan evaluar tecnologías sin zanja enfocadas en la rehabilitación y/o reparación de redes existentes, usando la información disponible de cada una de estas.



11. REFERENCIAS

- Abraham, D. M., Baik, H. S., & Gokhale, S. (2002). Development of a Decision Support System For Selection of Trenchless Technologies to Minimize Impact of Utility Construction on Roadways. *Development of a Decision Support System For Selection of Trenchless Technologies to Minimize Impact of Utility Construction on Roadways*. Joint Transportation Research Program, West Lafayette, Indiana.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (7 de Junio de 2023). EPA. Obtenido de EPA: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- Agua, G. N. (2024). *Guía Nueva Cultura del Agua*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de Guía Nueva Cultura del Agua: <https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/areas/el-agua-en-el-medio-urbano>
- Aguilar, A., Figueras, M., & Quezada, L. (s.f.). Desarrollo de un software para la clasificación de suelos. *Desarrollo de un software para la clasificación de suelos*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C., Puebla, México. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/47709608/Desarrollo_de_un_software_para_la_clasificacion_de_suelos-libre.pdf?1470101501=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDesarrollo_de_un_software_para_la_clasif.pdf&Expires=1731267717&Signature=WydM
- AINPRO S.A. Tecnología sin Zanja. (2023). AINPRO S.A. Obtenido de <https://www.ainpro.com.co/tecnicas/ramming.html>
- Akkerman. (2023). AKKERMAN. Obtenido de AKKERMAN: <https://www.akkerman.com/equipment/slp-system-periphery-drive/>
- American Society for Testing and Material. (2017). ASTM D2487. *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*. ASTM.
- American Society of Civil Engineers. (2015). Standard Design And Construction Guidelines For Microtunneling (36-15). *Standard Design And Construction Guidelines For Microtunneling (36-15)*. ASCE.
- Ariaratnam, S. T., Piratla, K., Cohen, A., & Olson, M. (2013). Quantification of Sustainability Index for Underground Utility Infrastructure Projects. *Journal of Management in Engineering*. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000763
- Avendaño, L. M. (2021). Análisis comparativo por medio de un modelo de simulación de elementos discretos para la estimación de la huella de carbono, en instalaciones



de tuberías para los métodos Guided Auger Boring-Pilot Tube y zanja abierta. *Análisis comparativo por medio de un modelo de simulación de elementos discretos para la estimación de la huella de carbono, en instalaciones de tuberías para los métodos Guided Auger Boring-Pilot Tube y zanja abierta.* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

BAROIG. (2024). *BAROIG SAFE & INTELLIGENT MRO*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://baroig.com/tipos-tuberias-industriales-materiales-aplicaciones/>

BESSAC ANDINA. (2023). *BESSAC ANDINA*. Obtenido de <https://bessac-andina.com/experiencia/>

Calvo, V. O. (2023). Huella de carbono de la instalación y/o renovación y/o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado: zanja abierta vs. tecnologías sin zanja. *Huella de carbono de la instalación y/o renovación y/o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado: zanja abierta vs. tecnologías sin zanja.* Universidad de los Andes, Bogotá.

Chaves Pabón, S. B., Cárdenas Moreno, D., Avilez Romero, C., & Barajas Bernal, J. (Enero de 2018). Estudio comparativo técnico y económico del sistema del sistema de perforación horizontal ramming y el sistema convencional, estudio de caso. *Revista Ingeniería Solidaria*, 14(24), 16. doi:<https://doi.org/10.16925/in.v14i24.2165>

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. (2019). *Concepto 91411 de 2019*. Bogotá D.C.

COPPARD. (2023). *COPPARD PLANT HIRE LIMITED*. Obtenido de <https://www.coppard.co.uk/pages/quick-links/moling-equipment.php>

Corporation, C. I. (2024). *CNBM*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://ecomexperu.com/CNBM%20Catalogo%20de%20Tuberias%20y%20Conexiones.pdf>

Cosmos. (2024). *Cosmos*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://tuberiadefibradevidrio.com/>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (Septiembre de 2024). *DANE*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2024, de DANE: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc>



- Dolar-Colombia. (2024). *Dolar-Colombia*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2024, de <https://www.dolar-colombia.com/ano/2004>
- Dolar-Colombia. (2024). *Dolar-Colombia*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2024, de Dolar-Colombia: <https://www.dolar-colombia.com/ano/2013>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (09 de Diciembre de 2020). Criterios de selección de tecnologías sin zanja para alcantarillado NS-189. *Criterios de selección de tecnologías sin zanja para alcantarillado NS-189*. Bogotá.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (13 de Julio de 2021). Criterios para la instalación de tuberías sin zanja para acueducto NS-079. *Criterios para la instalación de tuberías sin zanja para acueducto NS-079*. Bogotá.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2017). Norma de construcción para instalación de tubería de acueducto sin zanja por el método de perforación horizontal dirigida.
- FERROSPLANES. (10 de Noviembre de 2024). *PLANES*. Obtenido de PLANES: <https://ferrosplanes.com/tubos-acero-inoxidable-usos/#:~:text=Los%20tubos%20de%20acero%20pueden,millones%20de%20toneladas%20cada%20a%C3%B1o.>
- HERRENKNECHT. (2023). *HERRENKNECHT Tunneling Systems*. Obtenido de HERRENKNECHT Tunneling Systems: <https://www.herrenknecht.com/en/ingeotecnica>. (10 de Noviembre de 2024). *ingeotécnica*. Obtenido de <https://ingeotecnica.com/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2012). *GTC-231 Guía para el uso de perforación máxi-horizontal dirigida para instalación de tubos o conductos de polietileno bajo obstáculos, incluyendo cruce de ríos*. ICONTEC Internacional.
- Instituto de Desarrollo Urbano. (20 de Febrero de 2023). *Instituto de Desarrollo Urbano*. Obtenido de <https://www.idu.gov.co/blog/boletines-de-prensa-idu-1/post/la-tuneladora-mas-grande-de-bogota-esta-en-la-obra-de-la-avenida-68-1629>
- INTERNATIONAL, M. (2024). *MCWANE*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://mcwane.com/upl/downloads/catalog/products/iso-en-tuber-a-de-hierro-d-ctil-651dfd91.pdf>
- JAMAR. (2024). *Prefabricados JAMAR*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://prefabricadosjamar.com/tubos-concreto.html>



- Jannone. (2024). *Jannone Grupo*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://www.jannone.net/es/tubos/tubo-gres-vitrificado/#:~:text=El%20tubo%20de%20gres%20vitrificado,en%20un%20producto%20100%25%20ecol%C3%B3gico>.
- Kumar, R., & Patel, J. (2019). Using Decision-making Criteria Approach for the Selection of Trenchless Construction Method: A Review Study. *Journal of Civil and Construction Engineering*, 9.
- Laboratorio, C. (2024). *CSR Laboratorio*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://csrlaboratorio.es/suelos/horizontes-estructura-clasificacion/>
- Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis*. Journal of Cleaner Production, Ruston, LA, United States.
- Mohit, S., Nezhad Monfared, M. A., Kang, C., & Bayat, A. (2017). Comparative study of greenhouse gas emissions from hand tunneling and pilot tube method underground construction methods. *Journal of Green Building*.
- Monfared, M. A. (2018). Comparison of Trenchless Technologies and Open Cut Methods in New Residential Land Development. *Comparison of Trenchless Technologies and Open Cut Methods in New Residential Land Development*. University of Alberta, Alberta.
- MORENO, T. (2024). *TUBERAA MORENO*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://www.tuberiamoreno.com/productos/especialidades/tuberia-de-fibra-de-vidrio-prfv-gfrp-grp>
- Najafi, D. M., Gokhale, D., R. Calderón, D., & Ma, D. (2021). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal* (Segunda ed.). New York: McGraw Hill.
- PAVCO. (2024). *PAVCO WAVIN*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://pavcowavin.com.co/tuberia-polietileno-acueducto-acuaflex-pavco>
- PERFHORA. (2023). *perfhora TECNOLOGÍA SIN ZANJA*. Obtenido de http://www.perfhora.es/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=36
- PERFOTÉCNICA. (2023). *PERFOTÉCNICA S.A.S. Tecnología sin Zanja*. Obtenido de <https://perfotecnica.com.co/>



- Piratla, K. R., Ariaratnam, S. T., & Cohen, A. (2012). Estimation of CO2 Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project. *Journal of Management in Engineering*.
- Rodriguez Gutierrez, S. M., Molano Garay, C. L., & Vargas Manrique, I. Y. (2016). Matriz cuantitativa de selección de tecnología trenchless para procesos de construcción de alcantarillado en Colombia. *Matriz cuantitativa de selección de tecnología trenchless para procesos de construcción de alcantarillado en Colombia*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C.
- ROTOLIA. (2024). *ROTOLIA*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://www.rotolia.com/blog/que-es-el-pvc-y-sus-caracteristicas/>
- Sánchez, D. A. (2018). *Recomendaciones para el diseño de cruces subfluviales para acueducto y sus obras asociadas*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.
- Santiago, F. M. (2015). MÉTODOS DE EXCAVACIÓN SIN ZANJAS. *MÉTODOS DE EXCAVACIÓN SIN ZANJAS*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.
- Servicio Geológico Mexicano. (2024). *Gobierno de México*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de Gobierno de México: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Introduccion-rocas.html>
- Sihabuddin, S. S., & Ariaratnam, S. T. (2009). Methodology for estimating emissions in underground utility construction operations. *Journal of Engineering, Design and Technology*.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 7.
- Technologies, T. T. (2023). *TERRA Trenchless Technologies*. Obtenido de TERRA Trenchless Technologies: <http://en.bohrshop.de/bilder/webartikel/en/hdd-directional-drilling/1964-5501-00-hdd-directional-drilling-pullers-expander-chuck-standard-.png>
- Tododren. (2024). *Tododren*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de <https://tododren.com/tuberia-de-concreto-reforzado/>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2024). *Ciencia UNAM*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de Ciencia UNAM: <https://ciencia.unam.mx/leer/1247/rocas-mas-dinamicas-e-importantes-para-nuestra-vida-de-lo-que-pensamos>



Universidad Nacional de La Plata. (2024). *UNLP*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de UNLP: <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/98/27598/3f23fc987dbbda82587753c9796000a.pdf>

Wuxi Caston Drill Tools Co., L. (2023). *CASTON S*. Obtenido de <http://hdd-drillpipes.com/1-2-1-integral-guide-drill/>



12. ANEXOS

12.1 ANEXO 1. ÍNDICES IPC SERIE DE EMPALME 100 (DIGITAL)

12.2 ANEXO 2. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN TECNOLOGÍA SIN ZANJA (DIGITAL)

12.3 ANEXO 3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – NIVEL 1 (ASPECTOS DEL SITIO)

- **Escenario 1.** Para este escenario se asume un tipo de terreno igual a gravas arcillosas, con presencia de nivel freático, así mismo, se supone que en el inicio del tramo se cuenta con un ancho de 20,00 m y un largo de 30,00 m, mientras que, para el final del tramo el ancho es igual a 15,00 m y el largo es de 30,00 m.

Según las condiciones de entrada, los resultados obtenidos cumplen adecuadamente, ya que, son aplicables únicamente las tecnologías Pipe Ramming, Microtunelado y Direct Pipe.

Auger Boring, Pilot Tube y los Métodos de compactación no son aplicables con presencia de nivel freático y el método HDD es aplicable con nivel freático, pero solo para suelos arcillosos y arenosos.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|------------------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | GC |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | Si |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 20,00 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 30,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 15,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 30,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 2.** Mantener las condiciones de entrada del escenario anterior, variando únicamente la existencia del nivel freático en el sitio a “No”.

Realizando este ajuste se cumple lo adecuado, las tecnologías Auger Boring y Pilot Tube cambian a aplicables, dado que estas se pueden implementar para las condiciones anteriores sin presencia de nivel freático. El método HDD no cumple con las condiciones de espacio y los métodos de compactación no se pueden aplicar en gravas, continúan siendo inviábiles.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|------------------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | GC |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 20,00 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 30,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 15,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 30,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 3.** Ajuste de las medidas disponibles al inicio y final del tramo.

En este escenario se modifican las medidas del espacio para que la tecnología HDD sea aplicable, se obtiene el resultado esperado. La única tecnología no aplicable son los métodos de compactación, debido al tipo de suelo.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|------------------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | GC |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 47,50 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 90,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 20,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 45,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 4.** Cambio del tipo de terreno presente en el sitio a cantos o rocas de hasta 1/3 del diámetro de perforación.

Con este ajuste, se obtienen los resultados esperados, ya que, la tecnología Pipe Ramming se descarta de las anteriores, ya que, esta no es aplicable para estas condiciones.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|---|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | Cantos o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería a instalar |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 47,50 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 90,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 20,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 45,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 5.** Cambio de la condición del nivel freático a “Sí” con las anteriores condiciones.

Con este ajuste, se obtienen los resultados esperados, se descartan las tecnologías Auger Boring y Pilot Tube porque estas no son aplicables con nivel freático, mientras que Pipe Ramming y Métodos de compactación no son aplicables para cantos o bolos de hasta 1/3 del diámetro de perforación.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|---|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | Cantos o bolos de hasta 1/3 del diámetro de la tubería a instalar |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | Si |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 47,50 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 90,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 20,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 45,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 6.** Cambio de la condición del nivel freático a “No” y ajuste del tipo de terreno a suelos cohesivos (Limos inorgánicos). Adicionalmente se reduce el espacio disponible significativamente.

Con estos ajustes se cumple lo requerido, las tecnologías factibles son Auger Boring, Pipe Ramming, Pilot Tube y Métodos de compactación.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|------------------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | ML |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 5,00 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 20,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 5,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 20,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | NO APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 7.** Cambio de las dimensiones para que todas las tecnologías sean aplicables.

Al realizar los ajustes en las medidas disponibles, se generan los resultados esperados, todas las tecnologías analizadas son aplicables.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|------------------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | ML |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 50,00 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 100,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 30,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 50,00 |

Limpia

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 8.** Asignación del tipo de terreno igual a roca sólida y ajuste de las dimensiones.

Realizando los ajustes en las medidas disponibles, se generan los resultados esperados, solo las tecnologías de Microtunelado y Direct Pipe son aplicables.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor a ingresar |
|---|---|--------|------------------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | Roca sólida |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 20,00 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 30,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 20,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 50,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

12.4 ANEXO 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – NIVEL 2 (CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA A INSTALAR)

Para los primeros escenarios a evaluar se asumió que en el Nivel 1 todas las tecnologías de instalación de tubería sin zanja son aplicables.

- **Escenario 1.** En este escenario se busca instalar como tubería de servicio una tubería de acero de 250 mm de diámetro. Sin necesidad de carcasa.

Con base en estas características, las tecnologías Auger Boring, HDD, Pipe Ramming y Pilot Tube son aplicables.

Las tecnologías Microtunelado y Direct Pipe pueden instalar tubería de acero, sin embargo, el diámetro es más pequeño del diámetro mínimo de estas dos. Mientras que,



la tecnología Métodos de Compactación no puede instalar tubería de acero y el diámetro de la tubería está por encima del máximo.

Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | Acero |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 250,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | No |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | VIABLE |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | NO APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 2.** Variar el diámetro de la tubería de servicio a 500 mm.

De acuerdo con este cambio, la tecnología Microtunelado se vuelve aplicable. Se descartan únicamente las tecnologías Direct Pipe y MC.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | Acero |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 500,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | No |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | VIABLE |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 3.** Variar el diámetro de la tubería de servicio a 750 mm.

De acuerdo con este cambio, la tecnología DP se vuelve aplicable. Se descarta únicamente la tecnología MC.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | Acero |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 750,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | No |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | VIABLE |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 4.** Cambio del material de instalación a HDPE. Dejando aún que no se podría utilizar carcasa de acero.

Con este ajuste se obtienen los resultados esperados, ya que, se descartan automáticamente las tecnologías que requieren carcasa como AB, PR y DP, adicionalmente, se descartan los métodos MT y PT porque no logran instalar este material de tubería. MC se descarta porque el diámetro de la tubería es superior al máximo. La única tecnología aplicable sería HDD.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | HDPE |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 750,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | No |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | VIABLE |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | NO APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 5.** Cambio de la restricción del uso de carcasa a “Sí”.

Con este ajuste, se obtienen los resultados esperados, se vuelven aplicables las tecnologías AB, PR y DP, ya que el diámetro aproximado de la carcasa requerida está dentro del rango de diámetros que estas tecnologías manejan. Adicionalmente, se vuelven aplicables las tecnologías MT y PT, ya que, se permite la instalación de carcasa de acero y estas tecnologías pueden instalar este material, el diámetro de la carcasa se encuentra dentro del rango permitido.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|--------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | HDPE |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 750,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | Si |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | 850,00 |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 6.** Cambio del diámetro de la tubería de servicio a 1100 mm.

Con este ajuste se dan los resultados esperados, dado que se descartan las tecnologías Auger Boring y Pilot Tube, porque el diámetro aproximado de la carcasa es superior al máximo diámetro instalable por estas. Solo es aplicable HDD, PR, MT y DP.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|---------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | HDPE |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 1100,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | Si |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | 1200,00 |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 7.** Cambio del material de la tubería a RCP y del diámetro de esta a 1000 mm. Cambio de la restricción del uso de carcasa a “No”.

Realizando los ajustes se generan los resultados esperados. Las tecnologías aplicables serían solamente MT y PT.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | RCP |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 1000,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | No |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | VIABLE |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 8.** Cambio de la restricción del uso de carcasa a “Sí”.

Realizando este ajuste se vuelven aplicables las tecnologías AB, PR y DP. Adicionalmente, se vuelve aplicable la tecnología HDD, ya que, esta tecnología puede instalar tuberías de acero del diámetro de carcasa requerida, por lo cual, podría implementarse.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|---------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | RCP |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 1000,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | Si |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | 1100,00 |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 9.** Ajuste material y diámetro para que sea aplicable la tecnología MC.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | HDPE |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 150,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | No |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | VIABLE |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | NO APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 10.** Ajuste en el Nivel 1 para que no todas las tecnologías sean aplicables y colocar las características del Escenario 1 en el Nivel 2.

A continuación, se muestra el ajuste del Nivel 1 según las características del sitio asumidas con el fin de que no todas las tecnologías sean aplicables.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-------|
| 1 | Tipo de terreno presente en el sitio (Grupo de suelo correspondiente, cantos o bolos o roca sólida) | - | ML |
| 2 | ¿Se cuenta con nivel freático presente en el sitio por encima de la profundidad de instalación? | - | No |
| 3 | Ancho disponible (al inicio del tramo) | m | 10,00 |
| 4 | Largo disponible (al inicio del tramo) | m | 20,00 |
| 5 | Ancho disponible (al final del tramo) | m | 10,00 |
| 6 | Largo disponible (al final del tramo) | m | 20,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | NO APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

Los resultados del Nivel 1 para este último escenario evidencian que las tecnologías HDD, MT y DP no son aplicables. Posteriormente, se asignan las mismas características del Escenario 1 del Nivel 2 y se obtienen los resultados esperados, ya que, se distinguen en el Nivel 2 las diferentes tecnologías que no fueron viables con las características dadas en el Nivel 1.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|--|--------|-----------|
| 1 | Material de la tubería de servicio | - | Acero |
| 2 | Diámetro de la tubería de servicio | mm | 250,00 |
| 3 | Si el material de la tubería de servicio es diferente al acero, ¿se podría utilizar una carcasa de acero si la tecnología lo requiere? Seleccione Si o No. Si la tubería de servicio a instalar es de acero, seleccione "No". | - | No |
| 4 | Diámetro de la carcasa requerida | mm | No aplica |

Nota: El valor dado para el diámetro de carcasa requerido es aproximado.

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | VIABLE |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | DESCARTADA EN N1 |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | DESCARTADA EN N1 |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | DESCARTADA EN N1 |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

12.5 ANEXO 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – NIVEL 3 (CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO)

Para los primeros escenarios a evaluar se asumió que en el Nivel 1 todas las tecnologías son aplicables y para el Nivel 2 todas son aplicables, excepto Métodos de Compactación, ya que sus características requeridas son diferentes a las demás.

- **Escenario 1.** En este escenario, se busca instalar un tramo de tubería de 100 m de largo, sin precisión y a una profundidad de 2,00 m. El diámetro de la tubería es de 1000 mm, en acero, sin carcasa.

Con base en estas características, las tecnologías Auger Boring, Pipe Ramming y Microtunelado son aplicables. El método Microtunelado garantiza una precisión alta, no obstante, el hecho de que no se requiera precisión, no excluye el uso de esta tecnología. Para estas tecnologías, se cumple con la profundidad adecuada.



Las tecnologías HDD y Direct Pipe pueden instalar la longitud del caso, sin embargo, la profundidad no supera la mínima requerida, mientras que MC fue descartada en el Nivel 2.

Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|---------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 100,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Sin precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 2,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N2 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 2.** Disminuir la longitud de instalación a 60 m. El diámetro de la tubería es de 1000 mm, sin carcasa.

De acuerdo con este cambio, la tecnología Pilot Tube se vuelve aplicable, ya que, la longitud de instalación es menor a la máxima instalable. Se descartan únicamente las tecnologías HDD, Direct Pipe y MC.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|---------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 60,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Sin precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 2,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | NO APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N2 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 3.** Aumento de la profundidad de instalación a 7,00 m.

De acuerdo con este cambio, las tecnologías HDD y Direct Pipe se vuelven aplicables, dado que la profundidad de instalación es superior a la mínima.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|---------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 60,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Sin precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 7,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | APLICA |
| PIPE RAMMING | APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N2 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 4.** Cambio del requerimiento de precisión a “Buena precisión”.

Con este ajuste se obtienen los resultados esperados, ya que, se descartan automáticamente las tecnologías que no garantizan una buena precisión como AB, HDD y PR.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-----------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 60,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Buena precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 7,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N2 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 5.** Aumento de la longitud de instalación a 250 m.

Con este ajuste se obtienen los resultados esperados, la tecnología Pilot Tube se vuelve no aplicable, dado que la longitud de instalación supera la longitud máxima de instalación.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-----------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 250,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Buena precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 7,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | APLICA |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N2 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 6.** Cambio de la longitud de instalación a 100 m y reducción del diámetro de instalación en el Nivel 2 a 600 mm.

Con estos ajustes se cumple que se descarta la tecnología Direct Pipe en el Nivel 2, porque el diámetro de instalación es inferior al mínimo, por lo cual, la única tecnología aplicable sería Microtunelado.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-----------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 100,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Buena precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 7,00 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | DESCARTADA EN N2 |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N2 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 7.** Reducción de la profundidad de instalación a 1,50 m.

Realizando este ajuste ninguna tecnología sin zanja sería viable, ya que, no se dan las condiciones requeridas para su uso.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-----------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 100,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Buena precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 1,50 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | NO APLICA |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | NO APLICA |
| MICROTUNELADO | NO APLICA |
| PILOT TUBE | NO APLICA |
| DIRECT PIPE | DESCARTADA EN N2 |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | DESCARTADA EN N2 |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 8.** Cambio de las condiciones en el Nivel 2 a una tubería de HDPE y de 200 mm de diámetro.

Realizando estos ajustes todas las tecnologías se descartan en el Nivel 2, excepto HDD y MC que se descartan en el Nivel 3 por las condiciones dadas. Ninguna tecnología sin zanja sería viable a aplicar.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|-----------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 100,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Buena precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 1,50 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | DESCARTADA EN N2 |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | DESCARTADA EN N2 |
| MICROTUNELADO | DESCARTADA EN N2 |
| PILOT TUBE | DESCARTADA EN N2 |
| DIRECT PIPE | DESCARTADA EN N2 |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | NO APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |

- **Escenario 9.** Ajuste de la longitud de instalación a 40 m, la profundidad de instalación a 2,50 m y el requerimiento de precisión a “Sin precisión”.

Con estos ajustes se logra lo esperado, ya que, la tecnología MC se vuelve aplicable, siendo la única tecnología viable.



Ingrese en las celdas de color amarillo los valores solicitados:

| | Variable | Unidad | Valor |
|---|---|--------|---------------|
| 1 | Longitud de instalación | m | 40,00 |
| 2 | Precisión requerida | - | Sin precisión |
| 3 | Profundidad de instalación (A cota clave) | m | 2,50 |

| TECNOLOGÍA SIN ZANJA | APLICABILIDAD |
|---------------------------------|-------------------------|
| AUGER BORING | DESCARTADA EN N2 |
| HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING | NO APLICA |
| PIPE RAMMING | DESCARTADA EN N2 |
| MICROTUNELADO | DESCARTADA EN N2 |
| PILOT TUBE | DESCARTADA EN N2 |
| DIRECT PIPE | DESCARTADA EN N2 |
| MÉTODOS DE COMPACTACIÓN | APLICA |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 1 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 2 | Diligenciar información |
| TECNOLOGÍA ADICIONAL 3 | Diligenciar información |