

TESIS DE MAESTRIA (Tesis II)

**HUELLA DE CARBONO DE LA INSTALACIÓN Y/O RENOVACIÓN Y/O
REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO:
ZANJA ABIERTA VS. TECNOLOGÍAS SIN ZANJA**

VADIM ORLANDO NARANJO CALVO

Asesor: Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
ENERO,2023**



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, mi madre, mi padre, al resto de mi familia y a mis amigos por su apoyo y paciencia en el desarrollo del presente trabajo.

Asimismo, agradezco a mi asesor de tesis ingeniero Juan Guillermo Saldarriaga por su acompañamiento a lo largo del desarrollo de esta tesis y por su continuo apoyo. De igual manera, agradezco a todas las personas que aportaron con información, ideas y su asesoría al desarrollo del presente trabajo.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. MARCO TEORICO	15
2.1 CARBONO EQUIVALENTE.....	15
2.2 HUELLA DE CARBONO	15
2.3 ANALISIS DE CICLO DE VIDA.....	16
2.4 SISTEMAS DE ALCANTARILLADO.....	18
2.5 SISTEMAS DE ACUEDUCTO	19
2.6 FALLAS EN SISTEMAS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO	19
2.7 METODO CONVENCIONAL DE ZANJA ABIERTA	21
2.8 TECNOLOGIAS SIN ZANJA	23
2.8.1 MÉTODOS DE INSTALACIÓN.....	23
2.8.1.1 PIPE JACKING, UTILITY TUNNELING, MICROTUNELADO, MICROTUNELADO CON TUBO PILOTO	25
2.8.1.2 HORIZONTAL AUGER BORING (HAB)	28
2.8.1.3 HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING (HDD)	29
2.8.1.4 PERFORACIÓN POR GOLPEO (PIPE RAMMING)	30
2.8.1.5 RAMMING ASISTIDO HIDRÁULICAMENTE(ADB)	31
2.8.1.6 COMPARACIÓN.....	33
2.8.2 MÉTODOS DE RENOVACIÓN Y REHABILITACIÓN	34
2.8.2.1 MÉTODOS DE RENOVACIÓN	35
2.8.2.1.1 PIPE BURSTING	35
2.8.2.1.2 PIPE EATING.....	37
2.8.2.1.3 PIPE REAMING.....	38
2.8.2.1.4 TUNNEL LINER	39
2.8.2.1.5 VIDA ÚTIL DE LOS MÉTODOS.....	39
2.8.2.2 MÉTODOS DE REHABILITACIÓN	40

2.8.2.2.1	CLOSE FIT SLIP LINING	40
2.8.2.2.2	CIPP	42
2.8.2.2.3	SPIRAL WOUND LINING	43
2.8.2.2.4	REPARACIÓN PUNTUAL (POINT REPAIR).....	45
2.8.2.2.5	VIDA UTIL DE LOS MÉTODOS.....	46
3.	ESTADO DEL ARTE	47
3.1	IMPACTOS AMBIENTALES.....	47
3.1.1	HUELLA DE CARBONO	47
3.1.2	HUELLA DE CARBONO A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA DE LAS TUBERIAS	56
3.2	IMPLEMENTACIÓN TECNOLOGIAS SIN ZANJA.....	68
3.3	NUEVOS MATERIALES DE TUBERIAS	74
3.4	IMPACTOS SOCIALES	76
4.	CASOS DE ESTUDIO	84
4.1	CASO I: FASE 2 DE LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO 3 DE LA LÍNEA TIBITOC-CASABLANCA.....	84
4.2	CASO II: LAS DELICIAS-LA VIEJA	88
5.	MODELACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO	93
5.1	CASO I: FASE 2 DE LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO 3 DE LA LÍNEA TIBITOC-CASABLANCA.....	93
5.1.1	ESCENARIO ACTUAL (SIN ZANJA).....	94
5.2	CASO II: LAS DELICIAS-LA VIEJA	116
5.2.1	CIPP	117
6.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	124
6.1	CASO DE ESTUDIO I.....	124
6.2	CASO DE ESTUDIO II	130
6.3	COMPENSACIÓN.....	134
7.	CONCLUSIONES.....	138
8.	RECOMENDACIONES.....	141
9.	BIBLIOGRAFIA.....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.Marco de referencia ACV.....	17
Figura 2.Excavación a zanja abierta.....	21
Figura 3.Clasificación tecnologías sin zanja.....	23
Figura 4.Métodos sin zanja para la instalación de tuberías.....	23
Figura 5.Métodos horizontal earth boring.....	24
Figura 6.Usos métodos de instalación sin zanja.....	24
Figura 7.Hincado de tubería(Pipe Jacking).....	25
Figura 8.Microtunelado(Microtunnelling).....	26
Figura 9.Microtunelado con tubo piloto(Pilot-tube microtunneling).....	27
Figura 10.Túneles de servicio público(Utility tunneling).....	28
Figura 11.Horizontal auger boring (HAB).....	29
Figura 12.Horizontal directional drilling (HDD).....	30
Figura 13.Perforación por golpeo(Pipe ramming).....	31
Figura 14.Ramming Asistido Hidráulicamente(ADB).....	32
Figura 15.Pipe bursting.....	36
Figura 16.Eschema método pipe bursting.....	36
Figura 17.Pipe eating.....	37
Figura 18.Pipe reaming.....	38
Figura 19.Sección longitudinal método tunnel liner.....	39
Figura 20.Close fit slip lining.....	40
Figura 21.Tecnología close fit slip lining.....	41
Figura 22.Maquinaria utilizada en el método CIPP.....	42
Figura 23.Eschema CIPP.....	43
Figura 24.Rehabilitación de tuberías de diferente sección con el método spiral wound lining.....	44
Figura 25.Spiral wound lining.....	44
Figura 26.Instalación Spiral Wound.....	45
Figura 27.Técnica reparación puntual.....	46
Figura 28. Límites para el cálculo de la huella de carbono.....	48
Figura 29.Consumo energético considerando el tipo de suelo y el diámetro de la tubería.....	53
Figura 30.Consumo energético considerando la condición del suelo y el tipo de superficie.....	54
Figura 31.Consumo energético considerando la longitud de la tubería y la profundidad de excavación.....	55
Figura 32.Análisis de ciclo de vida de las tuberías.....	56
Figura 33.Proceso de producción del PVC.....	57
Figura 34.Sección transversal CIPP.....	58
Figura 35.Emissiones de CO2 durante la etapa de fabricación.....	58
Figura 36.Emissiones de CO2 durante la fase de instalación.....	60
Figura 37.Optimización emisiones durante la fase de instalación.....	61
Figura 38.Emissiones de CO2 durante la fase de operación.....	61

Figura 39.Emisiones de CO ₂ durante la fase de disposición y reciclaje de materiales.....	62
Figura 40.Optimización emisiones durante la fase de fabricación.....	63
Figura 41.Comparación emisiones de carbono durante el ciclo de vida de las tuberías	64
Figura 42.Emisiones de carbono durante el ciclo de vida de las tuberías, su etapa de operación y la etapa de fabricación.....	65
Figura 43.Localización del proyecto Czajka.....	65
Figura 44.Modelo de cálculo proyecto Czajka.....	66
Figura 45.Total de emisiones de CO ₂ con zanja y sin zanja.....	67
Figura 46.Total de emisiones de CO ₂ por categorías	67
Figura 47.Emisiones pipe bursting vs método sin zanja	69
Figura 48.Caso de estudio ciudad de Bowling Green en el condado de Wood, Ohio.....	71
Figura 49.Comparación emisiones de CO ₂ método sin zanja vs pipe bursting	71
Figura 50.Localización proyecto instalación By Pass de la estación de bombeo.....	72
Figura 51.Modelo en Symphony del proyecto	73
Figura 52.Comparación emisiones dióxido de carbono equivalente.....	74
Figura 53. Sección transversal tuberías compuestas de bobinado de bambú (BWCP)	75
Figura 54.Vista pozo a pozo del proyecto.....	78
Figura 55.Curva de costos de la reducción de los costos sociales por medio de la optimización.....	79
Figura 56.Curva de costos de la reducción de los costos sociales por medio de un premium	80
Figura 57.Resultados de los impactos ambientales promedio del estudio	81
Figura 58.Costos ambientales tecnología con zanja abierta vs. CIPP	81
Figura 59.Costos sociales tecnología con zanja abierta vs. CIPP	82
Figura 60.Costos ambientales y sociales tecnología con zanja abierta vs. CIPP	82
Figura 61.Trazado línea Tibitoc- Casablanca.....	85
Figura 62.Tramos de la línea Tibitoc-Casablanca.....	85
Figura 63.Etapas de la rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca.	86
Figura 64.Fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca.....	87
Figura 65.Zonas de intervención fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca	88
Figura 66.Localización proyecto Las Delicias-La Vieja.....	89
Figura 67.Resultados obtenidos con el sondeo del colector.....	90
Figura 68.Tramos rehabilitados con la tecnología Spiral Wound	91
Figura 69.Tramos rehabilitados con la tecnología Panel Liner	91
Figura 70.Tramos instalados con la tecnología Pipe Jacking.....	92
Figura 71.Punto central del proyecto correspondiente al caso de estudio I	94
Figura 72.Tablestaca	97
Figura 73.Pantalla pre-excavada	98
Figura 74.Procesos caso de estudio I escenario sin zanja	108
Figura 75.Procesos caso de estudio I escenario zanja abierta	116
Figura 76.Procesos caso de estudio II-Rehabilitación con CIPP	120
Figura 77.Punto central del proyecto correspondiente al caso de estudio I	120

Figura 78. Procesos caso de estudio II-Rehabilitación con CIPP	123
Figura 79. Interfaz de selección de método de configuración de cálculo en SimaPro Flow	124
Figura 80. Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I.....	125
Figura 81. Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I.....	126
Figura 82. Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I.....	127
Figura 83. Resultados de emisiones escenario con zanja abierta caso I.....	128
Figura 84. Comparación resultados escenario sin zanja Vs. con zanja abierta	129
Figura 85. Resultados de emisiones rehabilitación CIPP caso II	131
Figura 86. Resultados de emisiones rehabilitación CIPP caso II	131
Figura 87. Resultados de emisiones rehabilitación Spiral Wound caso II	132
Figura 88. Resultados de emisiones rehabilitación Spiral Wound caso II	133
Figura 89. Comparación resultados rehabilitación CIPP y Spiral Wound	133
Figura 90. Compensación de huella de carbono según Ley 1819 de 2016 caso I.....	135
Figura 91. Compensación de huella de carbono según Ley 1819 de 2016 caso II.....	136
Figura 92. Compensación de huella de carbono según norma europea caso I.....	136
Figura 93. Compensación de huella de carbono según norma europea caso II.....	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que afectan el deterioro de las tuberías de alcantarillado	20
Tabla 2. Ventajas y desventajas método a zanja abierta	22
Tabla 3. Comparación métodos sin zanja para la instalación de tuberías	33
Tabla 4. Profundidad mínima de excavación métodos de instalación sin zanja	34
Tabla 5. Diferencias tecnologías sin zanja para la renovación y rehabilitación de tuberías	35
Tabla 6. Vida útil y materiales de las tuberías renovadas con métodos sin zanja abierta	40
Tabla 7. Vida útil y materiales de las tuberías rehabilitadas con métodos sin zanja abierta	46
Tabla 8. Clasificación métodos con y sin zanja con base en las emisiones de CO ₂	49
Tabla 9. Clasificación materiales de tubería con base en las emisiones de CO ₂	49
Tabla 10. Comparación instalación tuberías empelando el método de zanja abierta y sin zanja para dos diámetros diferentes	50
Tabla 11. Aplicación métodos de instalación, renovación y rehabilitación de acuerdo con el diámetro de las tuberías	51
Tabla 12. Variables consideradas relacionadas con las tuberías consideradas en el estudio	51
Tabla 13. Supuestos realizados en el estudio	52
Tabla 14. Reducción en el consumo de carbono y el consumo energético de los métodos sin zanja comparados con el método con zanja abierta	55
Tabla 15. Porcentajes de reciclaje y disposición de los materiales de las tuberías así como el consumo de energía requerido	62
Tabla 16. Diámetros y longitudes de tubería instalada con método con y sin zanja	68
Tabla 17. Parámetros medidos y calculados para las tuberías rehabilitadas con el método CIPP	70
Tabla 18. Comparación consumo energético tubería BWCP comparada con otros materiales	75
Tabla 19. Valores mínimos y máximos por metro de tubería y por día para el cálculo de los costos sociales	77
Tabla 20. Costos sociales caso de estudio 1	77
Tabla 21. Costos sociales caso de estudio 2	78
Tabla 22. Resultados de la estimación de tKm del transporte de tuneladoras desde la fábrica hasta la obra y especificación de selección de procesos en Simapro Flow	95
Tabla 23. Resultados de la estimación de tKm del transporte de equipos mayores hasta la obra y especificación de selección de procesos en Simapro Flow	96
Tabla 24. Descripción de consumo de combustible en el proceso de instalación de la contención y selección de procesos en Simapro Flow	99
Tabla 25. Descripción de consumo de combustible en el proceso de vaciado del pozo, instalación de los refuerzos horizontales y las estructuras en concreto, y selección de procesos en Simapro Flow	99
Tabla 26. Descripción de consumo de combustible generador durante la etapa de construcción de pozos y selección de procesos en Simapro Flow	100
Tabla 27. Resultados de la estimación de tKm del montaje-desmontaje y especificación de selección de procesos en Simapro Flow	100

Tabla 28.Resultados de la estimación de tKm del suministro de tuberías y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	101
Tabla 29.Resultados de la estimación de tKm del suministro de agua limpia y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	102
Tabla 30.Resultados de la estimación de tKm del retiro de lodo líquido y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	103
Tabla 31.Resultados de la estimación de tKm del suministro de combustible y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	104
Tabla 32.Resultados de la estimación de tKm del retiro del material de excavación y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	105
Tabla 33.Descripción de consumo de combustible retroexcavadora y selección de procesos en Simapro Flow.....	106
Tabla 34.Descripción de consumo de combustible generación energética y selección de procesos en Simapro Flow.....	107
Tabla 35.Descripción de consumo de combustible de la soldadura de las juntas de la tubería y selección de procesos en Simapro Flow.....	107
Tabla 36.Descripción de consumo de combustible etapa de demolición de la carpeta asfáltica y selección de procesos en Simapro Flow.....	109
Tabla 37.Descripción de consumo de combustible etapa de excavación mecánica y selección de procesos en Simapro Flow.....	110
Tabla 38.Resultados de la estimación de tKm del retiro del material de excavación y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	111
Tabla 39.Descripción de consumo de combustible etapa de excavación mecánica y selección de procesos en Simapro Flow.....	112
Tabla 40.Resultados de la estimación de tKm del suministro de material de relleno y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	113
Tabla 41.Descripción de consumo de combustible etapa de recuperación de espacio público y selección de procesos en Simapro Flow.....	114
Tabla 42.Resultados de la estimación de tKm del suministro de asfalto y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	115
Tabla 43.Resultados de la estimación de la movilización de equipos y materiales CIPP, y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	118
Tabla 44.Descripción de consumo de combustible etapa de rehabilitación CIPP y selección de procesos en Simapro Flow.....	119
Tabla 45.Resultados de la estimación de la movilización de equipos y materiales Spiral Wound, y especificación de selección de procesos en Simapro Flow.....	121
Tabla 46.Descripción de consumo de combustible etapa de rehabilitación Spiral Wound y selección de procesos en Simapro Flow.....	122
Tabla 47.Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I.....	124
Tabla 48.Resultados de emisiones escenario con zanja abierta caso I.....	126
Tabla 49.Comparación resultados escenario sin zanja Vs. con zanja abierta.....	128



Tabla 50. Rendimiento tecnologías	129
Tabla 51. Resultados de emisiones rehabilitación CIPP caso II	130
Tabla 52. Resultados de emisiones rehabilitación Spiral Wound caso II.....	132
Tabla 53. Comparación resultados rehabilitación CIPP y Spiral Wound	133
Tabla 54. Resultados comparativos de costos de compensación caso I.....	134

1. INTRODUCCIÓN

Para la comunidad científica, así como para diversos grupos sociales, empresariales y políticos de diferentes países del mundo, el cambio climático, el cual es originado por actividades humanas, constituye uno de los mayores desafíos ambientales que se interponen en el camino hacia el desarrollo sostenible. La causa de dicho fenómeno se encuentra en las altas concentraciones atmosféricas de Gases Efecto Invernadero (GEI), las cuales serían responsables del aumento de la temperatura global del planeta. De acuerdo con el panel Intergubernamental sobre Cambio Climático con sede en Ginebra-Suiza, el riesgo del cambio climático es severo y su impacto aumentará notablemente con un incremento de las temperaturas en 2 °C por encima de las registradas en la época preindustrial (Valderrama, Espíndola, & Quezada, 2011).

Es por ello que el cambio climático constituye un problema ambiental y de desarrollo con profundos impactos potenciales en la sociedad, la economía y los ecosistemas. En consecuencia, en la agenda comercial mundial han aparecido nuevos temas que han cobrado relevancia como lo es la Huella de Carbono (HC), la cual se define como la cantidad de gases efecto invernadero emitidos a la atmósfera, derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios, y se ha transformado en un patrón de competitividad. Igualmente, este indicador ha permitido que en el ámbito internacional los temas relacionados con las emisiones como la fuga del carbono, el análisis del ciclo de vida en la cadena productiva y comercial adquirieran relevancia, así como también las responsabilidades en torno a la contabilidad global del carbono (Valderrama, Espíndola, & Quezada, 2011). Esto ha generado que países comprometidos con el tema ambiental presionen a los países en vías de desarrollo para que se comprometan e implementen medidas como los impuestos al carbono, los programas de transacción de derechos de emisión, las exigencias de eficiencia energética y el control de emisiones de GEI.

En países en vías de desarrollo como Colombia y otros países latinoamericanos, se busca tener una economía acorde con las aspiraciones del desarrollo sostenible y menos vulnerable a las exigencias climáticas de un paradigma económico carbono reduccionista por lo cual se hace necesario que los sectores productivos avancen rápidamente en procesos de cuantificación y disminución de los efectos climáticos con el fin de resguardar su actual posición competitiva (Valderrama, Espíndola, & Quezada, 2011).

Igualmente, desde un punto de vista local las ciudades son quienes más contribuyen al cambio climático, según ONU-Habitat, las ciudades son responsables de más del 60% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Se espera que a mediados de siglo las dos terceras partes de la población del planeta se concentre en las ciudades donde se está provocando el aumento en la demanda de energía y las emisiones de GEI como consecuencia de la concentración en los núcleos urbanos de las actividades productivas, de transporte y comerciales (Navarro Torres, Mena Nieto, Bravo Aranda, & Hernandez, 2021).

A su vez, el aumento de la población urbana hace necesaria la instalación y la renovación y/o rehabilitación de tramos de tubería en sistemas de acueducto y alcantarillado, lo cual es importante puesto que asegura la confiabilidad en lo que respecta al funcionamiento hidráulico, la estabilidad estructural, así como aspectos ambientales de conformidad con la normatividad vigente y los criterios de ingeniería contemporáneos. De acuerdo con lo anterior, la renovación de tuberías se realiza con el

fin atender reparaciones programadas de tramos de la red que por su funcionamiento afectan su nivel de servicio mientras que su rehabilitación tiene como fin de atender reparaciones puntuales de la misma buscando dar continuidad al funcionamiento del sistema (Sánchez, 2011) por lo tanto con el fin de responder a los requerimientos hidráulicos de evitar inundaciones por insuficiencias en el primer caso, deterioros y colapsos de los tramos de tubería más viejos en el segundo, se hace necesario en Colombia la renovación y/o rehabilitación de las tuberías de los sistemas de acueducto y alcantarillado debido a su edad, así como al incremento y densificación de las áreas pobladas (Sánchez, 2011).

En ese orden de ideas, para la instalación, renovación y rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado puede emplearse la tecnología con zanja abierta la cual se fundamenta en la excavación de las zonas en las cuales se realizará la intervención de las tuberías. Este es un método altamente invasivo, el cual requiere de gran cantidad de maquinaria, recursos humanos y recursos económicos. El uso de esta tecnología puede generar diversos impactos como la producción de residuos, gases, material particulado o el deterioro ecológico como consecuencia de la intervención invasiva en las zonas determinadas. De igual forma, se pueden presentar efectos en la movilidad, costos y duración de las obras, así como la interferencia con redes prestadoras de otros servicios o daños a propiedades o vías públicas (Cuello Mendoza, 2021). Por otra parte, el desarrollo de diferentes tecnologías y equipos ha generado cambios en la instalación y renovación de tuberías, lo cual han logrado facilitar la instalación de estos servicios causando una excavación mínima y la disminución de impactos sociales, ambientales, en el tráfico, entre otros. Estos métodos sin zanja se caracterizan por tener poca intervención y un proceso de excavación reducido. Dentro de sus ventajas se encuentran que permiten disminuir los daños en pavimentos, aumentar el tamaño de las tuberías, reducir la interferencia con otros servicios públicos, etc. De igual manera se han logrado desarrollar e implementar diferentes tecnologías, las cuales permiten renovar y rehabilitar tuberías, sin embargo, estas tecnologías o metodologías poseen distintos limitantes (Cuello Mendoza, 2021).

Igualmente, se han desarrollado diferentes investigaciones alrededor del tema de la excavación sin zanja y se han creado organizaciones a nivel mundial que promulgan su implementación teniendo en cuenta los beneficios ambientales y económicos que lleva consigo (Sánchez, 2011). Asimismo, desde hace ya varias décadas, la empresa pública y privada en Colombia ha venido desarrollando gran parte de sus proyectos de renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado a zanja abierta, pero la situación ha tenido cambios importantes teniendo en cuenta la intervención de las instituciones educativas y de los nuevos profesionales interesados en el tema que hoy en día tienen una mayor conciencia ambiental y son conocedores de los múltiples beneficios asociados con estas. Asimismo, se debe tener en cuenta que hoy en día los materiales y equipos son más asequibles, y que a nivel nacional se han ajustado los procedimientos a las condiciones locales favoreciendo las futuras implementaciones de dichas tecnologías (Sánchez, 2011).

Paralelamente, como se mencionó anteriormente debido a la reciente atención que se le presta al cambio climático y el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero, el análisis de huella de carbono se está volviendo cada vez más popular en todas las industrias. Además, la industria de la construcción es el principal productor de gases de emisiones de efecto invernadero por lo cual este sector necesita identificar los beneficios potenciales del análisis de huella de carbono para cada proyecto (A. A. Alsadi & Matthews, 2020). No obstante, la mayoría de las empresas constructoras de

tuberías no evalúan sus emisiones de carbono a pesar de que utilizan varios materiales y métodos para instalar nuevas tuberías o rehabilitar las existentes. En consecuencia, la mayoría de las empresas consideran solo los costos directos antes de elegir el método de instalación e ignoran por completo los costos sociales y el impacto ambiental porque cuantificarlos es un desafío para muchas empresas constructoras y de servicios públicos teniendo en cuenta que muchos de los factores son desconocidos o no están disponibles (A. A. Alsadi & Matthews, 2020).

En consecuencia, los aspectos anteriores generaron la motivación para adelantar esta tesis, en la cual en primer lugar se identificarán y describirán las principales características, el método constructivo, así como las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos para la instalación, renovación y rehabilitación tanto de la tecnología con zanja abierta como de la tecnología sin zanja abierta. En segundo lugar, se realizará una revisión del estado del arte a nivel internacional respecto de las investigaciones realizadas sobre los impactos ambientales y sociales de la instalación, rehabilitación y renovación de tuberías de sistemas de acueducto y alcantarillado empleando tanto tecnologías con zanja abierta como tecnologías sin zanja, en especial considerando lo relacionado con la huella de carbono.

Resultado de lo anterior se encontrará que la mayoría de los estudios realizados a la fecha se enfocan en los costos directos de diferentes métodos de instalación, rehabilitación y renovación sin zanja y con zanja, por lo cual se hace necesario cuantificar cuales son los impactos ambientales en términos de toneladas de carbono equivalente generados por la instalación, renovación y rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado empleando tecnologías con y sin zanja. Esto permitirá verificar si las tecnologías sin zanja generan menores impactos ambientales en términos de toneladas de carbono equivalente que las tecnologías con zanja para la instalación, rehabilitación y renovación de tuberías de sistemas de acueducto y alcantarillado. De igual forma, a partir de un análisis de ciclo de vida (ACV) es posible determinar la huella de carbono mediante la estimación de las emisiones de CO₂ equivalente de cada una de las etapas del ciclo de vida: fabricación, transporte, instalación, uso y disposición final. Es por ello que se identificaron y estudiaron dos casos de estudio en la ciudad de Bogotá, uno correspondiente a la instalación de tuberías de acueducto y otro de rehabilitación de tuberías de alcantarillado, ambos con tecnología sin zanja, en los cuales se pueda determinar la huella de carbono de la instalación y rehabilitación de estas tuberías de acueducto y alcantarillado empleando tecnologías con y sin zanja. Posteriormente, se realizó para cada caso de estudio un análisis de ciclo de vida (ACV), el cual se limitó a la etapa de instalación y/o renovación y/o rehabilitación de las tuberías de acueducto y alcantarillado, este estudio se realizó haciendo uso del software computacional Simapro.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el impacto en términos de toneladas de carbono equivalente de las tecnologías con y sin zanja para la instalación y/o rehabilitación y/o renovación de tuberías de sistemas de acueducto y alcantarillado a través de un análisis de ciclo de vida con el fin de establecer una comparación que ayude a determinar a los tomadores de decisiones que tipo de tecnología se debe emplear.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar el estado del arte de las tecnologías sin zanja y con zanja existentes para la instalación y/o rehabilitación y/o renovación de tuberías de acueducto y alcantarillado, así como los impactos en términos de toneladas de carbono equivalente de las tecnologías sin zanja y con zanja para la instalación y/o rehabilitación y/o renovación de tuberías de acueducto y alcantarillado.
- Elaborar un inventario de huella de carbono la etapa de instalación y/o rehabilitación de los proyectos: I) Fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 la Línea Tibitoc-Casablanca y II) II-Las Delicias-La Vieja.
- Evaluar y comparar la huella de carbono de los proyectos: I) Fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 la Línea Tibitoc-Casablanca y II) II-Las Delicias-La Vieja.

2. MARCO TEORICO

2.1 CARBONO EQUIVALENTE

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA por sus siglas en inglés), el carbono equivalente corresponde a un cálculo por medio del cual se hace la conversión de equivalencias de gases de efecto invernadero (GEI) a dióxido de carbono (CO₂). De igual manera, en caso de requerirse se puede obtener un ponderado en cuantías económicas correspondientes al impacto generado (EPA, 2020). En ese orden de ideas, el carbono equivalente permite evaluar la factibilidad de un proyecto en específico, tanto por las emisiones de GEI que genera como por los costos monetarios asociados a las mismas. Por otra parte, las emisiones pueden ser presentadas en términos del uso de emisiones marginales de CO₂ promedio y varían de acuerdo con la equivalencia de unidades por medio de la cual se establezcan las mediciones (EPA, 2020). La EPA establece algunas unidades de referencia que varían según el cálculo específico y que comprende el sistema determinado para EE. UU, algunas de estas son las siguientes:

- Reducciones de electricidad (Kilovatios-hora): Toneladas de CO₂/kWh.
- Galones de gasolina consumida: Toneladas de CO₂/Galón de gasolina.
- Galones de diésel consumido: Toneladas de CO₂/Galón de diésel.
- Pasajeros de vehículo por año: Toneladas de CO₂/Vehículo/año.
- Barriles de petróleo consumidos: Toneladas de CO₂/Barril.
- Uso de electricidad en el hogar: Toneladas de CO₂/Hogar.
- Libras de carbón quemadas: Toneladas de CO₂ /Libra de carbón.

(EPA, 2020)

2.2 HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono es un indicador de la totalidad de GEI emitidos de forma directa o indirecta por un individuo, evento, organización, producto o servicio y se expresa por medio del carbono equivalente. Esta estimación se relaciona inversamente con el desempeño del individuo, puesto que a mayor huella de carbono se tienen un peor desempeño debido al inherente impacto negativo producido sobre el medio ambiente (Green Solution, 2016). Para el cálculo de la huella de carbono se toman 6 contaminantes criterio, los cuales fueron definidos como los mayores causantes del cambio climático en el Protocolo de Kioto de 1997:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Perfluorocarburos (PFCs)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- Hidrofluorocarburos (HFCs)
- Hexafloruro de azufre (SF₆)

(Green Solution, 2016)

Dentro de los cálculos se puede considerar el inventario de gases de efecto invernadero que incluya los contaminantes anteriormente mencionados u otros cuyas emisiones sean considerables o que generen un impacto que pueda ser identificable y/o cuantificable (Green Solution, 2016). A su vez, existen diferentes normativas internacionales, las cuales son una guía para la identificación, cálculo e interpretación de la huella de carbono dentro de las que se encuentran algunas como:

- Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard (GHG Protocol): Fue desarrollado por el World Resources Institute (Instituto de Recursos Mundiales) y el World Business Council for Sustainable Development (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible), es uno de los protocolos más utilizados a escala internacional (Ministerio para la Transición Ecológica).
- IPCC 2021 GHG Workbook: Es una guía para calcular GEI provenientes de diferentes fuentes y sectores, y que incluye una detallada lista de factores de emisión. Esta se creó con el fin de servir de orientación para cuantificar las emisiones de GEI de los inventarios nacionales. Si no se dispone de factores de emisión específicos, el IPCC 2021 GHG Workbook proporciona factores de emisión genéricos que pueden servir para calcular la huella de carbono (Ministerio para la Transición Ecológica).

2.3 ANALISIS DE CICLO DE VIDA

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es un método desarrollado con el fin de comprender y tratar los aspectos ambientales y posibles impactos al medio ambiente asociados con los productos o servicios tanto consumidos como manufacturados. Esta técnica consiste en la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida, el cual comprende varias etapas consecutivas e interrelacionadas que abarcan desde la adquisición o generación de materias primas a partir de recursos naturales hasta la disposición final (ICONTEC, 2022).

Para la realización de ACV se cuenta con la norma ISO 14040- Gestión ambiental que establece el análisis de ciclo de vida, principios y marco de referencia para la ejecución y posterior evaluación de un ACV (ICONTEC, 2022). A continuación, se presenta un esquema de las fases que comprenden este tipo de análisis de acuerdo con la norma ISO 14040:

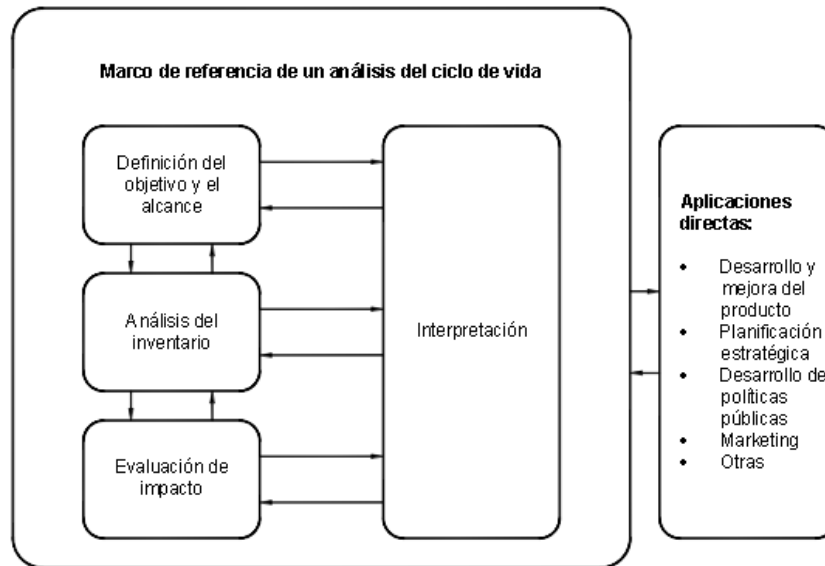


Figura 1. Marco de referencia ACV.

Tomado de: (ICONTEC, 2022)

De acuerdo con lo anterior las fases de un ACV son:

1. **Definición del objetivo y el alcance:** Se establecen los objetivos, lo cual incluye las razones por las cuales se lleva a cabo el estudio, así como la aplicación y público previsto, a su vez se define el alcance del estudio para lo cual se debe delimitar el sistema que se analizará, para lo cual es necesario establecer el sistema del producto a estudiar, las funciones del sistema, la unidad funcional, los límites del sistema, procedimientos de asignación, limitaciones y suposiciones.
2. **Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV):** Implica la recopilación de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema del producto. La recopilación de datos se debe hacer para cada proceso unitario dentro de los límites del sistema e incluye las entradas físicas (energía, materia prima, auxiliares, entre otras), los productos y co-productos, así como las emisiones al aire y los vertimientos al agua y el suelo. Luego de la recopilación de datos sigue el cálculo de datos para lo cual se tienen los siguientes procedimientos necesarios para generar los resultados del inventario del sistema definido para cada proceso unitario y para la unidad funcional definida del sistema del producto que se va a modelar:
 - Validación de los datos recopilados
 - Relación de los datos con los procesos unitarios
 - Relación de los datos con el flujo de referencia de la unidad funcional

3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV): Tiene como propósito evaluar cuan significativos son los impactos potenciales utilizando los resultados del ICV. Esto incluye la asociación de los datos de inventarios con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías para entender los impactos.
4. Interpretación del ciclo de vida: En esta fase se consideran en conjunto los hallazgos de las fases previas de ICV y EICV con el fin de obtener resultados coherentes con el objetivo y alcance definidos para el estudio, que lleguen a conclusiones que permitan explicar las limitaciones y proporcionen recomendaciones para quienes toman decisiones.

(ICONTEC, 2022)

2.4 SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

El sistema de alcantarillado se define como el conjunto de estructuras y tuberías utilizadas para la evacuación y transporte de las agua residuales y pluviales de una población, desde el sitio donde se generan hasta el sitio en el que se vierten (Fuentes hídricas) o se tratan. Estos sistemas funcionan por gravedad y existen dos tipos: Convencional y no convencional (Pupo Gonzalez, 2014).

En primer lugar, los alcantarillados convencionales son aquellos se emplean tradicionalmente para la recolección y transporte de las aguas residuales o lluvias hasta los sitios de disposición final. A su vez estos se dividen en sistemas de alcantarillado separados si el transporte y recolección de las aguas residuales y lluvias se realiza mediante tuberías separadas o combinado si se emplea una misma tubería para transportar y recolectar tanto el agua residual como el agua lluvia (Pupo Gonzalez, 2014).

En segundo lugar, se encuentran los alcantarillados no convencionales los cuales han surgido como alternativa a los sistemas convencionales los cuales son costosos por lo cual para poblaciones con limitaciones económicas se han planteado sistemas de menor costo basados en consideraciones de diseño adicionales y en una mejor tecnología disponible para su operación y mantenimiento. Dentro de estos sistemas se encuentran:

- Alcantarillados simplificados: Funcionan como un alcantarillado sanitario convencional, pero se diseñan y construyen teniendo en cuenta consideraciones como la disponibilidad de mejores equipos de mantenimiento que permiten reducir el diámetro de los colectores, así como reducir el número de pozos de inspección o sustituirlos por otras estructuras más económicas.
- Alcantarillados condominales: Recogen las aguas residuales de un conjunto de viviendas en un área inferior a 1 ha mediante colectores simplificados, conduciéndolas a la red de alcantarillado municipal o a una planta de tratamiento.
- Alcantarillados sin arrastre de sólidos: Son sistemas en los que las aguas residuales de una o más casas se descarga a un tanque interceptor de sólidos que los retiene y degrada, de manera

que se produce un efluente sin sólidos sedimentables que se transporta por gravedad en un sistema de colectores de diámetros reducidos.

(Pupo Gonzalez, 2014)

2.5 SISTEMAS DE ACUEDUCTO

El sistema de acueducto tiene la finalidad de entregar agua en calidad y cantidad adecuada para satisfacer necesidades de la población (Jiménez Terán, 2013). Este está compuesto por varios componentes como lo son:

- **Captación:** Es la parte inicial del sistema en la cual se capta el agua dependiendo de la disponibilidad de esta para poder abastecer a la población. Las fuentes de captación pueden ser: aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas meteóricas y/o agua de mar (Jiménez Terán, 2013).
- **Aducción y conducción:** La línea de aducción es el componente del sistema, compuesto por estructuras civiles y electromecánicas, a través del cual se transporta el agua cruda desde el sitio de captación hasta un primer punto ya sea de almacenamiento o a un desarenador. Por su parte, la línea de conducción corresponde a la parte del sistema que dependiendo la calidad y condiciones del suministro, transporta el agua hasta la planta de tratamiento o sitio de consumo (Ministerio de Ambiente, 2010).
- **Planta de tratamiento:** En este lugar se hacen todos los procesos físicos, mecánicos y químicos requeridos para que el agua tenga características necesarias para que sea apta para su consumo. Los objetivos principales son que el agua cumpla con estándares para que su consumo humano sea seguro, que sea estéticamente aceptable y que sea económica para la población (Jiménez Terán, 2013).
- **Almacenamiento:** Esta parte del sistema hace referencia en especial a tanques que permiten contar con un volumen de agua de reserva para casos de contingencia que tengan como resultado la falta de agua en un sitio (Jiménez Terán, 2013).
- **Línea de alimentación y red de distribución:** Hace referencia a el conjunto de tuberías encargadas de conducir el agua hasta su entrega a los consumidores en sus domicilios. Se compone de válvulas, tuberías, tomas domiciliarias, medidores, equipos de bombeo y demás elementos necesarios (Jiménez Terán, 2013).

2.6 FALLAS EN SISTEMAS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO

En los sistemas de acueducto y alcantarillado se pueden presentar diversos problemas o fallas como consecuencia de diversas causas internas y externas, las cuales ocasionan daños como fisuras o abrasión. En general las fallas en tuberías de acueducto y alcantarillado se clasifican en dos grupos: fallas operacionales y fallas estructurales. De igual manera, se pueden analizar las fallas como localizadas si afectan uno o varios tramos, y sistemáticas generalizadas cuando se debe intervenir toda la tubería (Pupo Gonzalez, 2014).

Dentro de las causas internas de las fallas de las tuberías se encuentran las características fisicoquímicas del fluido, el rendimiento hidráulico, el tiempo de construcción de la red, la edad de la red, el material de la tubería y los métodos constructivos utilizados en la construcción del sistema de alcantarillado. Con respecto a las causas externas que pueden ocasionar fallas en las tuberías se tienen las sobrecargas de tráfico, sobrecargas del suelo, intrusión de raíces, la presencia de otras redes de servicios públicos subterráneas, el tipo de suelo, el nivel freático y la variación del uso del suelo o la redensificación de las zonas (Pupo Gonzalez, 2014).

En ese orden de ideas, las fallas operacionales están relacionadas con la pérdida de la capacidad de diseño en la conducción de los fluidos como consecuencia del aumento de los caudales transportados ocasionado por el incremento de conexiones erradas, infiltraciones u obstrucciones. Dentro de los problemas operacionales se encuentran diámetros insuficientes, obstrucciones por conexión, intrusión de raíces, sedimentación y acumulación de materiales, infiltración de agua desde el suelo circundante y exfiltración de agua hacia la tierra. Por otra parte, las fallas estructurales están relacionadas con los inconvenientes en el sistema estructural de las tuberías, provocados por deficiencias de diseño, aumento de las cargas actuantes, irregularidades internas en las paredes de la tubería, fisuramientos y roturas. Dentro de las fallas estructurales más frecuentes se tiene la deformación o deflexión, las fisuras o fracturas, la rotura o colapso, el material de sello introducido en la tubería, el desplazamiento de juntas, daños superficiales, defectos en la mampostería o falta de mortero (Pupo Gonzalez, 2014). De acuerdo con lo mencionado anteriormente, las tuberías pueden deteriorarse por factores físicos, ambientales y operacionales los cuales contribuyen al deterioro de las tuberías. En la siguiente tabla se muestra un resumen de aquellos factores que contribuyen generalmente al deterioro de acuerdo con estudios realizados para predecir las condiciones de las tuberías:

Tabla 1. Factores que afectan el deterioro de las tuberías de alcantarillado

Tomada de: Mohammadi, M. M., Najafi, M., Kermanshachi, S., Kaushal, V., & Serajiantehrani, R. (2020). Factors Influencing the Condition of Sewer Pipes: State-of-the-Art Review. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.

Physical factors	Environmental factors	Operational factors
End invert elevation	Backfill type	Blockages
Installation method	Bedding material	Burst history
Joint type	Ground movement	Debris
Pipe length	Groundwater level	Flow velocity
Pipe shape	pH	Hydraulic condition
Pipe slope	Road type	Infiltration/exfiltration
Pipe age	Root interference	Previous maintenance
Pipe depth	Soil corrosivity	Sediment level
Pipe material	Soil fracture potential	Sewer type
Pipe size	Soil moisture	—
Start invert elevation	Soil type	—
	Soil sulfate level	—
	Traffic characteristics	—
	Vehicle flow	—

2.7 METODO CONVENCIONAL DE ZANJA ABIERTA

El método tradicional, conocido como el método de zanja, se fundamenta en la excavación a cielo abierto de las zonas en las cuales se realizará la instalación o renovación de nuevas tuberías o para la rehabilitación de tuberías existentes. Este método es invasivo y requiere gran cantidad de recursos humanos, mecánicos, y económicos. Antes de realizar la excavación se requiere contar con los estudios de suelos que indiquen las características de los mismos así como investigar si en el sitio de obra se cruzan otras redes de servicios públicos existentes con el fin de solicitar la autorización para realizar los trabajos (Alarcon Rocha & Pachecho Calvo, 2014).

Inicialmente se realiza la excavación de la trinchera como se observa en la Figura 2, para lo cual se pueden emplear métodos manuales o mecánicos, la trinchera es estabilizada a través de un sistema de apuntalamiento o entibado con el fin de garantizar la seguridad del personal que participa en la obra, así como la estabilidad de las estructuras y los terrenos adyacentes, dependiendo de factores como el tipo de suelo o las características de la zanja (ancho y profundidad). La excavación se debe diseñar y ejecutar de manera que asegure una instalación cómoda y segura de las tuberías. Además, se debe asegurar que cuando el entibado sea removido la tubería no sufra daños ni se mueva (Krah, 2008). Luego se realiza la instalación de la tubería con una cimentación adecuada, la cual puede ser con rellenos granulares o en concreto. Si se va a realizar la intervención en zonas urbanas se requiere de una adecuada señalización de las vías por las cuales se desviará el tráfico mientras se realiza la demolición y reconstrucción de la estructura del pavimento respectivo en las cuales se instaló la tubería (Alarcon Rocha & Pachecho Calvo, 2014).



Figura 2. Excavación a zanja abierta.

Tomada de: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/12/10/apertura-de-zanja-en-la-instalacion-de-tuberias/>

A su vez el método tradicional o con zanja abierta presenta tanto ventajas y desventajas, de acuerdo con Pupo González, C (2014) se tienen las siguientes:

Tabla 2. Ventajas y desventajas método a zanja abierta

Ventajas	Desventajas
Es un método que se ha aplicado a lo largo de los años y en múltiples proyectos por lo cual se tiene una gran experiencia en su aplicación	El costo puede ser mayor comparado con otras tecnologías debido a que la apertura de zanjas genera costos de construcción altos, en especial si se deben estabilizar los taludes debido a niveles freáticos altos
El método se acomoda a cualquier condición de alineamiento y pendiente.	Los tiempos de construcción son mayores que cuando se emplean tecnologías sin zanja, puesto que con la tecnología con zanja hay perturbación de otras infraestructuras, se interrumpe el tráfico y se requiere mayor trabajo para la instalación del alcantarillado.
Se emplean materiales y tecnologías con disponibilidad en el medio por lo cual se cuenta con gran cantidad de mano de obra y equipos disponibles en caso de ejecutar algún trabajo.	Se presenta un riesgo de movimiento de tierras, lo cual de igual forma es un riesgo para los trabajadores.
Con este método se pueden instalar, renovar o rehabilitar tuberías de acueducto o alcantarillado así como tuberías de cualquier material o diámetro	El uso de esta tecnología produce y/o requiere grandes volúmenes de tierra cuyo costo de transporte es elevado.
Con este método se pueden se pueden rehabilitar o renovar otras infraestructuras de manera simultánea.	Al emplear este método se pueden presentar interferencias con otras superficies o infraestructuras subterráneas.
Este método permite generar empleos rápidamente puesto que se los trabajadores requieren bajos niveles de habilidad para realizar los trabajos	Al emplear la tecnología con zanja abiertas los costos sociales y económicos son importantes debido a factores como la mayor contaminación auditiva por la mayor duración de los trabajos o los problemas de seguridad y tráfico.

2.8 TECNOLOGIAS SIN ZANJA

Desde hace varios años se han desarrollado técnicas alternativas a la zanja abierta para la construcción, rehabilitación y renovación de acueductos y alcantarillados como alternativa para propietarios y prestadores de servicios de acueducto y alcantarillado, quienes buscan tecnologías innovadoras como las tecnologías sin zanja para extender la vida útil de los activos y reparar grandes longitudes de los sistemas de acueducto y alcantarillado (Barrera Murillo, 2016). Las tecnologías sin zanja se definen como las técnicas a utilizar en la instalación, reemplazo y renovación de tuberías con excavación mínima del terreno. Estas tecnologías protegen el medio ambiente, son menos contaminantes, utilizan los recursos de forma más sostenible y tratan los residuos de forma más aceptable que la tecnología convencional con zanja abierta (Alarcon Rocha & Pachecho Calvo, 2014). A continuación, se muestra la clasificación de las tuberías sin zanja:

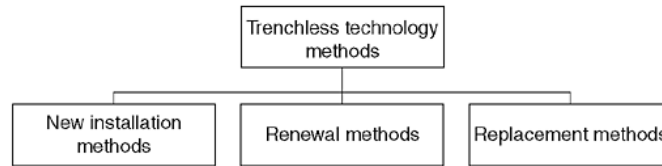


Figura 3. Clasificación tecnologías sin zanja

Tomada de: Najafi, M. (2005). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*.

De igual forma, estos métodos tienen poca intervención y un proceso de excavación reducido, de manera que los impactos y riesgos de los trabajadores se reduzcan (Najafi, 2005). Estas tecnologías tuvieron sus inicios en los años 60 en Japón como resultado de una decisión gubernamental para incrementar la proporción de población urbana provista con los servicios básicos, así como mejorar las características hidráulicas y estructurales de los sistemas existentes de la época sin alterar el medio ambiente ni poner en riesgo a las trabajares o la comunidad aledaña. En los años posteriores, se han realizado investigaciones sobre las tecnologías sin zanja y se crearon organizaciones a nivel mundial que promulgan su implementación teniendo en cuenta los beneficios ambientales y económicos de estas (Sánchez, 2011).

2.8.1 MÉTODOS DE INSTALACIÓN

Los métodos de instalación de tuberías sin zanja abierta se clasifican en tres grandes grupos como se observa en la Figura 4: pipe jacking (hincado de tuberías), utility tunneling (túneles de servicio público) y horizontal earth boring (HEB) (Najafi, 2005).

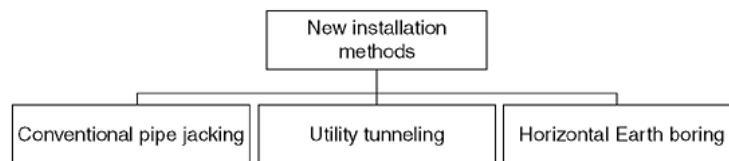


Figura 4. Métodos sin zanja para la instalación de tuberías

Tomada de: Najafi, M. (2005). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*.

Estos métodos a su vez se dividen en diversas tecnologías. Por ejemplo, dentro de los métodos en el grupo de horizontales earth boring (HEB) se encuentran otros 5 métodos como se muestra en la Figura 5: horizontal auger boring (HAB), horizontal directional drilling (HDD), excavación con micro tuneladora (Microtunneling), excavación con micro tuneladora con tubo piloto (Pilot-tube microtunneling) y la perforación por golpeo (Pipe ramming) (Najafi, 2005).

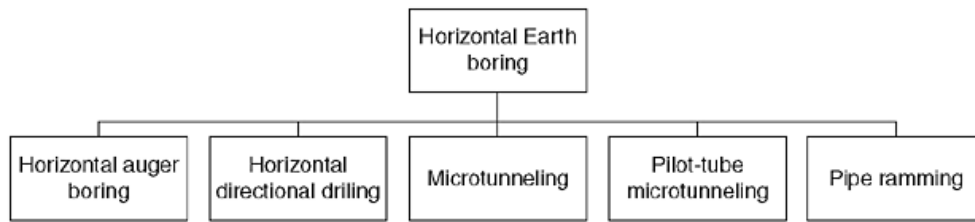


Figura 5. Métodos horizontal earth boring

Tomada de: Najafi, M. (2005). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*.

De igual forma, de acuerdo con Najafi (2005) de los métodos de instalación de tuberías sin zanja disponibles para la instalación de tuberías que funcionan por gravedad como las de alcantarillado para diámetros entre 4-300 pulgadas, se recomienda empelar el microtunelado con tubo piloto, para diámetros entre 12-42 pulgadas, se recomienda el microtunelado y para diámetros mayores a 42 pulgadas se debe utilizar el pipe jacking o utility tunneling. Por otra parte, para la instalación de tuberías a presión (acueducto) se recomienda utilizar la técnica de horizontal directional drilling (HDD):

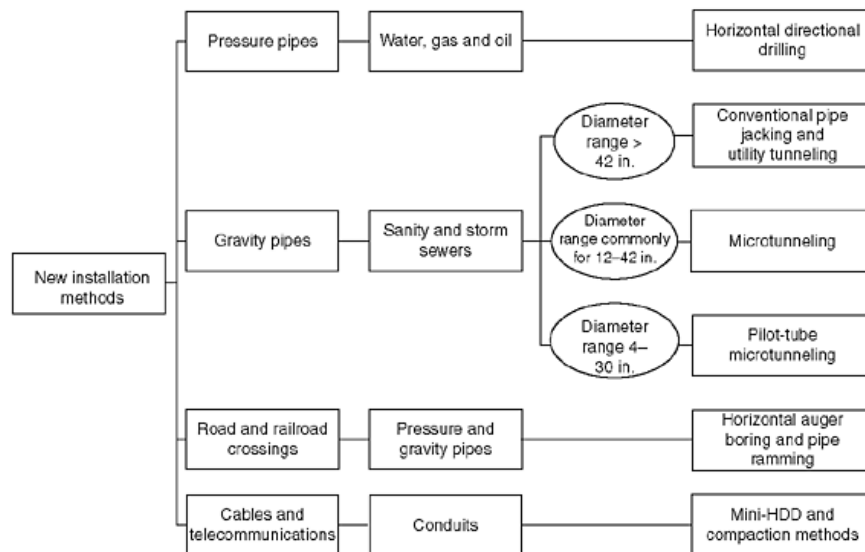


Figura 6. Usos métodos de instalación sin zanja

Tomada de: Najafi, M. (2005). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*.

A continuación, se realizará una breve descripción de los métodos mencionados anteriormente:

2.8.1.1 PIPE JACKING, UTILITY TUNNELING, MICROTUNELADO, MICROTUNELADO CON TUBO PILOTO

La técnica de tubo de hincado (pipe jacking), de excavación con micro tuneladora y excavación con micro tuneladora con tubo piloto hacen parte de una misma familia de métodos para la instalación de tuberías cuya maquinaria cuenta con bastidores de empuje con gatos hidráulicos, y que tiene un rango de aplicación que va desde diámetros de 120 mm en adelante (Alarcon Rocha & Pachecho Calvo, 2014).

En primer lugar, el hincado de tuberías es un método para instalar tuberías con una mínima ruptura de la superficie en el cual se emplean cilindros hidráulicos para empujar tuberías especialmente diseñadas para hincado a través del terreno. En este tipo de perforaciones se utiliza el tubo como elemento definitivo del túnel y al mismo tiempo como elemento de empuje sobre la tuneladora. Asimismo, la hincada es un proceso cíclico que usa la potencia de empuje de los gatos hidráulicos para hacer avanzar la tubería a través del terreno y al mismo tiempo se excava al frente. Después de instalado cada segmento de tubería, los cilindros de los gatos se retraen de modo que se pueda colocar otro segmento en posición para comenzar el ciclo de nuevo. La principal diferencia de este método con la excavación con micro tuneladora es que este método requiere que los trabajadores trabajen dentro de la tubería instalada mientras que en la excavación con micro tuneladora esta se opera remotamente (Mínguez Santiago, 2015).

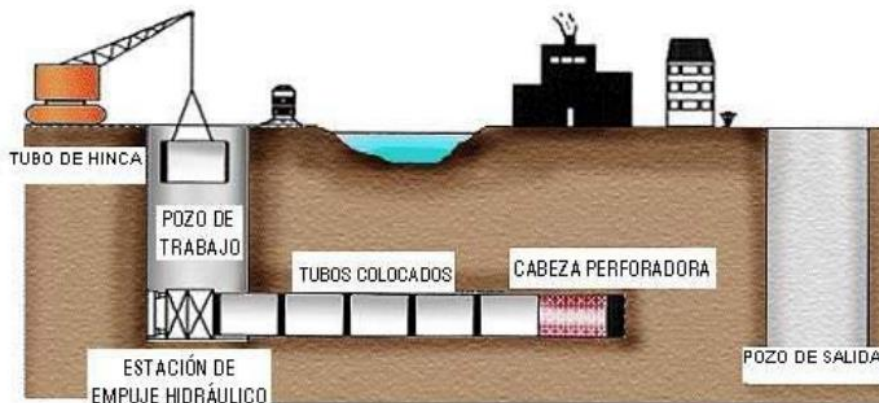


Figura 7. Hincado de tubería (Pipe Jacking)

Tomada de: Mínguez Santiago, F. (2015). Métodos de excavación sin zanjas. *Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid

En segundo lugar, el método de excavación con micro tuneladora consiste en la instalación de tuberías entre dos pozos verticales denominados pozo de entrada y pozo de salida. A la par que las tuberías son empujadas por una máquina tuneladora, se realiza el corte del suelo en la cara de la cabeza

perforadora y se realiza la remoción de suelo hacia el pozo de entrada. Las máquinas tuneladoras suministran presión de manera continua al frente de la excavación con el fin de equilibrar las presiones del agua subterránea y del suelo, y además son guiadas por un sistema láser controlado remotamente, el cual permite ajustar la alineación y la pendiente (Mínguez Santiago, 2015).

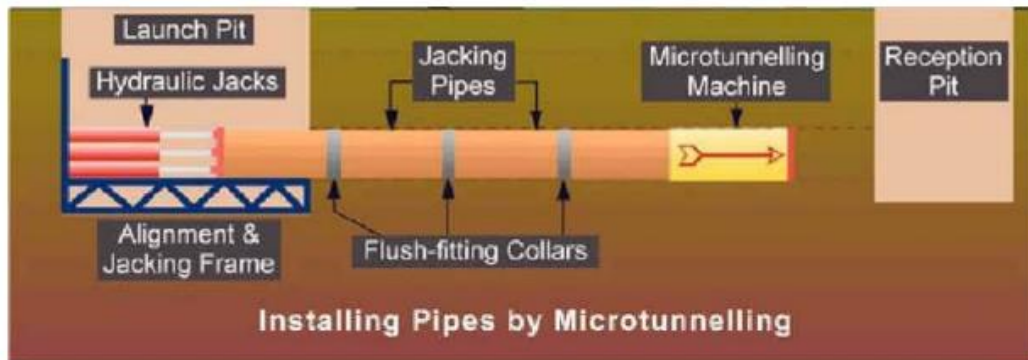


Figura 8. Microtunelado (Microtunnelling)

Tomada de: Mínguez Santiago, F. (2015). Métodos de excavación sin zanjas. Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

En tercer lugar, se tiene el método de excavación con micro tuneladora con tubo piloto el cual se emplea cuando se deben instalar tuberías pequeñas o longitudes reducidas. Este método es una combinación entre un sistema de perforación direccional y un sistema de excavación con micro tuneladora tradicional. Además, se emplea una barra perforadora para practicar una perforación piloto con una determinada alineación y cota, normalmente monitorizada y controlada mediante un teodolito laser apuntando a una mira situada justo tras la cabeza de perforación. Luego de realizada la perforación piloto se realiza una perforación concéntrica empleando un tornillo sin fin para aumentar el diámetro de la perforación y al terminar esta operación, el tubo se empuja a su posición final (Aларcon Rocha & Pachecho Calvo, 2014).

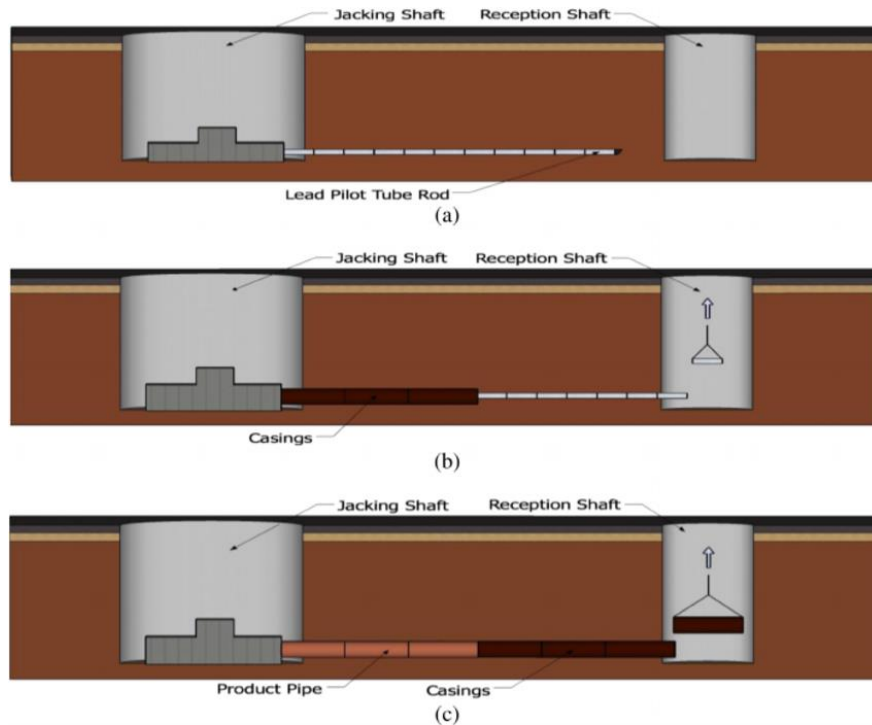


Figura 9. Microtunelado con tubo piloto (Pilot-tube microtunneling)

Tomada de: Tang, P., Shen, Z., Olson, M., & Ariaratnam, S. (2015). Time Series Analysis of Hydraulic Data for Automated Productivity Monitoring of Pilot Tube Microtunneling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.

Por otra parte, se tiene el método de excavación de túneles de servicios públicos (utility tunneling) el cual se realiza dentro de un escudo de túnel especialmente diseñado como en el pipe jacking pero se diferencia de este en el revestimiento instalado dado que en la excavación de túneles de servicios públicos el revestimiento consta de placas de acero modulares prefabricadas que se utilizan para construir un revestimiento temporal que soporta la excavación hasta su finalización. Una vez se concluye la excavación se empuja la tubería a través del túnel y se rellena el espacio anular entre el revestimiento de acero y la tubería (Statewide Urban Design and Specifications, 2013).

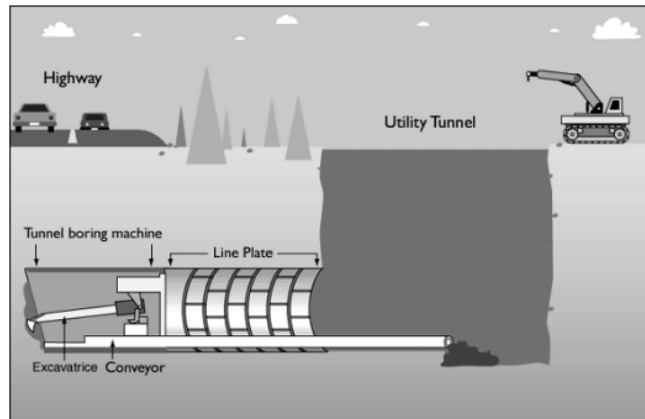


Figura 10. Túneles de servicio público (Utility tunneling)

Tomada de: *Statewide Urban Design and Specifications. (2013). Design Manual. Iowa State University*

Los métodos de tubo de hincado (pipe jacking), excavación con micro tuneladora, excavación con micro tuneladora con tubo piloto y excavación de túneles de servicios públicos (utility tunneling) se pueden emplear en gran variedad de condiciones de terreno como gravas y arenas saturadas, arcillas y limos blandos, suelos consolidados secos o saturados, y roca sólida (Asociación Ibérica de tecnologías Sin Zanja, 2013). En el caso los métodos de tubo de hincado (pipe jacking) y excavación de túneles de servicios públicos (utility tunneling) los suelos granulares y cohesivos son los más favorables y pueden ser utilizados en casi todos los tipos de suelos con el equipo apropiado y las condiciones necesarias. De igual forma los métodos de excavación con micro tuneladora y excavación con micro tuneladora con tubo piloto se pueden acomodar a gran variedad de condiciones del suelo, pudiendo remover cantos rodados mayores al 30% del diámetro de la tubería (Statewide Urban Design and Specifications, 2013). Asimismo, estos métodos son aptos para proyectos en los cuales las tuberías deben cumplir especificaciones rígidas en cuanto a alineación, cota y profundidad (Alarcon Rocha & Pachecho Calvo, 2014).

2.8.1.2 HORIZONTAL AUGER BORING (HAB)

El método de perforación horizontal con tornillo helicoidal se emplea para la instalación de tuberías metálicas o de hormigón de diámetros entre los 100 y los 1.500 mm. La perforación se realiza utilizando una cabeza de corte giratorio, la cual está unida al extremo delantero de una cadena sinfín, que se abre camino entre el suelo mientras que la fuerza de hincado es proporcionada por unos cilindros de empuje hidráulico. Tanto la tubería como las diferentes secciones del tornillo sin fin se van añadiendo a medida que la máquina avanza, con respecto a los escombros estos se evacúan a través de la tubería y son conducidos hasta el inicio de la perforación donde son evacuados a mano por los trabajadores. De igual manera, el método se puede realizar en diferentes tipos de suelos en especial en suelos blandos, como las arcillas limosas. No obstante, tiene limitaciones en suelos muy húmedos o cuando hay presencia de cantos rodados de tamaño mayor al tercio del diámetro de la tubería.

Además, en casos de suelos inestables se puede provocar el hundimiento de la superficie (Mínguez Santiago, 2015).



Figura 11. Horizontal auger boring (HAB)

Tomada de: Mínguez Santiago, F. (2015). Métodos de excavación sin zanjas. *Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

2.8.1.3 HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING (HDD)

El método de perforación horizontal dirigida o HDD por sus siglas en inglés “Horizontal Directional Drilling” es frecuentemente utilizada para obras tales como cruces de grandes ríos, canales, autopistas y alcanzado grandes distancias, así como la instalación de tuberías de agua a presión, cables de líneas de comunicación o conductos sin zanja. Con este método se pueden realizar trazados rectos o gradualmente curvados y se puede ajustar la cabeza cortadora en cualquier momento de la perforación piloto prevista. Uno de los aspectos más relevantes de este método es la capacidad de tiro de la máquina, pues mientras mayor sea esta, mayor será el diámetro de la tubería capaz de instalarse y también será un indicativo de la máxima longitud de colocación dependiendo de las condiciones del terreno (Asociación Ibérica de tecnologías Sin Zanja, 2013).

El proceso para la instalación de tuberías con este método consiste en dos pasos. El primer paso es realizar una perforación piloto a lo largo de un trazado previsto usando tanto el empuje en la plataforma de perforación como la rotación de las varillas de perforación para avanza en esa dirección. Esta perforación es monitoreada y maniobrada por un detector que recibe la señal por medio de una sonda que se encuentra instalada en una porta sonda ubicada en la parte de atrás de la broca y para esto se usa un equipo que controla la posición brindando la información necesaria (Mínguez Santiago, 2015). Una vez finalizada la perforación piloto, el segundo paso consiste en ensanchar dicha perforación de manera concéntrica y en sentido contrario al empleado en la perforación piloto con ayuda de un retro-ensanchador, seguido de la tubería a instalar. Dependiendo de las condiciones del terreno, la tubería se instala por etapas o no (Alarcon Rocha & Pachecho Calvo, 2014).

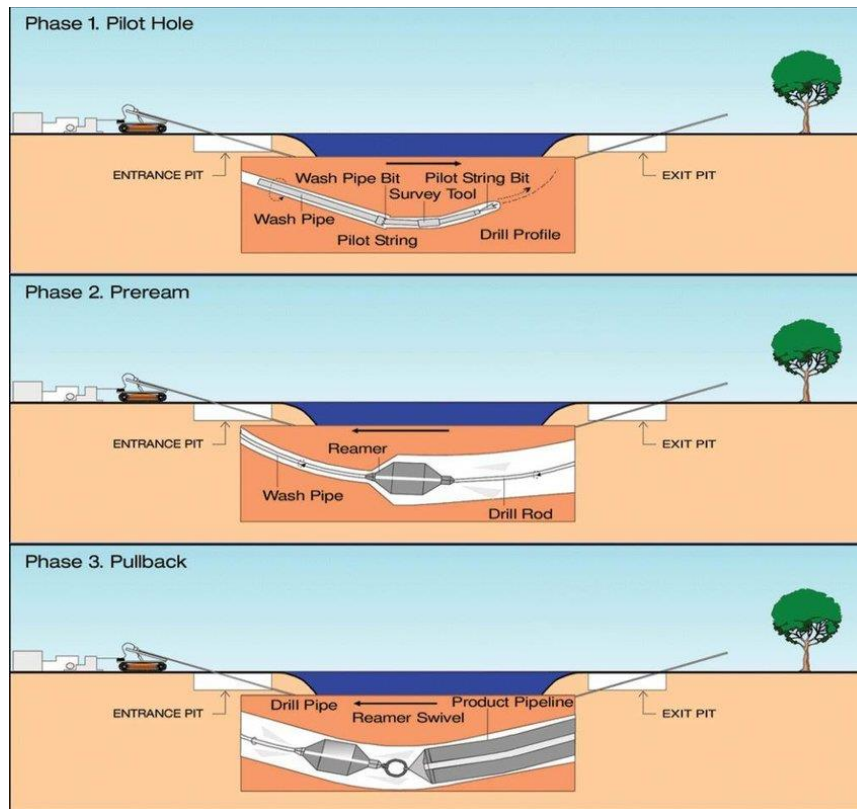


Figura 12. Horizontal directional drilling (HDD)

Tomada de: Tabesh, A., Najafi, M., Kohankar Kouchesfehni, Z., Malek Mohammadi, M., & Ashoori, T. (2019). Risk Identification for Pipeline Installation By Horizontal Directional Drilling (HDD). ASCE Pipeline Conference 2019, (págs. 141-150). Nashville.

Por otra parte, la perforación horizontal dirigida se divide en tres grandes sectores cuyo funcionamiento es similar: perforación de gran diámetro (maxi-HDD), perforación de mediano diámetro (midi-HDD) y perforación de pequeño diámetro (mini-HDD). Asimismo, el método se puede aplicar en varios tipos de suelos siendo las arcillas son ideales para la aplicación de estos métodos al igual que las arenas arcillosas finas y cohesivas y los limos mientras que en suelos rocosos o con gravas la precisión y la velocidad de trabajo se puede reducir (Mínguez Santiago, 2015).

2.8.1.4 PERFORACIÓN POR GOLPEO (PIPE RAMMING)

El método de perforación e hincado de tuberías por golpeo (pipe ramming) es un método de instalación de tuberías sin zanja para hincar horizontalmente tuberías de acero de diferentes diámetros, las cuales son usadas debido a su resistencia y ductilidad permite resistir y distribuir mejor las cargas transmitidas por el martillo. El método constructivo es igual al empleado para hincar pilotes verticales con tubo de acero, diferenciándose en que el empuje de la tubería se realiza mediante un martillo neumático o

hidráulico que golpea la tubería, la cual penetra el suelo sin causar alteración de este. De igual forma, dentro de sus ventajas se encuentran que no se requiere de agua durante el proceso y no hay excavación mecánica de material desde el frente de la tubería durante el proceso de instalación, pero la carcasa de acero requiere de soldadura, lo cual aumenta el tiempo total de trabajo (Mínguez Santiago, 2015).

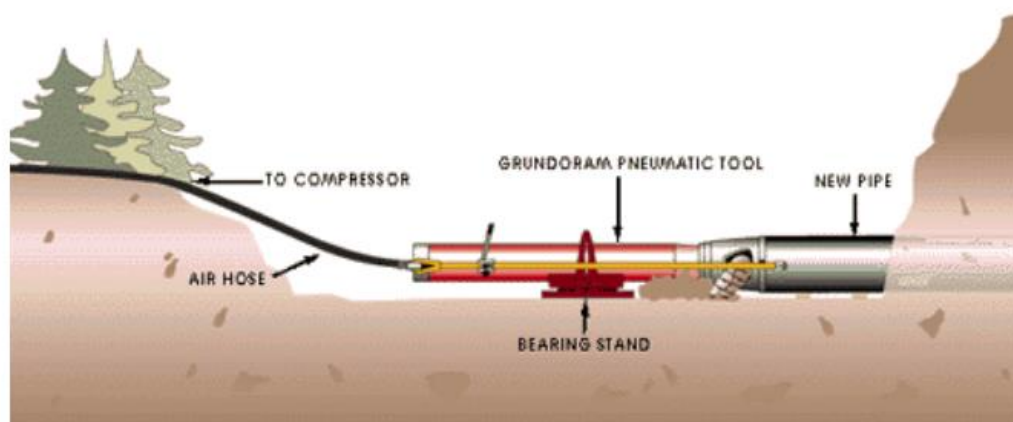


Figura 13. Perforación por golpeo (Pipe ramming)

Tomada de: Mínguez Santiago, F. (2015). *Métodos de excavación sin zanjas. Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.*

Para este método es necesario construir una base sólida, normalmente de hormigón, en el pozo de entrada de la instalación. También, se ajustan los rieles a la línea de la excavación y se instalan en la losa. El primer tramo de tubería se coloca sobre los rieles guía y se suelda un perfil cortante en el extremo frontal de la tubería, luego se coloca el martillo a percusión pegado del extremo posterior de la tubería que empuja a tubería dentro del suelo. Una vez se instala una sección de tubería, se quita el martillo y se coloca un nuevo tramo de tubería, sobre los rieles guía, el cual es soldado a la tubería ya instalada. Con respecto al tipo de suelos en los cuales se puede utilizar este método se debe mencionar que es un método versátil que permite trabajar en diversas condiciones de suelo excepto cuando se tenga presencia de roca sólida (Mínguez Santiago, 2015).

2.8.1.5 RAMMING ASISTIDO HIDRÁULICAMENTE (ADB)

ADB es una metodología que combina una fuerza hidráulica, una carga estática, constante con impactos de percusión de alta frecuencia para aumentar significativamente la fuerza de penetración, minimizando el desperdicio de energía absorbida por la elasticidad del tubo metálico y los efectos del rebote. Esto permite la instalación de distancias más largas, diámetros mayores o tipos de suelo más complejos que otros sistemas de hincado de tuberías convencionales. Adicionalmente, cuando se requiere una alta precisión, el equipo es capaz de guiar la tubería metálica utilizando los métodos existentes, como el guiado por piloto o los sistemas de aletas, entre otros (Zilper Trenchless, s.f.).

Esta metodología instala un revestimiento metálico abierto que permite que el suelo entre libremente en el revestimiento sin necesidad de un cabezal de corte giratorio especializado. Esto último, junto con la capacidad de contener todo o parte del suelo dentro de la camisa, minimizando el riesgo de socavación y asentamiento de la superficie, también permite instalar la camisa a profundidades relativamente bajas y en condiciones de suelo difíciles, como arenas fluidas, gravas, suelos mixtos y cantos rodados (Zilper Trenchless, s.f.). Además, las máquinas están preparadas para retirar fácilmente la tierra del interior de las camisas si es necesario, sustituyendo el martillo por un motor hidráulico y un conjunto de barrenas (Zilper Trenchless, s.f.).

El proceso comienza con un manguito metálico con un refuerzo en el extremo en contacto con el terreno natural, cuyo otro extremo se apoya directamente en la placa de empuje del equipo. Esta última está asistida por cilindros hidráulicos que pre comprimen el tubo contra el suelo mientras el martillo impacta en la placa para transmitir la energía a la parte delantera de la instalación. El martillo puede ser accionado por aire comprimido o por una unidad de potencia hidráulica (Zilper Trenchless, s.f.). Una vez instalada la primera sección de tubería, se puede colocar una sección adicional de tubería y el proceso se repite continuamente hasta alcanzar el pozo de llegada. Gracias a la facilidad de intercambio entre el motor hidráulico y el martillo de impacto, se puede realizar una limpieza parcial de la tierra que ha entrado durante la instalación, pero manteniendo siempre suficiente tierra en el revestimiento hasta que se complete la sección para mantener una presión equilibrada en la cara de corte que evite la entrada de material no deseado, especialmente en terrenos inestables (Zilper Trenchless, s.f.).

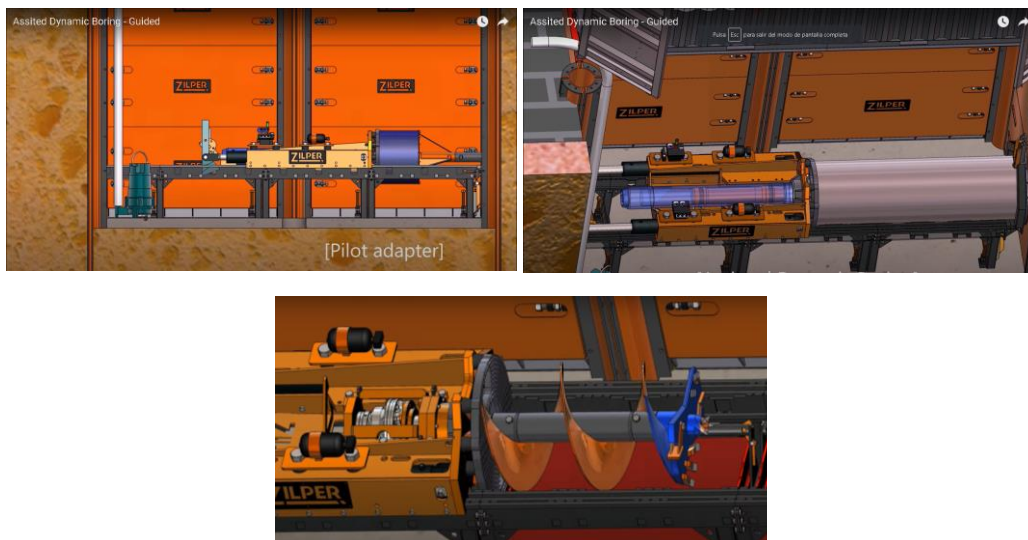


Figura 14. Ramming Asistido Hidráulicamente (ADB)

Tomado de: Zilper Trenchless. (s.f.). Assisted Dynamic Boring. Obtenido de Zilper Trenchless: <https://zilpertrenchless.com/tecnologia-adb-2/>

2.8.1.6 COMPARACIÓN

De acuerdo con los métodos expuestos anteriormente y con lo expuesto por Najafi (2005) se puede afirmar que el método de perforación de pequeño diámetro (mini-HDD) permite instalar los menores diámetros de tuberías mientras que con los métodos de excavación con micro tuneladora, método de perforación e hincado de tuberías por golpeo (pipe ramming), hincado de tuberías (pipe jacking) y túneles de servicio público (utility tunneling) permiten instalar tuberías de diámetros mayores a 130 pulgadas. Además, los últimos dos métodos mencionados anteriormente permiten instalar tuberías de mayor longitud mientras el método de excavación con micro tuneladora con tubo piloto permite instalar la menor longitud de tuberías de los métodos estudiados. También, para el método HAB y el método de perforación e hincado de tuberías por golpeo (pipe ramming) solo se emplean tuberías de acero mientras los otros métodos permiten emplear tuberías de varios materiales. De igual forma, en la siguiente tabla se comparan otras características de los métodos como su campo de uso o su precisión:

Tabla 3. Comparación métodos sin zanja para la instalación de tuberías

Tomado de: Najafi, M. (2005). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*. McGraw-Hill Education.

Trenchless Method	Diameter Range (in.)	Inst. Length (ft)	Max Depth (ft)	Pipe Material*	Typical Application	Accuracy
Conventional pipe jacking & utility tunneling	42 & up (144 in.)	1600–3500	N/A ^a	RCP, GRP, steel	Pressure & gravity pipes	± 1 in.
Auger boring (conventional)	4–60	600	N/A ^a	Steel	Road & railroad crossings	± 1% of the bore length
Auger boring steered on grade ^a	4–60	600	N/A ^a	Steel	Pressure & gravity pipes	± 1 in.
Auger boring steered on line + grade ^a	4–60	600	N/A ^a	Steel	Pressure & gravity pipes	± 12 in.
Mini-HDD	2–12	600	60	HDPE, steel, PVC, ductile iron	Pressure pipes/conduits/cables	Varies
Midi-HDD	12–24	600–2000	100	HDPE, fusible PVC, steel, ductile iron	Pressure pipes	Varies
Maxi-HDD	24–60	2000–6000	200	HDPE, steel	Pressure pipes	Varies
Microtunneling	12–136	1500	N/A ^a	RCP, GRP, VCP, DIP, steel, PCP	Gravity pipes	± 1 in.
Pilot tube microtunneling	6–30	300	N/A ^a	RCP, GRP, VCP, DIP, steel, PCP	Small-diameter gravity pipes	± 1 in.
Pipe ramming	4–140	400	N/A ^a	Steel	Road & railroad crossings	Dependent on setup

Paralelamente, de acuerdo con lo expuesto por Najafi (2005) respecto de la profundidad mínima de excavación para los métodos de instalación sin zanja de tuberías para tres tamaños de tuberías dependiendo su diámetro (pequeñas, medianas y grandes) y 4 tipos de suelos diferentes, para suelos más gruesos como gravas se requiere una profundidad mayor que cuando se tienen suelos arcillosos o limosos. A su vez, se observa que la profundidad mínima de excavación para los métodos de hincado de tuberías (pipe jacking), túneles de servicio público (utility tunneling), excavación con

micro tuneladora y excavación con micro tuneladora con tubo piloto no depende ni del tamaño de la tubería ni del tipo de suelo ya que en el caso de los tres primeros métodos la profundidad mínimas es de 6 pies o 3 veces del diámetro exterior de la tubería mientras que en el caso del último método mencionado la profundidad mínima de es de 6 pies o 3 veces del diámetro exterior de la tubería. Sumado a lo anterior se observa para los métodos de HDD, HAB y perforación e hinca de tuberías por golpeo (pipe ramming), a mayor es el tamaño de la tubería mayor es la profundidad mínima de excavación de las tuberías. A continuación, se presenta la tabla desarrollada por Najafi (2005) de la profundidad mínima de excavación para los métodos de instalación sin zanja de tuberías:

Tabla 4. Profundidad mínima de excavación métodos de instalación sin zanja

Tomado de: Najafi, M. (2005). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*. McGraw-Hill Education.

Pipe Diameters (in.)	Soil Conditions	PJ/UT	HAB (ft)	HDD (ft)	MT	PTMT	PR (ft)
Small (<12)	Clayey	6 ft of cover or 3 times outside diameter whichever is more	4	4	6 ft of cover or 3 times outside diameter whichever is more	4 ft of cover or 3 times outside diameter whichever is more	2
	Silty		4				
	Sandy		6				
	Gravelly		6				
Medium (12~24)	Clayey		6	8			
	Silty		8				
	Sandy		12				
	Gravelly		20				
Large (>24)	Clayey	10	25				
	Silty	14					
	Sandy	20					
	Gravelly	25					

2.8.2 MÉTODOS DE RENOVACIÓN Y REHABILITACIÓN

Las tecnologías para realizar la intervención de redes buscan el mejoramiento de las condiciones estructurales de la red intervenida y están dispuestas en dos grandes grupos:

- Renovación: se realiza con el fin atender reparaciones programadas de tramos de red que por su funcionamiento afectan el nivel de servicio de la red.
- Rehabilitación: tiene el fin de atender reparaciones puntuales en la red buscando dar continuidad al funcionamiento del sistema. Las tecnologías de rehabilitación se caracterizan por ser de rápida implementación y fácil montaje.

(Barrera Murillo, 2016)

En ese orden de ideas, las tecnologías de renovación y rehabilitación de acuerdo con Sánchez (2011) presentan otras diferencias como se muestra a continuación:

Tabla 5. Diferencias tecnologías sin zanja para la renovación y rehabilitación de tuberías

Tecnologías de rehabilitación de tuberías	Tecnologías de renovación de tuberías
Permiten mejorar las características hidráulicas internas de un tramo o sección de tubería afectada	Se debe destruir la tubería existente
Incrementan el tiempo de vida de la tubería existente	Reemplaza la totalidad de la tubería anterior
La sección de la tubería se ve disminuida	Se emplean cuando el grado de deterioro de la tubería existente hace necesario su reemplazo
La tubería existente no se ve afectada estructuralmente	Permiten incrementar la sección transversal de la tubería si se requiere
Se emplean cuando la tubería existente no presenta un grado de deterioro considerable	Se emplea cuando la frecuencia de reparación de la tubería existente no es económica

2.8.2.1 MÉTODOS DE RENOVACIÓN

Como se mencionó anteriormente los métodos de renovación o restitución de tuberías sin zanja abierta consisten en el reemplazo de la tubería existente vieja y defectuosa por otra nueva (Mínguez Santiago, 2015). Dentro de estas tecnologías se encuentran los métodos de fragmentación de tuberías (pipe bursting), pipe eating, pipe reaming y tunnel liner los cuales se explican a continuación:

2.8.2.1.1 PIPE BURSTING

Esta tecnología consiste en el rompimiento de la tubería existente por medio de una herramienta de ruptura, y la ampliación de la sección original para la instalación de una tubería nueva, generalmente de polietileno de alta densidad, en el espacio dejado por la tubería anterior. Dependiendo del tipo de suelo se pueden ampliar los diámetros respecto de la tubería original, en hasta 10 centímetros y en el caso del uso de tuberías de polietileno se logra mejorar la capacidad hidráulica debido a la baja rugosidad de este material.

El procedimiento de instalación consiste inicialmente en definir los pozos de entrada y de salida del tramo de tubería a renovar, luego desde el pozo de entrada se inserta una cabeza cónica la cual tiene como función fracturar la tubería existente, esta configuración permite desplazar los fragmentos hacia el pozo de salida. Al mismo tiempo que se realiza esta acción viene conectada a la cabeza cónica la tubería nueva. Además, la tracción de la cabeza cónica se realiza desde el pozo de salida por medio de un cable el cual hace parte de un sistema de tracción. Sumado a lo anterior, los sistemas de fracturamiento más usados son la fractura de tubería neumática, fractura de tubería estática y fractura de tubería hidráulica.

Dentro de las principales ventajas del método se encuentran que permite ampliar los diámetros de la tubería, sus tiempos de ejecución son rápidos una vez se ha establecido el alineamiento de la tubería y que las vibraciones que genera son menores a comparación de otros métodos por lo cual se mitigan las afectaciones a la infraestructura cercana. Por otra parte, dentro de sus limitaciones se encuentran que el radio de curvatura de la nueva tubería no debe exceder 20 veces el diámetro de la tubería, se requiere una profundidad mínima de excavación de 1.5 m generalmente, puede haber interferencia y

destrucción de otras redes de servicios públicos como por ejemplo las conexiones domiciliarias las cuales se deben reconstruir manualmente. Igualmente, para tuberías de diámetros grandes se hace necesario hacer trincheras grandes para evitar el rompimiento de la tubería debido a las limitaciones del radio de curvatura.

(Barrera Murillo, 2016)

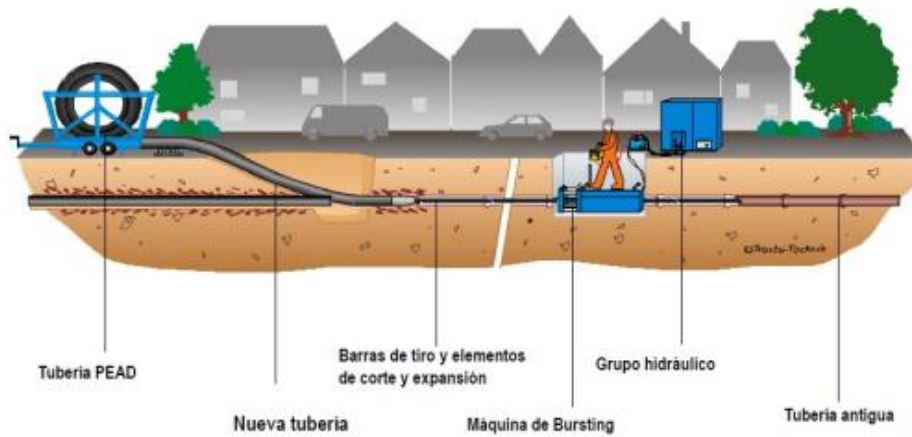


Figura 15. Pipe bursting

Tomada de: Mínguez Santiago, F. (2015). Métodos de excavación sin zanjas. Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

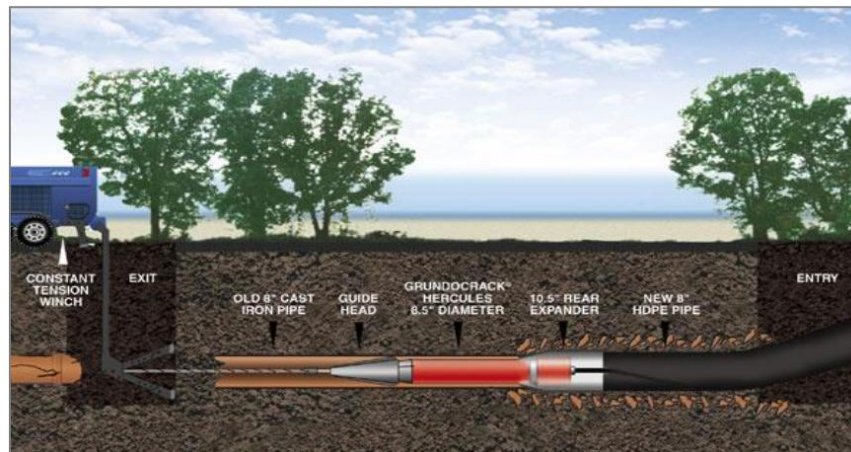


Figura 16. Esquema método pipe bursting

Tomada de: Barrera Murillo, C. A. (2016). Tecnologías más prometedoras para renovar y rehabilitar tuberías de sistemas de alcantarillado. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.

2.8.2.1.2 PIPE EATING

Este método se basa en la adaptación de los métodos de excavación con micro tuneladora y horizontal directional drilling (HDD) y consiste en la trituración de la tubería existente por medio de un cabezal de corte giratorio el cual opera bajo los lineamientos de los sistemas de perforación de túneles. Se pueden renovar tuberías de gres, hormigón sin refuerzo en un rango de diámetros de 100 mm hasta 2.400 mm. Adicionalmente, se requiere que el diámetro de la tubería existente sea menor al de máquina y la precisión de instalación es alta. Por otra parte, para retirar los escombros se hace uso de un sistema de suspensión circulante, el cual tira la tubería nueva a medida que se tritura la tubería existente por medio de un sistema de gatos hidráulicos ubicados en el pozo de entrada. Además, la tubería existente debe ser rellenada previamente con concreto pobre con el fin de permitir el avance de la dirección y evitar que se desvíe la cabeza de corte.

La tecnología presenta ventajas como que permite aumentar el diámetro de la tubería a renovar o que es un sistema dirigido lo cual permite gran precisión en la perforación de tuberías de gran longitud. Sin embargo, como todo método tiene limitaciones como que no permite cambios de dirección, requiere el llenado previo de concreto pobre de la tubería que se va a renovar, el montaje de las herramientas del sistema requiere mayor tiempo y logística, requiere de una planta de separación de lodos para la disposición del material excavado, no se puede utilizar para la renovación de tuberías metálicas o que tengan acero de refuerzo y no se recomienda su aplicación para suelos con índice de penetración estándar SPT>35 y rocas duras.

(Barrera Murillo, 2016)

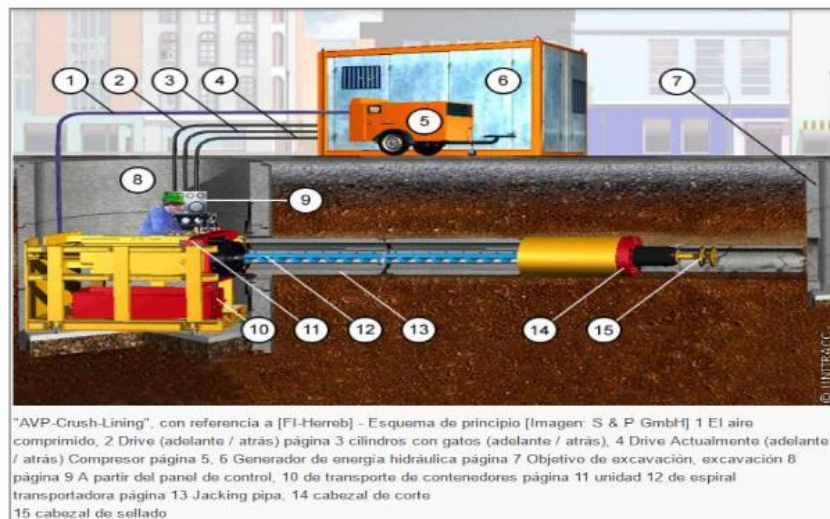


Figura 17. Pipe eating

Tomada de: Barrera Murillo, C. A. (2016). *Tecnologías más prometedoras para renovar y rehabilitar tuberías de sistemas de alcantarillado. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.*

2.8.2.1.3 PIPE REAMING

El método de pipe reaming permite de manera simultánea la eliminación de la tubería existente y la instalación de una nueva tubería en su reemplazo, generalmente una tubería termoplástica adecuada para instalaciones que utilizan equipos de perforación direccional. El método puede emplearse para la renovación de varios tipos de tuberías y se emplea especialmente para la sustitución y cambio de sección de tuberías en suelos rígidos o rocosos en los cuales no se puede emplear el pipe bursting.

Este método hace uso de la técnica de horizontal directional drilling (HDD) explicado con anterioridad, el cual es uno de los componentes más importantes de este método, el cual se emplea para insertar una sarta de perforación a través de la tubería existente con el fin de aumentar la sección. La nueva tubería está unida a la herramienta de fresado y se jala en la medida que avanza el taladro. Además, los fragmentos de la tubería existente junto con el suelo cortado se mezclan en el fluido de perforación y son empujados a través de la tubería existente al pozo de entrada o acceso donde se extraen para luego ser separados y eliminados.

Dentro de las ventajas de este método se encuentran que permite realizar cambios de dirección leves en el alineamiento de las tuberías, permite dejar la zona de perforación libre de residuos gracias al manejo eficiente del material fracturado y reduce la interrupción en zonas urbanas. No obstante, tiene imitaciones como por ejemplo que su costo es mayor que otras tecnologías como el pipe bursting debido a que se basa en el HDD.

(Barrera Murillo, 2016)

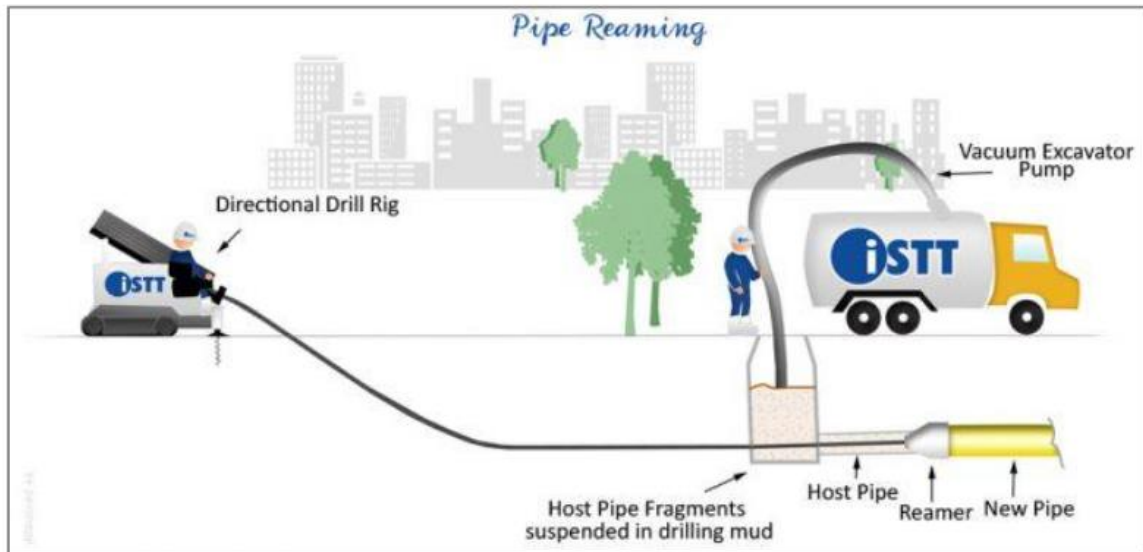


Figura 18. Pipe reaming

Tomada de: Barrera Murillo, C. A. (2016). *Tecnologías más promisorias para renovar y rehabilitar tuberías de sistemas de alcantarillado. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.*

2.8.2.1.4 TUNNEL LINER

El método de tunnel liner consiste en la excavación y ensamblaje interior, progresivo y simultáneo de placas de acero corrugado, en el caso de alcantarillados sanitarios se puede presentar una terminación en acero negro o revestimiento protector. Esta tecnología se emplea para la renovación de nuevas tuberías de alcantarillado de diámetros mayores a 1 metro dependiendo la longitud de intervención y las características de la tubería existente. Este método se compone de estructuras circulares de acero, formadas por un perfil corrugado en forma de “M” con dos pestañas para la unión y espesor de acuerdo con cada proyecto. El ensamblaje se realiza desde el interior mediante pernos y tuercas tanto en el sentido longitudinal como perimetral de la estructura. Además, los vacíos entre la superficie externa de las chapas de revestimiento y el terreno deben ser llenados por medio de una inyección de mortero fluido para evitar deformaciones.

(Barrera Murillo, 2016)

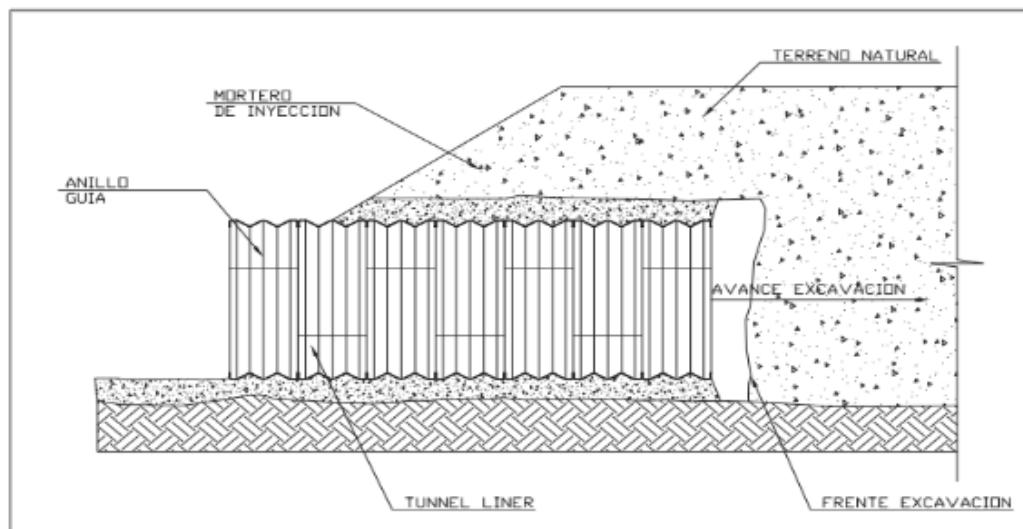


Figura 19. Sección longitudinal método tunnel liner

Tomada de: Barrera Murillo, C. A. (2016). *Tecnologías más promisorias para renovar y rehabilitar tuberías de sistemas de alcantarillado. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.*

2.8.2.1.5 VIDA ÚTIL DE LOS MÉTODOS

Los métodos anteriores se pueden emplear en sistemas de acueducto y alcantarillado, tanto de agua residual como aguas lluvias. Por otra parte, de acuerdo con lo expuesto por Najafi (2005) a continuación se presenta una tabla en la que se muestra los materiales de tubería empleados y su vida útil:

Tabla 6. Vida útil y materiales de las tuberías renovadas con métodos sin zanja abierta

Método de renovación	Materiales usados	Vida útil
Pipe bursting	Polietileno, PVC, HDPE y GRP	>50 años
Pipe reaming	Tuberías termoplásticas (PVC y PE)	>50 años
Pipe eating	Concreto simple, GRP	>50 años
Tunnel liner	Acero	>50 años

2.8.2.2 MÉTODOS DE REHABILITACIÓN

La rehabilitación de tuberías comprende las técnicas en las cuales se mejoran las condiciones internas de una tubería vieja sin destruirla, con el fin de fortalecer sus características estructurales o mejorar la capacidad hidráulica de las mismas (Sánchez, 2011). Dentro de estos métodos se encuentran los siguientes:

2.8.2.2.1 CLOSE FIT SLIP LINING

El método close fit slip lining se emplea para la rehabilitación de tuberías y consiste en la inserción de una tubería termoplástica nueva en la sección existente de la tubería. Este método está diseñado para ser una línea independiente capaz de resistir todas las cargas por sí misma, se emplea generalmente para rehabilitar tuberías entre los 200-500 mm y aquellas que se encuentran en áreas de difícil acceso o tráfico pesado donde los pozos existentes se pueden usar (Barrera Murillo, 2016).

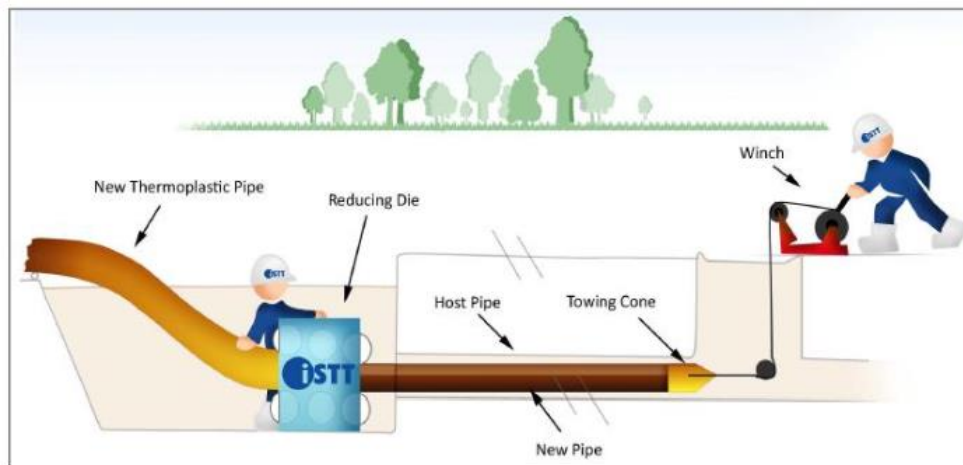


Figura 20. Close fit slip lining

Tomada de: Barrera Murillo, C. A. (2016). *Tecnologías más prometedoras para renovar y rehabilitar tuberías de sistemas de alcantarillado*. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.

En este método se emplean materiales termoplásticos los cuales cambian su forma cuando se aplican fuerzas al material ya sea mediante la aplicación de compresión o tensión, pero retornan a su forma original cuando la fuerza externa se elimina o se aplica presión interna. Esta propiedad permite que la tubería termoplástica pueda ser deformada temporalmente e ingresada a la tubería vieja, y una vez colocada en la posición deseada se deje de aplicar la tensión en la tubería con el fin de que esta vuelva a su forma original. A su vez, se pueden encontrar dos sistemas dentro de este método, la reducción concéntrica y el sistema de técnicas plegadas de inserción (Barrera Murillo, 2016):

2.8.2.2.1 TÉCNICA DE REDUCCIÓN CONCÉNTRICA

Dentro de esta técnica se encuentran a su vez incluídas dos técnicas que son la técnica de deformación por tensión y por compresión. La primera utiliza un rodillo para reducir el diámetro de la tubería termoplástica por medio de sistemas estáticos de troqueles los cuales reducen el diámetro exterior a un diámetro mínimo en relación con el orificio de la tubería existente mientras se mantiene la aplicación de la tensión generada por la fuerza de tirar de la tubería, una vez instalada la tubería se libera la tensión de la tubería haciendo que esta vuelva a su sección inicial. La segunda técnica consiste en empujar la tubería por una serie de rodillos que reducen su diámetro, reduciendo la sección de la tubería mientras es empujada o halada, finalmente se utiliza presión interna del agua o aire para regresar la tubería a su sección original.

2.8.2.2.1.2 TÉCNICAS PLEGADAS DE INSERCIÓN

Es técnica se emplea para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado de aguas residuales, pero puede utilizarse también para sistemas de agua potable y tuberías a gravedad. La nueva tubería está hecha de polietileno regular, esta se suministra en longitudes continuas, y debe ser introducida en forma de “C” en el sistema preexistente, tal como se observa en la Figura 21 (Cuello Mendoza, 2021).



Figura 21. Tecnología close fit slip lining

Tomada de: Cuello Mendoza, M. M. (2021). Factibilidad del uso de tecnologías sin zanja para la rehabilitación y/o renovación de sistemas de alcantarillado, caso de estudio: centro histórico de santa marta. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.

El siguiente paso consiste en usar vapor con el fin de que el tubo compactado se invierta y que esta tome la forma de la tubería deteriorada gracias a la tecnología de memoria del polietileno. No obstante, al ser este un revestimiento interno, se pierde área transversal de la tubería, lo cual puede llegar a afectar el transporte de agua residual dentro de la red de alcantarillado, pero al mismo tiempo al ser el revestimiento más liso se mejora el comportamiento hidráulico y la capacidad de flujo de la tubería. Asimismo, esta tecnología se emplea en tuberías de diámetros pequeños de hasta 500 milímetros y la geometría para la cual está diseñada es principalmente para tuberías circulares (Cuello Mendoza, 2021).

2.8.2.2.2 CIPP

El método de rehabilitación de tuberías Cured in Place Pipe-CIPP (curado de tuberías en sitio) consiste en la inserción de un material flexible en forma de tubo de matriz fibrosa de resina termo endurecible dentro de la tubería de huésped, el cual es llenado con agua o aire a alta temperatura para alcanzar el curado o endurecido del tramo intervenido. Esta técnica normalmente se emplea para diámetros entre 100 y 2800 mm en longitudes máximas de 1000 metros. Previo a la inserción del tubo de revestimiento, las conexiones domiciliarias son suspendidas o desviadas y se debe realizar la limpieza de la tubería para evitar imperfecciones el tramo. Luego de la etapa de curado de la tubería insertado, se procede al restablecimiento de la funcionalidad del tramo intervenido.

(Sánchez, 2011)



Figura 22. Maquinaria utilizada en el método CIPP

Tomada de: Mínguez Santiago, F. (2015). Métodos de excavación sin zanjas. Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Existen dos formas de introducir la tubería flexible en la tubería huésped, la primera es mediante suministro de agua o aire y la segunda consiste en halar con cables dentro de la tubería existente para ser posteriormente polimerizada. Además, no se requiere rellenar el espacio entre la nueva tubería y la existente puesto que no hay espacio anular y se puede emplear para varias formas de tubería. Con

respecto a sus ventajas se encuentran que tiene altos rendimientos de instalación, se pueden ajustar los alineamientos y variaciones en el diámetro, así como que no presenta espacio anular entre la tubería huésped y la tubería instalada. Dentro de sus desventajas están que las conexiones domiciliarias se deben recuperar luego del proceso de curado, requiere de personal capacitado y equipo especializado y el uso en diámetros pequeños hace costosa la implementación de esta tecnología.

(Sánchez, 2011)

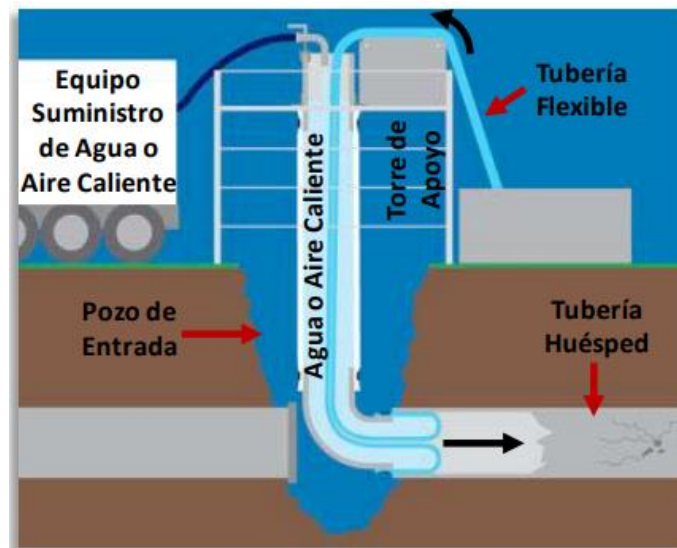


Figura 23. Esquema CIPP

Tomada de: Sánchez, L. G. (2011). *Tecnologías promisorias para renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de alcantarillado. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental., Bogotá.*

2.8.2.2.3 SPIRAL WOUND LINING

El método de rehabilitación spiral wound lining (SWL) consiste en la instrucción de una banda (con pestañas en sus bordes) en el tramo a intervenir y mediante un sistema mecánico se realiza el enrollamiento helicoidal de estas, formando un conducto con el diámetro y forma deseada. Las bandas tienen unas pestañas que se cierran herméticamente durante el armado y tienen un ancho de 2 a 6 pulgadas y pueden ser de PVC, acero o PEAD (Sánchez, 2011).



Figura 24. Rehabilitación de tuberías de diferente sección con el método spiral wound lining

Tomada de: Mínguez Santiago, F. (2015). *Métodos de excavación sin zanjas. Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.*

Este método se puede ver como una técnica de revestimiento deslizante o de diámetro fijo (spiral wound slip lining) cuando el revestimiento en espiral es instalado en una tubería y el espacio anular es rellenado con grouting para completar el revestimiento. Asimismo, se puede ver como un revestimiento de ajuste estrecho para tubos de menor diámetro en especial, donde las tiras de perfil pueden ser expandidas por la máquina para ajustarse con la tubería huésped (spiral wound close fit lining (Barrera Murillo, 2016).

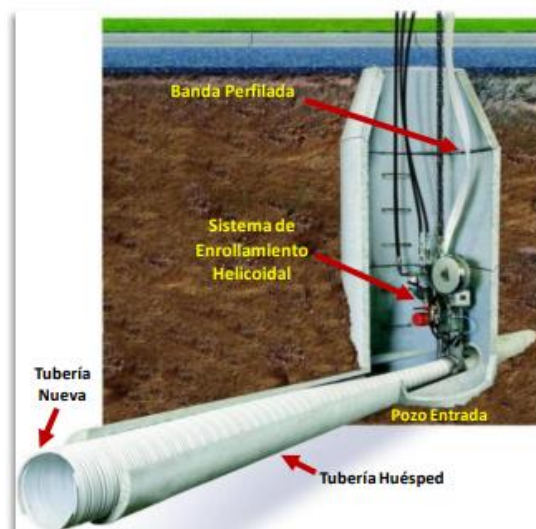


Figura 25. Spiral wound lining

Tomada de: Sánchez, L. G. (2011). *Tecnologías promisorias para renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de alcantarillado. Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental., Bogotá.*

De igual manera hay dos formas de instalación, la primera es con una máquina de bobina para formar el revestimiento dentro de la tubería y la segunda de manera manual con una operación de un hombre dentro de la tubería original. Por otra parte, dentro de sus principales beneficios se encuentran que es altamente eficiente, se puede usar en gran cantidad de diámetros, tipos de secciones y longitudes, el cambio en la sección hidráulica es leve (Barrera Murillo, 2016). Dentro de sus desventajas se encuentra que requiere maquinaria y equipo especializado para su instalación así como que no es recomendable su aplicación en tuberías de PVC en las que se combine corrosión y bajas temperaturas (Sánchez, 2011).



Figura 26. Instalación Spiral Wound

Tomada de: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). Rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias.

2.8.2.2.4 REPARACIÓN PUNTUAL (POINT REPAIR)

Permite la rehabilitación de tuberías con diámetros de 50 mm a 600 mm, con presencia de grietas, fracturas, agujeros y la separación de las juntas. La reparación se centra sobre el segmento puntual de la tubería donde se ubica el daño. Se emplea un paño flexible de poliéster con fibra de vidrio y resinas epóxicas 100% para sólidos. Es un procedimiento simple, eficaz, sin interrumpir el flujo de aguas y no requiere trabajos de excavación, es posible realizar intervenciones en tiempos breves, con notable reducción de costos (SG Ingeniería en ductos S.A. ESP, s.f.).



Figura 27. Técnica reparación puntual

Tomada de: Pace Municipal Maintenance. (2022). *Point Repairs*. Obtenido de <https://www.pacemt.com/services/point-repairs/>

2.8.2.2.5 VIDA ÚTIL DE LOS MÉTODOS

Los métodos anteriores se pueden emplear en sistemas de alcantarillado tanto de aguas residuales como aguas lluvias. Por otra parte, de acuerdo con lo expuesto por Najafi (2005) a continuación se presenta una tabla en la que se muestra los materiales empleados y su vida útil esperada:

Tabla 7. Vida útil y materiales de las tuberías rehabilitadas con métodos sin zanja abierta

Método de rehabilitación	Materiales usados	Vida útil
Close fit slip lining	Polietileno	>50 años
CIPP	Resina de termosellado	>50 años
Spiral wound lining	HDPE, PE y PVC	>50 años

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 IMPACTOS AMBIENTALES

3.1.1 HUELLA DE CARBONO

Kaushal et al (2020) realizaron una revisión bibliográfica sobre la literatura existente de la comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre los métodos de instalación de tuberías abierto y sin zanjas entre los años 1980 y 2019 al igual que los procedimientos utilizados para la estimación de la huella de carbono. Dentro del estudio se consideraron métodos de instalación sin zanja como HAB, HDD y excavación con micro tuneladora, así como métodos de renovación como pipe bursting y de rehabilitación como CIPP. Producto de la revisión bibliográfica se encontró que se han realizado varios estudios para la investigación y cuantificado las emisiones de GEI en proyectos de instalación de tuberías, los cuales en su mayoría hicieron uso del modelo no vial USEPA a partir del cual se han desarrollado herramientas como calculadoras de emisiones. Modelos como este pueden ser útiles para elegir que método de instalación de tuberías elegir en función de las emisiones de efecto invernadero liberadas al ambiente, las cuales son la principal causa del calentamiento global. A pesar de que los estudios realizados a la hora de analizar los efectos ambientales se enfocan en los gases de efecto invernadero, en el caso de la construcción, estos efectos generalmente se miden mediante la huella de carbono, la cual se expresa en términos de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Kaushal, Najafi, & Serajiantehrani, 2020).

De acuerdo con lo anterior, para la determinación de la huella de carbono inicialmente se debe seleccionar qué gases de efecto invernadero se requieren medir, así como trazar los límites de análisis para posteriormente realizar la recolección de los datos para el cálculo respectivo. Con respecto a la definición de los límites de análisis de acuerdo con los dos componentes principales de la huella de carbono como se ve en la Figura 28, el básico se refiere a la huella de carbono calculada de las emisiones directas y la energía incorporada, y el completo que incluye todas las emisiones directas e indirectas. Por su parte, la recolección de los datos se puede realizar in situ o por medio de otras fuentes de recolección como bases de datos globales o inventarios, dependiendo del objetivo del estudio y otros factores como la credibilidad, viabilidad, costo y capacidad. Finalmente, el cálculo de la huella de carbono se puede realizar con ayuda de modelos (Kaushal, Najafi, & Serajiantehrani, 2020).

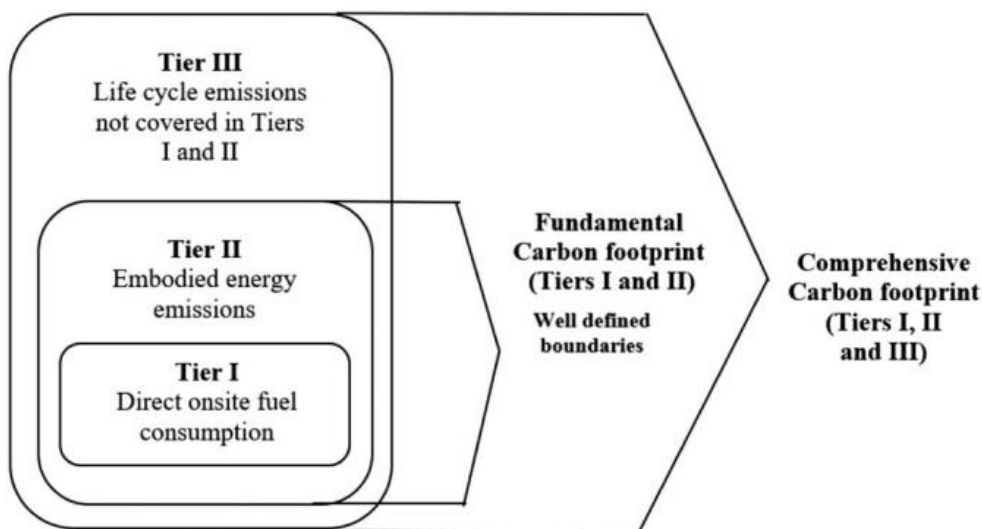


Figura 28. Límites para el cálculo de la huella de carbono

Tomada de: Kaushal, V., Najafi, M., & Serajiantehrani, R. (2020). *Environmental Impacts of Conventional Open-Cut Pipeline Installation and Trenchless Technology Methods: State-of-the-Art Review. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.*

El estudio encontró que se han realizado varias investigaciones que comparan las emisiones tanto de métodos sin zanja como con zanja para la instalación, renovación y rehabilitación de tuberías. Todos los estudios realizados en el periodo analizado encontraron que al utilizar técnicas sin zanja para la instalación, renovación y rehabilitación de tuberías como HDD, excavación con micro tuneladora o pipe bursting se obtienen menores impactos ambientales dado que las emisiones son menores como se ve en la Tabla 8, por lo cual el método tradicional con zanja abierta genera mayores impactos negativos en el medio ambiente (Kaushal, Najafi, & Serajiantehrani, 2020), más adelante de entrará en detalle en algunas de estas investigaciones.

Por otra parte, dentro de la revisión bibliográfica se encontró que las investigaciones han empelado diferentes materiales de tubería para el cálculo de los gases de efecto invernadero, estos estudios han hecho uso de 6 materiales de tuberías diferentes como PVC, HDPE o CIPP por lo cual son clasificados de acuerdo con sus emisiones de CO₂ como se muestra en la Tabla 9. Se destaca que los resultados muestran de los materiales analizados el PVC es uno de los materiales con menores emisiones de CO₂ y una menor huella de carbono (Kaushal, Najafi, & Serajiantehrani, 2020).

Tabla 8. Clasificación métodos con y sin zanja con base en las emisiones de CO₂

Tomada de: Kaushal, V., Najafi, M., & Serajiantehrani, R. (2020). *Environmental Impacts of Conventional Open-Cut Pipeline Installation and Trenchless Technology Methods: State-of-the-Art Review. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.*

References	Classification	Type of methods	EIs	GHG emission	Result
Rehan and Knight (2007)	PCM	OCPI and TCM	Air pollution	CO ₂	TCM resulted in 78%–100% fewer GHG emission compared with OCPI
Sihabuddin and Ariaratnam (2009b)	PCM	OCPI and HDD	Air pollution	CO ₂	HDD resulted in fewer emissions compared with OCPI
Piratla et al. (2012)	PCM	OCPI and HDD	Air pollution	CO ₂	HDD resulted in 47.6% fewer emissions compared with OCPI
Ariaratnam et al. (2013)	PCM	OCPI, PTMT, HDD, and MT	Air pollution and social impact	CO ₂	PTMT, MT, and HDD resulted in 48.36%, 42.68%, and 31.65%, respectively, fewer emissions compared with OCPI
Mohit et al. (2017)	PCM	HT and PTM	Air pollution	CO ₂	PTM resulted in 17%–36% fewer emissions compared with HT
Monfared (2018)	PCM	OC, AB, and HDD	Air pollution	CO ₂	AB and HDD resulted in 70%–99% and 90%–99%, respectively, fewer emissions compared with OCPI
Ariaratnam and Sihabuddin (2009)	PRM	OCPI and PM	Air pollution	CO ₂	PB resulted in 80% fewer emissions compared with OCPI
Ariaratnam (2011)	PRM	PB and OCPI	Air pollution	CO ₂	PB resulted in fewer emissions compared with OCPI
Joshi (2012)	PRM	OCPI and PB	Air pollution	CO ₂	PB resulted in 72.6% fewer emissions compared with OCPI
Loss et al. (2018)	PRM	PB and OCPI	Air pollution	CO ₂	Pipe bursting resulted in fewer emissions compared with OCPI

Note: PCM = pipeline construction method; and PRM = pipeline renewal method.

Tabla 9. Clasificación materiales de tubería con base en las emisiones de CO₂

Tomada de: Kaushal, V., Najafi, M., & Serajiantehrani, R. (2020). *Environmental Impacts of Conventional Open-Cut Pipeline Installation and Trenchless Technology Methods: State-of-the-Art Review. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.*

References	Type of pipe material	Pipe diameter range	GHG emission	Result
Du et al. (2013)	PVC, DIP, CIP, HDPE, CP, and RCP	≤24 in. and ≥30 in.	CO ₂	CP has the lowest GWP; DIP and PVC have the highest GWP for pipe diameters less than or equal to 24 in. and greater than or equal to 30 in., respectively
Piratla et al. (2012)	PVC-O, PVC, HDPE, and DIP	8 in.	CO ₂	PVC-O is environmentally the best material compared with other pipe materials
Chilana et al. (2016)	SP and PCCP	66, 72, 84, and 108 in.	CO ₂	PCCPs have smaller CF compared with SP due to the greater energy consumption during manufacturing
Khan and Tee (2015)	SP, DIP, and PVC	15.7 in.	CO ₂	PVC pipe emitted less GHG emissions compared with SP and DIP
Kyung et al. (2017)	PVC, PE, CP, and CIP	—	CO ₂	CP generate less GHG emissions compared with other pipe materials
Parvez (2018)	PVC, HDPE, DIP, and PCCP	—	CO ₂	PVC pipe has the lowest CF as compared with other pipe materials
Alsadi (2019)	CIPP, HDPE, PVC, and PCCP	—	CO ₂	CIPP lining has the highest GHG emissions during the fabrication phase followed by HDPE, PVC, and PCCP

En ese orden de ideas, como se expuso anteriormente a través del tiempo se han desarrollado diferentes investigaciones respecto del impacto ambiental de las tecnologías sin zanja para la instalación de tuberías como la realizada por la Pipe Jacking Association (2017) quien comparó la huella de carbono generada por la construcción de tuberías de alcantarillado usando el método de zanja abierta y un método sin zanja (pipe jacking) para tuberías de 100 m de longitud y diámetros de 600 mm y 1200 mm. El estudio asumió que los escombros excavados son retirados a un sitio con los permisos ambientales requeridos y que cualquier vacío luego de instalar la tubería es llenado con piedra revestida. Además, se ignoró el efecto en la huella de carbono de los pozos y el transporte de las tuberías teniendo en cuenta que son comunes a ambos métodos. Para el cálculo de la huella de carbono se usó la calculadora de carbono disponible en la página web de la asociación, la cual fue desarrollada por el Laboratorio de Investigación de Transporte del Reino Unido y verificada por el Centro de Investigación del Agua del Reino Unido.

El estudio encontró que la huella de carbono al instalar la tubería con el método sin zanja tanto para la tubería de 600 mm como la de 1200 mm es menor que si se instalaran estas tuberías con el método tradicional de zanja abierta. De acuerdo con lo anterior, por una parte, los resultados muestran que la huella de carbono de la instalación de la tubería de 1200 mm para ambas tecnologías es mayor que la huella de carbono de la instalación de la tubería de 600 mm, siendo en el caso de la tecnología con zanja abierta 39,69% mayor mientras en el caso de la tecnología sin zanja 61,12% superior. Además, la tecnología sin zanja permite una reducción del 59,37% de la huella de carbono para el caso de la tubería de 600 mm y de 36,98% para el caso de la tubería de 1200 mm.

Tabla 10. Comparación instalación tuberías empelando el método de zanja abierta y sin zanja para dos diámetros diferentes

Tomada de: Pipe Jacking Association. (2017). An introduction to pipe jacking and microtunnelling. Pipe Jacking Association.

Aspect	600mm ID pipeline 4m deep, 100m length		1200mm ID pipeline 4m deep, 100m length	
	Open trench	Trenchless	Open trench	Trenchless
Excavated width	1400mm (trench width)	760mm (OD of jacking pipe)	2350mm (trench width)	1450mm (OD of jacking pipe)
Reinstatement width	1700mm	None	2650mm	None
Excavated volume per metre of pipeline	6.1m ³	0.5m ³	10.28m ³	1.65m ³
Imported stone fill and coated stone per metre of pipeline	11.9 tonnes	None	18.27 tonnes	None
Number of 20 tonne lorry loads per 100m pipeline (muck away and imported stone)	136	8	220	21
Tonnes CO ₂ emissions	66.7	27.1	110.6	69.7

A pesar de que varios artículos académicos han mostrado las ventajas de los métodos sin zanja en la protección del medio ambiente por medio de casos prácticos, muy pocos han analizado el consumo energético o huella de carbono de varios métodos de construcción sin zanja bajo varios parámetros de diseño. Por ello Lu, Matthews & Iseley (2020) analizaron el consumo energético de varias tecnologías sin zanja de instalación, renovación y rehabilitación. El objetivo principal de la investigación es ayudar a optimizar la toma de decisiones cuando se tenga que analizar aspectos como por ejemplo la velocidad de construcción o factores económicos de dos o más tecnologías para la instalación, renovación o rehabilitación de tuberías, de manera que comparando el consumo de estas y su huella de carbono se pueda tomar la decisión más conveniente.

Dentro de las tecnologías sin zanja de instalación consideradas en el estudio se incluyen HAB, HDD, excavación con micro tuneladora o pipe jacking; dentro de las técnicas de renovación se consideró el pipe bursting y dentro de las técnicas de rehabilitación se incluyeron CIPP, entre otras. De igual forma se consideraron 5 tipos diferentes de suelo, si el terreno estaba húmedo o no, 5 tipos de superficie ya sea asfalto o pasto por ejemplo, 4 rangos de diámetros de tuberías diferentes, 10 longitudes de tuberías distintas entre los 10 m y los 100 m, y 5 profundidades de instalación, renovación o rehabilitación diferentes desde 1 m hasta 3 m como se puede ver en la Tabla 12. De igual forma, teniendo en cuenta los 4 rangos de diámetros de tuberías elegidos se especificó para cada rango que método se consideró siendo por ejemplo el 4 rango el de menor aplicación de métodos ya que solo se consideró el método tradicional y la técnica de pipe jacking:

Tabla 11. Aplicación métodos de instalación, renovación y rehabilitación de acuerdo con el diámetro de las tuberías

Tomada de :Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. Journal of Cleaner Production.

Diameter category	Diameter range (mm)	Installation/renewal method
I	50–300	IM, PR, CIPP, DR, PB, OC
II	400–1300	HDD, HAB, PJ, PR, CIPP, SL, DR, PB, OC
III	1400–2000	HDD, PJ, PR, CIPP, SL, OC
IV	2100–4000	PJ, OC

Tabla 12. Variables consideradas relacionadas con las tuberías consideradas en el estudio

Tomada de :Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. Journal of Cleaner Production.

Construction method	IM, PR, PJ, HAB, HDD, SL, CIPP, DR, PB, OC
Soil type	Light soil/sand (1), medium soil (2), heavy soil (3), hard pan (4), rock (5)
Ground condition	Wet (1), dry (2)
Surface type	Asphalt (1), concrete (2), trees (3), grass (4), others (5)
Pipe diameter	Range 1: 50–300 mm (step size is 50 mm) Range 2: 400–1300 mm (step size is 100 mm) Range 3: 1400–2000 mm (step size is 100 mm) Range 4: 2100–4000 mm (step size is 100 mm)
Construction length	10 m (1), 20 m (2), 30 m (3), 40 m (4), 50 m (5), 60 m (6), 70 m (7), 80 m (8), 90 m (9), 100 m (10)
Construction depth	1 m (1), 1.5 m (2), 2.0 m (3), 2.5 m (4), 3.0 m (5)

Igualmente, en el estudio se realizaron varios supuestos como que la tubería se va a instalar, renovar o rehabilitar en una ciudad, que la profundidad al inicio y final de la tubería es igual, que se tienen 3

conexiones laterales y 2 pozos de inspección, que el material excavado no es reutilizado, que la capacidad de la volqueta para el transporte de los escombros es de $7,5 m^3$, que el sitio de disposición de los escombros está localizado a 10 km de la obra así como el ancho mínimo y máximo de la zanja en el caso del método tradicional como se observa a continuación:

Tabla 13. Supuestos realizados en el estudio

Tomada de :Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production*.

Factor	Setting or assumption
Pipe depth at start and pipe depth at the end	They are equal
Manhole quantity	2
Quantity of lateral/service connections near-side/far-side	3
Quantity of entry pit/exit pit	1
Distance between the construction site and dump site	10 km
Percentage of excavated material reused	0%
Soil/gravel/sand truck capacity	$7.5 m^3$
Trench upper width (for OC method) (m)	Pipe diameter + 1
Trench lower width (for OC method) (m)	Between (Pipe diameter + 0.45) and (Pipe diameter + 0.60)

De acuerdo con Lu, Mathhews & Iseley (2020) la huella de carbono debe ser calculada indirectamente mediante el cálculo del consumo de energía. Los autores, proponen calcular la huella de carbono de la etapa de instalación de tuberías teniendo en cuenta el consumo de energía de:

1. Fabricación de las tuberías: El mayor consumo energético proviene de la fabricación de las tuberías.
2. Transporte de las tuberías: El mayor consumo energético proviene del combustible consumido por los vehículos que transportan las tuberías.
3. Instalación de las tuberías: El mayor consumo energético proviene de la operación de la maquinaria y equipos.

De manera que el consumo total de energía para la etapa de instalación se puede calcular de la siguiente manera:

$$EN_{total} = EN_{Fabricación} + EN_{Transporte} + EN_{Instalación}$$

En ese orden de ideas, no se consideró el consumo de energía en la etapa de fabricación de las tuberías debido a que durante esta etapa las diferencias en el consumo energético son pequeñas de acuerdo con los autores. Con respecto al consumo de energía por el transporte de las tuberías se consideraron tres fuentes de consumo de energía:

1. Transporte de las tuberías hasta la obra.
2. Transporte del equipo y la maquinaria hasta la obra.
3. El movimiento del equipo dentro de la obra y hasta el sitio específico de la obra.

Para el cálculo del consumo energético de los procesos anteriores los autores hicieron uso de la siguiente fórmula:

$$EN_{Transporte} = q * d * e$$

$$q = \text{Masa del material} \quad d = \text{Distancia de transporte} \quad e = 2,423 \frac{MJ}{t * km}$$

Por otra parte, para la instalación de las tuberías como tal se debe tener en cuenta que el consumo energético proviene de la operación de la maquinaria y equipos, el cual está relacionado por ejemplo con el tiempo de operación o el tipo de motor. Para realizar este cálculo se hace uso de las siguientes ecuaciones:

$$EN_{Instalación} = T * e_e$$

$T =$ Tiempo de operación total del equipo

$e_e =$ Coeficiente de consumo energetico de los equipos

Finalmente, se puede calcular las emisiones de carbono de la siguiente manera utilizando un factor de emisiones obtenido de la EPA:

$$E = \sum_{f=1}^g E_f C_f$$

$E_f =$ Consumo energetico $C_f =$ Factor de emisiones

A continuación, se presentan los resultados de la investigación:

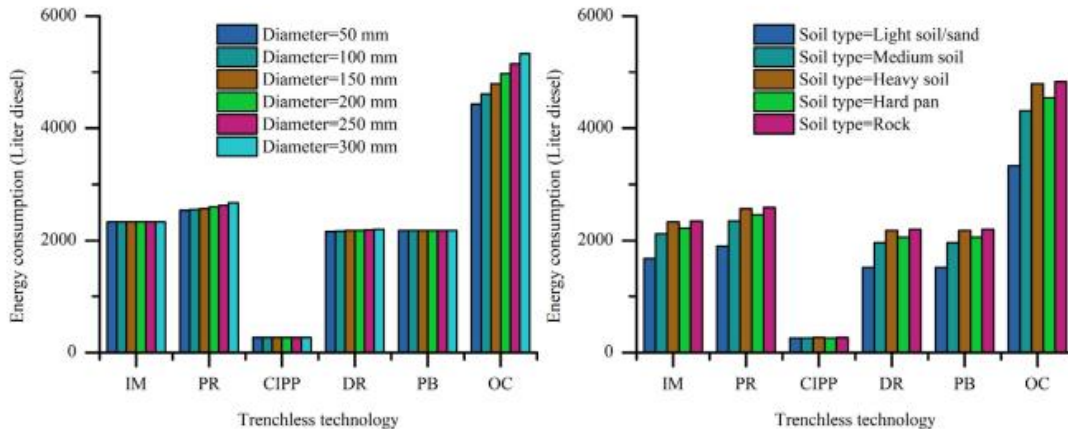


Figura 29. Consumo energético considerando el tipo de suelo y el diámetro de la tubería

Tomada de :Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production*.

De acuerdo con la Figura 29 se observa que el consumo energético y por ende la huella al variar el diámetro y el tipo de suelo es mayor cuando se emplea la tecnología con zanja abierta que cuando se usan métodos sin zanja. Además, para los métodos tradicional y pipe ramming a mayor diámetro de tubería mayor es el consumo energético mientras que para los demás métodos como CIPP o pipe bursting el consumo energético no varía para los 6 diámetros analizados. Igualmente, si se tienen suelos blandos como arcilla o arenas la huella de carbono es menor que si se tienen suelos rocosos, este comportamiento se observó para todos los métodos.

En ese orden de ideas como se encontró que el consumo energético es mayor cuando el suelo este húmedo que cuando el suelo este seco para todos los métodos analizados excepto para CIPP como se ve en la Figura 30. Asimismo, se encontró que el tipo de superficie no afecta el consumo energético puesto que este es igual para las 6 condiciones de tipo de superficie por lo cual no afecta la huella de carbono si en la superficie se tiene sea asfalto o pasto, por ejemplo.

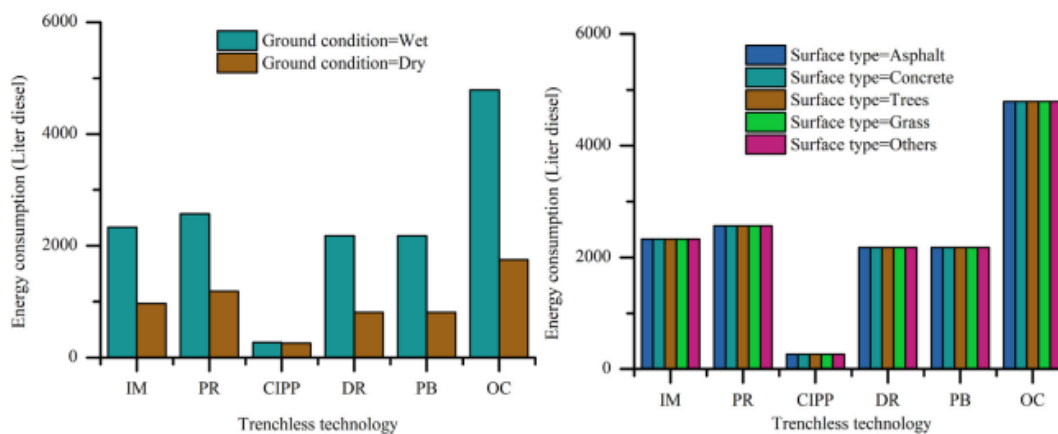


Figura 30. Consumo energético considerando la condición del suelo y el tipo de superficie

Tomada de :Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production*.

Por otra parte, el estudio encontró que en general a medida que aumenta la profundidad de instalación, rehabilitación o renovación de la tubería aumenta el consumo energético y la huella de carbono así como que a menores profundidades se tiene un menor consumo energético para los métodos considerados exceptuando el CIPP cuyo consumo energético no varía tal como se observa en la Figura 31. De igual manera, los resultados muestran que en el caso de la tecnología con zanja abierta y otros como el pipe ramming si se incrementa la longitud de la tubería se incrementa el consumo energético, aunque para otros métodos como CIPP o pipe bursting el consumo energético no varía si se aumenta o se reduce la longitud de la tubería a instalar, renovar o rehabilitar.

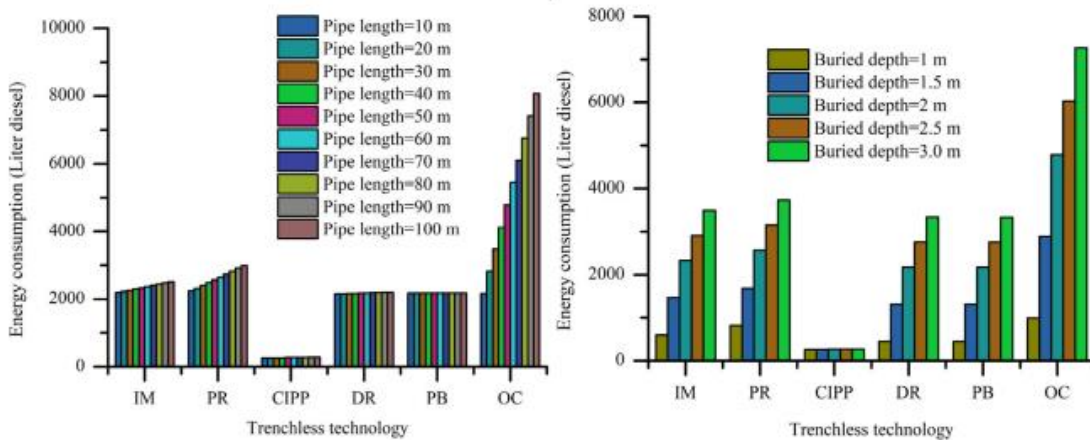


Figura 31. Consumo energético considerando la longitud de la tubería y la profundidad de excavación

Tomada de :Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production*.

A partir del estudio realizado se observa que todos los métodos considerados tienen un consumo energético y una huella de carbono inferior que la tecnología sin zanja, logrando una reducción de hasta el 98% en el caso del CIPP por ejemplo o hasta el 56% en el caso de HAB y HDD:

Tabla 14. Reducción en el consumo de carbono y el consumo energético de los métodos sin zanja comparados con el método con zanja abierta

Tomada de :Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production*.

Método	Reducción de la huella de carbono VS método con zanja abierta
Horizontal Directional Drilling(HDD)	6%-56%
Horizontal auger boring(HAB)	26%-56%
Impact Mole(IM)	38%-68%
Pipe jacking	14%-86%
Pipe ramming	6%-62%
CIPP	73%-98%
Pipe Bursting	50%-82%
Sliplining(Deslizamiento)	55%-91%
Aplicación de tuberías sin presión (Compact Pipe)	51%-81%

3.1.2 HUELLA DE CARBONO A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA DE LAS TUBERÍAS

Generalmente cuando se selecciona algún método o material de tubería para su instalación, renovación o rehabilitación generalmente el costo directo es el único factor considerado en la selección del método y material a utilizar en el proyecto, dejando de lado otros aspectos como los costos sociales o los impactos ambientales los cuales dentro del concepto de construcción sostenible cobran gran relevancia. Algunos estudios han evaluado los costos sociales pero muy poco se ha evaluado la sostenibilidad de los materiales de las tuberías durante su etapa de fabricación, por lo cual Alsadi, Matthews, & Matthews (2020) analizaron y compararon las emisiones de carbono (CO₂) durante la fase de fabricación de tuberías de 90 cm (36 in) de diámetro y una longitud de 30 m (100 ft) de tres tipos distintos: PVC, CIPP y PPCP(Concreto pretensado). En la investigación se presenta un esquema del análisis de ciclo de vida de una tubería durante las etapas de fabricación, instalación, operación y disposición, así como el consumo energético durante cada una de las fases. Dicho esquema se presenta a continuación:

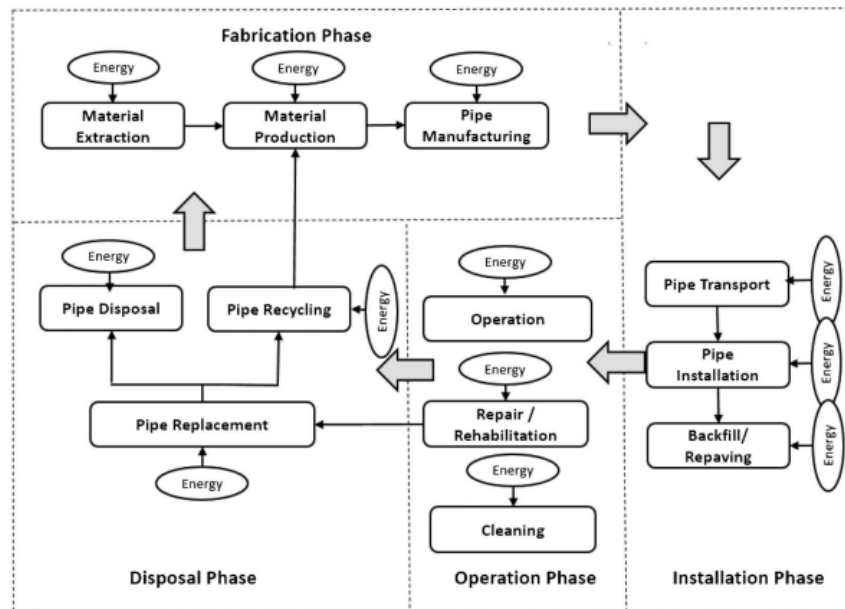


Figura 32. Analisis de ciclo de vida de las tuberías

Tomada de: Alsadi, A., Matthews, J., & Matthews, E. (2020). Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. Journal of Pipeline Systems.

De acuerdo con lo anterior, los autores para el caso de la tubería de concreto pretensado el consumo energético durante la fase de fabricación se calculó sumando el consumo energético de cada uno de los materiales de la tubería, el cual se obtiene de multiplicar la energía incorporada de cada material

por el peso de este. Teniendo en cuenta que la tubería está hecha de concreto, revestimiento de mortero, cilindro de acero y alambre pretensado el consumo energético es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Energía total}_{PCCP} = & \text{Energía incorporada}_{\text{Concreto}} * \text{Peso}_{\text{Concreto}} + \text{Energía incorporada}_{\text{Cilindro de acero}} \\
 & * \text{Peso}_{\text{Cilindro de acero}} + \text{Energía incorporada}_{\text{Revestimiento de mortero}} \\
 & * \text{Peso}_{\text{Revestimiento de mortero}} + \text{Energía incorporada}_{\text{Alambre pretensado}} \\
 & * \text{Peso}_{\text{Alambre pretensado}}
 \end{aligned}$$

Por otra parte, con respecto a la tubería de PVC se debe tener en cuenta que se obtiene a partir del etileno proveniente del petróleo bruto y del cloro que se obtiene de la sal, en la Figura 33 se muestra el proceso de producción de esta.

$$\text{Energía total}_{PVC} = \text{Energía incorporada}_{PVC} * \text{Peso}_{PVC}$$

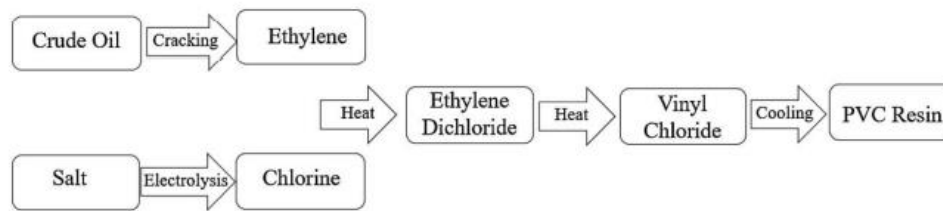


Figura 33. Proceso de producción del PVC

Tomada de: Alsadi, A., Matthews, J., & Matthews, E. (2020). Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. *Journal of Pipeline Systems*.

En ese orden de ideas, los autores para el caso de la tubería rehabilitada con el método CIPP el consumo energético durante la fase de fabricación se calculó sumando el consumo energético de cada uno de los materiales utilizados tal como se hizo con las tuberías de concreto pretensado y PVC. En el caso del CIPP, los materiales utilizados como se muestra son resina, fieltro, fibra de vidrio y revestimiento de manera que se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Energía total}_{PCCP} = & \text{Energía incorporada}_{\text{Fieltro}} * \text{Peso}_{\text{Fieltro}} \\
 & + \text{Energía incorporada}_{\text{Resina}} * \text{Peso}_{\text{Resina}} \\
 & + \text{Energía incorporada}_{\text{Revestimiento}} * \text{Peso}_{\text{Revestimiento}} \\
 & + \text{Energía incorporada}_{\text{Fibra de vidrio}} * \text{Peso}_{\text{Fibra de vidrio}}
 \end{aligned}$$

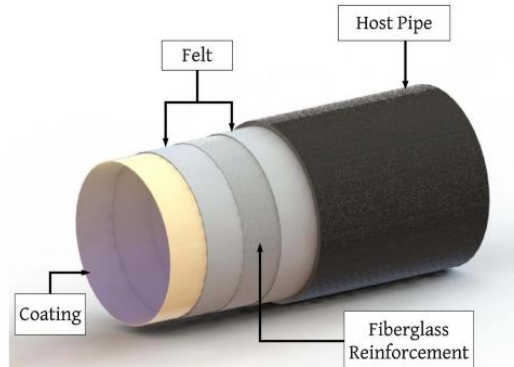


Figura 34. Sección transversal CIPP

Tomada de: Alsadi, A., Matthews, J., & Matthews, E. (2020). *Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. Journal of Pipeline Systems.*

Finalmente los resultados del estudio arrojaron que la tubería de PCCP tiene el menor consumo de energía y por ende las menores emisiones de CO₂ durante la etapa de fabricación, dos veces menos que la tubería de PVC y tres veces menos que la tubería rehabilitada con el método CIPP. Esto se debe a las materias primas de cada una de las tuberías, las cuales tienen gastos energéticos distintos. Por ejemplo, el concreto tiene una energía incorporada de 0.12 kWh/lb, la cual es inferior que la de la resina epóxica cuya energía incorporada es de 17.26 kWh/lb o que la del PVC que tiene una energía incorporada de 8.505 kWh/lb (Alsadi et al., 2020).

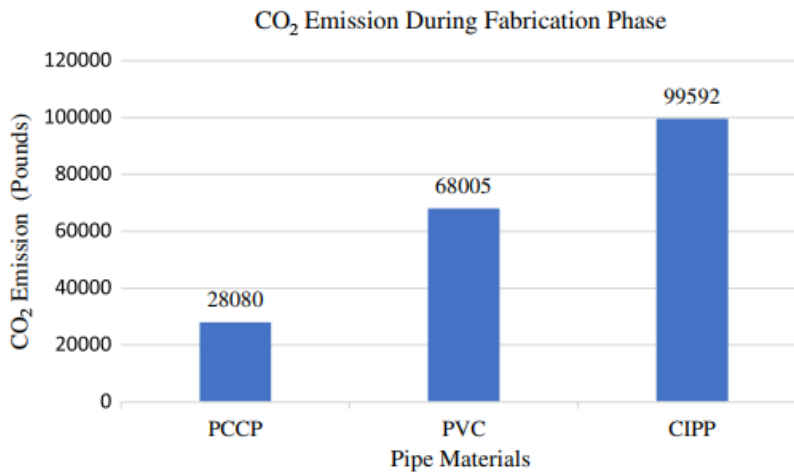


Figura 35. Emisiones de CO₂ durante la etapa de fabricación

Tomada de: Alsadi, A., Matthews, J., & Matthews, E. (2020). *Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. Journal of Pipeline Systems.*

Igualmente, Alsadi & Matthews (2020) evaluaron el impacto ambiental en términos del gasto energético y las emisiones de dióxido de carbono generados durante la fase de instalación, operación y disposición final de las tuberías completando el análisis de ciclo de vida iniciado en la investigación anterior en la cual se estudió la huella de carbono durante la etapa de fabricación de las tuberías. Para ello, se utilizaron tres métodos distintos: La calculadora E-calc, la base de datos ICE y las emisiones de dióxido de carbono resultantes de los combustibles como gasolina y diésel. El estudio se realizó considerando tuberías de 90 cm de diámetro y 30 m de largo, a su vez se contemplaron cuatro materiales de tubería distintos (PCCP, PVC, HDPE, y CIPP) (Matthews & Alsadi,2020).

Durante la fase de instalación se debe considerar el consumo energético debido al transporte de la tubería y equipos, la instalación del material, así como el relleno y repavimentación. Para esta fase se consideraron tres métodos de instalación diferentes (Zanja abierta, CIPP y pipe bursting) los cuales se explicaron en el capítulo anterior. Se debe mencionar que, al considerar tres métodos de instalación diferentes, la energía consumida varía de un método a otro y depende de factores como la cantidad de equipos, el tiempo requerido para acabar el proyecto y la ubicación del proyecto. En ese orden de ideas, para esta fase el primer paso es el transporte de la maquinaria y las tuberías al sitio de la obra. Los autores para este paso realizaron suposiciones como que la distancia entre la obra y la bodega donde se almacenan las tuberías y equipos es de 32 km, los materiales y maquinaria con transportando en camiones de cama baja cuyo consumo de diésel es de 5.9 mi/gal así como que cada galón de este combustible produce 22.2 lb/gal de emisiones de CO₂.

El siguiente paso de esta fase es la instalación de la tubería, el cual requiere más energía que los demás pasos y el consumo energético depende de diferentes aspectos del tipo de método elegido como el tipo de tubería (Peso, tamaño y longitud), equipo (Edad, potencia, capacidad) y el sitio de obra (Volumen de excavación, tipo de suelo, nivel freático, clima). Para este paso se realizaron varios supuestos como las medidas de las zanjas y los pozos de entrada y salida para los métodos sin zanja. En el caso del método tradicional la zanja es de 36.5 m de largo, 3 m de ancho y 3 m de profundidad mientras que en el caso del pipe bursting el pozo de entrada y salida es de 3.6 m de largo, 3 m de ancho y 3 m de profundidad. Por su parte, el pozo de entrada y salida del método de CIPP es de 2.4 m de largo, 2.4 m de ancho y 3 m de profundidad.

El último paso de esta fase es el relleno de la zanja con el mismo material excavado o con material nuevo y su posterior repavimentación. En el estudio se asumió que se rellenara con material nuevo y que está compuesto por 0.6 m de grava, 1.21 m de arena y 1.21 m de tierra. Con respecto a la repavimentación se debe mencionar que su consumo energético depende factores como el tamaño de la zanja, el tipo de pavimento (Concreto o asfalto) y el espesor de este.

La investigación encontró que para la fase de instalación de los tres métodos analizados el método con zanja abierta tiene mayores emisiones de CO₂ que los otros métodos sin zanja considerados y la técnica de CIPP a su vez tiene menores emisiones que el método de pipe bursting como se ve en la Figura 36. En ese orden de ideas, utilizando el método CIPP se tienen solo el 10,9% de las emisiones que se tienen con el método de zanja abierta y si se utiliza el método de pipe bursting esta cifra es del 18,4%. Además, se observa que de los tres pasos que componen esta fase la actividad de relleno

contribuye con las mayores emisiones de CO₂, seguida de la instalación y repavimentación siendo el primer paso de transporte de maquinaria y materiales a la obra el que menos contribuye con emisiones. Estos resultados obedecen a que el método CIPP requiere menor equipo para la instalación, tienen una duración corta y requiere pozos de entrada y salida pequeños a diferencias de los otros métodos como la zanja abierta que requiere más maquinaria, el proyecto dura más y requiere zanjas de gran tamaño (Alsadi & Matthews,2020).

Igualmente, Alsadi (2019) encontró que es posible optimizar las emisiones durante la fase de instalación si para los rellenos se emplea el mismo material excavado inicialmente, evitando la producción y transporte hasta la obra de nuevo material de relleno, y se realiza la repavimentación con concreto en vez de asfalto ya que este último genera más emisiones. En consecuencia, si se reutiliza el material excavado para el relleno y se repavimenta se pueden reducir las emisiones en un 70% en el caso del método con zanja abierta, del 60% para pipe bursting y del 50% para la técnica CIPP que si se rellenara con material nuevo y se repavimente con asfalto como se aprecia en la Figura 37.

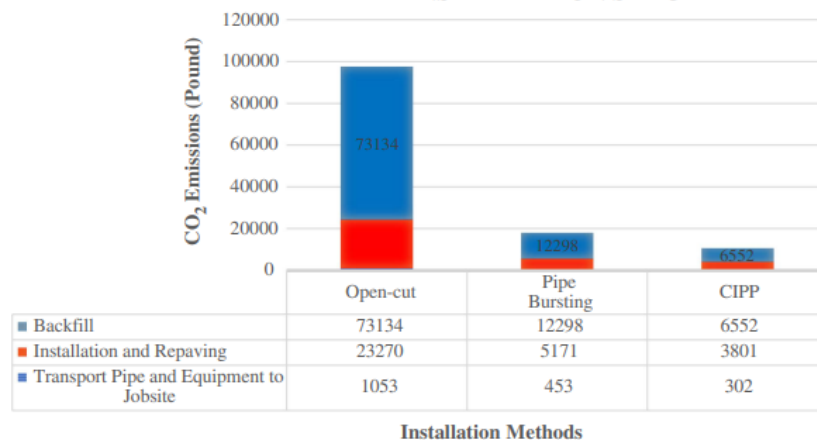


Figura 36.Emisiones de CO2 durante la fase de instalación

Tomada de: Alsadi, A., & Matthews, J. (2020). *Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during installation, Operation, and Disposal Phases. Journal of Pipeline Systems.*

Para la fase de operación se asumió una vida útil de 100 años a pesar de que las tuberías rehabilitadas con CIPP tienen una vida útil de 50 años a diferencia de las tuberías de PCCP, PVC y HDPE. La fase de operación se dividió en dos categorías para cuantificar el consumo energético, la primera es el bombeo del agua a presión específica y la segunda la limpieza de la tubería. Con respecto a la primera categoría el consumo de energía depende de variables como el área de la sección transversal, el coeficiente de fricción o la eficiencia de la bomba. Por otra parte, la segunda categoría puede mejorar la capacidad y el rendimiento hidráulico de la tubería. En el caso del estudio se consideró el método de Pigging, el cual remueve sólidos y se asumió que se realizaría cada 10 años.

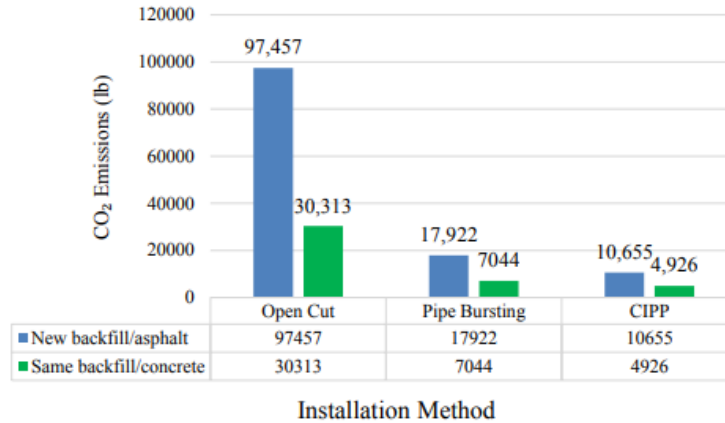


Figura 37. Optimización emisiones durante la fase de instalación

Tomada de: Alsadi, A. (2019). EVALUATION OF CARBON FOOTPRINT DURING THE LIFE-CYCLE OF FOUR DIFFERENT PIPE MATERIALS. Doctoral Dissertation. LOUISIANA TECH UNIVERSITY.

Así pues, el estudio encontró que la tubería de PCCP durante la fase de operación es la que más emisiones genera seguida de las tuberías rehabilitadas con CIPP, las tuberías de HDPE y por último las tuberías de PVC. Además, las emisiones en su gran mayoría se deben al consumo energético por el bombeo mientras las emisiones por la limpieza de la tubería son inferiores destacándose que en esta última categoría la tubería de PVC genera las mayores emisiones mientras la tubería de PCCP las menores debido a que en el caso de las tuberías de PVC el diámetro interior es mayor por lo cual se requiere más cantidad de agua para limpiar la tubería que por ejemplo en el caso de la tubería de PCCP cuyo diámetro interno es menor.

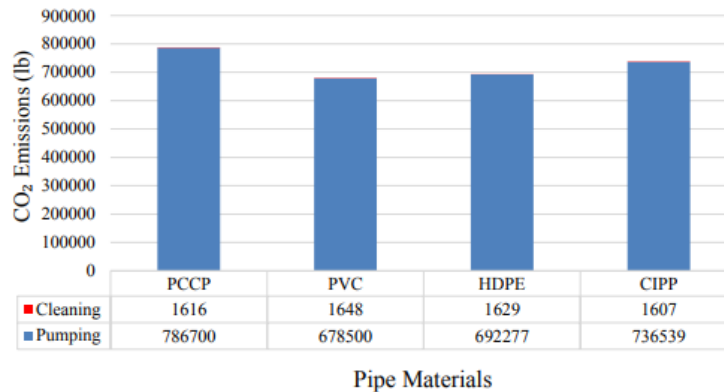


Figura 38. Emisiones de CO2 durante la fase de operación

Tomada de: Alsadi, A. (2019). EVALUATION OF CARBON FOOTPRINT DURING THE LIFE-CYCLE OF FOUR DIFFERENT PIPE MATERIALS. Doctoral Dissertation. LOUISIANA TECH UNIVERSITY.

La última fase corresponde a la fase de disposición en la cual la tubería es desechada, reciclada o abandonada. En el estudio para cada una de las tuberías consideradas se determinó de los materiales que componen cada una de las tuberías que porcentaje sería reciclado y cual sería desechado junto con el consumo energético requerido por el reciclaje y disposición de estos como se observa en la Tabla 15. De acuerdo con lo anterior, para el caso de la tubería rehabilitada con CIPP ningún material se reutilizaría, en el caso del PVC y HDPE se consideró reciclar el 50% mientras que para la tubería de concreto pretensado por ejemplo se consideró un 20% de reciclaje de concreto y 80% del cilindro de acero.

Tabla 15. Porcentajes de reciclaje y disposición de los materiales de las tuberías así como el consumo de energía requerido

Tomada de: Alsadi, A., & Matthews, J. (2020). Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during installation, Operation, and Disposal Phases. Journal of Pipeline Systems.

Pipe	Materials	Recycling			Disposal		
		Percentage of recycling (%)	Energy consumption by recycling (kWh)	Total of recycling energy (kWh)	Percentage of disposal (%)	Energy required for disposal (3.5%) (kWh)	Total disposal energy (kWh)
PCCP	Steel cylinder	80	1,272	3,365.3	20	70	231.4
	Concrete core	20	11.3	3,365.3	80	83.8	231.4
	Mortar coating	0	0	3,365.3	100	10.6	231.4
	Prestressing wire	80	2,082	3,365.3	20	67	231.4
PVC	PVC resin	50	16,705	16,705	50	881.1	881.1
HDPE	HDPE resin	50	22,725	22,725	50	1,864.74	1,864.74
CIPP	Epoxy resin	0	0	0	100	4,477.6	5,791
	Felt	0	0	0	100	343.3	5,791
	Fiberglass reinforced	0	0	0	100	966.8	5,791
	Tube liner	0	0	0	100	3.32	5,791

El estudio encontró que si se reciclan materiales el consumo energético de reciclar materiales de la tubería de HDPE es mayor que el de reciclar materiales de la tubería de PVC y PCCP. Con respecto a la tubería de CIPP esta es la que más emisiones genera durante la fase de disposición mientras la de PCCP es que menos emisiones genera como se observa en siguiente gráfica:

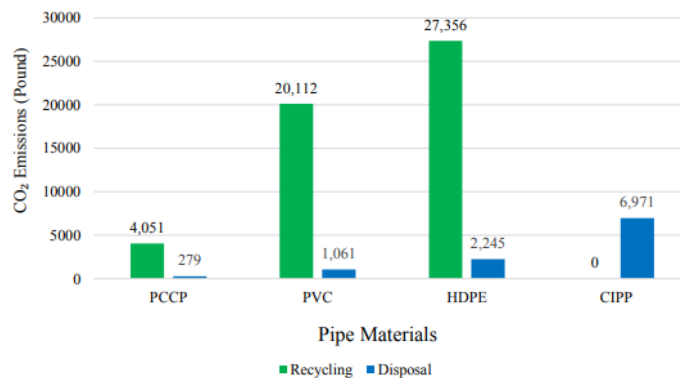


Figura 39. Emisiones de CO2 durante la fase de disposición y reciclaje de materiales

Tomada de: Alsadi, A. (2019). EVALUATION OF CARBON FOOTPRINT DURING THE LIFE-CYCLE OF FOUR DIFFERENT PIPE MATERIALS. Doctoral Dissertation. LOUISIANA TECH UNIVERSITY.

Teniendo en cuenta el reciclaje de materiales, de acuerdo con Alsadi (2019) es posible optimizar las emisiones durante la fase de fabricación. Por ello, el uso de materiales reciclados para la fabricación de las tuberías permite reducir las emisiones de CO₂ y los impactos ambientales. En el caso de las tuberías de concreto pretensado las emisiones se pueden reducir en hasta un 75% gracias al reciclaje del acero y al uso de concretos con geo polímeros mientras que en las tuberías de PVC se pueden reducir en hasta un 41% y en el caso de las tuberías de HDPE en hasta un 47% gracias al uso de materiales reciclados. Por otra parte, con respecto a las tuberías rehabilitadas con CIPP se puede lograr una reducción de las emisiones en hasta un 10% gracias al uso de resina de viniléster en vez de resina epóxica como se ve en la Figura 40 .

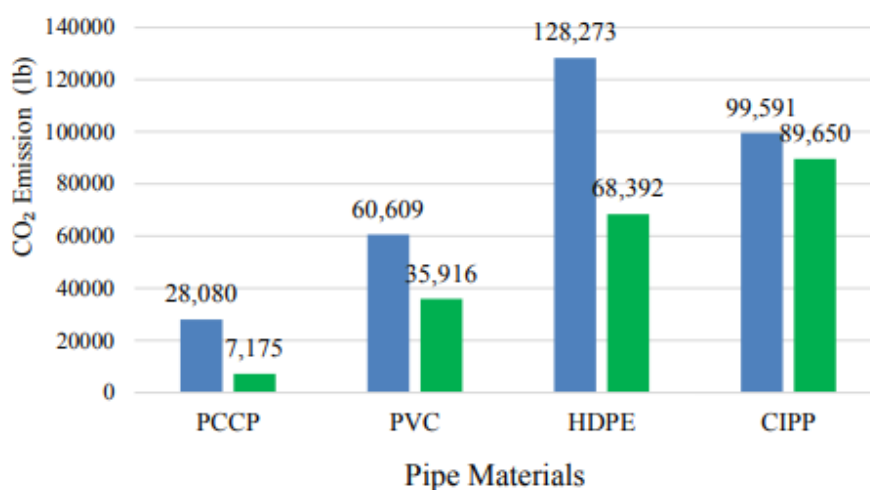


Figura 40. Optimización emisiones durante la fase de fabricación

Tomada de: Alsadi, A. (2019). *EVALUATION OF CARBON FOOTPRINT DURING THE LIFE-CYCLE OF FOUR DIFFERENT PIPE MATERIALS*. Doctoral Dissertation. LOUISIANA TECH UNIVERSITY.

Finalmente, en la Figura 41 se muestran las emisiones de carbono generadas para cada uno de los 4 materiales de tubería analizados en las fases de fabricación, instalación operación y disposición. De acuerdo con los resultados, se observa que el análisis de ciclo de vida muestra que la tubería de PVC es la que menos emisiones genera durante su ciclo de vida, seguida de la tubería de HDPE y PCCP. Por su parte, la tubería rehabilitada con CIPP tiene las mayores emisiones durante todo su ciclo de vida. No obstante, este estudio posee ciertas limitaciones, ya que se encuentra enfocado únicamente en el impacto ambiental, por lo que los autores recomiendan llevar a cabo análisis de los tres factores (costo directo, impacto social e impacto ambiental) en conjunto con el fin de obtener resultados completos que permitan tomar las mejores decisiones acerca de la elección de los materiales y los métodos de instalación más apropiados (Alsadi & Matthews, 2020).

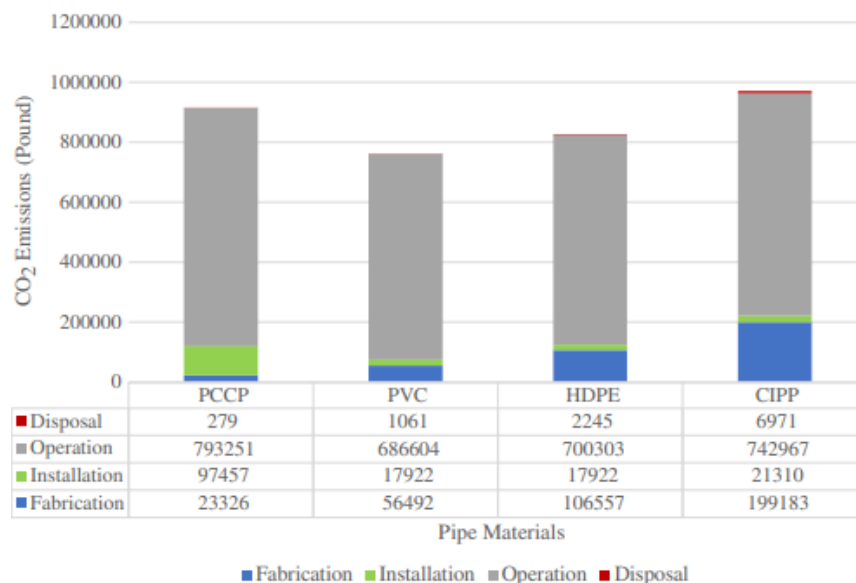


Figura 41. Comparación emisiones de carbono durante el ciclo de vida de las tuberías

Tomada de: Alsadi, A., & Matthews, J. (2020). Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during installation, Operation, and Disposal Phases. *Journal of Pipeline Systems*.

Igualmente se han realizado otros estudios como el de Kyung et al. (2017) quienes analizaron el consumo energético durante ciclo de vida del sistema de alcantarillado durante las etapas de fabricación, transporte, construcción, operación, mantenimiento y disposición del sistema de alcantarillado combinado de la ciudad metropolitana de Daejeon en Corea del Sur. La longitud del sistema de alcantarillado es de 1.940 km y está compuesto principalmente por tuberías de concreto (87.3%), PE (11.2%), PVC (0.5%), hierro fundido (0.8%). Estas tuberías tienen diámetros de 150, 300, 450, 700 y 900 mm. Para el análisis de ciclo de vida los límites del sistema de tuberías consideraron 5 etapas: (1) Producción(MP), (2) Transporte de los materiales (MT), (3) Construcción (CO), (4) Operación (OP), (5) Mantenimiento (MI) y disposición final (EL). Para el primer límite (emisiones directas e indirectas) se consideraron las emisiones de CH₄ generadas por la reacción de las biopelículas y el consumo de energía eléctrica mientras que para la energía incorporada se consideró la energía requerida para la fabricación de los materiales (Kyung et al.,2017).

De acuerdo con la Figura 42 se observa que la etapa de operación es la que mayores emisiones genera en el sistema de alcantarillado de la ciudad metropolitana de Daejeon, representando el 64.9% del total de emisiones. De las emisiones de la operación se encontró que el 95.6% se deben a las reacciones bioquímicas mientras que el restante corresponde al consumo energético de las estaciones de bombeo. Asimismo, la etapa de fabricación es la segunda que más emisiones genera, contribuyendo con el 16.1% de las emisiones totales, siendo las emisiones del concreto las mayores de todos los materiales debido a que casi el 90% de la red está hecha de este material por lo cual los demás materiales contribuyen en menor medida a las emisiones de CO₂. Además, se encontró que las emisiones dependen del diámetro y radio de instalación. Las emisiones de las etapas de construcción (7.7%) y disposición (7.1%) son las siguientes que más contribuyen con emisiones, a pesar en la etapa

de construcción no se consideraron métodos sin zanja por lo cual su uso puede reducir las emisiones durante esta etapa (Kyung et al.,2017).

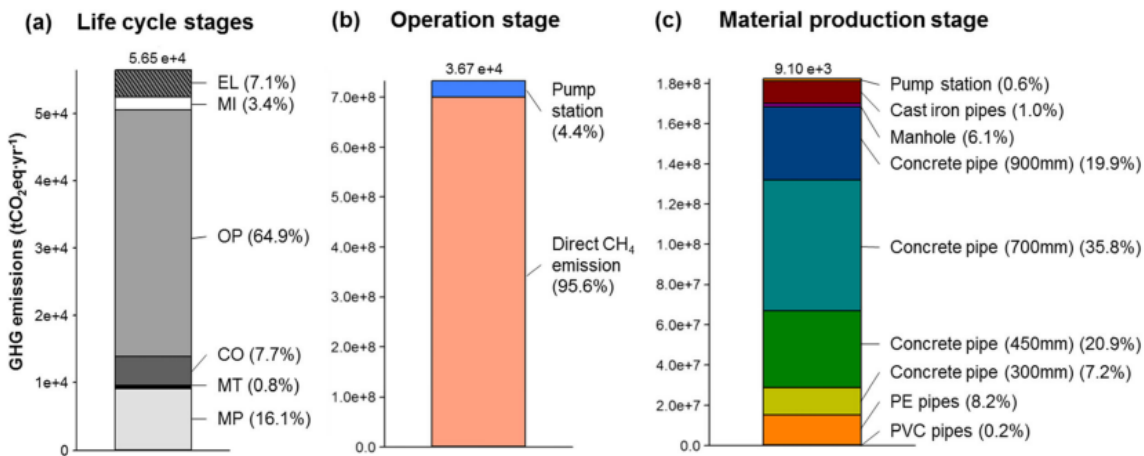


Figura 42. Emisiones de carbono durante el ciclo de vida de las tuberías, su etapa de operación y la etapa de fabricación

Tomada de: Kyung, D., Kim, D., Yi, S., Choi, W., & Lee, W. (2017). Estimation of greenhouse gas emissions from sewer pipeline system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

Adicionalmente, se cuenta con el estudio realizado por Vladimirov & Hölterhoff (2012) quienes seleccionaron el proyecto consistente en la construcción de la planta de tratamiento Czajka localizada a orillas del río Vístula en la ciudad de Warsaw, Polonia. El proyecto se divide en 3 partes: Czajka I (Orilla derecha del río), Czajka II (Orilla izquierda del río) y Czajka III (Debajo del río) como se observa en la Figura 43. Para el estudio se enfocaron en la primera parte, comparando un escenario sin zanja y con zanja, la cual tiene una longitud aproximada de 5.7 kilómetros de tuberías de 3000 mm instalados con pipe jacking (Vladimirov & Hölterhoff, 2012).

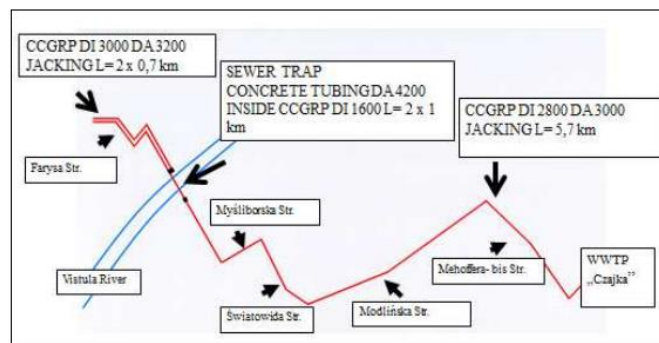


Figura 43. Localización del proyecto Czajka

Tomado de: Vladimirov, V., & Hölterhoff, J. (2012). Comparison of CO2 emissions from trenchless and open-cut installation methods. Installation of OD 3000 mm diameter pipes for. German Society of Trenchless Technology.

Con respecto al modelo de cálculo se consideraron cuatro niveles: Producción, transporte antes de la construcción, construcción (Preparación de la instalación, instalación en sí y los trabajos posteriores luego de la instalación) y tráfico como se observa en la Figura 44. De igual forma, se usó el software Umberto for Carbon Footprint (v1.0). la cual permite hacer análisis de huella de carbono y ciclo de vida, el cual se basa en el principio de entradas-salidas de flujos. Con respecto a los factores de emisión estos se tomaron de la base de datos Ecoinvent Database2 (Version 2.2) (Vladimirov & Hölterhoff, 2012).

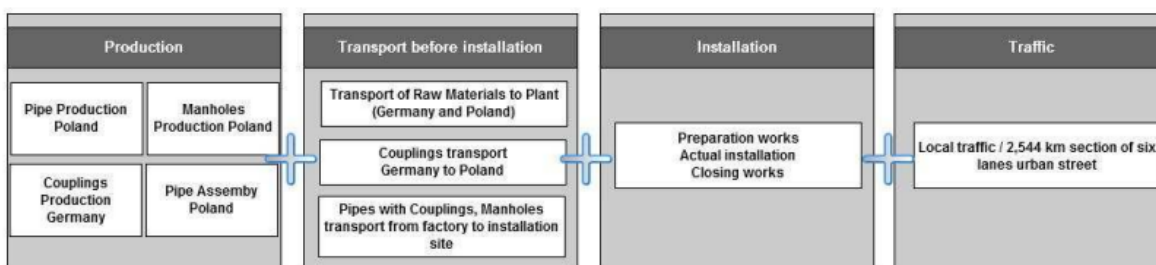


Figura 44. Modelo de cálculo proyecto Czajka

Tomado de: Vladimirov, V., & Hölterhoff, J. (2012). Comparison of CO2 emissions from trenchless and open-cut installation methods. Installation of OD 3000 mm diameter pipes for. German Society of Trenchless Technology.

Con respecto al tráfico, se obtuvieron sus volúmenes mediante conteo del tráfico, el cual se midió en los 2.54 km de la avenida Modlinska afectada por la obra en junio de 2010 durante la construcción y en febrero de 2011 luego de finalizadas las obras. En el estudio se asumió que el tráfico promedio diario anual en horas pico era el 11% del tráfico promedio diario anual, que los vehículos son solamente operados, no necesariamente ocupados, así como máximo unos carriles de los 5 carriles de la avenida serian bloqueados (Vladimirov & Hölterhoff, 2012).

De acuerdo con la Figura 45 se observa que en el escenario con zanja tiene emisiones de carbono 3,82 veces superiores a las del escenario sin zanja por lo cual al emplear tecnología sin zanja en vez de la tecnología con zanja abierta se evita la emisión de 376.734.646,01 kg CO₂ al ambiente (Vladimirov & Hölterhoff, 2012). Adicionalmente, durante la fase de producción se encontró que la producción de las tuberías para el escenario con tecnología sin zanja tiene emisiones de carbono 76% superiores a las de las tuberías del escenario de instalación con zanja abierta, esto puede deberse a que las tuberías empeladas en las técnicas sin zanja deben ser más fuertes y resistentes. Por otra parte, durante la etapa de transporte previo a la instalación se encontró que el escenario sin zanja tiene emisiones de carbono 32,36% superiores a las del escenario con zanja abierta. Igualmente, durante la fase de construcción se aprecia que en el escenario sin zanja se generan 4,14 veces menos emisiones de carbono que en el escenario con zanja abierta. Además, en el escenario sin zanja se genera un aumento de 8,72% en las emisiones de carbono debido al tráfico con respecto al escenario con condiciones de tráfico normales sin obras, mientras que en el escenario con zanja abierta las emisiones de carbono debido al tráfico serian 280,52% superiores respecto al escenario con condiciones de tráfico normales sin obras (Vladimirov & Hölterhoff, 2012).

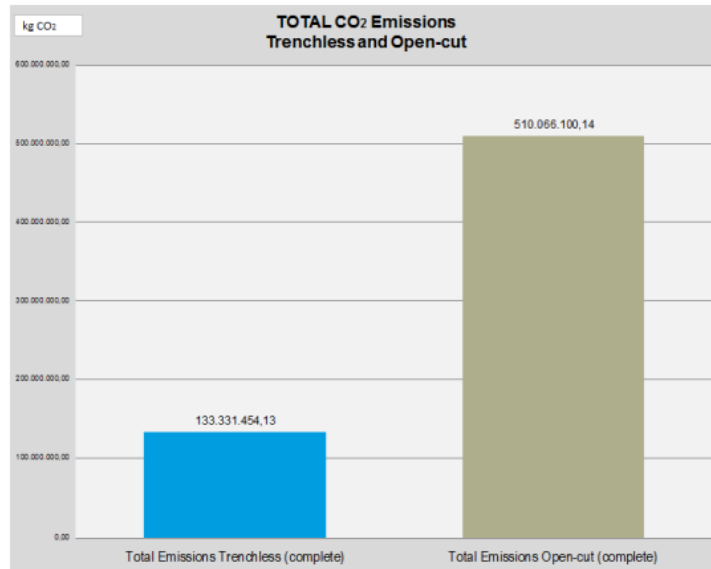


Figura 45. Total de emisiones de CO₂ con zanja y sin zanja

Tomado de: Vladimirov, V., & Hölterhoff, J. (2012). Comparison of CO₂ emissions from trenchless and open-cut installation methods. Installation of OD 3000 mm diameter pipes for. German Society of Trenchless Technology.

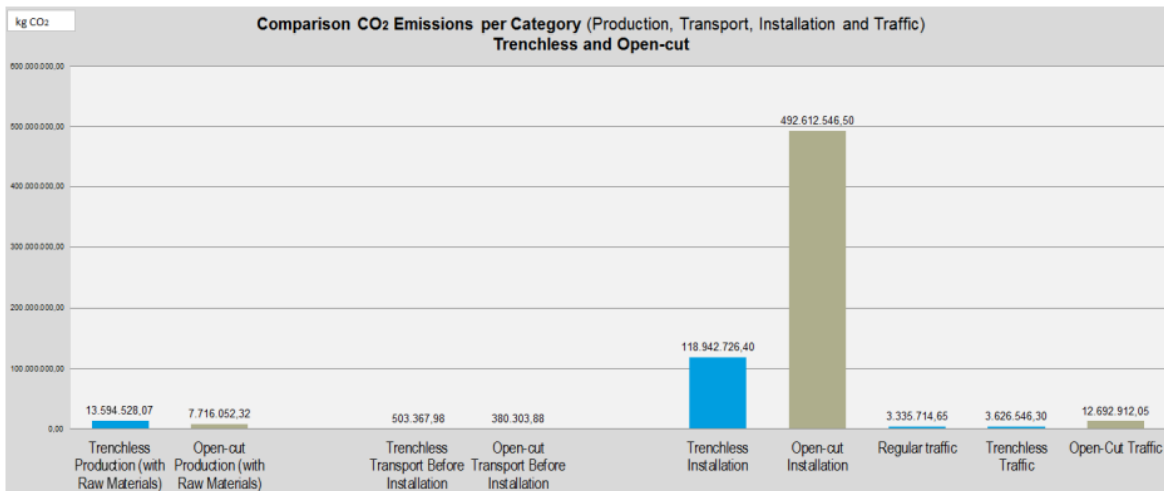


Figura 46. Total de emisiones de CO₂ por categorías

Tomado de: Vladimirov, V., & Hölterhoff, J. (2012). Comparison of CO₂ emissions from trenchless and open-cut installation methods. Installation of OD 3000 mm diameter pipes for. German Society of Trenchless Technology.

3.2 IMPLEMENTACIÓN TECNOLOGIAS SIN ZANJA

Alrededor del mundo se han llevado a cabo varios proyectos en los cuales se han empleado las tecnologías sin zanja. Un ejemplo de dichos proyectos fue el de la ciudad de Enid, Oklahoma la cual tiene una población de más de 50,000 personas. El Proyecto consistió en el traslado y relocalización de una tubería de alcantarillado existente de 152.5 mm (6 in) instalada entre 1960 y 1970 por tuberías de 203 mm (8 in) y 305 mm (12 in) de PVC. A su vez se instalaron 580 pies lineales utilizando la tecnología HDD y 576 pies lineales utilizando el método con zanja abierta. A continuación, se presentan los diámetros y longitudes de las tuberías instaladas:

Tabla 16. Diámetros y longitudes de tubería instalada con método con y sin zanja

Tomada de: Ghosh, S., Kim, J., Piratla, K., & Koo, D. (2020). Evaluating Benefits of Horizontal Directional Drilling Compared to Open-Cut: Case Study in the City of Enid, OK. *Journal of Pipeline Systems*.

Methods	Designed length	
Horizontal directional drilling	305 mm (12 in.):	203 mm (8 in.):
	514 LF (157 m)	66 LF (20 m)
Open cut	305 mm (12 in.): 576 LF (176 m)	

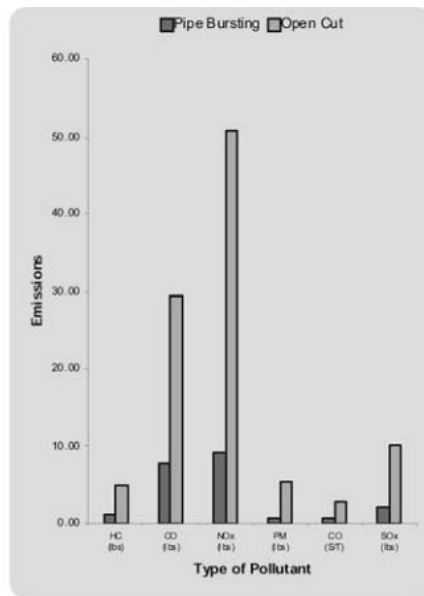
En el estudio se recolecto información en campo durante 7 días empleando sensores y observadores humanos de la siguiente manera:

- Para el caso de los datos de productividad se empleó un cronógrafo para contabilizar el tiempo requerido desde la excavación hasta la instalación final de la tubería de PVC y luego se normalizo la productividad a pies lineales por minuto.
- Para el caso de las emisiones en el aire se emplearon detectores multigas para recolectar y mediar las mediciones de monóxido de carbono (CO), oxígeno (O₂) y ácido sulfhídrico (H₂S) en los sitios de obra considerando tanto la maquinaria como el ambiente de trabajo.
- Para comparar las interrupciones en el tráfico se recolecto información de campo de la velocidad promedio de los vehículos y el flujo de trabajo en intersecciones cercanas a la calle intervenida.
- Debido a que se tomaron datos en un periodo corto de tiempo, la tasa de accidentes registrados (RIR) no era significativa por lo cual la seguridad del proyecto fue mediad de acuerdo con el número de trabajadores involucrados.

Los resultados encontrados con base en este cao de estudio es que la productividad con el método HDD es de 0.82 pies lineales/metro para la instalación de 220 pies lineales y de 0.99 pies lineales/metro para la instalación de 300 pies lineales arrojando una productividad promedio de 0.92 pies lineales/metro. Por su parte para el método con zanja abierta se obtuvo una productividad de 0.52 pies lineales/metro para la instalación de 136 pies lineales lo cual se traduce en una productividad 40% inferior que la obtenida con el método HDD. Además, el método HDD emite 2% menos de O₂, 250% más de CO que el método con zanja. Además, no se detectaron mediciones de H₂S. De igual manera, con el método HDD se requieren 7 trabajadores mientras que con el método tradicional se necesitan 13 trabajadores lo cual implica que este último método está más expuesto a riesgos.

Finalmente, no se evidenciaron cambios significativos en el flujo de tráfico y la velocidad promedio de los vehículos (Ghosh et al.,2020).

Otro caso de estudio encontrado de la revisión bibliográfica realizada es el reemplazo de una tubería de 200 mm de arcilla de aguas residuales por una tubería de 250 mm de HDPE en la ciudad de Los Lunas en Nuevo México. Se consideró una profundidad de instalación de 2.1 metros y una longitud de la tubería de 106 metros. Para la instalación de la tubería se consideraron 2 opciones: Pipe Bursting y el método tradicional. De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio se encontró que las tecnologías sin zanja permiten una reducción promedio del 80% de las emisiones de gases efecto invernadero, por ejemplo, la reducción de emisiones de hidrocarburos es del 75%, del material particulado la disminución es del 85% o en el caso de los óxidos de azufre es del 80%. Por ello, como se ha mencionado anteriormente los métodos sin zanja tienen un efecto positivo en el medio ambiente ya que logran reducir las emisiones de gases efecto invernadero, y a su vez el calentamiento global a comparación del método tradicional que genera muchas más emisiones (Ariaratnam & Sihabuddin, 2009).



Average Emission Reduction (Pipe Bursting) = 80%

Figura 47. Emisiones pipe bursting vs método sin zanja

Tomada de: Ariaratnam, S., & Sihabuddin, S. (2009). COMPARISON OF EMITTED EMISSIONS BETWEEN TRENCHLESS PIPE REPLACEMENT AND OPEN CUT UTILITY CONSTRUCTION. *Journal of Green Building*.

En ese orden de ideas, Sterling et al. (2016) realizaron un estudio el cual se enfocó en tuberías rehabilitadas con el método CIPP para lo cual se tomó una muestra de 19 tuberías en los Estados Unidos, con edades entre los 17 y los 34 años, así como se incluyeron dos tuberías de 5 y 9 años. Se

realizaron pruebas de los revestimientos de las tuberías verificando parámetros como el espesor, espacio anular, ovalidad, gravedad específica, porosidad, resistencia a flexión, resistencia a la tracción, etc. Estos ensayos arrojaron que la gravedad específica promedio fue de 1.16 con una desviación estándar de 0.07. De igual forma, la inspección visual arrojó que las tuberías se encuentran en buen estado. Asimismo, con respecto a las propiedades de flexión se encontró que la resistencia a la flexión cumple con el valor requerido por la ASTM de 4,500 psi (31.03 MPa) el cual es inferior al promedio de 6,594 psi (45.46 MPa) como se ve en la Tabla 17.

Igualmente, otro caso de estudio documentado es el de ciudad de Bowling Green en el condado de Wood, Ohio. En este proyecto la tubería de alcantarillado instalado tiene una longitud de 5.100 pies, un diámetro de 8 pulgadas y se instalaron a 10 pies de la superficie. Para acometer el proyecto se consideraron dos métodos: Zanja abierta y pipe-bursting. Para el primer caso se consideró la instalación de una nueva tubería paralela de PVC y para el segundo se consideró el reemplazo de la tubería vieja por una tubería de HDPE. Además, se consideró que las diferencias de materiales en las tuberías no tenían influencia en las emisiones de CO₂ así como que todo el material excavado se usaría para relleno (Joshi, 2012). En la Figura 48 se observa la localización del proyecto.

Tabla 17. Parámetros medidos y calculados para las tuberías rehabilitadas con el método CIPP

Tomada de: Sterling, R., Alam, S., Allouche, E., Condit, W., Matthews, J., & Downey, D. (2016). *Studying the life-cycle performance of gravity sewer rehabilitation Studying the life-cycle performance of gravity sewer rehabilitation. Procedia Engineering.*

Sample Location	Tensile Strength (psi)	Tensile Modulus (psi)	Flexural Strength (psi)	Flexural Modulus (psi)	Specific Gravity	Design Thickness (mm)	Actual Thickness (mm)	Age (yrs)
Columbus 36 in.	2.958	315.259	6.039	206.805	1.17	15.0	11.9	21
Columbus 8 in.	3.866	362.588	6.416	346.050	1.11	6.0	5.7	5
Denver 8 in.	3.029	411.621	6.756	335.340	1.16	6.0	5.9	25
Denver 48 in. (a)	2.995	382.420	7.031	302.960	1.07	18.0	12.5	23
Denver 48 in. (b)	3.208	426.787	5.575	223.165	1.08	13.5	14.2	23
Edmonton 10 in.	3.241	436.710	6.135	331.333	1.25	5.0	4.7	19
Edmonton 8 in.	3.653	510.132	6.816	364.788	1.25	N/A	4.8	19
Houston 21 in.	3.409	465.322	6.893	337.638	1.17	N/A	10.7	17
Houston 18 in.	3.252	450.985	7.204	338.565	1.18	N/A	11.0	17
Indianapolis 42 in.	2.718	351.294	4.712	237.264	1.08	N/A	22.2	25
Nashville 8 in. (a)	3.436	375.807	6.833	301.724	1.14	N/A	5.6	19
Nashville 8 in. (b)	2.672	400.926	5.497	282.460	1.21	N/A	7.1	9
NYC 15 in.	3.729	554.101	7.978	477.609	1.31	N/A	7.3	23
NYC 12 in.	3.275	324.406	7.200	285.177	1.15	N/A	7.1	24
Northbrook 12 in.	4.402	433.541	7.761	322.360	1.19	6.0	4.7	34
Winnipeg 30 in. (a)	(a)	(a)	8.592b	452.134b	1.21	6.0	6.6	34
Winnipeg 18 in. (a)	(a)	(a)	6.779b	323.930b	1.14	6.0	6.7	34
Winnipeg 30 in. (b)	(a)	(a)	4.469b	245.753b	1.07	N/A	22.8	28
Average	3.323	413.460	6.594	317.503	1.16	-	9.52	-
Standard Deviation	455	65.961	1.066	70.171	0.07	-	5.55	-
Percent Standard Deviation	13.7	16.0	16.2	22.1	5.7	-	58.3	-

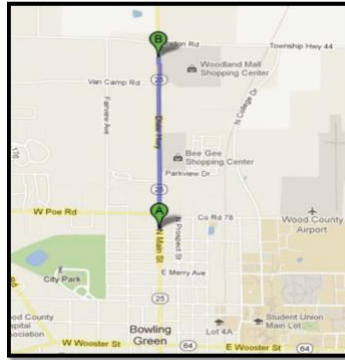


Figura 48. Caso de estudio ciudad de Bowling Green en el condado de Wood, Ohio

Tomada de: Joshi, A. (2012). *A Carbon Dioxide comparison of open-cut and pipe bursting. Master of Technology Management Plan II. Bowling Green State University.*

El estudio encontró que con el método sin zanja se obtiene una reducción del 68% del incremento del consumo de combustible debido a la reducción de la velocidad promedio provocada por la interrupción de tráfico lo cual se puede explicar por la menor duración de los trabajos y las menores interrupciones del tráfico. Paralelamente, con el método sin zanja se obtuvo una reducción del 73.4% del consumo de combustible de la maquinaria de construcción. Esto es consecuencia de la menor duración de los trabajos, la menor excavación requerida y la menor reposición de asfalto que debe realizarse (Joshi, 2012).

En ese orden de ideas, se obtuvo que al utilizar la tecnología sin zanja (Pipe bursting) se pueden reducir en un 72.6% en las emisiones de CO₂ comparado con el método tradicional. Además, para el método con zanja abierta las emisiones de CO₂ debido al consumo de combustible de la maquinaria de construcción representa el 83% del total mientras que para el método de Pipe-Bursting representan el 79.6% (Joshi, 2012).

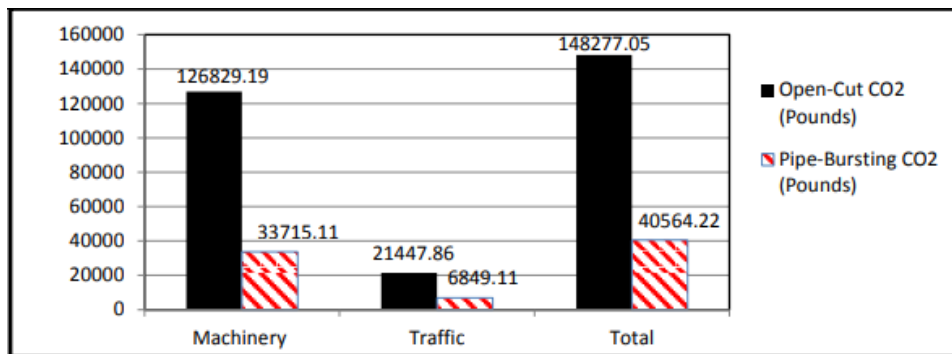


Figura 49. Comparación emisiones de CO2 método sin zanja vs pipe bursting

Tomada de: Joshi, A. (2012). *A Carbon Dioxide comparison of open-cut and pipe bursting. Master of Technology Management Plan II. Bowling Green State University.*

En Latinoamérica se encontró el estudio llevado a cabo por Perdomo (2021) quien comparo la huella de carbono producida por la construcción realizada para la instalación de tuberías a zanja abierta versus la tecnología sin zanja por el método de perforación con tornillo sinfín guiado y tubo piloto (Guided Auger Boring – Pilot Tube) (GAB-PT) mediante modelos de simulación mediante software de elementos discretos para cada tecnología. Así pues, se tomó un proyecto de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP), cuyo objeto fue la instalación de tubería de 750 mm (30”) mediante la instalación de 215 m con zanja abierta y 1050 m con GAB-PT. Dicho proyecto consistió en la construcción del By pass de la estación de bombeo para la localidad de Bosa, con una longitud total de 1703 m de instalación de tubería en concreto reforzado a 6 m de profundidad y un diámetro de 750 mm (30”). A la fecha de entrega de la información para el trabajo se habían realizado 215 m con zanja abierta y una duración de 3 meses mientras que con la tecnología sin zanja se habían realizado 1050 m con una duración de 30 meses (Perdomo Avendaño, 2021).

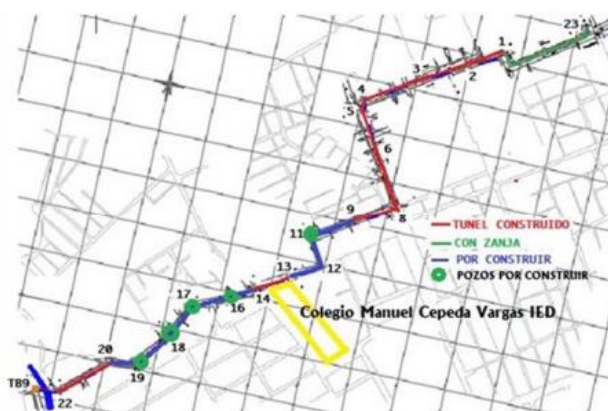


Figura 50. Localización proyecto instalación By Pass de la estación de bombeo

Tomado de: Perdomo 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. Trabajo de grado para optar al título de: Magister en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

En ese orden de ideas, de acuerdo con la estratigrafía encontrada, a partir de los 4,50 m. aflora el nivel freático y a partir de los 5,00 m. se encuentran depósitos de arenas finas, medias y gruesas formando capas llamadas “Quicksands”: material fácilmente removible con baja capacidad hidráulica. Esto generó problemas como que el nivel freático con las arenas desestabilizó y desplomó los pozos, presentándose el fenómeno de subducción. Al realizar el bombeo del agua para abatir el nivel freático, arrastró las arenas generando socavaciones y poniendo en peligro la estabilidad de las construcciones vecinas, igualmente las arenas taponaron el tornillo sinfín impidiendo su movimiento, incrementando la necesidad de construir pozos de rescate, para recuperar la barrena (Perdomo Avendaño, 2021).

Adicionalmente, Perdomo (2021) optó por el método desarrollado por la USEPA y no se contempló la generación de GEI por las desviaciones al tráfico durante operaciones con zanja abierta. Para realizar dicho análisis se empleó el software de Symphony el cual es un software libre y para la presente investigación su uso fue autorizado por la Universidad de Alberta. A partir de lo anterior se hizo un modelo de elementos discretos del proceso constructivo en dicho programa. Luego de esto se alimentaron las actividades con sus correspondientes distribuciones estadísticas y en los casos que no se tenía suficiente información para determinar la distribución se anotó el tiempo de ejecución. De igual manera se calibraron los contaminantes, Symphony ejecuta los cálculos con base en tiempos de ejecución y distribuciones estadísticas, se inició dando a cada contaminante el valor de 1.0, al conocer los valores resultados de la corrida del modelo, se calibraron con base en los resultados obtenidos manualmente (Perdomo Avendaño, 2021).

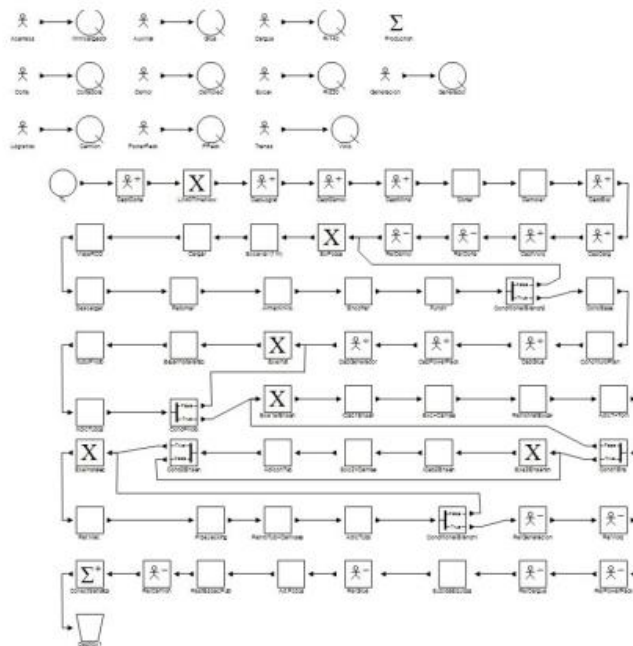


Figura 51. Modelo en Symphony del proyecto

Tomado de: Perdomo 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. Trabajo de grado para optar al título de: Magister en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

En ese orden de ideas, se encontró con el trabajo que la diferencia de emisiones de gases contaminantes y de emisiones de dióxido de carbono equivalente estimados por metro de instalación presentan un caso atípico; la investigación demostró que la instalación a zanja abierta generó menos contaminantes que la tecnología por el método GAB-PT, debido principalmente a la mayor duración en tiempos de instalación, a la necesidad de construir pozos de rescate para el equipo y a la gran

cantidad de inyecciones de mortero que fue necesario realizar como se observa en la Figura 52 . Sin embargo, los resultados obtenidos por metro para 30 meses de construcción por el método GAB-PT comparados con los tres meses en la instalación a zanja abierta, permiten establecer que las tecnologías sin zanja son más amigables con el medio ambiente (Perdomo Avendaño, 2021).

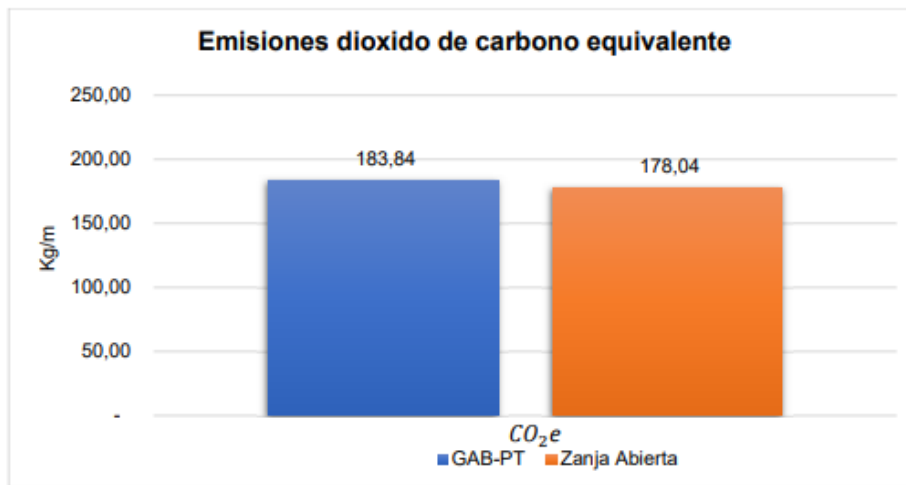


Figura 52. Comparación emisiones dióxido de carbono equivalente

Tomado de: Perdomo 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. Trabajo de grado para optar al título de: Magister en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.*

3.3 NUEVOS MATERIALES DE TUBERIAS

La selección de materiales de ingeniería para infraestructura hoy en día requiere consideraciones ambientales junto con otros aspectos como lo son la resistencia, eficiencia y costo. Es por ello, que las tuberías compuestas de bobinado de bambú (BWCP) se muestran como una opción ideal para el reemplazo de tuberías de acero y PVC de los sistemas de alcantarillado debido a que es la primera tubería moderna desarrollada para incorporar biomateriales renovables. Estas fueron desarrolladas desde el año 2007 por la empresa Zhejiang Xinzhou Bamboo-based Composites Technology Co., Ltd. y satisfacen la necesidad de contar con tuberías de alto rendimiento a un costo competitivo, con bajas emisiones de CO₂ y, adecuada resistencia sísmica y con capacidad de aislamiento térmico (Chen et al., 2021).

Con el fin de estudiar varias características de estas tuberías como por ejemplo las emisiones de producidas durante su fabricación se llevó a cabo un estudio en el cual se fabricaron 3 diámetros de tubería diferentes (300,600 y 1.000 mm) con un espesor de pared de 13,28 y 38 milímetros respectivamente. Las tuberías tienen tres capas como se muestra: una capa interior de poliéster para proteger la tubería del agua, la pared de bambú para soporte estructural y un revestimiento exterior de protección para prevenir el contacto directo del suelo y la capa de bambú. Igualmente se asumió

que el 30% del peso de la tubería corresponde al peso del bambú, al igual que 1 tonelada de tubería contiene 30% w/w de bambú. Además se asumió que cada tonelada de bambú contiene un 8% de agua y se realizó el cálculo de las emisiones de CO₂ para 4 años y 4 fábricas, cada una de las cuales produce 5 kt por año (Chen et al., 2021).

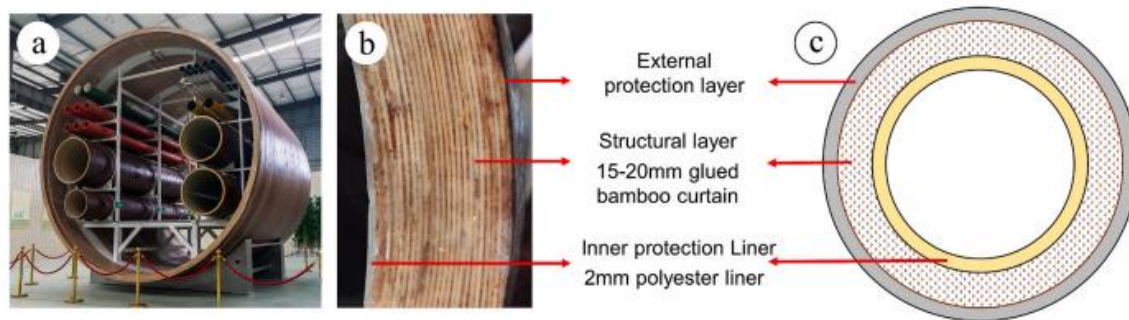


Figura 53. Sección transversal tuberías compuestas de bobinado de bambú (BWCP)

Tomada de: Chen , M., Weng , Y., Semple, K., Zhang , S., Hu , Y., Jiang , X., . . . Dai , C. (2021). Sustainability and innovation of bamboo winding composite pipe products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

El estudio encontró que la fabricación de tuberías compuestas de bobinado de bambú (BWCP) requieren menos energía y tienen una huella de carbono menor que los demás materiales con los que se comparó como PVC o acero. Se resalta que las tuberías de BWCP requieren casi 4 veces menos energía por metro de tubería producido que las tuberías de acero, 3.4 veces menos que las tuberías plásticas y casi la mitad de la energía requerida para fabricar una tubería de concreto como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 18. Comparación consumo energético tubería BWCP comparada con otros materiales

Tomada de: Chen , M., Weng , Y., Semple, K., Zhang , S., Hu , Y., Jiang , X., . . . Dai , C. (2021). Sustainability and innovation of bamboo winding composite pipe products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Pipe type ^a	Density (t/m ³)	Wall thickness (mm)	Mass per unit length (kg/m)	Energy consumption (kgce/t)	Energy consumption (kgce/m)
BWCP	1.1	21	74.1	652.5	48.3
Steel	7.85	10	249.1	858.3	213.8
PE	0.95	38	117.7	1384.0	162.9
RPMP ^b	1.8	18.6	107.1	994.8	106.6
Cement	5.8	100	1990	49.7	98.9

3.4 IMPACTOS SOCIALES

De acuerdo con Matthews et al. (2015) se consideran ocho categorías de costos sociales los cuales son comunes a muchos proyectos de construcción de servicios públicos y pueden ser calculados cuantitativamente de una manera razonable. En consecuencia, las ocho categorías consideradas son las siguientes:

1. Retrasos en los tiempos de viaje: Como consecuencia del cierre total o parcial de vías para los vehículos y andenes para los peatones.
2. Costos operativos de los vehículos: Las mayores distancias conllevan a mayores consumos de combustible y por ende mayores costos operativos.
3. Disminución del valor de la superficie de la carretera: El uso del método con zanja abierta reduce aproximadamente el 30% de la vida útil del pavimento.
4. Ingresos comerciales perdidos: Como consecuencia de las obras se reduce la accesibilidad a los locales comerciales lo cual reduce el número de clientes y dificulta el abastecimiento de los locales.
5. Pérdida de ingresos por estacionamiento.
6. Costos del control de residuos: Por un lado, se hace necesario limpiar la zona intervenida y por otro se reduce la calidad de vida de las personas cerca de la obra.
7. Costos de la contaminación auditiva: El uso de maquinaria pesada conlleva a mayor ruido lo cual puede afectar la salud de la gente alrededor de la obra. A su vez se puede afectar el valor de los inmuebles, el incremento de 1 decibel puede reducir en un 0,4% el valor del inmueble.
8. Costos de seguridad: El método tradicional presenta un riesgo tanto para los trabajadores como para los peatones, por ejemplo, en USA cada año en promedio mueren 60 trabajadores en este tipo de obras, siendo 112% superior al promedio para el sector de la construcción.

Para el cálculo de estos costos sociales los autores consideraron dos casos de estudio. En el primer caso de estudio se calcularon los costos sociales debido al reemplazo de una tubería de aguas lluvias en Oakland, California en los Estados Unidos. Además, se consideró la construcción con zanja y sin zanja para lo cual se contempló el método de excavación con micro tuneladora. También, se hicieron suposiciones como que solo una calle de las tres calles por las que pasa el proyecto se ven afectadas, así como una duración de 98 días y una longitud de 654 metros. En el segundo caso de estudio se determinaron los costos sociales debido al mejoramiento del sistema de alcantarillado de Kessel-Dorp, Bélgica. El sistema inicialmente era un sistema combinado el cual fue reemplazado por un sistema separado utilizando el método de pipe jacking (Matthews et al., 2015). En la siguiente tabla se muestra los valores mínimos y máximos por metro de tubería y por día utilizada para el cálculo de los costos sociales:

Tabla 19. valores mínimos y máximos por metro de tubería y por día para el cálculo de los costos sociales

Tomada de: Matthews, J., Allouche, E., & Sterling, R. (2015). *Social cost impact assessment of pipeline infrastructure projects. Environmental Impact Assessment Review.*

Social cost category	Number of data points	Min. [\$ /m]	Max. [\$ /m]	Min. [\$ /day]	Max. [\$ /day]
Vehicle operating costs ^a	4	7	232	29	2581
Travel delay costs	5	10	806	45	8477
Dirt control costs	3	13	56	61	149
Parking meter revenue	3	22	34	91	239
Decreased road surface value	2	57	125	249	334
Noise pollution costs	2	-9	2	-24	8
Lost business revenue	2	161	226	433	2624

^a Social cost category for which explicit calculations are required.

En la Tabla 20 y Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos. De acuerdo con estos resultados se observa que si se emplean métodos sin zanja los costos sociales pueden representar entre el 1 y el 9% de los costos totales de construcción, siendo del 6% en los casos de estudio mientras que si se usa el método tradicional los costos sociales representan casi el 55% de los costos totales de construcción. Además, en los casos de estudio analizados se encontró que los costos causados por los retrasos en los tiempos de viaje representan el 18% del costo total de construcción y el 55% de los costos sociales. De igual manera, de los costos sociales no relacionados con el tráfico se tiene que los ingresos comerciales perdidos representan entre el 4% y el 6% de los costos de construcción para el caso II, así como que los demás costos sociales representan en conjunto un 7,5% de los costos de construcción totales (Matthews et al., 2015).

Tabla 20. Costos sociales caso de estudio 1

Tomada de: Matthews, J., Allouche, E., & Sterling, R. (2015). *Social cost impact assessment of pipeline infrastructure projects. Environmental Impact Assessment Review.*

	Unit	Open cut	Microtunneling
<i>Project characteristics</i>			
Project duration	[days]	98	98
Construction days	[days]	70	70
Pipe length	[m]	654	244 (410 open cut)
Pipe diameter	[mm]	2134-2286	2134-2286
Trench depth	[m]	3.6-6.0	3.6-6.0
<i>Traffic data</i>			
Street type		Urban streets	Urban streets
Traffic control		Complete road closure, detour	No permanent road closures
Traffic volume	[cars/day]	14,160 AADT	14,160 AADT
Persons/car		1.25	1.25
Pedestrians	[pers./h]	30	30
Number of lost parking spaces		22 (49 days), 44 (49 days)	4 (98 days)
<i>General cost data</i>			
Value of lost time/road user	[\$/h]	12.67	
Value of lost time/pedestrian	[\$/h]	12.67	
Operating cost allowance	[\$/km]	0.27	
Wage rate cleaning personal	[\$/h]	30.16	
Direct contract costs	[\$]	1,784,962	1,500,008 (microtunneling) 1,027,304 (open cut)
Costs/meter placed pipe	[\$/m]	2729	6148 (microtunneling) 2506 (open cut)
<i>Social costs</i>			
Vehicle operating costs	[\$]	152,703	0
Costs due to travel delay	[\$]	457,723	0
Cost of pedestrian disruption	[\$]	37,238	0
Cost of dust and dirt control	[\$]	8233	0
Lost parking meter revenue	[\$]	16,719	579
Lost parking ticket revenue	[\$]	36,415	0
Worker safety	[\$]	79,818	57,204
Total social costs	[\$]	787,849	57,782
Costs/meter placed pipe	[\$/m]	1205	88
Costs/construction day	[\$/day]	11,255	825
% direct contract costs	[%]	44	2
Total costs	[\$]	2,572,811	2,585,095
Costs/meter placed pipe	[\$/m]	3934	3953

Tabla 21. Costos sociales caso de estudio 2

Tomada de: Matthews, J., Allouche, E., & Sterling, R. (2015). Social cost impact assessment of pipeline infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*.

	Unit	Open cut	Pipe jacking
Project characteristics			
Project duration	[days]	300	200
Construction days	[days]	216	144
Pipe length	[m]	2500	2500
Pipe diameter	[mm]	1200; 1600	600; 1200; 1600
Trench depth	[m]	2.9–4.4	Pipe is placed deeper than open-trench
Traffic data			
Street type		Urban street	Urban street
Traffic control		Road closure (8 months)	Road closure (1 month)
Increase in travel distance	[km]	11.7	11.7
General cost data			
Value of time/vehicle	[\$/h]	69 (trucks), 34 (delivery vans), 21 (passenger car)	69 (trucks), 34 (delivery vans), 21 (passenger car)
Annual business turnover	[\$/year]	4,117,223	4,117,223
Direct contract costs	[\$]	5,540,539	7,162,689
Costs/meter placed pipe	[\$/m]	2216	2865
Social costs			
Increased fuel costs	[\$]	557,488	68,920
Costs due to detour	[\$]	1,830,985	490,231
Time costs due to increased traffic on detour route	[\$]	553,159	68,385
Lost business revenue	[\$]	566,771	70,073
Total social costs	[\$]	3,508,403	607,609
Costs/meter of placed pipe	[\$/m]	1403	279
Costs/construction day	[\$/day]	16,243	4845
% direct contract costs	[%]	63	10
Total costs	[\$]	9,048,943	7,860,298
Costs/meter placed pipe	[\$/m]	3620	3144

Igualmente, se han desarrollado otros estudios que también han calculado los costos sociales de proyectos de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de alcantarillado como el llevado a cabo por Kaushal & Najafi(2020) en la ciudad de Pasadena, California el cual se observa en la Figura 54. El proyecto estaba compuesto por 58 segmentos de tubería que miden 4,120 m en total, de las cuales el 51.5% de los segmentos serian intervenidos con el método de zanja abierta, es decir 36 segmentos que miden 2,120 m. De igual forma, el 48.5% de los segmentos, es decir 22 segmentos, los cuales miden 2,000 m se intervinieron con el método de CIPP. Con respecto a los diámetros, se tiene que para el método con zanja abierta el 82% de las tuberías tienen un diámetro de 8 pulgadas, el 11% son de diámetro de 10 pulgadas y el 7% de las tuberías tienen un diámetro de 12 pulgadas. Por su parte, se tiene que para el método sin zanja CIPP el 70% de las tuberías tienen un diámetro de 8 pulgadas, el 15% son de diámetro de 10 pulgadas y el 15% restante de las tuberías tienen un diámetro de 12 pulgadas. Además, la profundidad de excavación fue entre 2.1 y 4.9 metros debajo de la superficie.



Figura 54. Vista pozo a pozo del proyecto

Tomada de: Kaushal, V., & Najafi, M. (2020). Comparative Analysis of Environmental and Social Costs of Trenchless Cured-in-Place Pipe Renewal Method with Open-Cut Pipeline Replacement for Sanitary Sewers. *Journal of Pipeline Systems*.

Para el estudio de los impactos ambientales se realizó de acuerdo con la normativa ISO 1404 y 14044 en cuatro etapas: La primera consiste en la definición del objetivo y alcance, la segunda en el análisis de inventarios (Entradas y salidas del sistema), la tercera en la evaluación de impactos y la última en la interpretación de los potenciales impactos. A su vez se empleó el programa Simapro 2017 que permite hacer análisis de ciclo de vida y cuenta con la herramienta para la reducción y manejo de químicos y otros impactos ambientales (TRACI 2.1) desarrollada por la USEPA que evalúa los impactos de las siguientes categorías:

1. Agotamiento de ozono(CFC-11)
2. Calentamiento global(CO2)
3. Smog(O3)
4. Acidificación (SO2)
5. Eutrofización (N)
6. Cancerígenos (CTU)
7. No cancerígenos (CTUh)
8. Efectos respiratorios(PM)
9. Eco toxicidad(CTUe)
10. Agotamiento de combustibles fósiles(MJ)

Con respecto a los costos sociales se calcularon de la misma manera que en el estudio de Matthews et al. (2015). De igual forma se menciona que dentro de estudios anteriores realizados, uno de ellos encontró que los métodos con zanja reducen la vida del pavimento en un 30% e incrementan los costos de mantenimiento y rehabilitación de \$64/m²(690/ft²) a \$110/m²(1,185/ft²). Asimismo, en el estudio se menciona que si los costos sociales son reducidos optimizando el proceso de fabricación de las tuberías así como los procesos de construcción y operación de modo que se minimicen los desperdicios y se empleen materiales reciclados se aprecia una reducción tanto de los costos del dueño del proyecto como de todo el ciclo de vida como se ve en la Figura 55 (Kaushal,2019).

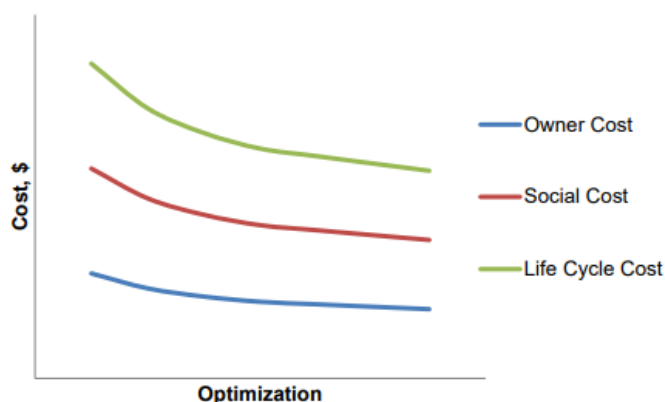


Figura 55. Curva de costos de la reducción de los costos sociales por medio de la optimización

Tomada de: KAUSHAL, V. (2019). COMPARISON OF ENVIRONMENTAL AND SOCIAL COSTS OF TRENCHLESS CURED-IN-PLACE PIPE RENEWAL METHOD WITH OPEN-CUT PIPELINE REPLACEMENT FOR SANITARY SEWERS. Doctoral dissertation. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, 2019.

No obstante, si los costos sociales son reducidos por medio de medidas como el uso de materiales de tubería y maquinaria o el empleo de métodos de construcción amigables con el medio ambiente los costos del dueño aumentan inclusive sin los costos del ciclo de vida permanecen constantes como se ve en la Figura 56 (Kaushal,2019).

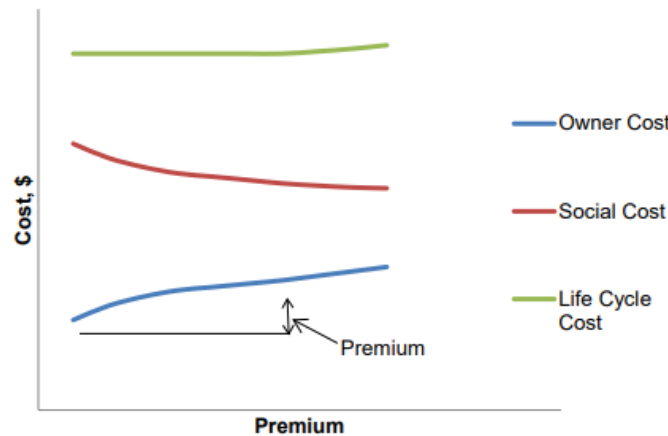


Figura 56. Curva de costos de la reducción de los costos sociales por medio de un premium

Tomada de: KAUSHAL, V. (2019). *COMPARISON OF ENVIRONMENTAL AND SOCIAL COSTS OF TRENCHLESS CURED-IN-PLACE PIPE RENEWAL METHOD WITH OPEN-CUT PIPELINE REPLACEMENT FOR SANITARY SEWERS*. Doctoral dissertation. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, 2019.

En la Figura 57 se muestran el promedio de los resultados obtenido en el estudio de los 10 impactos ambientales generados por el método con zanja abierta y CIPP para las tuberías de 8,10 y 12 pulgadas. De acuerdo con esto, se puede ver que en promedio el método CIPP tiene menores impactos ambientales que el método sin zanja para las 10 categorías analizadas, siendo los impactos menores al 50% a los producidos por el método tradicional con zanja(Kaushal,2019).

De igual manera se encontró que los costos totales ambientales y sociales del método CIPP son 90% inferiores que los del método tradicional con zanja abierta para pequeños diámetros de tuberías de alcantarillado como se aprecia en las Figura 58 y Figura 59. Asimismo, se encontró una reducción considerable de los costos sociales y ambientales empleando el método CIPP en lugar del método tradicional con zanja abierta. En el caso de los costos ambientales la disminución es del 25% al utilizar el método CIPP mientras que en el caso de los costos sociales la disminución es mucho mayor, del 95% inferiores utilizando una tecnología sin zanja (Kaushal,2019).

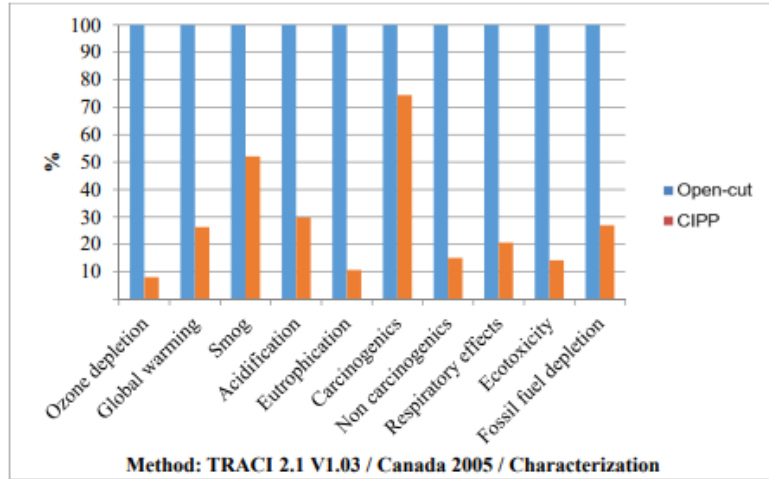


Figura 57. Resultados de los impactos ambientales promedio del estudio

Tomada de: KAUSHAL, V. (2019). COMPARISON OF ENVIRONMENTAL AND SOCIAL COSTS OF TRENCHLESS CURED-IN-PLACE PIPE RENEWAL METHOD WITH OPEN-CUT PIPELINE REPLACEMENT FOR SANITARY SEWERS. Doctoral dissertation. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, 2019.



Figura 58. Costos ambientales tecnología con zanja abierta vs. CIPP

Tomada de: KAUSHAL, V. (2019). COMPARISON OF ENVIRONMENTAL AND SOCIAL COSTS OF TRENCHLESS CURED-IN-PLACE PIPE RENEWAL METHOD WITH OPEN-CUT PIPELINE REPLACEMENT FOR SANITARY SEWERS. Doctoral dissertation. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, 2019.

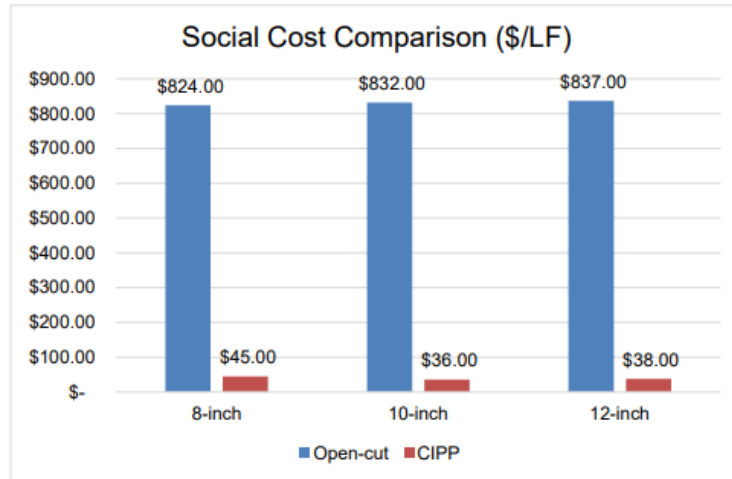


Figura 59. Costos sociales tecnología con zanja abierta vs. CIPP

Tomada de: KAUSHAL, V. (2019). COMPARISON OF ENVIRONMENTAL AND SOCIAL COSTS OF TRENCHLESS CURED-IN-PLACE PIPE RENEWAL METHOD WITH OPEN-CUT PIPELINE REPLACEMENT FOR SANITARY SEWERS. Doctoral dissertation. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, 2019.

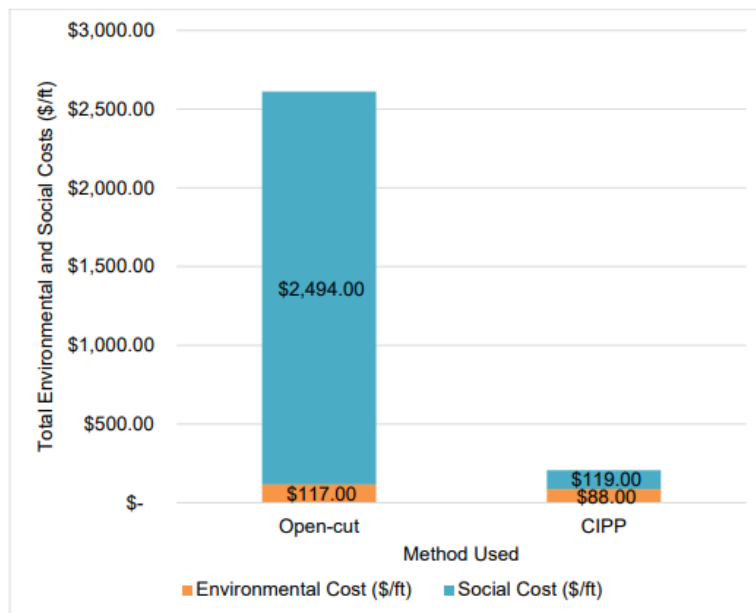


Figura 60. Costos ambientales y sociales tecnología con zanja abierta vs. CIPP

Tomada de: KAUSHAL, V. (2019). COMPARISON OF ENVIRONMENTAL AND SOCIAL COSTS OF TRENCHLESS CURED-IN-PLACE PIPE RENEWAL METHOD WITH OPEN-CUT PIPELINE REPLACEMENT FOR SANITARY SEWERS. Doctoral dissertation. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, 2019.

Sumado a lo anterior, de acuerdo con los resultados del estudio en el caso de la tecnología CIPP los costos ambientales representan el 57% y los costos sociales un 43% mientras que para la tecnología con zanja abierta se tiene que los costos sociales representan el 96% y los costos ambientales el 4%. Asimismo, para el caso de la tecnología CIPP los costos ambientales son mayores que los sociales pero para el método con zanja abierta los costos sociales son superiores a los ambientales como se muestra en la Figura 60.

4. CASOS DE ESTUDIO

A partir de lo establecido en el estado del arte, se encontró que muy poco se ha documentado en Latinoamérica de casos de estudio de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado con tecnologías sin zanja puesto que solo se cuenta con un trabajo realizado en Colombia por Perdomo (2021), así como que la mayoría se han realizado en Norteamérica, Asia o Europa. De igual forma, fue posible comprender la importancia de los estudios de ciclo de vida, ya que estos toman gran relevancia a la hora de elegir variables de los proyectos como el material y el método de instalación en obras. Además, puede contribuir al desarrollo de políticas públicas que incluyan y promuevan aspectos de la construcción sostenible como las emisiones de carbono.

Es por ello, que se documentaron dos proyectos que empleen tecnologías sin zanja en la ciudad de Bogotá, los cuales se presentan a continuación:

4.1 CASO I: FASE 2 DE LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO 3 DE LA LÍNEA TIBITOC-CASABLANCA

La tubería Tibitoc-Casablanca tiene un diámetro de 78 pulgadas, esta fue fabricada por la empresa American Pipe entre los años 1968-1972 y la tubería es de PCCP (Prestressed Concrete Cylinder Pipe). En ese orden de ideas, la tubería inicia en la planta Tibitoc, ubicada en el municipio de Tocancipá, y atraviesa de norte a sur toda la ciudad, pasando por el corredor de la Autopista Norte hasta llegar a la Calle 129, por donde se deriva hacia al occidente hasta el cruce de la Avenida Boyacá, vía por la cual se mantiene hasta llegar a la Avenida Ferrocarril del Sur. La línea continua por este corredor hasta llegar al cruce de la Autopista Sur con Avenida Ciudad de Villavicencio, por donde sube hacia el occidente hasta llegar a la Diagonal 72, en donde se desvía hasta llegar al Tanque Casablanca, ubicado en la localidad Ciudad Bolívar (Jiménez Aldana, 2017). Su trazado puede apreciarse en la Figura 61. Además, para el año 2017, la línea abastecía a una población de alrededor de 4 millones de habitantes suministrado agua a:

- Toda la zona occidental de la ciudad de Bogotá en las localidades de Engativá, Fontibón, Kennedy y Bosa
- Los municipios de Chía, Cajicá, Mosquera, Funza y Madrid
- La parte occidental de la localidad de Usaquén
- La zona oriental de la localidad de Suba
- Parte nor-occidental de la localidad de Barrios Unidos

(Jiménez Aldana, 2017)

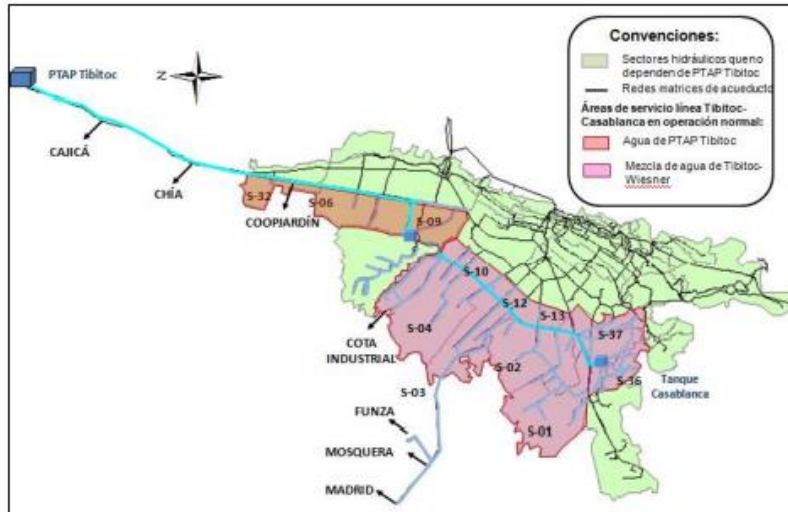


Figura 61. Trazado línea Tibitoc- Casablanca

Tomada de: Jiménez Aldana, M. (2017). Proyecto de rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca. Trenchless World Congress 2017. Medellín.

A su vez, la empresa de Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP con base en diversos contratos de consultoría contratados realizó una definición conceptual de tramos que se presenta a continuación:

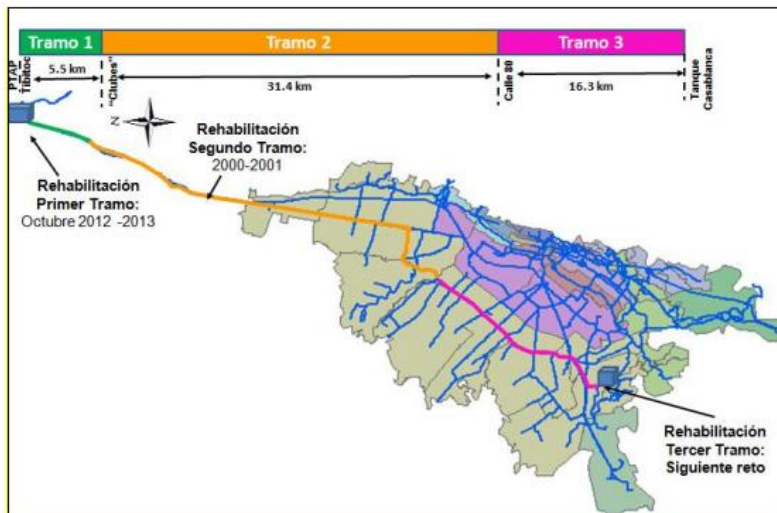


Figura 62. Tramos de la línea Tibitoc-Casablanca

Tomada de: Jiménez Aldana, M. (2017). Proyecto de rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca. Trenchless World Congress 2017. Medellín.

Para los tramos 1 y 2 se llevaron obras de rehabilitación que consistieron en la inserción interna de encamisados de acero de 72 pulgadas. Con respecto al tramo 3, en el año 2015 se contrataron los diseños detallados de la rehabilitación de la conducción del Tramo 3. Dichos estudios concluyeron que la mejor alternativa consiste en realizar la rehabilitación de la tubería actual en toda su longitud (16,4 km), complementada con la construcción de una nueva tubería de diámetro 60 pulgadas y 12,4 km de longitud, que iría paralela a la tubería actual, por el corredor de la Avenida Boyacá, para garantizar la continuidad del servicio durante la ejecución de las obras de rehabilitación, así como para generar mayor confiabilidad al sistema en el mediano y largo plazo (Jiménez Aldana, 2017). Además, dicho estudio recomendó ejecutar el proyecto en 3 etapas como se muestra en la Figura 63 :

1. Fase 1: Rehabilitación de la actual tubería Tibitoc- Casablanca en el subtramo sur comprendido entre la Av. Boyacá-cruce Av. El Ferrocarril (Calle 39 A sur).
2. Fase 2: Instalación de Manija en tubería de 60” instalada en zanja y/o tubería hincada, por toda la Av. Boyacá (Subtramo norte), con una longitud cercana a los 12,4 km.
3. Fase 3: Rehabilitación de la actual tubería Tibitoc-Casablanca en el subtramo norte, comprendido entre la Av. Boyacá- Calle 80 y la Av. Boyacá-cruce Av. El Ferrocarril (Calle 39 A sur), con una longitud de 12,4 km.

(Jiménez Aldana, 2017)



Figura 63. Etapas de la rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca.

Tomada de: Jiménez Aldana, M. (2017). Proyecto de rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca. Trenchless World Congress 2017. Medellín.

Es importante mencionar que la división entre el Subtramo Norte y Sur correspondió a la solicitud del Instituto de Desarrollo Urbano y la Secretaría de Movilidad de Bogotá, puesto que se requería dar prioridad a la rehabilitación del Subtramo Sur, teniendo en cuenta que la tubería actualmente pasa por los corredores de la Avenida Ferrocarril del Sur y la Avenida Ciudad de Villavicencio, en donde se prevé construir Troncales de Transmilenio y el metro (Jiménez Aldana, 2017).

En ese orden de ideas, las obras proyectadas en el subtramo Sur comprenden la rehabilitación de aproximadamente 4.000 metros de la tubería existente mediante la inserción dentro de la tubería actual de 78 pulgadas, una camisa de acero de 72 pulgadas, llenando el espacio anular entre las 2 tuberías, con un mortero de cemento fluido. Además, se realizaría el cambio de todas las válvulas en línea (5 válvulas de 60 pulgadas), derivaciones y demás accesorios de la línea; así como la rehabilitación y/o construcción de nuevas estructuras en concreto para las cajas de válvulas (Jiménez Aldana, 2017). Estas obras se iniciaron en enero de 2020 y finalizaron en el mes de diciembre de 2021 con un costo de \$60,741,031,558 COP.

Por otra parte, las obras proyectadas en el Subtramo Norte comprenden dos fases. La primera corresponde a la construcción de una manija de 60 pulgadas de diámetro y 12.4 kilómetros de longitud, que iría por el corredor lateral de la calzada occidental de la Avenida Boyacá, y que permitirá garantizar la continuidad del servicio durante las obras de rehabilitación de la tubería existente. De igual forma, el estudio planteó realizar la construcción de alrededor de 8.7 kilómetros mediante el método de pipe jacking y los 3.7 kilómetros restantes serán instalados mediante la técnica tradicional de zanja abierta (30% instalación en zanja abierta y 70% instalación sin zanja) como se aprecia en la Figura 64 (Jiménez Aldana, 2017).

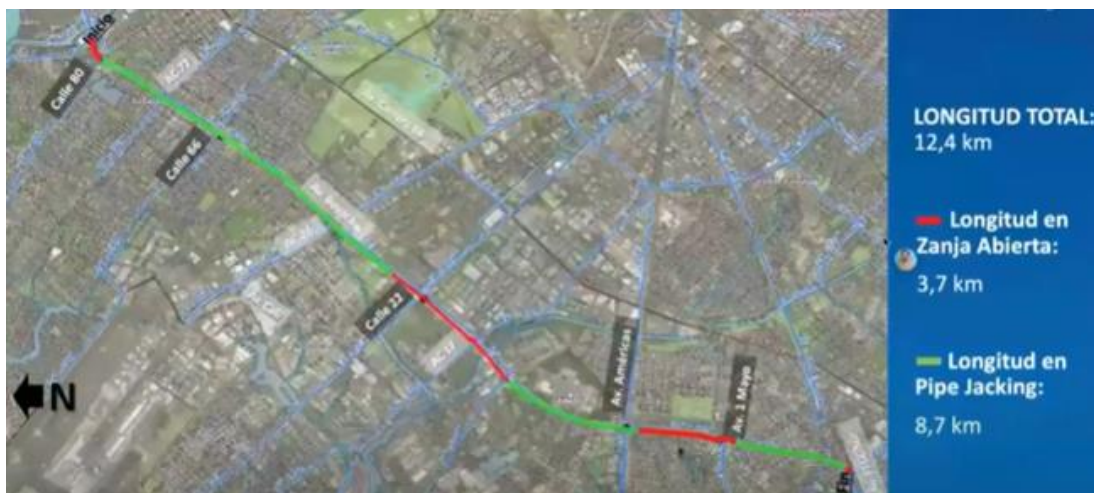


Figura 64. Fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca

Tomada de: Jiménez Aldana, M. (2017). Proyecto de rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca. Trenchless World Congress 2017. Medellín.

Las obras de construcción de la manija se desarrollan entre la Calle 80 y la calle 39 sur y tienen un plazo de ejecución de 32 meses, los trabajos iniciaron en el mes de noviembre de 2021 y se proyecta finalicen en mayo de 2023 con un valor inicial de \$70.000.000 USD. A su vez, esta fase se dividió en dos zonas de intervención como se aprecia en la Figura 65 : Zona de intervención norte la cual está comprendida entre la calle 80 y la calle 13, y la zona de intervención sur la cual está comprendida entre la calle 13 y la calle 39 sur. Asimismo, en el proyecto se contemplaron 23 pozos contractuales (11 pozos de lanzamiento y 12 pozos de recepción), y se tienen 11 derivaciones para servicio y 4 interconexiones en total en el proyecto.

Finalmente, la siguiente etapa consiste en las obras de rehabilitación del Subtramo Norte, lo que comprende la instalación interna de encamisados de acero de 72 pulgadas y su correspondiente inyección anular con mortero de cemento fluido, durante una longitud de 12.4 kilómetros. Como parte de este trabajo, se deberá realizar el reemplazo de las válvulas en línea y la renovación de las derivaciones existentes, así como la conexión con las derivaciones construidas con la nueva manija (Jiménez Aldana, 2017).



Figura 65. Zonas de intervención fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca

Tomada de: Jiménez Aldana, M. (2017). Proyecto de rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca. Trenchless World Congress 2017. Medellín.

4.2 CASO II: LAS DELICIAS-LA VIEJA

El proyecto fue contratado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP y tuvo una duración aproximada de 24 meses, inicio el 9 de abril de 2018 y finalizó en 8 de abril de 2020 con un costo superior a los 87.000 millones de pesos colombianos (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021). El proyecto fue ejecutado bajo el contrato de obra 1-01-32100-1290-2017 cuyo

objeto contra cual era” Obras de rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias” el cual conto con una interventoría contratada bajo el contrato de consultoría 1-1532100-01307-2017. El proyecto consistió en la rehabilitación del colector La Vieja el cual inicia en la calle 71 con carrera 3 y termina con la entrega al canal Salitre en la carrera 30 con calle 71 con una longitud aproximada de 3920 m, y del colector Las Delicias el cual inicia en la carrera 3 con calle 62 y termina con la descarga en la carrera 30 con calle 62 con una longitud 2482 m (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021). Los colectores La vieja y Las Delicias abarcan las localidades de Chapinero, Barrios Unidos y Teusaquillo en la ciudad de Bogotá y forman parte del sistema de alcantarillado sanitario y pluvial:

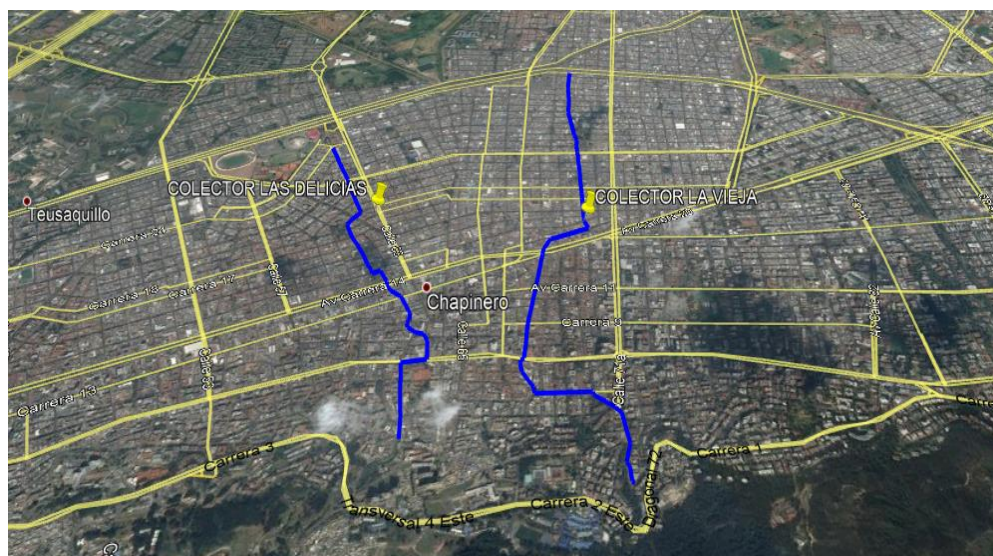


Figura 66. Localización proyecto Las Delicias-La Vieja

Tomada de: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). Rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias.

En el proyecto se realizó una fase previa de mapeo subterráneo la cual abarca la combinación de varias tecnologías con el fin de obtener información gráfica, fácil de interpretar en la identificación y cuantificación de cárcavas y vacíos en el área y terreno circundante a la estructura escaneada, en este caso los colectores de aguas residuales (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021). Esta metodología consta de las siguientes fases:

1. Preliminares: Levantamiento topográfico y fotogrametría (Sobrevuelos programados con Dron, cada vuelo cubre un área aproximada de 120 m de largo por 60 m de ancho).
2. Rastreo de redes con equipo E.M: Permite localizar tuberías y cables metálicos, así como seguir su trazado y profundidad para lo cual se marcan con un punto en el suelo las líneas de tubería detectadas para posteriormente ser levantadas con estación topográfica.

3. Sondeo del colector: Se introduce una sonda al interior del colector para rastrearla a lo largo de su recorrido y se georreferencia su trayectoria. La sonda es ingresada en el manhole aguas arriba y se retira en el siguiente manhole aguas abajo.

(Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021)



Figura 67. Resultados obtenidos con el sondeo del colector

Tomada de: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). Rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias.

4. Sistema Ground Penetrating Radar(GPR): Es una técnica que emplea pulsos electromagnéticos de alta frecuencia con el fin de detectar objetos sub-superficiales de manera no invasiva. En este caso se utilizó el sistema para la detección del colector y del estado de vacíos del material circundante a él.
5. Determinación de cavidades.
6. Modelado 3D: Mediante la combinación del entorno con los modelos 3D se puede mostrar a detalle la configuración actual de las tuberías en sitios específicos.

(Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021)

Es importante precisar que en el proyecto se utilizó una combinación de diversas tecnologías sin zanja:

- Spiral wound: Esta tecnología es explicada en la sección 2.8.2.2.3 del presente documento. Esta tecnología se utilizó debido a que permite instalar en presencia del caudal(Q), y se empleó para la rehabilitación de aproximadamente 5200 metros de tuberías, las cuales tienen un diámetro entre 1,3 m y 3 m. Además, se destaca que el perfil utilizado para rehabilitar tramos curvos, el cual es único en el mundo, tiene un costo superior de aproximadamente el 70% comparado con los perfiles para tramos rectos (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021). A continuación, se muestra en que tramos del proyecto se empleó esta tecnología:



Figura 68. Tramos rehabilitados con la tecnología Spiral Wound

Tomada de: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). Rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias.

- Panel Liner: Esta tecnología se explica en la sección 2.8.2.1.4 y en el proyecto se utilizó en el colector La Vieja a partir de la carrera 27 hasta el canal Salitre, en aproximadamente 980 m, debido a que se tenían 2 box culverts de 2 celdas con dimensiones de 2.5 m de ancho y 1.8 m de alto. Los paneles utilizados fueron hechos bajo medida de 2.3 m de largo, 2.5 m de ancho y 1.68 m de alto, estos fueron fabricados en Dubái (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021). A continuación, se muestra en que tramos del proyecto se empleó esta tecnología:

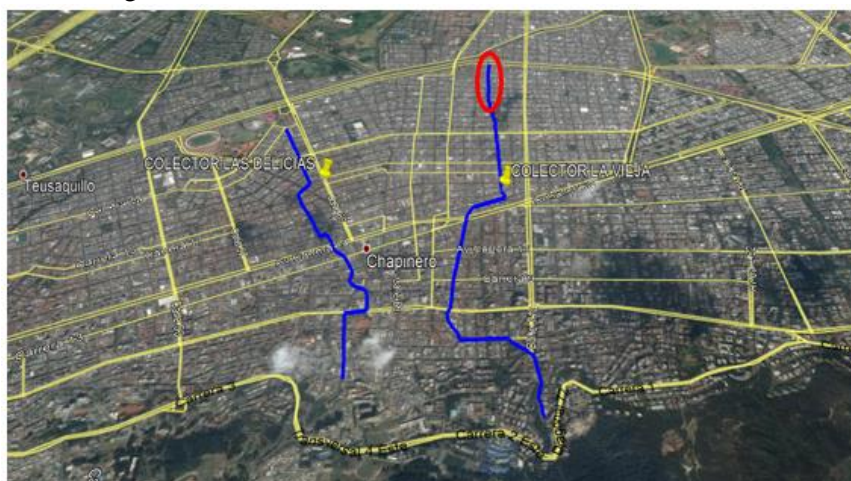


Figura 69. Tramos rehabilitados con la tecnología Panel Liner

Tomada de: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). Rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias.

- Pipe jacking: Esta tecnología se explica en la sección 2.8.1.1 y se empleó para la instalación de aproximadamente 600 m de tubería en el colector las Delicias desde su inicio hasta la calle 63 con carrera 9, especialmente para el cruce de la tubería sobre la avenida carera 7 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021). A continuación, se muestra en que tramos del proyecto se empleó esta tecnología:



Figura 70. Tramos instalados con la tecnología Pipe Jacking

Tomada de: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). Rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias.

- CIPP: Esta tecnología es explicada en la sección 2.8.2.2.2 y fue empleada en la rehabilitación de los primeros 100 m del colector La Vieja debido a la presencia de disipadores de energía. En este caso se empleó la tecnología CIPP con inyección de aire curada con vapor (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021).

5. MODELACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

Es importante tener en cuenta que el presente trabajo se llevó a cabo teniendo en cuenta los lineamientos de la norma ISO 14040. Para ello se establecieron los planteamientos iniciales que serán considerados para cada caso de estudio, así como el alcance, limitaciones y puntos por asumir. Posteriormente, se realizó la consulta de información con las empresas de la industria encargadas de realizar los trabajos de instalación y/o rehabilitación para cada caso de estudio con el fin de establecer la información primaria con la que se cuenta, así como determinar la información secundaria que debe complementarse. Luego, se realiza el proceso de modelación computacional en el cual se ingresan los datos al software SimaPro Flow en forma de escenarios con el fin de evaluar la huella de carbono. Para ello es necesario la selección de un material, proceso o fuente de energía que se acomode a las condiciones del caso de estudio en Colombia o que cumpla con las condiciones generales para todo el planeta para lo cual se empleó y utilizó la base de datos disponible en el programa Simapro Flow, la cual es la base de datos Ecoinvent en su versión 3.7.1 Cut-off, en la cual se considera que para cada proceso y/o producto “El productor es totalmente responsable de la disposición de sus desechos, y que no recibe ningún crédito por la provisión de cualquier material reciclable” (Ecoinvent, 2022). Por lo cual, dentro del proceso de modelación no se está considerando la disposición o manejo de los sub-desechos generados. Además, dicha versión no corresponde con la última versión disponible de esta base de datos. Finalmente se realiza el análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones del análisis realizado.

A continuación, se explicará cómo se llevó a cabo la modelación del primer caso de estudio correspondiente a la fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca y el segundo al proyecto Las Delicias-La vieja:

5.1 CASO I: FASE 2 DE LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO 3 DE LA LÍNEA TIBITOC-CASABLANCA

De acuerdo con la norma ISO 14040, en primer lugar, es necesario definir el alcance y objetivos del análisis del ciclo de vida (ACV) que se va a realizar. En este caso el objetivo del análisis es comparar y evaluar, utilizando la metodología del IPCC 2021GWP100 (no se hará análisis de sensibilidad ni coherencia ni integridad), la huella de carbono en emisiones equivalentes del proyecto correspondiente a la fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca en el cual se instaló una tubería de acueducto para proveer agua potable a un sector de la ciudad empleando tecnología sin zanja, así como hacer una comparación con otro sistema constructivo para lo cual se considera un escenario en el cual el proyecto se hubiera ejecutado con zanja abierta. Este trabajo corresponde a un proyecto investigativo cuyo público previsto corresponde al sector académico y empresas del sector de acueducto, así como empresas constructoras, empresas de servicios públicos y de tuberías.

En ese orden de ideas, en relación con el ACV del proyecto correspondiente a la fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca se limitará a analizar únicamente la etapa de instalación de la tubería, por lo que otras etapas del ciclo de vida (fabricación de tuberías, transporte de tuberías, uso/operación de las tuberías y disposición final de las tuberías) no serán consideradas, debido a que se han realizado otros trabajos como el llevado a cabo por Andrés Ariza quien analizó el ciclo de vida completo teniendo en cuenta el enfoque “Cradle to Grave” (desde la Cuna hasta la Tumba) de varias tuberías de diferentes materiales y diámetros, por lo cual el presente trabajo complementa dicho trabajo realizado así como otros realizados en los cuales se consideraron otras etapas del ciclo de vida de las tuberías.

5.1.1 ESCENARIO ACTUAL (SIN ZANJA)

Ahora bien, se estimó el consumo energético para la totalidad de metros instalados con tecnología sin zanja, se empleó la tecnología Pipe Jacking cuyo proceso constructivo consta de las siguientes etapas:

1. Movilización de equipos al proyecto (sucede una sola vez en el proyecto): comprende el transporte de las máquinas tuneladoras, contenedores, así como los tanques de lodo y agua desde sus puntos de almacenamiento o fabricación hasta la obra (se tomó un punto central de todo el proyecto el cual corresponde a la avenida Boyacá con calle 22):

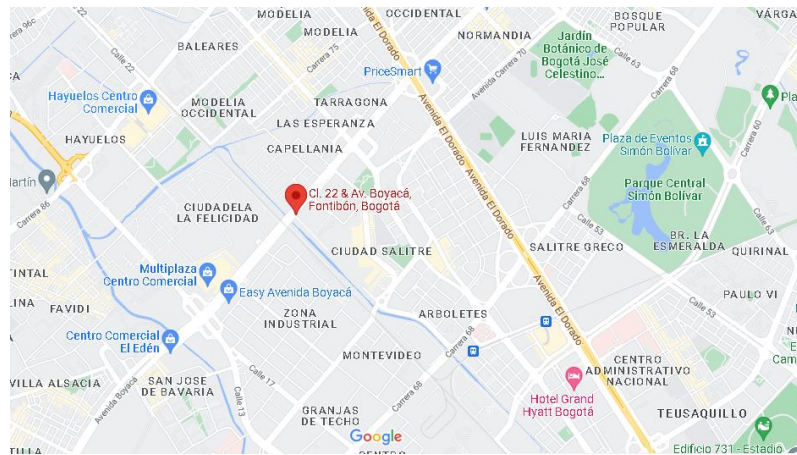


Figura 71. Punto central del proyecto correspondiente al caso de estudio 1

Tomado de: Google Maps

De igual manera las distancias terrestres se calcularon con ayuda de la herramienta Google Earth y la distancia marítima se estimó con ayuda de la herramienta Searates. Además, debe tenerse en cuenta que los sistemas de transporte que se pueden seleccionar en Simapro Flow requieren el ingreso de la información en la unidad tonelada-kilómetro (tKm), la cual se puede obtener multiplicando el peso (M) del insumo o máquina transportado por la distancia

(D) estimada de desplazamiento, como se muestra en la $tKm = M(Ton) * D(Km)$ Ecuación 1.

$$tKm = M(Ton) * D(Km) \quad \text{Ecuación 1}$$

De acuerdo con lo anterior esta etapa considera lo siguiente:

- Transporte de las maquinas tuneladoras AVND 1600 AB marca Herrenknecht desde la fábrica hasta la obra: Consta de tres fases, la primera corresponde al transporte terrestre desde la fábrica en Schwanau(Alemania) hasta el puerto de Amberes(Bélgica) en tracto camiones con doble eje trasero. La segunda corresponde al transporte marítimo desde el puerto de Amberes(Bélgica) hasta el puerto de Cartagena(Colombia) y el tercero corresponde a al transporte terrestre entre el puerto de Cartagena(Colombia) y la obra en tracto camiones con doble eje trasero. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con los puntos de partida y llegada, así como teniendo en cuenta que el peso de una tuneladora es de 15.000 kg por lo que al emplear en el proyecto 2 tuneladoras se tiene lo siguiente:

Tabla 22. Resultados de la estimación de tKm del transporte de tuneladoras desde la fábrica hasta la obra y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Schwanau(Alemania)	Puerto Amberes(Bélgica)	396,44	30000	11893,20	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.
Puerto Amberes(Bélgica)	Puerto Cartagena(Colombia)	8627,39	30000	258821,70	Transport, freight, sea, container ship transport, freight, sea, container ship Global	
Puerto Cartagena(Colombia)	Avenida Boyacá con Calle 22	1050	30000	31500	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	

- Transporte de los equipos mayores (Contenedores, tanques de lodo y agua) desde sus puntos de almacenamiento hasta la obra: Comprende el transporte de 6 contenedores de 40 pies, cada uno de los cuales tiene un peso de 3750 Kg vacío. De igual forma, incluye el transporte de los tanques de lodo y agua los cuales tienen un peso aproximado de 170.000 kg:

Tabla 23. Resultados de la estimación de tKm del transporte de equipos mayores hasta la obra y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Cota- Almacenamiento de contenedores	Avenida Boyacá con Calle 22	15	22500	337,50	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.
Mondoñedo- Almacenamiento del tanque de lodos y agua	Avenida Boyacá con Calle 22	19,6	170000	3332	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	

2. Construcción pozos: Esta etapa consta de dos fases, la primera fase corresponde a la instalación de la contención, en el proyecto se emplearon dos métodos constructivos diferentes: Tablestaca y pantalla pre-excavada. Con respecto a las tablestacas estas son un tipo de pantalla o estructura de contención flexible, definitiva o temporal, que permite realizar excavaciones de cualquier tipología: talud, zanja, pozo, sótano, etc., adaptándose a cualquier forma o dimensión en planta (Yepes Piqueras, 2014). Además, las tablestacas están

formadas por elementos prefabricados que suelen ser de acero. Los elementos prefabricados que componen las tablestacas se hincan en el terreno mediante vibración o golpeo (Yepes Piqueras, 2014). A continuación en la Figura 72 se muestra una tablestaca:



Figura 72. Tablestaca

*Tomado de: Yepes Piqueras, V. (23 de 06 de 2014). Tablestacas. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia:
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/06/23/tablestacas/>*

Por otra parte, las pantallas pre-excavadas son un elemento de hormigón armado, pre-excavado y fundido en sitio, que funciona como muro de contención para obras civiles subterráneas cuya función es estabilizar excavaciones profundas como parqueaderos, deprimidos u obras civiles subterráneas en general de manera que se puede asegurar funciones de: Retención, cimentación y estanqueidad (Soletanche Bachy Cimas, s.f.).

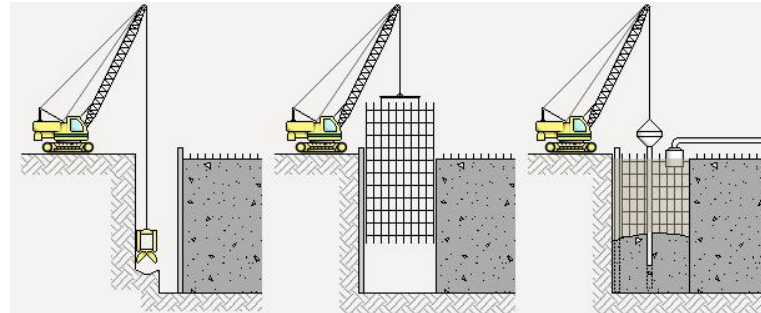


Figura 73. Pantalla pre-excavada

Tomado de: CYPE Ingenieros S.A. (s.f.). Muro Pantalla de concreto armado, con lodos. Obtenido de Generador de Precios Colombia: http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Contenciones/Muros_pantalla/

En ese orden de ideas, la segunda fase corresponde al conjunto de actividades correspondientes al vaciado del pozo, la instalación de los refuerzos horizontales y las estructuras en concreto (Placas). Para esta etapa se estimó el consumo total de combustible consumido por la maquinaria para lo cual se multiplico el tiempo de operación, es decir las horas de operación diarias por el número total de días de utilización de la maquinaria, por el por el consumo por hora de cada máquina empleada, como se expresa a continuación:

$$Combustible_{Consumido}(L) = Tiempo_{Operación\ diario}(h) * \#días * Consumo_{Por\ hora} \left(\frac{L}{h} \right)$$

Ecuación 2. Calculo del combustible consumido

- Instalación de la contención: Indistintamente del método constructivo, ya sea Tablestaca o pantalla pre-excavada, se emplea una Grúa -Liebherr 855. Se debe tener en cuenta que se estimó el consumo para la construcción de un pozo, el cual tarda 1 semana de 6 días para su construcción, y luego se multiplico este valor por el número de pozos:

Tabla 24. Descripción de consumo de combustible en el proceso de instalación de la contención y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Semanas de operación	Número de pozos	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Grúa -Liebherr 855	12	6	1	21	36	54432	46267,20	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

- Actividades de vaciado del pozo, instalación de los refuerzos horizontales y las estructuras en concreto (Placas): Para estas actividades se emplea una excavadora marca Kobelco la cual se emplea de la siguiente manera:

Tabla 25. Descripción de consumo de combustible en el proceso de vaciado del pozo, instalación de los refuerzo horizontales y las estructuras en concertó, y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Semanas de operación	Número de pozos	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Excavadora-Kobelco	8	6	5	21	18	90720	77112	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

- Tanto para la fase de Instalación de la contención, así como para las actividades de vaciado del pozo, instalación de los refuerzos horizontales y las estructuras en concreto (Placas) se emplea un generador P80 de la marca Casa Inglesa. Al ser de uso común para ambas fases se contempló su utilización de la siguiente manera:
:

Tabla 26. Descripción de consumo de combustible generador durante la etapa de construcción de pozos y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Semanas de operación	Número de pozos	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Generador P80	12	6	6	21	22	199584	169646,40	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

3. Instalación de tubería: Esta etapa comprende las siguientes actividades:

- Montaje-Desmontaje de obra: Se considera el transporte de las tuneladoras y equipos mayores (Contenedores y tanques de agua y lodo) de un pozo de lanzamiento a otro nuevo, entre pozo y pozo hay una distancia de 1 Km, teniendo en cuenta que esta actividad se repite 10 veces, que corresponde a la cantidad de pozos de lanzamiento con los que cuenta el proyecto se toma una distancia de 10 Km:

Tabla 27. Resultados de la estimación de tKm del montaje-desmontaje y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Pozo de lanzamiento original	Nuevo pozo de lanzamiento	10	192500	1925	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

- Suministro de tuberías: La longitud total a instalar con tecnología sin zanja en el proyecto corresponde a 8.630 m, debe tenerse en cuenta que cada tubería tiene 3 metros de largo por lo cual para todo el proyecto se requieren:

$$\frac{8.630 \text{ m}}{3 \frac{\text{m}}{\text{tubería}}} = 2.877 \text{ tuberías}$$

De igual forma, cada tubería tiene un peso aproximado de 9 toneladas o 9000 kg de manera que:

Tabla 28. Resultados de la estimación de tKm del suministro de tuberías y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Autopista Medellín-Bogotá Km. 3.2 (Cota)	Avenida Boyacá con Calle 22	19,2	25893000	497145,60	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

- Suministro de agua limpia: De acuerdo con datos suministrados por la empresa contratista de obra por cada metro lineal de tubería instalada se requieren 4,67 m³ de agua limpia. En ese orden de ideas es necesario calcular inicialmente la cantidad de metros cúbicos requeridos para todo el proyecto:

$$\text{Metros cúbicos}_{\text{Agua limpia}} = 4,67 \text{ m}^3 * 8630 \text{ m} = 40302,10 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la densidad del agua se puede determinar el peso de los metros cúbicos de agua requeridos:

$$\text{Peso}_{\text{Agua limpia}} = 40302,10 \text{ m}^3 * 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 40302100 \text{ Kg}$$

De manera que:

Tabla 29. Resultados de la estimación de tKm del suministro de agua limpia y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Punto aguas de la Sabana-Autopista Medellín-Bogotá Km 1.8(Llegando al primer retorno)	Avenida Boyacá con Calle 22	13,3	40302100	536017,93	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

- Retiro de lodo líquido: De acuerdo con datos suministrados por la empresa contratista de obra por cada metro lineal de tubería instalada se requiere retirar 4,62 m³ de lodo líquido. En ese orden de ideas es necesario calcular inicialmente la cantidad de metros cúbicos de lodo que deben retirarse para todo el proyecto:

$$\text{Metros cúbicos}_{\text{Lodo líquido}} = 4,62 \text{ m}^3 * 8630 \text{ m} = 39870,6 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la densidad del lodo se puede determinar el peso de los metros cúbicos de lodo a retirar:

$$\text{Peso}_{\text{Lodo líquido}} = 39870,6 \text{ m}^3 * 1019 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 40628141,40 \text{ Kg}$$

De manera que:

Tabla 30. Resultados de la estimación de tKm del retiro de lodo líquido y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Avenida Boyacá con Calle 22	Cemex Escombrera Tunjuelo (Av. Boyacá # 72 – 04 Sur)	13,7	40628141,40	556605,54	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

- Suministro de combustible: De acuerdo con datos suministrados por la empresa contratista de obra por cada metro lineal de tubería instalada se requieren 9,95 Gal de combustible, diésel corriente (ACPM). En ese orden de ideas es necesario calcular inicialmente la cantidad de galones requeridos para todo el proyecto:

$$Galones_{Combustibles} = 9,95 \text{ Gal} * 8630 \text{ m} = 85868,5 \text{ Gal} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,2 \text{ Gal}} = 325,01 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la densidad del diésel se puede determinar el peso de los galones de combustible requeridos:

$$Peso_{Combustible} = 325,01 \text{ m}^3 * 850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 276261,26 \text{ Kg}$$

De manera que:

Tabla 31. Resultados de la estimación de tKm del suministro de combustible y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Planta Mansilla(Facatativá)	Avenida Boyacá con Calle 22	40,8	276261,26	11271,46	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

- Retiro de material de excavación: De acuerdo con datos suministrados por la empresa contratista de obra por cada metro lineal de tubería instalada se requiere retirar 5,69 m³ material de excavación. En ese orden de ideas es necesario calcular inicialmente la cantidad metros cúbicos de material de excavación que se requiere retirar para todo el proyecto:

$$\text{Metros cúbicos}_{\text{Material de excavación}} = 5,69 \text{ m}^3 * 8630 \text{ m} = 49104,70 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la densidad del material de excavación se puede determinar el peso de los metros cúbicos a retirar:

$$\text{Peso}_{\text{Material de excavación}} = 49104,70 \text{ m}^3 * 2000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 98209400 \text{ Kg}$$

De manera que:

Tabla 32. Resultados de la estimación de tKm del retiro del material de excavación y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Avenida Boyacá con Calle 22	Cemex Escombrera Tunjuelo (Av. Boyacá # 72 – 04 Sur)	13,7	98209400	1345468,78	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

Además, se emplea una retroexcavadora la cual se utiliza así:

Tabla 33. Descripción de consumo de combustible retroexcavadora y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Retroexcavadora	12	360	7,5	32362,50	27508,13	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

- Generación energética para el uso de las tuneladoras y demás equipos: De acuerdo con datos suministrados por la empresa contratista de obra por cada metro lineal de tubería instalada se requieren 9,95 Gal de combustible, diésel corriente(ACPM). En ese orden de ideas es necesario calcular inicialmente la cantidad de combustible requerido para todo el proyecto:

$$Galones_{Combustibles} = 9,95 \text{ Gal} * 8630 \text{ m} = 85868,5 \text{ Gal} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,20 \text{ Gal}} = 325,01 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la densidad del diésel se puede determinar el peso de los galones de combustible requeridos:

$$Peso_{Combustible} = 325,08 \text{ m}^3 * 850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 276261,26 \text{ Kg}$$

Tabla 34. Descripción de consumo de combustible generación energética y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Generación Energética-Generadores P750 y P80	325012,27	276261,26	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

- Soldaduras de las juntas de la tubería-Moto soldador: Inicialmente se determinó el tiempo total que se tardaría la soldadura de juntas de las tuberías teniendo en cuenta que para el proyecto dos soldadores (Dos frentes) para la soldadura de 500 m de tubería tardan 4 semanas de 6 días de trabajo y 9 horas de trabajo diarias por lo cual se tiene que:

$$\frac{8630 \text{ m}}{500 \frac{\text{m}}{\text{Mes}}} = 17,26 \text{ Meses} * \frac{30 \text{ dias}}{1 \text{ Mes}} = 517,8 \text{ dias}$$

Para esta actividad se utiliza la electricidad provista por el generador P80 de la marca Casa Inglesa de manera que:

Tabla 35. Descripción de consumo de combustible de la soldadura de las juntas de la tubería y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Generador P80	9	517,8	22	82019,52	69716,59	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

Es importante precisar que el cerramiento de los pozos, lo cual consiste en colocar la tapa del pozo no se consideró dentro del estudio debido a que esta actividad como se mencionó consiste en ponerle tapa a los pozos lo cual no representa un consumo de combustible o energía significativo. La unidad funcional del estudio corresponde a la huella de carbono en emisiones equivalentes por **metro lineal de tubería instalada con tecnología sin zanja**, en este caso Pipe Jacking. A continuación, se presenta el diagrama de procesos del caso de estudio I correspondiente al escenario sin zanja:

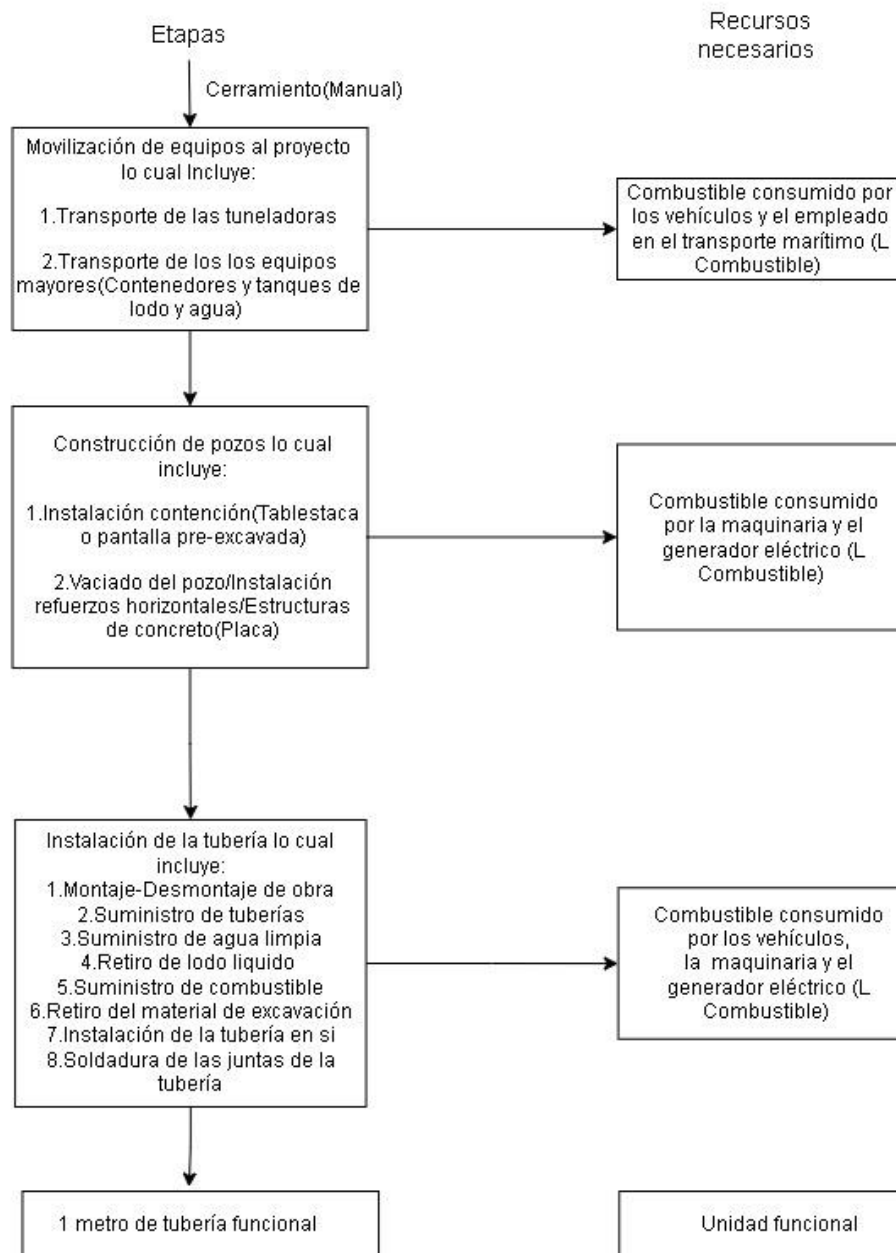


Figura 74. Procesos caso de estudio I escenario sin zanja

:5.1.2 ESCENARIO CON ZANJA ABIERTA

Para este escenario se estimaron los datos para la instalación de 100 metros de tubería de acueducto de igual diámetro a la instalada en el escenario sin zanja, 60 pulgadas, a una profundidad similar, en este caso 8 metros, y con un ancho de zanja de 3 metros. Es importante precisar que dentro de las etapas consideradas dentro del estudio no se consideró el transporte de la maquinaria, debido a que a que a diferencia del caso sin zanja los equipos utilizados tienen disponibilidad en la ciudad y son utilizados frecuentemente en distinta clase de proyectos por lo que dichos equipos están disponibles dentro de la ciudad y a su vez estos no tienen las dimensiones o peso que tienen los equipos utilizados en el escenario sin zanja. De igual manera, no se consideró el transporte de las tuberías a la obra puesto que las empleadas en la zanja abierta son menos pesadas que las utilizadas en la tecnología sin zanja. El proceso constructivo consta de las siguientes etapas:

1. Replanteo y desvío de redes: Comprende el replanteo y desvío de las redes existentes. De acuerdo con datos de la empresa constructora se puede estimar el consumo energético como el 10% del consumo total de la etapa 3 correspondiente a la excavación mecánica:

$$Galones_{Combustibles} = 2.882,12 \text{ Gal} * 10\% = 288,21 \text{ Gal} * \frac{1 \text{ m}^3}{264,20 \text{ Gal}} = 1,09 \text{ m}^3 * 850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 927,25 \text{ Kg}$$

2. Demolición carpeta asfáltica: Comprende la rotura de asfalto y pavimento. Para ello se utilizan los siguientes equipos así:

Tabla 36. Descripción de consumo de combustible etapa de demolición de la carpeta asfáltica y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Combustible (L)	Consumo total de Combustible (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Cortadora de Concreto	24	1	3,5	84(Gasolina)	60,48(Gasolina)	petroleum market for petroleum Global
Mini cargador con martillo demoleedor BOBCAT S570	12	1	10,2	122,4(Diésel)	104,04(Diésel)	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

3. Excavación mecánica: Comprende la excavación y entibado. Para ello los equipos requeridos son los siguiente:

Tabla 37. Descripción de consumo de combustible etapa de excavación mecánica y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Excavadora CAT 330	10	20	18	3600	3060	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Mini cargador con cucharón BOBCAT S570	10	21	10,2	2142	1820,70	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Generador P80 el cual suministra electricidad a Motobomba sumergible de 4 pulgadas	10	20	22	4400	3740	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

Asimismo, es necesario considerar el consumo de combustible debido al retiro del material excavado para lo cual en primer lugar se determinó el volumen de material excavado a retirar:

$$\text{Metros cúbicos}_{\text{Material de excavación}} = 100 \text{ m} * 8 \text{ m} * 3 \text{ m} = 2.400 \text{ m}^3$$

Además, se consideró un factor del esponjamiento del 20% por lo que el volumen a excavar es:

$$\text{Metros cúbicos}_{\text{Material de excavación}} = 2400 \text{ m}^3 * (1 + 20\%) = 2.880 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la densidad del material de excavación se puede determinar el peso de los metros cúbicos a retirar como se muestra:

$$Peso_{Material\ de\ excavación} = 2.880m^3 * 2000 \frac{Kg}{m^3} = 5.760.000 Kg$$

De manera que:

Tabla 38. Resultados de la estimación de tKm del retiro del material de excavación y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Avenida Boyacá con Calle 22	Escombrera	20	5760000	115200	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

4. Instalación de tubería y relleno: Comprende las actividades de cimentación de la tubería. Para ello se utilizan los siguientes equipos así:

Tabla 39. Descripción de consumo de combustible etapa de excavación mecánica y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Mini cargador con cucharón BOBCAT S570 para acarreo de material de relleno	10	25	10,2	2550	2167,50	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Excavadora CAT 330(Izaje y manipulación del tubo)	10	25	18	4500	3825	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Pajarita(Retroexcavador marca New Holland B95B)	10	25	7,5	1875	1593,75	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Canguro	10	25	2,3	575	488,75	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Vibro compactador de doble rodillo	10	25	15	3750	3187,50	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Generador P80 el cual suministra electricidad a Motobomba sumergible de 4 pulgadas	10	15	22	3300	2805	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

De igual forma, es necesario considerar el material de relleno para lo cual se estableció el volumen de relleno requerido de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Volumen}_{\text{Tubería}} &= \pi * \left(\frac{60 \text{ Pul} * 0,0254 \frac{\text{m}}{\text{Pul}}}{2} \right)^2 * 100 \text{ m} = 182,41 \text{ m}^3 \\
 \text{Volumen}_{\text{Relleno}} &= 2880 \text{ m}^3 - 182,41 \text{ m}^3 = 2.697,59 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Asumiendo para el material de relleno la misma densidad que el material de excavación se puede determinar el peso de los metros cúbicos a suministrar:

$$\text{Peso}_{\text{Material de relleno}} = 2.697,59 \text{ m}^3 * 2000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 5.395.170,62 \text{ Kg}$$

De manera que:

Tabla 40. Resultados de la estimación de tKm del suministro de material de relleno y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Proveedor	Avenida Boyacá con Calle 22	20	5395170,62	107903,41	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

5. Recuperación de espacio público y asfalto: Para esta fase se utilizan los siguientes equipos como se indica a continuación:

Tabla 41. Descripción de consumo de combustible etapa de recuperación de espacio público y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Días de operación	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Compactador neumático HYSTER C530A	10	2	11	220	187	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Asfalto Finisher 650P	10	2	18	360	306	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

De igual forma, es necesario considerar el asfalto requerido para la reposición de la carpeta asfáltica para lo cual se consideró un espesor de 20 cm de esta última:

$$\text{Metros cúbicos}_{\text{Asfalto}} = 100 \text{ m} * 0,2 \text{ m} * 3 \text{ m} = 60 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta la densidad del asfalto se puede determinar el peso de los metros cúbicos a suministrar:

$$\text{Peso}_{\text{Asfalto}} = 60 \text{ m}^3 * 2322,7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 139362 \text{ Kg}$$

De manera que:



Tabla 42. Resultados de la estimación de tKm del suministro de asfalto y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Proveedor	Avenida Boyacá con Calle 22	20	139362	2787,24	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

La unidad funcional del estudio corresponde a la huella de carbono en emisiones equivalentes por **metro lineal de tubería instalada con tecnología con zanja abierta**. A continuación, se presenta el diagrama de procesos del caso de estudio I correspondiente al escenario con zanja abierta:

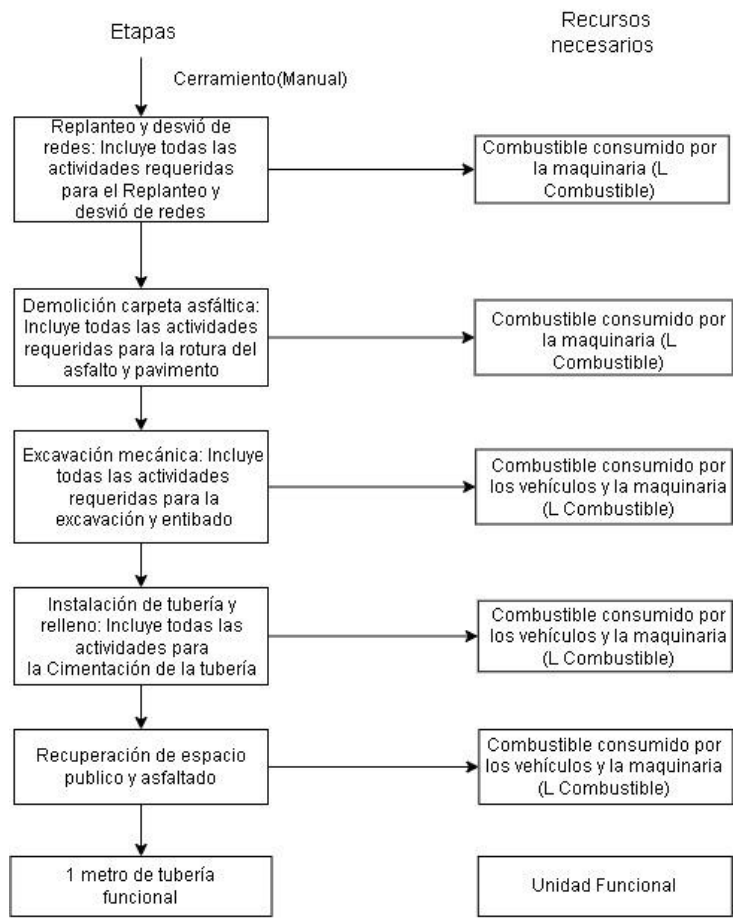


Figura 75. Procesos caso de estudio I escenario zanja abierta

5.2 CASO II: LAS DELICIAS-LA VIEJA

De acuerdo con la norma ISO 14040, en primer lugar, es necesario definir el alcance y objetivos del análisis del ciclo de vida (ACV) que se va a realizar. En este caso el objetivo del análisis es comparar y evaluar, utilizando la metodología del IPCC 2021GWP100(No se hará análisis de



sensibilidad ni coherencia ni integridad), la huella de carbono en emisiones equivalentes por instalación(1 día) de dos tecnologías sin zanja empleadas en el proyecto Las Delicias-La Vieja en el cual se rehabilitaron colectores de alcantarillado para el transporte de aguas residuales y lluvias, específicamente las tecnologías CIPP y Spiral wound, las otras tecnologías empleadas no se consideraron en el presente estudio debido a la limitación de información disponible sobre las mismas. Este trabajo corresponde a un proyecto investigativo cuyo público previsto corresponde al sector académico y empresas del sector de alcantarillado, así como empresas constructoras, empresas de servicios públicos y de tuberías.

En relación con el ACV del proyecto correspondiente al proyecto de rehabilitación de los colectores Las Delicias- La Vieja se limitará a analizará únicamente la etapa constructiva correspondiente a la rehabilitación de los colectores, específicamente con dos de las tecnologías sin zanja empleadas en el proyecto, por lo que otras etapas del ciclo de vida(fabricación de tuberías, transporte de tuberías, uso/operación de las tuberías y disposición final de las tuberías) no serán consideradas, debido a que dichos colectores fueron construidos hace muchos años así como presentan varios tipos de secciones transversales por lo cual el acceso a la información sobre la construcción de estos colectores es de difícil acceso. De igual forma, se han realizado otros trabajos como el llevado a cabo por Andrés Ariza quien analizo el ciclo de vida completo teniendo en cuenta el enfoque “Cradle to Grave” (desde la Cuna hasta la Tumba) de varias tuberías de diferentes materiales y diámetros, por lo cual el presente trabajo complementa dicho trabajo realizado, así como otros realizados en los cuales se consideraron otras etapas del ciclo de vida de las tuberías.

Ahora bien, a continuación, se presentan las etapas de cada una de las tecnologías analizadas:

5.2.1 CIPP

Con respecto a esta tecnología se pueden considerar las siguientes etapas por cada instalación realizada (1 día):

1. **Movilización de equipos y materiales:** Para esta etapa se utiliza un Camión NQR modelo 2017 para las actividades de inspección y corte. Teniendo en cuenta que el constructor suministro la ficha técnica del vehículo empleado, se asumió que el camión se usa al máximo de su capacidad. De acuerdo con lo anterior se tiene que:

Tabla 43. Resultados de la estimación de la movilización de equipos y materiales CIPP, y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	Número de viajes	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Acuapunto-Calle 72 con NQS	Calle 72 con Carrera 5	2,7	5600	1	15,12	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.

- Rehabilitación con CIPP (Epóxico): Para ello se requieren de un generador eléctrico el cual se encarga de suministrar energía al sistema hidráulico, drum XL, caldera de vapor e iluminación. De igual manera, se requiere un compresor para mantener presurizado el sistema (Reversado y curado) así como una caldera de vapor de la cual el constructor suministro directamente el dato de consumo de combustible para una instalación. De acuerdo con esto se tiene que se utilizan los siguientes equipos así:

Tabla 44. Descripción de consumo de combustible etapa de rehabilitación CIPP y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Generador Eléctrico PRAMAC-Modelo GBL 42	8	9	72	61,20	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Compresor Kaeser	6	20,5	123	104,55	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Caldera de vapor-Loos International	10		302,83	257,41	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

La unidad funcional del estudio corresponde a la huella de carbono en emisiones equivalentes por **instalación con tecnología sin zanja** para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado, en este caso CIPP. A continuación, se presenta el diagrama de procesos del caso de estudio II correspondiente a la tecnología CIPP:

De acuerdo con lo anterior se tiene que:

Tabla 45. Resultados de la estimación de la movilización de equipos y materiales Spiral Wound, y especificación de selección de procesos en Simapro Flow

Punto de Partida	Punto de Llegada	Distancia(Km)	Peso(Kg)	Número de viajes	tKm	Parámetro Simapro Flow	Observaciones
Acuapunto-Calle 72 con NQS	Calle 72 con Carrera 5	1,52	12100(Mercedes Benz Atego 2730)	3	55,18	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 Rest-of-world	De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Ariza(2021) se consideró al igual que en dicho estudio que los vehículos utilizados cumplen con la normativa Euro VI.
Acuapunto-Calle 72 con NQS	Calle 72 con Carrera 5	1,52	5600(Camión NQR)	1	8,51	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 Rest-of-world	
Acuapunto-Calle 72 con NQS	Calle 72 con Carrera 5	1,52	6500(Planchón VW 15.180 con grúa)	3	29,64	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4 Rest-of-world	

2. Rehabilitación con Spiral Wound (SPR): Para ello se requieren de un generador CAT DE50 el cual suministra electricidad a la bomba de inyección, un compresor-Kaeser M13 el proceso de enrollado, un generador Generador-CAT DE18E multipropósito, un generador Generador-Yamaha EF3000iSE multipropósito y un generador eléctrico que suministra electricidad a la unidad hidráulica, se debe mencionar que el constructor suministro directamente el dato de consumo de combustible para una instalación de este generador De acuerdo con esto se tiene que se utilizan los siguientes equipos así:

Tabla 46. Descripción de consumo de combustible etapa de rehabilitación Spiral Wound y selección de procesos en Simapro Flow

Equipo	Horas de operación diarias(h)	Consumo combustible por hora(L/H)	Consumo total de Diésel (L)	Consumo total de Diésel (Kg)	Parámetro Simapro Flow
Generador-CAT DE50	8	10,5	84	71,40	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Compresor Kaeser	3	3,78	11,34	8,16	Petroleum market for petroleum Global
Generador-CAT DE18E	8	4,4	35,2	29,92	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia
Generador-Yamaha EF3000iSE	2	1,63	3,26	2,35	Petroleum market for petroleum Global
Generador-Unidad Hidráulica	8		132,49	112,60	Diesel diesel production, petroleum refinery operation Colombia

La unidad funcional del estudio corresponde a la huella de carbono en emisiones equivalentes por **instalación con tecnología sin zanja** para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado, en este caso Spiral Wound (SPR). A continuación, se presenta el diagrama de procesos del caso de estudio II correspondiente a la tecnología SPR:

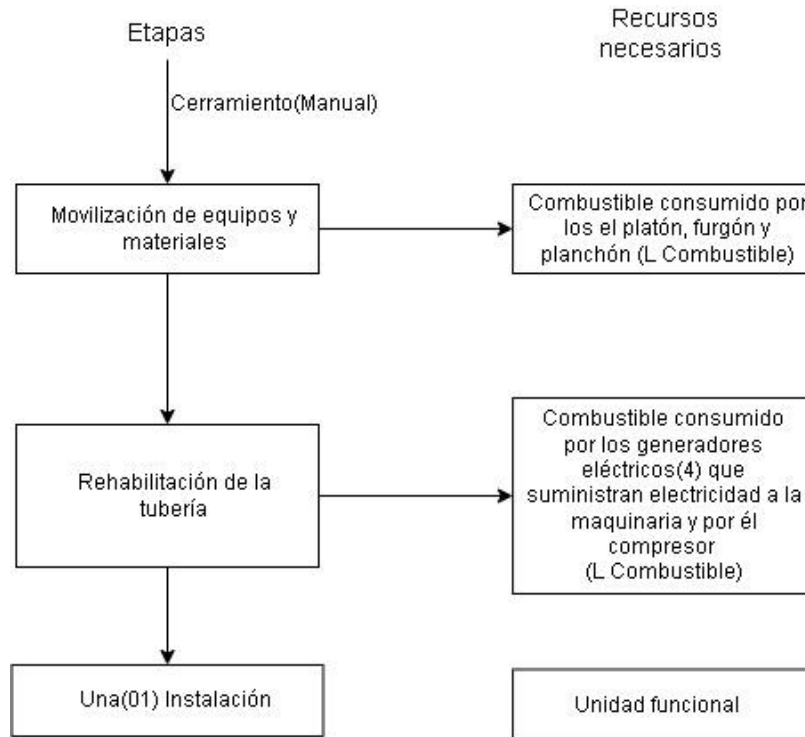


Figura 78. Procesos caso de estudio II-Rehabilitación con CIPP

6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Toda la información presentada anteriormente, la cual fue recolectada y consultada con el apoyo de las empresas encargadas de llevar a cabo los proyectos, se ingresó al programa SimaPro en su versión Simapro Flow para la estimación de la huella de carbono en emisiones equivalentes para ambos casos de estudio. Dicho programa permite el cálculo de las emisiones de carbono equivalente, para lo cual como se ha mencionado se seleccionó el método IPCC 2021GWP100 el cual fue desarrollado por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático y permite incluir la captura de CO₂ en un periodo de tiempo de 100 años (Ariza Mesa, 2021). En la Figura 79 se presenta la interfaz de selección del método de cálculo, el cual es aplicado por el programa permitiendo obtener los resultados que se presentan a continuación.

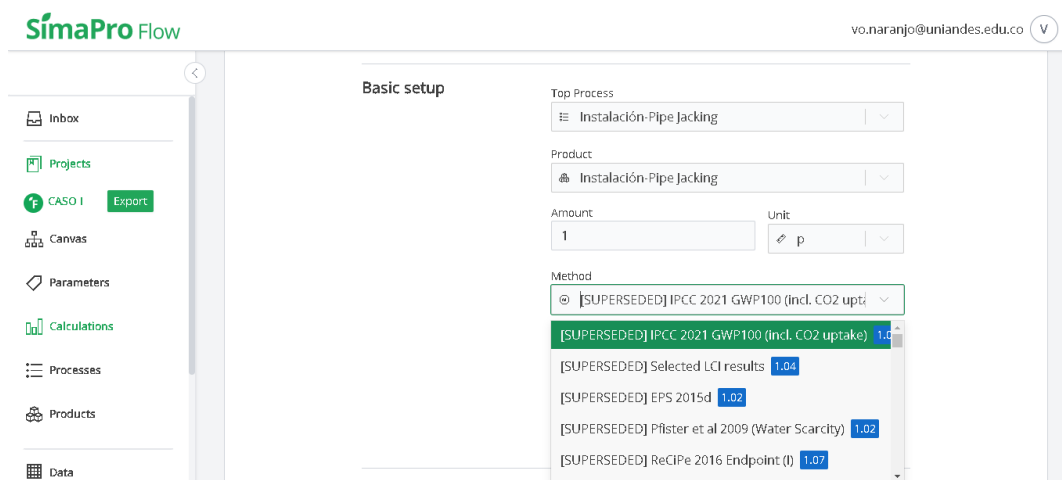


Figura 79. Interfaz de selección de método de configuración de cálculo en SimaPro Flow

6.1 CASO DE ESTUDIO I

En el caso del escenario sin zanja en la Tabla 47 y en la Figura 80 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación de este escenario:

Tabla 47. Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I

FASE	EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE(KG)
Movilización de equipos al proyecto	6791,67
Construcción de pozos	133420,57
Instalación de tubería	634579,06
Total	774791,30

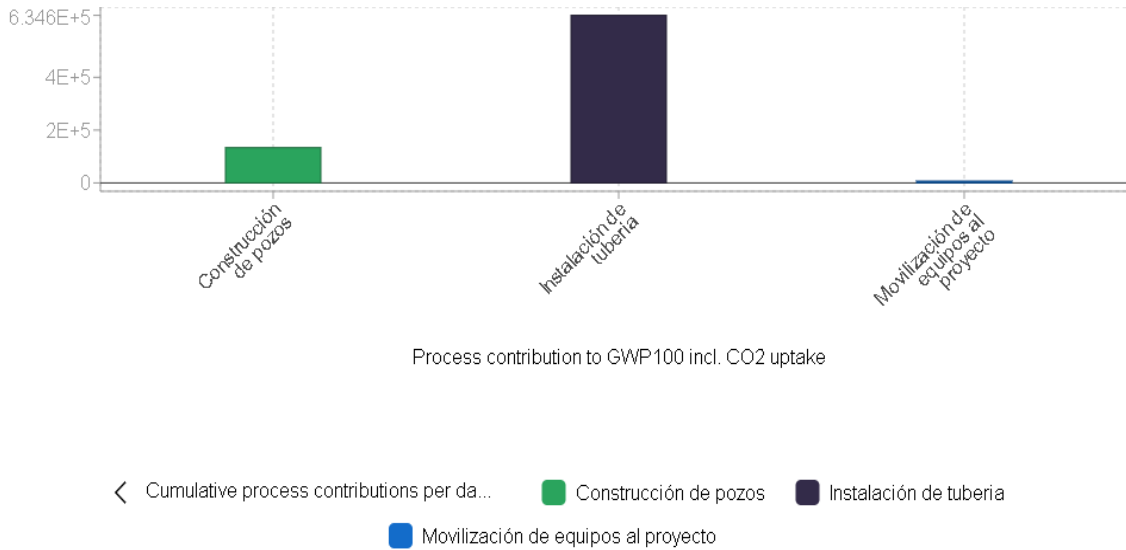


Figura 80. Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I

En ese orden de ideas, se observa que para este escenario la fase de movilización de equipos al proyecto representa un 0,88% del total de emisiones de CO₂ equivalente, siendo la fase que menos emisiones genera, seguida por la fase de construcción de pozos, la cual genera 19,64 veces más emisiones que la fase de movilización de equipos al proyecto, puesto que esta representa el 17,22% del total de emisiones de CO₂ equivalente mientras que la fase de instalación de la tubería representa el 81,9% del total de emisiones de CO₂ equivalente del escenario, siendo la fase que más emisiones genera de todas como se ve en la Figura 81. Así pues, la fase de instalación de la tubería genera 3,76 veces más emisiones de CO₂ equivalente que la fase de construcción de pozos y 94,43 veces más que la fase de movilización de equipos al proyecto. Además, se encontró que en la fase de instalación de la tubería las actividades que más emisiones de CO₂ equivalente generan son el retiro del lodo líquido (14,97% del total) y el suministro de agua limpia (14,41% del total) mientras que la actividad de montaje-desmontaje de obra es la que menos contribuye a la generación de emisiones de CO₂ equivalente (0,03% del total).

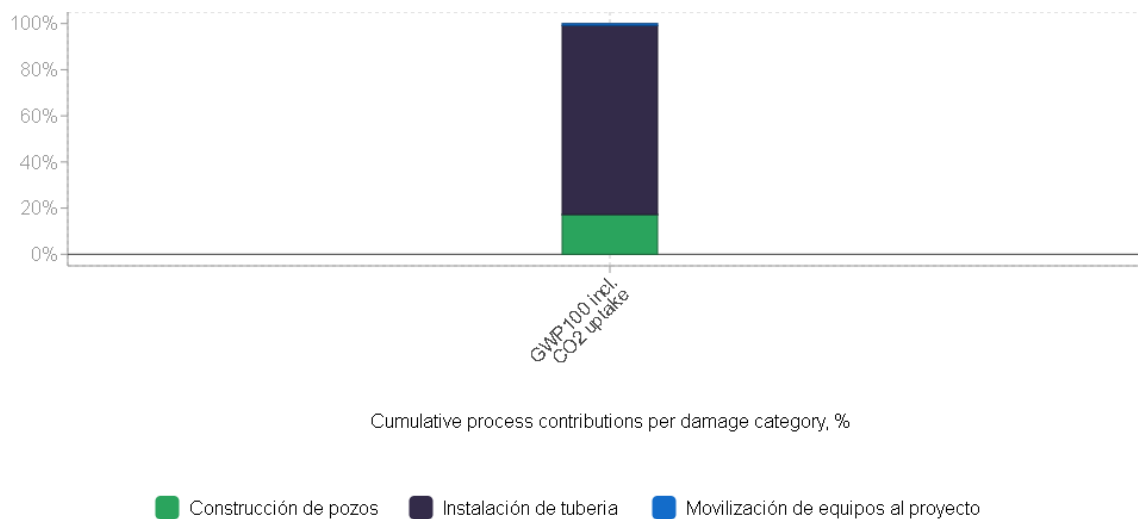


Figura 81. Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I

Igualmente, se debe tener en cuenta que la simulación se realizó con base en la instalación de 8630 metros de tubería en total con el método Pipe Jacking de manera que se estiman las emisiones de CO₂ equivalente por metro de tubería instalada así:

$$\frac{774791,30 \text{ Kg CO}_2 \text{ eq}}{8630 \text{ m}} = 89,78 \frac{\text{Kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}}$$

Por otra parte, referente al escenario con zanja abierta del caso de estudio I en la Tabla 48 y en la Figura 82 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación de este escenario:

Tabla 48. Resultados de emisiones escenario con zanja abierta caso I

FASE	EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE(KG)
Replanteo y desvió de redes	422,20
Demolición carpeta asfáltica	61,16
Excavación mecánica	23582,60
Instalación de tubería y relleno	24817,56
Recuperación de espacio público y asfalto	481,33
Total	49364,84

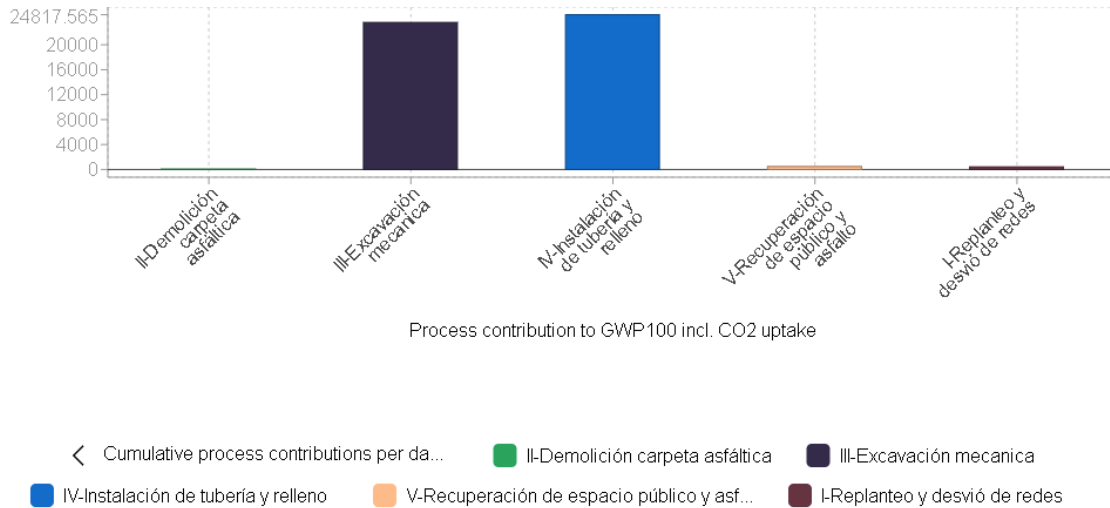


Figura 82. Resultados de emisiones escenario sin zanja caso I

En ese orden de ideas, se observa que para este escenario la fase que más emisiones de CO₂ equivalente genera es la fase de instalación de la tubería y relleno la cual representa el 50,27% del total de emisiones de CO₂ equivalente, seguida por la fase de excavación mecánica la cual representa el 47,77% de las emisiones de CO₂ equivalente. Con respecto a la fase de replanteo y desvío de redes esta representa el 0,86% de las emisiones de CO₂ equivalente del escenario mientras que la fase de demolición de la carpeta asfáltica representa el 0,12% de las emisiones de CO₂ equivalente del escenario, y la fase de recuperación de espacio público y asfalto representa el 0,98% de las emisiones de CO₂ equivalente del escenario. Como se observa las tres fases mencionadas anteriormente no contribuyen significativamente con la generación de emisiones de CO₂ equivalente puesto que representan menos del 2% del total de emisiones de CO₂ equivalente como se ve en la Figura 83. Además, se encontró que en la fase de instalación de la tubería y relleno la actividad que más emisiones de CO₂ equivalente genera es el suministro de relleno (74,19% del total) seguida por el uso de la excavadora que genera el 7,02% del total de emisiones de CO₂ equivalente y por el uso del vibro compactador de doble rodillo que genera el 5,85% del total de emisiones de CO₂ equivalente.

Paralelamente, se debe tener en cuenta que la simulación se realizó con base en la instalación de 100 metros de tubería en total con el método de zanja abierta de manera que se estiman las emisiones de CO₂ equivalente por metro de tubería instalada así:

$$\frac{49364,84 \text{ Kg CO}_2 \text{ eq}}{100 \text{ m}} = 493,65 \frac{\text{Kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}}$$

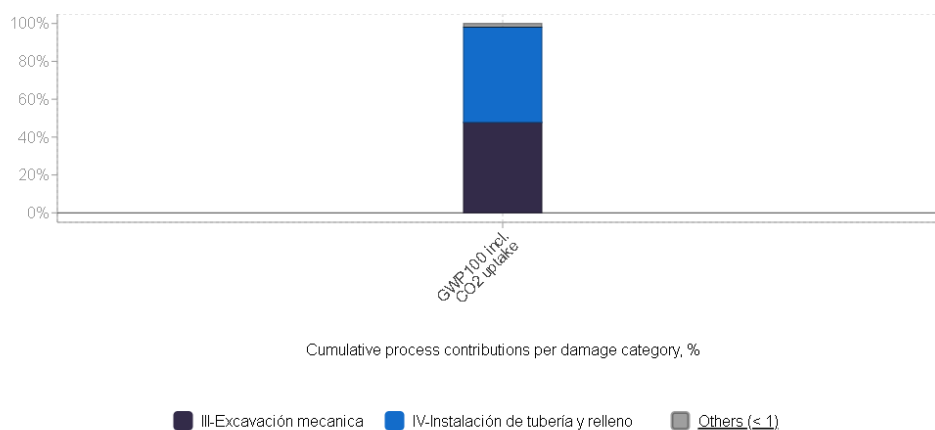


Figura 83. Resultados de emisiones escenario con zanja abierta caso I

De igual forma, se observa que ambos escenarios estudiados la fase de instalación de la tubería es la que mayores emisiones de CO₂ equivalente genera siendo en el escenario sin zanja su contribución mayor (81,9%) que en el escenario con zanja abierta (50,27%). Además, la fase de construcción de pozos del escenario sin zanja, la cual representa el 17,22% del total de emisiones de CO₂ equivalente del escenario podría equipararse con las fases de replanteo y desvío de redes, demolición de la carpeta asfáltica y excavación mecánica del escenario con zanja abierta las cuales representan en conjunto el 48,75% del total de emisiones de CO₂ equivalente del escenario, representando un valor superior. Sumado a lo anterior, la fase de la fase de instalación de tubería del escenario sin zanja, la cual representa el 81,9% del total de emisiones de CO₂ equivalente del escenario podría equipararse con las fases de instalación de tubería y relleno, y recuperación de espacio público y asfalto del escenario con zanja abierta las cuales representan en conjunto el 51,25% del total de emisiones de CO₂ equivalente del escenario, representando un valor superior.

Así pues, al comparar el escenario con zanja abierta y sin zanja como se muestra en la Tabla 49, se observa que las emisiones de CO₂ equivalente por metro de tubería instalada de acueducto de 60 pulgadas de diámetro al utilizar la tecnología sin zanja (Pipe Jacking) son 4,5 veces inferiores a las emisiones de CO₂ equivalente generadas al emplear la técnica de zanja abierta para la instalación de tubería de acueducto de 60 pulgadas de diámetro puesto que la instalación con tecnología sin zanja representa tan solo el 18,19% del total de emisiones de CO₂ equivalente generadas con la tecnología con zanja abierta:

Tabla 49. Comparación resultados escenario sin zanja Vs. con zanja abierta

TÉCNICA CONSTRUCTIVA	EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE POR METRO DE TUBERIA INSTALADA ($\frac{\text{Kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}}$)
Sin Zanja (Pipe Jacking)	89,78
Con Zanja Abierta	493,65

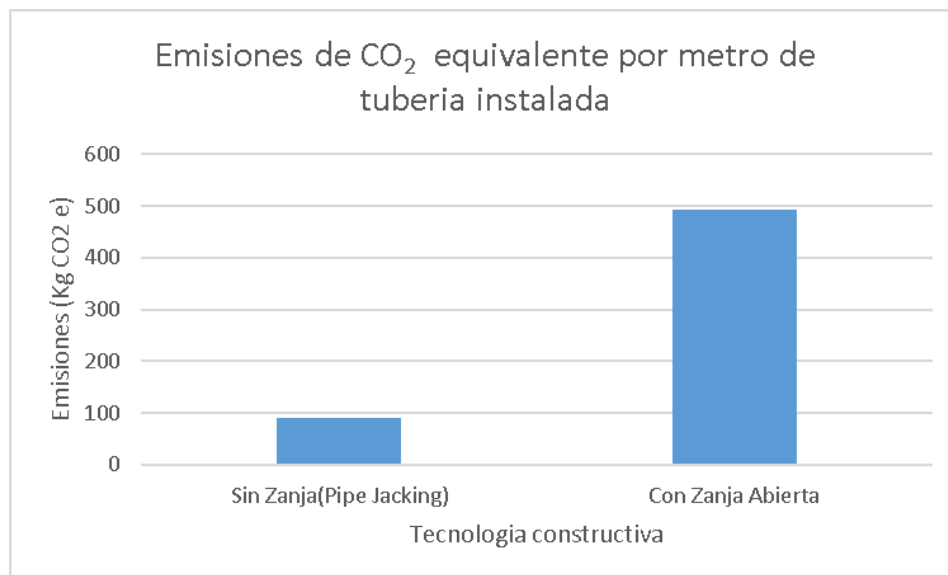


Figura 84. Comparación resultados escenario sin zanja Vs. con zanja abierta

En consecuencia, para instalar 8630 m de tubería las emisiones de CO₂ equivalente al instalar la tubería con tecnología sin zanja (Pipe Jacking) es de 774.791,30 Kg CO₂ equivalentes mientras que si se utiliza la tecnología con zanja abierta las emisiones de CO₂ equivalente serian de 4.260.199,5 Kg CO₂ equivalentes, 4,5 veces mayores. Sumado a lo anterior, se debe tener en cuenta el rendimiento de cada una de las tecnologías de instalación las cuales se muestran en la Tabla 50, como se ve con la tecnología sin zanja se pueden instalar los 8.630 m de tubería en 360 días (0,99 Años) mientras que con la tecnología con zanja abierta se tardaría 2158 días (5,9 Años).

Tabla 50. Rendimiento tecnologías

TÉCNICA CONSTRUCTIVA	Rendimiento ($\frac{m}{dia}$)
Sin Zanja(Pipe Jacking)	24
Con Zanja Abierta	4

En síntesis, los resultados obtenidos son consistentes con lo obtenido en trabajos anteriores como el llevado a cabo por Kaushal et al (2020) puesto que en el presente trabajo se encontró que se obtienen menores impactos ambientales al utilizar técnicas sin zanja para la instalación de tuberías al igual que en los estudios realizados en el periodo analizado por ellos. De igual forma, los resultados obtenidos en este trabajo muestran una reducción de las emisiones de CO₂ equivalente empleando tecnología sin zanja, al igual que en el trabajo llevado a cabo por la Pipe Jacking Association (2017) pero en el presente trabajo la reducción es mayor, del 81,81% a comparación del 60% obtenido por la Pipe Jacking Association (2017). Además, teniendo en cuenta los resultados de Lu et al (2020) quienes

encontraron en su estudio que utilizando la técnica de instalación sin zanja Pipe Jacking se logran reducciones de la huella de carbono entre 14%-86% a comparación de un escenario de instalación con zanja abierta, se observa que la reducción en la huella de carbono evidenciada en el presente trabajo (81,81%) se encuentra dentro del rango establecido en dicho estudio.

Sumado a lo anterior se tiene que los resultados del presente estudio coinciden con los obtenidos por Alsadi et al (2020) respecto de las menores emisiones al utilizar tecnología sin zanja, esto a pesar que Alsadi et al (2020) considero tecnologías sin zanja diferentes a la considerada en el presente estudio. Además, al igual que en el estudio de Alsadi et al (2020) se encontró que con el método de zanja abierta la actividad de relleno(Suministro) es la que más emisiones de CO₂ equivalente genera. Igualmente, los resultados coinciden con los obtenidos por Vladimirov & Hölterhoff (2012) dado que en ambos estudios se encontraron reducciones considerables en las emisiones de CO₂ equivalente al emplear tecnología sin zanja (Pipe Jacking) en lugar de la técnica de zanja abierta, siendo la reducción del presente estudio mayor (81,81%) que la del estudio de Vladimirov & Hölterhoff (73,86%). No obstante, los resultados difieren de los obtenidos por Perdomo (2021) puesto que en el presente estudio las emisiones de CO₂ equivalente empleando tecnología sin zanja para la instalación de tuberías son menores que la instalación con zanja abierta como obtuvo en su estudio Perdomo (2021), siendo dicho estudio un caso atípico puesto que como se ha mencionado anteriormente la mayoría de estudios coinciden en que las tecnologías sin zanja generan menores emisiones de CO₂ equivalente que la zanja abierta.

6.2 CASO DE ESTUDIO II

En el caso del escenario sin zanja en la Tabla 51 y en la Figura 85 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación del escenario de rehabilitación de la tubería con la tecnología sin zanja CIPP :

Tabla 51.Resultados de emisiones rehabilitación CIPP caso II

FASE	EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE(KG)
Movilización de equipos y materiales	8,110
Rehabilitación	192,673
Total	200,783

En ese orden de ideas, se observa que para este escenario la fase de movilización de equipos y materiales al proyecto representa el 4,04% del total de emisiones de CO₂ equivalente, siendo la fase que menos emisiones genera mientras la fase de rehabilitación es la que más emisiones de CO₂ equivalente genera puesto que esta fase representa el 95,96% del total de emisiones de CO₂ equivalente como se ve en la Figura 86. De igual manera, la fase de rehabilitación de la tubería genera 22,76 veces más emisiones de CO₂ equivalente que la fase de movilización de equipos y materiales al proyecto. Además, se encontró que en la fase de rehabilitación de la tubería el uso de la caldera de vapor es la que más emisiones de CO₂ equivalente genera (58,37% del total) mientras el compresor

genera el 23,71% de las emisiones de CO₂ equivalente y el generador eléctrico genera el 18,88% de las emisiones de CO₂ equivalente.

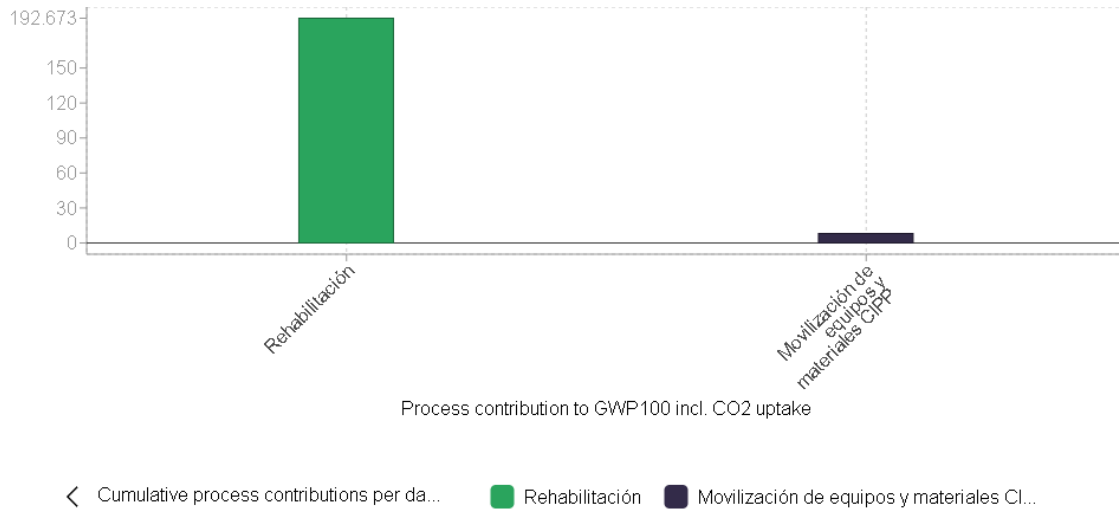


Figura 85. Resultados de emisiones rehabilitación CIPP caso II

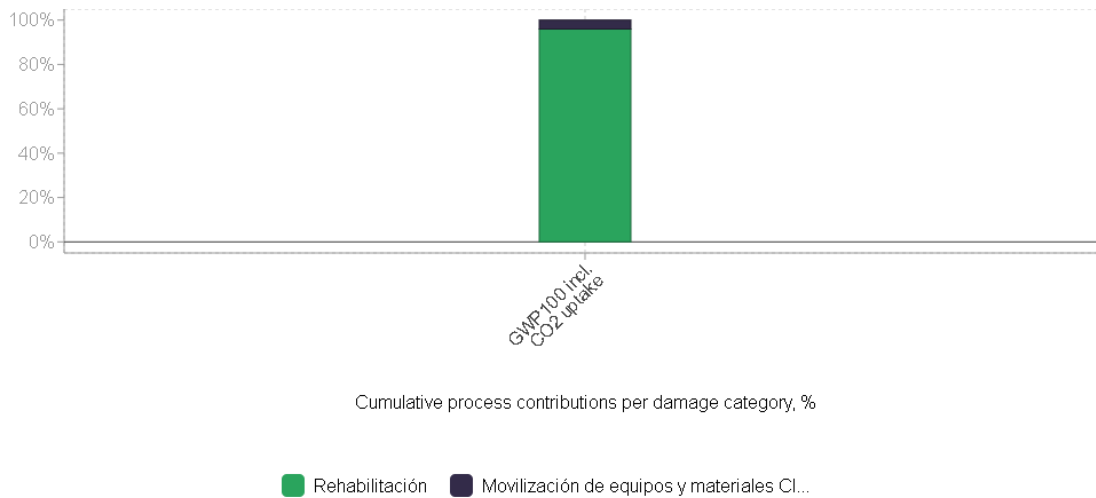


Figura 86. Resultados de emisiones rehabilitación CIPP caso II

Por otra parte, referente al escenario de rehabilitación de la tubería con tecnología sin zanja, específicamente Spiral Wound, en la Tabla 52 y en la Figura 87 se presentan los resultados de emisiones de CO₂ equivalente, obtenidos al realizar la simulación de este escenario:

Tabla 52. Resultados de emisiones rehabilitación Spiral Wound caso II

FASE	EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE(KG)
Movilización de equipos y materiales	32,72
Rehabilitación	99,80
Total	132,51

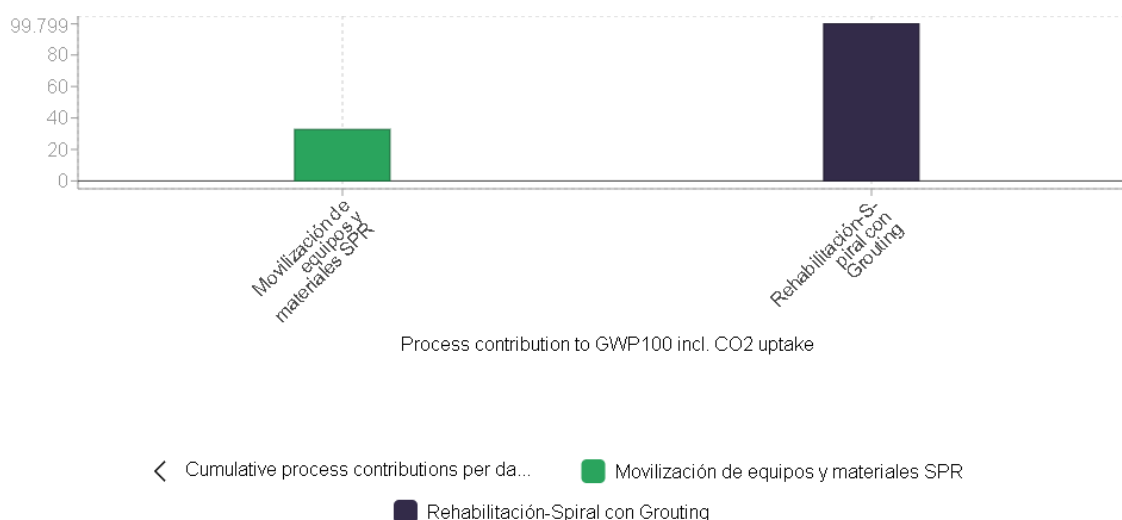


Figura 87. Resultados de emisiones rehabilitación Spiral Wound caso II

En ese orden de ideas, se observa que para este escenario la fase de movilización de equipos y materiales al proyecto representa el 24,69% del total de emisiones de CO₂ equivalente, siendo la fase que menos emisiones genera mientras la fase de rehabilitación es la que más emisiones de CO₂ equivalente genera puesto que esta fase representa el 75,31% del total de emisiones de CO₂ equivalente como se ve en la Figura 88. De igual manera, la fase de rehabilitación de la tubería genera 2,05 veces más emisiones de CO₂ equivalente que la fase de movilización de equipos y materiales al proyecto. Además, se encontró que en la fase de rehabilitación de la tubería el uso del generador que suministra energía a la unidad hidráulica es lo que más emisiones de CO₂ equivalente genera (51,37% del total), seguido por el generador CAT DE50 (32,58% de las emisiones de CO₂ equivalente), el generador CAT DE18E (13,65% de las emisiones de CO₂ equivalente), el compresor (7,86% de las emisiones de CO₂ equivalente) y el generador Yamaha EF3000iSE (0,54% de las emisiones de CO₂ equivalente).

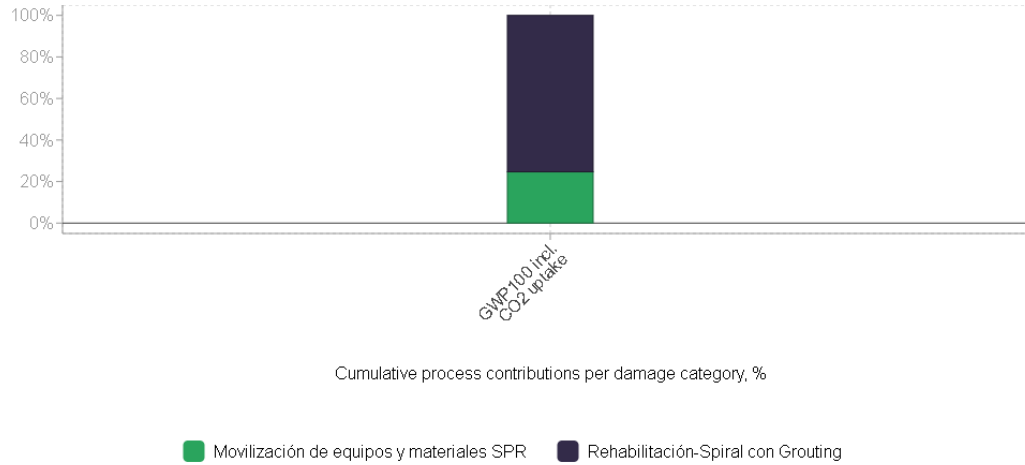


Figura 88. Resultados de emisiones rehabilitación Spiral Wound caso II

Sumado a lo anterior, al comparar las tecnologías sin zanja para la rehabilitación de tuberías como se muestra en la Tabla 53, se observa que las emisiones de CO₂ equivalente por instalación de CIPP son 0,51 veces superiores a las emisiones de CO₂ equivalente generadas por instalación de Spiral Wound:

Tabla 53. Comparación resultados rehabilitación CIPP y Spiral Wound

TÉCNICA CONSTRUCTIVA	EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE POR INSTALACIÓN ($\frac{\text{Kg CO}_2 \text{ eq}}{m}$)
CIPP	200,78
Spiral Wound(SPR)	132,51

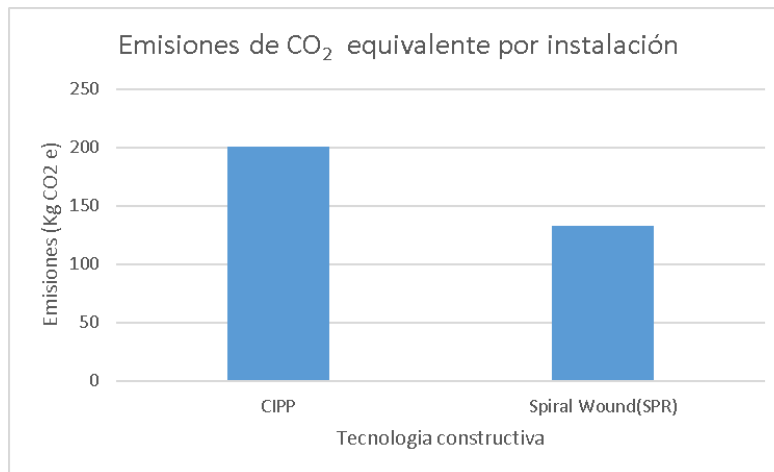


Figura 89. Comparación resultados rehabilitación CIPP y Spiral Wound

De igual forma, se observa que ambos escenarios estudiados la fase de instalación de la tubería es la que mayores emisiones de CO₂ equivalente genera siendo en el escenario de rehabilitación con CIPP mayor (95,96%) que en el escenario de rehabilitación con SPR (75,31%). Asimismo, con respecto a la fase de movilización de equipos y materiales se observa que en el caso de la rehabilitación con CIPP genera el 4,04% de las emisiones de CO₂ equivalente el cual es un valor inferior al generado en esta misma fase en el escenario de rehabilitación con Spiral Wound, en el cual se generan el 24,69% de las emisiones de CO₂ equivalente.

Por último, se debe mencionar que dentro de la revisión bibliográfica realizada no se encontró un estudio en el cual se comparan directamente las emisiones de CO₂ equivalentes de las técnicas de rehabilitación de tuberías sin zanja analizadas en el presente caso de estudio, las cuales son CIPP y Spiral Wound.

6.3 COMPENSACIÓN

Hoy en día se realizan compensaciones, las cuales cumplen la función de ser un abono monetario que se reinvierte en proyectos para mejorar el entorno natural y el desarrollo social con el fin de mitigar el efecto de las emisiones de CO₂ por procesos antropogénicos en el medio ambiente (Ariza Mesa, 2021). En línea con lo anterior, se destaca que en Colombia se implementó la Ley 1819 de 2016 por medio de la cual se creó el impuesto nacional al carbono, el cual busca desincentivar el uso de combustibles fósiles y promover mejoras tecnológicas que conduzcan a su uso eficiente (Departamento Nacional de Planeación, s.f.). En ese orden de ideas, este impuesto para el año 2022 tenía una tarifa de \$18.829 COP por cada tonelada de CO₂ generada por la quema de combustibles. Asimismo, para el caso de la Unión Europea el valor de compensación por tonelada de carbono a inicios del mes de diciembre del 2022 se encontraba en € 85.22 EUR (Statista, 2022). A partir de lo anterior se puede hacer una comparación sobre el costo que puede tener compensar las emisiones generadas en cada escenario analizado para ambos casos de estudio. En la Tabla 54 se presentan los resultados obtenidos para el caso de estudio I y en la Tabla 52 se encuentran los resultados obtenidos para el caso de estudio II.

Tabla 54. Resultados comparativos de costos de compensación caso I

TECNOLOGIA	EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTE(KG)	COMPENSACIÓN DE CARBONO (\$ COP)	COMPENSACIÓN DE CARBONO (€ EUR)
Sin Zanja(Pipe Jacking)	774791,3	\$ 14.588.545,39	€ 66.027,71
Con Zanja Abierta	4260199,5	\$ 80.215.296,39	€ 363.054,20
CIPP	200,78	\$ 3.780,49	€ 17,11
Spiral Wound(SPR)	132,51	\$ 2.495,03	€ 11,29

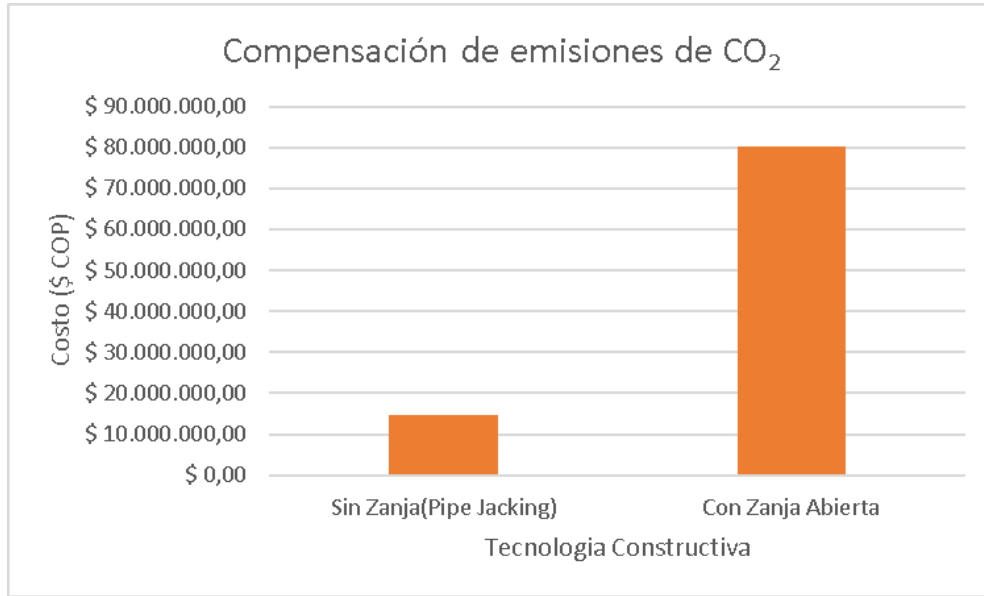


Figura 90. Compensación de huella de carbono según Ley 1819 de 2016 caso I

Como se observa en la Figura 90, Figura 92, Figura 92 y Figura 93 se evidencia que para el caso de estudio I los costos de compensación son mayores tanto para la normativa de Colombia como la de la Unión Europea que para el caso de estudio II, esto debido a que en el caso I se contemplan mayores emisiones de CO₂ equivalente para ambas tecnologías constructivas (Con zanja y sin zanja) ya que se hizo el análisis para la totalidad de la instalación de la tubería del proyecto mientras que en el caso de estudio II se hizo el análisis por instalación (1 día) de cada método de rehabilitación sin zanja contemplado por lo cual las emisiones son menores. De igual manera los costos de compensación en el caso I al utilizar tecnología sin zanja son significativamente menores que al emplear el método tradicional de zanja abierta. Además, en el caso II se observa que los costos de compensación por instalación de Spiral Wound (SPR) son un 34% inferiores que los de la instalación de CIPP.

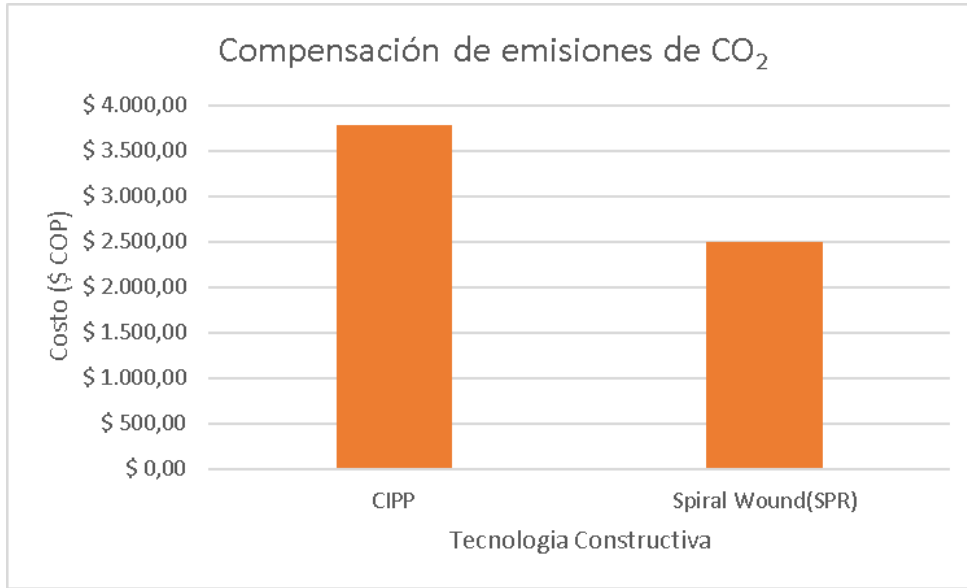


Figura 91. Compensación de huella de carbono según Ley 1819 de 2016 caso II

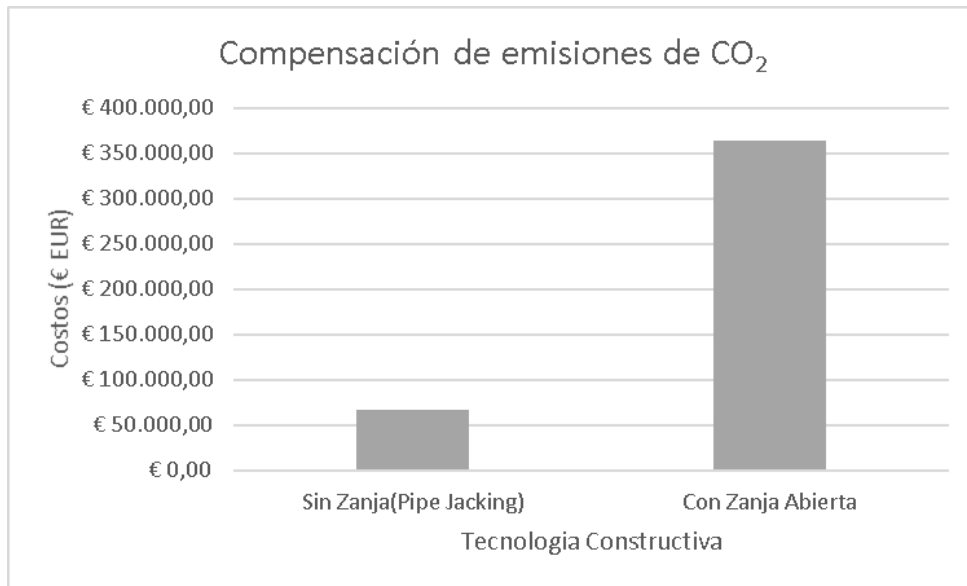


Figura 92. Compensación de huella de carbono según norma europea caso I

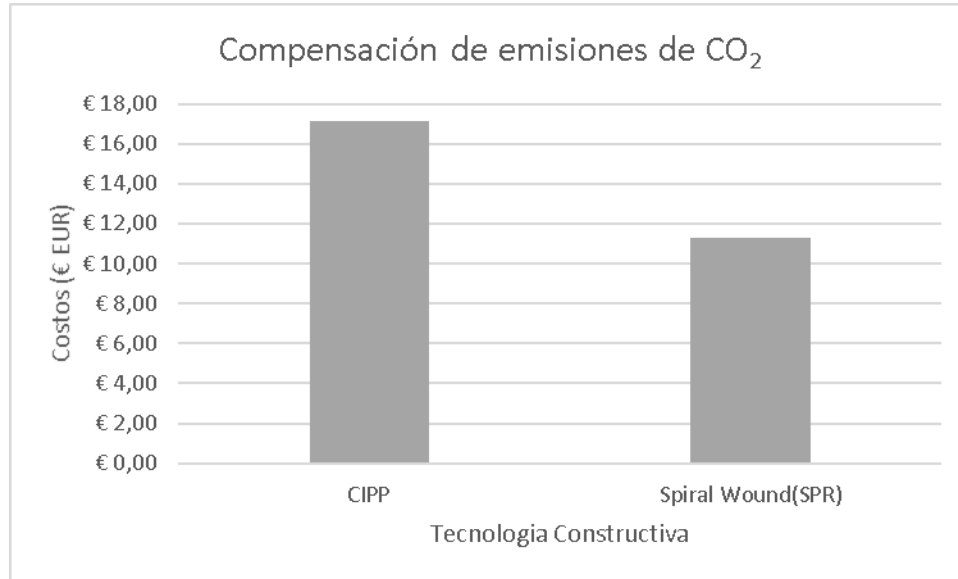


Figura 93. Compensación de huella de carbono según norma europea caso II

Igualmente, se evidencia que internacionalmente, en este caso en la Unión Europea, los costos de compensación son más elevados, 21,68 veces más costosos, que los que se encuentran establecidos en Colombia. Como consecuencia, en Colombia se presenta una subestimación de los costos debido a las afectaciones medio ambientales lo cual a su vez implica un alto costo de oportunidad en inversión de proyectos que pueden ayudar a mitigar las problemáticas ambientales y las afectaciones directas sobre el cambio climático (Ariza Mesa, 2021). Esto puede ser un problema al momento de la toma de decisión de los dueños de los proyectos de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado en Colombia dado que al comparar los costos requeridos para evitar la generación de CO₂ por medio del uso de tecnologías sin zanja, por ejemplo, con el costo de pagar el impuesto establecido por compensación, no se reflejará realmente el costo de las afectaciones medio ambientales y se optará por la alternativa constructiva cuyo costo sea menor.

7. CONCLUSIONES

En el marco del presente trabajo de investigación se llevó a cabo inicialmente una revisión bibliográfica para establecer en primer lugar las tecnologías de instalación, renovación y rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado disponibles, así como en segundo lugar establecer el estado del arte de la huella de carbono, especialmente las emisiones de CO₂ equivalente, de las tecnologías sin zanja y con zanja para la instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado. De igual forma, se realizó la modelación de dos casos de estudio, en los cuales se evaluó la huella de carbono de la etapa de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado. A partir del trabajo realizado se puede concluir lo siguiente:

- De acuerdo con la revisión bibliográfica se puede establecer que para la instalación de tuberías de acueducto y alcantarillado existen las siguientes tecnologías sin zanja disponibles, una de las cuales fue desarrollada en Colombia (ADB):
 - ✓ Pipe Jacking
 - ✓ Utility Tunneling
 - ✓ Microtunelado
 - ✓ Microtunelado con tubo piloto
 - ✓ Horizontal Auger Boring (HAB)
 - ✓ Horizontal Directional Drilling (HDD)
 - ✓ Perforación por Golpeo (Pipe Ramming)
 - ✓ Ramming asistido Hidráulicamente(ADB)
- De acuerdo con la revisión bibliográfica se puede establecer que para la renovación de tuberías de acueducto y alcantarillado existen las siguientes tecnologías disponibles:
 - ✓ Pipe Bursting
 - ✓ Pipe Eating
 - ✓ Pipe Reaming
 - ✓ Tunnel Liner
- Con base en la revisión bibliográfica se puede establecer que para la rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado existen las siguientes tecnologías disponibles:
 - ✓ Close Fit Slip Lining
 - ✓ CIPP
 - ✓ Spiral Wound Lining
 - ✓ Reparación Puntual (Point Repair)
- A nivel internacional se han realizado varios estudios para la investigación y cuantificación las emisiones de GEI, en especial la huella de carbono, en proyectos especialmente de instalación de tuberías en los cuales se comparan las emisiones tanto de métodos sin zanja como con zanja abierta. No obstante, los casos de renovación y rehabilitación han sido poco

documentados o estudiados a la fecha por lo cual a futuro documentar esta clase de proyectos puede ayudar a complementar la información disponible.

- En la revisión bibliografía se encontró que los casos de estudio documentados de proyectos de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías con tecnologías sin zanja se localizan especialmente en Europa o en Estados Unidos puesto que en Latinoamérica solamente se ha documentado un caso en Colombia el cual se realizó en el año 2021. En consecuencia, se hace necesario que a futuro se documenten una mayor cantidad de proyectos sin zanja en Latinoamérica así como en otras partes del mundo como Oceanía por ejemplo.
- Con base en el estado del arte, se encontró que la mayoría de estudios realizados para la investigación y cuantificación las emisiones de GEI, en especial la huella de carbono, en proyectos de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto o alcantarillado han obtenido resultados que muestran que al emplear tecnologías sin zanja en lugar de la técnica de zanja abierta se pueden reducir considerablemente las emisiones de CO₂ equivalente. Sin embargo, el estudio llevado a cabo por Perdomo (2021) arroja resultados atípicos puesto que la zanja abierta genero menos contaminantes que la tecnología sin zanja, siendo el único estudio que presenta estos resultados.
- Se documentaron dos proyectos en la ciudad de Bogotá en los cuales se utilizaron tecnologías sin zanja: I) Fase 2 de la rehabilitación del tramo 3 la Línea Tibitoc-Casablanca en el cual se utilizó la tecnología Pipe Jacking para la instalación de tubería de acueducto y II) II-Las Delicias-La Vieja en el cual se utilizaron varias técnicas de rehabilitación sin zanja como CIPP o Spiral Wound para rehabilitar colectores de alcantarillado.
- Para el caso de estudio I, las emisiones de CO₂ equivalente por metro de tubería instalada utilizando tecnología sin zanja son de $89,78 \frac{\text{Kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}}$ mientras que utilizando la zanja abierta este valor es de $493,65 \frac{\text{Kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{m}}$. En consecuencia la huella de carbono si se usa tecnología sin zanja en lugar de la zanja abierta puede reducirse en un 81,81% puesto que la zanja abierta genera 4,5 veces más emisiones que la tecnología sin zanja.
- Para el caso de estudio I se encontró que, en el escenario sin zanja, la fase de instalación de la tubería es la que más emisiones de CO₂ equivalente genera, así como que dentro de esta fase las actividades que más emisiones de CO₂ equivalente generan son el retiro del lodo líquido (14,97% del total) y el suministro de agua limpia (14,41% del total). Con respecto al escenario de zanja abierta la fase que más emisiones de CO₂ equivalente genera es la fase de instalación de la tubería y relleno la cual representa el 50,27% del total de emisiones de CO₂ equivalente, de igual forma dentro de esta fase la actividad que más emisiones de CO₂ equivalente genera es el suministro de relleno (74,19% del total).

- Los resultados obtenidos para el caso de estudio I son consistentes con los resultados obtenidos en otros trabajos llevados a cabo por otros autores puesto que los resultados del presente estudio muestran una reducción de las emisiones de CO₂ equivalente empleando tecnología sin zanja en vez de utilizar la zanja abierta.
- Para el caso de estudio II se encontró que las emisiones de CO₂ equivalente por instalación de CIPP son 0,51 veces superiores a las emisiones de CO₂ equivalente generadas por instalación de Spiral Wound. Además, en ambos escenarios estudiados la fase de instalación de la tubería es la que mayores emisiones de CO₂ equivalente genera siendo en el caso de la rehabilitación con CIPP el uso de la caldera de vapor lo que más emisiones de CO₂ equivalente genera (58,37% del total) mientras que con la rehabilitación con SPR el uso del generador que suministra energía a la unidad hidráulica es lo que más emisiones de CO₂ equivalente genera (51,37% del total).
- Al comparar los costos de compensación de las emisiones de CO₂ se encontró que los costos de compensación son superiores en otros lugares del mundo como por ejemplo en la Unión Europea donde esta compensación tiene un costo 21,68 veces superior al establecido en Colombia. Por lo tanto, es necesario que en Colombia se revise la regulación vigente con el fin de equipararla a la de otras partes del mundo con el fin de lograr desincentivar el uso de combustibles fósiles y promover mejoras tecnológicas como por ejemplo lo es el uso de las tecnologías sin zanja en proyectos de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado.

8. RECOMENDACIONES

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

- El proceso de obtención de la información se puede ver obstaculizado en ciertos casos por la falta de acceso a la información por parte de las empresas constructoras por lo cual se hace necesario profundizar la relación entre la academia y las empresas con el fin de lograr objetivos conjuntos que beneficien a ambas partes.
- Para futuros posteriores se sugiere incluir dentro del análisis de ciclo de vida las emisiones de CO₂ equivalente correspondiente a la fabricación u obtención de los materiales empleados dentro de la etapa constructiva como, por ejemplo, el material de relleno o el asfalto.
- El presente estudio contribuye a documentar la huella de carbono de proyectos de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado con tecnología sin zanja en Colombia y en Latinoamérica, a su vez se busca incentivar el desarrollo de esta clase de investigaciones por lo cual es necesario que se sigan estudiando proyectos sin zanja en el país y la región.
- Se requiere en el futuro documentar y estudiar mayoritariamente proyectos de renovación y rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado con tecnología sin zanja puesto que a la fecha la mayoría de estudios realizados se han enfocado en proyectos de instalación de tuberías con diferentes metodologías sin zanja. Además, se hace necesario el desarrollo de un mayor número de trabajos que comparen entre si varias tecnologías sin zanja para la de instalación, renovación o rehabilitación de tuberías de acueducto y alcantarillado.
- Para la evaluación de la huella de carbono en el presente estudio se empleó el Software Simapro, el cual no es de libre acceso y cuya disponibilidad es limitada lo cual puede ser un impedimento para el desarrollo de esta clase de trabajos por lo cual se requiere analizar metodologías alternas que permitan hacer esta clase de trabajos sin la limitante del acceso al Software como por ejemplo el uso de calculadoras de carbono de libre acceso desarrolladas por entidades estatales.
- Para trabajos futuros se sugiere analizar los costos económicos, sociales y ambientales simultáneamente de las tecnologías con y sin zanja con el fin de ayudar a los tomadores de decisión respecto de que tipo de tecnología se debe seleccionar teniendo en cuenta no solo al análisis económico sino otros aspectos como los ambientales y sociales.

9. BIBLIOGRAFIA

- Alarcon Rocha, J. A., & Pachecho Calvo, J. L. (2014). Comparación tecnológica y costos del método de instalación de tuberías sin zanja (trenchless) más eficiente para los suelos encontrados en un proyecto de Bogotá. *FACULTAD DE INGENIERÍA*. Pontificia Universidad Javeriana., Bogotá.
- Alsadi, A. (2019). EVALUATION OF CARBON FOOTPRINT DURING THE LIFE-CYCLE OF FOUR DIFFERENT PIPE MATERIALS. *Doctoral Dissertation*. LOUISIANA TECH UNIVERSITY.
- Alsadi, A., & Matthews, J. (2020). Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during installation, Operation, and Disposal Phases. *Journal of Pipeline Systems*.
- Alsadi, A., Matthews, J., & Matthews, E. (2020). Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. *Journal of Pipeline Systems*.
- Ariaratnam, S., & Sihabuddin, S. (2009). COMPARISON OF EMITTED EMISSIONS BETWEEN TRENCHLESS PIPE REPLACEMENT AND OPEN CUT UTILITY CONSTRUCTION. *Journal of Green Building*.
- Ariza Mesa, A. D. (2021). ESTADO DEL ARTE DE LOS COSTOS DE TONELADAS DE CARBONO EQUIVALENTE PARA SER INCLUIDOS EN DISEÑOS MULTI OBJETIVO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS URBANOS. *Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil*. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Bogotá.
- Asociación Ibérica de tecnologías Sin Zanja. (2013). *Manual de tecnología sin zanja*.
- Barrera Murillo, C. A. (2016). Tecnologías más promisorias para renovar y rehabilitar tuberías de sistemas de alcantarillado. *Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.
- Chen , M., Weng , Y., Semple, K., Zhang , S., Hu , Y., Jiang , X., . . . Dai , C. (2021). Sustainability and innovation of bamboo winding composite pipe products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Cuello Mendoza, M. M. (2021). Factibilidad del uso de tecnologías sin zanja para la rehabilitación y/o renovación de sistemas de alcantarillado, caso de estudio: centro histórico de santa marta. *Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Bogotá.

CYPE Ingenieros S.A. (s.f.). *Muro Pantalla de concreto armado, con lodos*. Obtenido de Generador de Precios Colombia: http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Contenciones/Muros_pantalla/CCP020_Muro_pantalla_de_concreto_armado__c.html

Departamento Nacional de Planeación. (s.f.). *Instrumentos económicos para el cambio climático*. Obtenido de Portal Web DNP: [https://www.dnp.gov.co/programas/ambiente/CambioClimatico/Paginas/Instrumentos-economicos-para-el-cambio-climatico.aspx#:~:text=Dentro%20de%20los%20instrumentos%20m%C3%A1s,Comercio%20de%20Emisiones%20\(SCE\).](https://www.dnp.gov.co/programas/ambiente/CambioClimatico/Paginas/Instrumentos-economicos-para-el-cambio-climatico.aspx#:~:text=Dentro%20de%20los%20instrumentos%20m%C3%A1s,Comercio%20de%20Emisiones%20(SCE).)

Ecoinvent. (2022). *Database*. Obtenido de Ecoinvent: <https://ecoinvent.org/>

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). *Rehabilitación de los colectores La Vieja y Las Delicias*.

EPA. (2020). *Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias*. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos>

Ghosh, S., Kim, J., Piratla, K., & Koo, D. (2020). Evaluating Benefits of Horizontal Directional Drilling Compared to Open-Cut: Case Study in the City of Enid, OK. *Journal of Pipeline Systems*.

Green Solution. (2016). Todo Tiene Una Huella ¿Cual Es La Tuya? En *Huella de Carbono* (pág. 14). Santiago de Chile.

ICONTEC. (2022). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia. En *Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 14040*.

Jiménez Aldana, M. (2017). Proyecto de rehabilitación del Tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca. *Trenchless World Congress 2017*. Medellín.

Jiménez Terán, J. M. (2013). Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario. *Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario*. Universidad Veracruzana, Xalapa.

Joshi, A. (2012). A Carbon Dioxide comparison of open-cut and pipe bursting. *Master of Technology Management Plan II*. Bowling Green State University.

- KAUSHAL, V. (2019). COMPARISON OF ENVIRONMENTAL AND SOCIAL COSTS OF TRENCHLESS CURED-IN-PLACE PIPE RENEWAL METHOD WITH OPEN-CUT PIPELINE REPLACEMENT FOR SANITARY SEWERS. *Doctoral dissertation*. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON, 2019.
- Kaushal, V., & Najaf, M. (2020). Comparative Assessment of Environmental Impacts from Open-Cut Pipeline Replacement and Trenchless Cured-in-Place Pipe Renewal Method for Sanitary Sewers. *Infrastructures*.
- Kaushal, V., & Najafi, M. (2020). Comparative Analysis of Environmental and Social Costs of Trenchless Cured-in-Place Pipe Renewal Method with Open-Cut Pipeline Replacement for Sanitary Sewers. *Journal of Pipeline Systems*.
- Kaushal, V., Najafi, M., & Serajiantehrani, R. (2020). Environmental Impacts of Conventional Open-Cut Pipeline Installation and Trenchless Technology Methods: State-of-the-Art Review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.
- Krah. (2008). *Recomendaciones para el Manejo e Instalación en Zanja de Tuberías Krah*.
- Kyung, D., Kim, D., Yi, S., Choi, W., & Lee, W. (2017). Estimation of greenhouse gas emissions from sewer pipeline system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production*.
- Matthews, J., Allouche, E., & Sterling, R. (2015). Social cost impact assessment of pipeline infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*.
- Mínguez Santiago, F. (2015). Métodos de excavación sin zanjas. *Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Ministerio de Ambiente. (2010). Capítulo 6: Aducción y conducción. En M. d. Ambiente, *Guía Ambiental para sistemas de acueducto*.
- Ministerio para la Transición Ecológica. (s.f.). *GUÍA PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MEJORA DE UNA ORGANIZACIÓN*. España.
- Mohammadi, M. M., Najafi, M., Kermanshachi, S., Kaushal, V., & Serajiantehrani, R. (2020). Factors Influencing the Condition of Sewer Pipes: State-of-the-Art Review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.

- Najafi, M. (2005). *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*. McGraw-Hill Education.
- Navarro Torres, A. M., Mena Nieto, A., Bravo Aranda, G., & Hernandez, F. (2021). Huella de carbono de la legalización de actividades en el Ayuntamiento de Sevilla. *DYNA*, 134-139.
- Pace Municipal Maintenance. (2022). *Point Repairs*. Obtenido de <https://www.pacemt.com/services/point-repairs/>
- Perdomo 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. *Trabajo de grado para optar al título de: Magister en Ingeniería Civil*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Pipe Jacking Association. (2017). *An introduction to pipe jacking and microtunnelling*. Pipe Jacking Association.
- Pupo Gonzalez, C. A. (2014). Metodología para la selección de obras de ingeniería para la rehabilitación de redes. *Maestría en Ingeniería Civil*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.
- Sánchez, L. G. (2011). Tecnologías promisorias para renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de alcantarillado. *Tesis de Grado para optar por el Título de Magister en Ingeniería Civil*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental., Bogotá.
- SG Ingeniería en ductos S.A. ESP. (s.f.). *Reparación puntual UV*. Obtenido de Rehabilitación de redes sin zanja: <https://www.sgingeneriaenductos.com/index.php/servicios/rehabilitacion-de-redes-sin-zanja/reparacion-puntual-point-repair-uv>
- Soletanche Bachy Cimas. (s.f.). *Soluciones*. Obtenido de Soletanche Bachy Cimas: <https://soletanche-bachy.com.co/soluciones/>
- Statewide Urban Design and Specifications. (2013). *Design Manual*. Iowa State University.
- Statista. (2022). *Weekly European Union Emission Trading System (EU-ETS) carbon pricing in 2022*. Obtenido de Energy & Environment: <https://www.statista.com/markets/408/energy-environment/>
- Sterling, R., Alam, S., Allouche, E., Condit, W., Matthews, J., & Downey, D. (2016). Studying the life-cycle performance of gravity sewer rehabilitation Studying the life-cycle performance of gravity sewer rehabilitation. *Procedia Engineering*.

- Tabesh, A., Najafi, M., Kohankar Kouchesfehni, Z., Malek Mohammadi, M., & Ashoori, T. (2019). Risk Identification for Pipeline Installation By Horizontal Directional Drilling (HDD). *ASCE Pipeline Conference 2019*, (págs. 141-150). Nashville.
- Tang, P., Shen, Z., Olson, M., & Ariaratnam, S. (2015). Time Series Analysis of Hydraulic Data for Automated Productivity Monitoring of Pilot Tube Microtunneling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*.
- Valderrama, J., Espíndola, C., & Quezada, R. (2011). Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias. *Formación Universitaria Vol. 4(3)*, 3-12.
- Vladimirov, V., & Hölterhoff, J. (2012). Comparison of CO2 emissions from trenchless and open-cut installation methods. Installation of OD 3000 mm diameter pipes for Project Czajka, Warsaw (Poland) . *German Society of Trenchless Technology*.
- Yepes Piqueras, V. (23 de 06 de 2014). *Tablestacas*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/06/23/tablestacas/>
- Zilper Trenchless. (s.f.). *Assisted Dynamic Boring*. Obtenido de Zilper Trenchless: <https://zilpertrenchless.com/tecnologia-adb-2/>