	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>08-07-2021</b>	<b>B</b>
Dependencia	Aprobado	Pág.		
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>	<b>1(87)</b>		

### RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

<b>AUTORES</b>	Heider Cárdenas Areniz		
<b>FACULTAD</b>	Facultad de ingeniería		
<b>PLAN DE ESTUDIOS</b>	Especialización en Interventoría de Obras Civiles		
<b>DIRECTOR</b>	Esp. Jesús David Márquez Montejo		
<b>TÍTULO DE LA TESIS</b>	Análisis Técnico Y Económico Para El Seguimiento Y Control En Proyectos De Rehabilitación De Colectores De Alcantarillado Comparando Métodos No Convencionales Con Métodos Tradiciones De Excavación.		
<b>TITULO EN INGLES</b>	Technical and economic analysis for monitoring and control of sewer rehabilitation projects comparing non-conventional methods with traditional excavation methods.		
<b>RESUMEN</b> (70 palabras)			
El deterioro de los sistemas de infraestructura subterránea y la creciente demanda de servicios públicos han aumentado la necesidad de una instalación, inspección, reparación, rehabilitación y reemplazo más eficientes de los servicios públicos subterráneos. Teniendo en cuenta los factores sociales y ambientales, los métodos abiertos tienen impactos adversos en la comunidad, debido a la contaminación indeseable y las interrupciones del tráfico.			
<b>RESUMEN EN INGLES</b>			
The deterioration of subway infrastructure systems and the increasing demand for utilities have increased the need for more efficient installation, inspection, repair, rehabilitation and replacement of subway utilities. Considering social and environmental factors, open methods have adverse impacts on the community due to undesirable pollution and traffic disruptions.			
<b>PALABRAS CLAVES</b>	Colectores, Alcantarillado, Excavación, Económico, Técnico.		
<b>PALABRAS CLAVES EN INGLES</b>	Collectors, Sewer, Excavation, Economic, Technical.		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
<b>PÁGINAS:</b> 87	<b>PLANOS:</b>	<b>ILUSTRACIONES:</b>	<b>CD-ROM:</b>



**Análisis Técnico Y Económico Para El Seguimiento Y Control En Proyectos De  
Rehabilitación De Colectores De Alcantarillado Comparando Métodos No Convencionales  
Con Métodos Tradiciones De Excavación.**

**Heider Cárdenas Areniz**

**Facultad De Ingeniería, Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña**

**Especialización En Interventoría De Obras Civiles**

**Esp. Jesús David Márquez Montejo**

**07 octubre, 2022**

## Índice

Capítulo 1. Análisis técnico y económico para el seguimiento y control en proyectos de rehabilitación de colectores de alcantarillado comparando métodos no convencionales con métodos tradiciones de excavación.....	5
1.1 Planteamiento del problema .....	5
1.2 Formulación del problema.....	7
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 <i>Objetivo general.</i> .....	7
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	7
1.4 Justificación .....	8
1.5 Delimitaciones .....	12
1.5.1 <i>Delimitación Conceptual.</i> .....	12
1.5.2 <i>Delimitación Geográfica.</i> .....	12
1.5.3 <i>Delimitación Temporal.</i> .....	12
Capítulo 2. Marco Referencial.....	13
2.1 Marco histórico.....	13
2.2 Marco contextual .....	16
2.3 Marco conceptual .....	19
2.4 Marco teórico.....	21
Capítulo 3. Diseño Metodológico.....	29
3.1 Tipo de investigación.....	29
3.2 Población y muestra.....	29
3.2.1 <i>Población. Sistemas de colectores de alcantarillado.</i> .....	29
3.2.2 <i>Muestra. Métodos convencionales y no convencionales de rehabilitación de alcantarillados.</i> .....	30
3.3 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos	30
3.4 Análisis de la información.....	30
3.5 Cronograma .....	30
Capítulo 4. Resultados .....	31
4.1. Establecer los principios y fundamentos conceptuales referentes a los métodos convencionales de excavación y rehabilitación con zanjas.....	31
4.2. Analizar los métodos de excavación sin zanja para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado como el método pipe bursting mediante el análisis documental y estudios de caso.	42

4.2.1. <i>Sistemas neumáticos de explosión</i> .....	43
4.2.2. <i>Sistemas de explosión estáticos</i> .....	44
4.2.3. <i>División de tuberías</i> .....	45
4.2.4. <i>Escariado de Tuberías</i> .....	45
4.2.5. <i>Proceso por impacto</i> .....	46
4.2.6. <i>Material de tubería antigua</i> .....	47
4.2.7. <i>Nuevo material de tubería</i> .....	47
4.2.8. <i>Pertinencia del método pipe bursting</i> .....	48
4.2.9. <i>Consideraciones de diseño</i> .....	50
4.2.10. <i>Servicios públicos circundantes</i> .....	57
4.3. Comparar los métodos convencionales y no convencionales de rehabilitación de tuberías a partir de antecedentes y la evolución de las diferentes técnicas en Colombia. ....	59
4.3.1. <i>Excavación de zanja a cielo abierto</i> .....	59
4.3.2. <i>Técnica sin zanja y pipe bursting</i> .....	60
4.3.3. <i>Cuadro comparativo</i> .....	63
4.3.4. <i>Costos de la implementación</i> .....	65
4.3.5. <i>Impacto ambiental y sostenibilidad</i> .....	72
4.3.6. <i>Antecedentes en Colombia</i> .....	75
Conclusiones .....	78
Referencias.....	81

## Lista de Figuras

Figura 1. Proceso de pipe bursting.....	20
Figura 2. El proceso de Sliplining continuo.....	20
Figura 3. El proceso de curado in situ.....	21

# **Capítulo 1. Análisis técnico y económico para el seguimiento y control en proyectos de rehabilitación de colectores de alcantarillado comparando métodos no convencionales con métodos tradiciones de excavación.**

## **1.1 Planteamiento del problema**

El deterioro de los sistemas de infraestructura subterránea y la creciente demanda de servicios públicos han aumentado la necesidad de una instalación, inspección, reparación, rehabilitación y reemplazo más eficientes de los servicios públicos subterráneos. Teniendo en cuenta los factores sociales y ambientales, los métodos abiertos tienen impactos adversos en la comunidad, debido a la contaminación indeseable y las interrupciones del tráfico. Las tecnologías sin zanjas que se utilizan para reparar, actualizar, reemplazar o instalar sistemas de infraestructura subterránea con una interrupción mínima de la superficie ofrecen una alternativa viable a los métodos abiertos existentes (Pérez y Ramos, 2017).

El reemplazo de tuberías a cielo abierto es el método más común y tradicional de instalación o reemplazo de la infraestructura subterránea. Según el tipo de trabajo, este método también incluye excavar e instalar, excavar y reparar o excavar y reemplazar. Este método incluye abrir zanjas en el suelo para colocar una tubería nueva o reemplazar la tubería vieja existente por una nueva y luego restablecer la superficie. Este proceso incluye la selección de una nueva ruta, levantamiento de superficie y sub-suelo, planificación y análisis, excavación de zanjas, cimentación, colocación de una nueva tubería, empotramiento y relleno con compactación con suelo seleccionado y reinstalación de la superficie del suelo (Bajaña, 2016).

La construcción sin zanjas es un área emergente de construcción que involucra métodos, materiales y equipos innovadores utilizados para la instalación de infraestructura nueva y la rehabilitación o reemplazo de infraestructura subterránea existente con una necesidad mínima o nula de excavación a cielo abierto. Además, la tecnología sin zanjas ha sido descrita (pero no universalmente aceptada) como el conjunto de tecnologías y métodos que se pueden utilizar para reparar, actualizar, reemplazar o instalar sistemas de infraestructura subterránea con una mínima alteración de la superficie (Mínguez, 2015).

La rotura de tuberías o Pipe Bursting, es una tecnología sin zanjas que reemplaza una alcantarilla rompiendo y desplazando la tubería existente e instalando una tubería de reemplazo en el vacío creado. El sistema utiliza una unidad de ruptura neumática, hidráulica o estática para dividir y romper la tubería existente, comprimiendo los materiales en el suelo circundante a medida que avanza (Simicevic y Sterling, 2001).

La tecnología sin zanjas es una nueva alternativa para la instalación tradicional o el reemplazo de la infraestructura subterránea con una interrupción mínima en la superficie y el subsuelo. Las ventajas de estos métodos son menos zanjas, operaciones de construcción respetuosas con el medio ambiente, rentabilidad y un mejor nivel de seguridad y productividad en el proceso de construcción. (Duque, 2018)

Mediante esta monografía se aborda los principios y generalidades de entre el sistema sin zanja pipe bursting y el sistema convencional de excavación con zanja a cielo abierto, se explicarán algunos aspectos fundamentales en el diseño de cada método y consideraciones para

tener en cuenta en su diseño, manteniendo el enfoque del seguimiento y control sobre este tipo de obras.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Qué aspectos técnicos y económicos diferencian los métodos no convencionales de rehabilitación de tuberías de alcantarillados respecto a los métodos convencionales?

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general.***

Realizar un análisis técnico y económico del método pipe bursting empleado en la rehabilitación de sistemas de alcantarillado, a través de una revisión documental que permita la comparación con métodos tradicionales de rehabilitación.

### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

- Establecer los principios y fundamentos conceptuales referentes a los métodos convencionales de excavación y rehabilitación con zanjas.
- Analizar los métodos de excavación sin zanja para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado como el método pipe bursting mediante el análisis documental y estudios de caso.



- Comparar los métodos convencionales y no convencionales de rehabilitación de tuberías a partir de antecedentes y la evolución de las diferentes técnicas en Colombia.

#### **1.4 Justificación**

Para que el sistema de alcantarillado funcione en forma adecuada, es necesario realizar un mantenimiento regular y cuidar los daños y posibles fugas en las tuberías. Adicionalmente, el buen mantenimiento del sistema de alcantarillado es un requisito previo para la gestión racional de esta infraestructura urbana y para unas buenas condiciones sanitarias en el entorno social y una buena protección del medio ambiente (Sandoval et al, 2012).

Uno de los métodos tradicionales y más popular para la construcción, reparación o reemplazo de alcantarillas, consiste en la excavación por zanjas. Este método implica excavar y exponer la tubería existente para que pueda repararse o reemplazarse (Baquero y Matamoros, 2021), este método suele ser el menos costoso si la tubería está ubicada debajo de áreas no pavimentadas.

Los métodos tradicionales de rehabilitación o sustitución de tuberías subterráneas han incluido típicamente el uso de métodos de construcción a cielo abierto o de revestimiento. El método tradicional de reparación de tuberías subterráneas emplea métodos de excavación (que generalmente requiere revestimiento y apuntalamiento), extracción de tuberías, reemplazo de tuberías, relleno y luego restauración del sitio a su estado original (Woodroffe y Arianratham, 2008). La sustitución de la tubería mediante técnicas convencionales de corte y recubrimiento

puede tener efectos adversos en la vida y las actividades diarias de las personas y las empresas que rodean el proyecto de rehabilitación. Por lo general, los cierres de carreteras, los retrasos y redireccionamientos del tráfico, la pérdida de acceso a negocios y hogares, así como la contaminación acústica y visual no deseada son comunes en los proyectos de corte abierto. Y se suele incurrir en costos adicionales por la necesidad de restaurar las superficies terminadas existentes, incluidas las aceras y aceras, además de la jardinería (Mínguez, 2015).

En un intento por reducir el costo y las interrupciones asociadas con la excavación y el reemplazo, la industria de rehabilitación del sistema de alcantarillado sanitario ha desarrollado tecnologías “sin excavación” (sin zanjas) para la rehabilitación del sistema de recolección de alcantarillado sanitario. Durante los últimos treinta años, los ingenieros han desarrollado una amplia gama de tecnologías para rehabilitar tuberías de alcantarillado, pozos de inspección, estaciones de bombeo y otros elementos de los sistemas de alcantarillado sin necesidad de excavación (Mínguez, 2015). La mayoría de los países de América del Sur han utilizado métodos sin zanjas de una forma u otra desde principios de la década de 1990, pero de ninguna manera son el modo de construcción predominante. Entre los países que han utilizado métodos sin zanja se encuentran Brasil, Argentina y Venezuela y, en menor medida, Perú, Colombia, Chile, Uruguay y Ecuador. Brasil ha sido, con mucho, el país sudamericano más activo en utilizar este tipo de tecnologías (Chapman et al, 2020).

Mediante la implementación de los nuevos métodos se obtienen progresos importantes a la hora de desarrollar un proyecto de acueducto y alcantarillado, por tal motivo este trabajo de monografía analizara aspectos fundamentales como las ventajas y desventajas de la utilización de

cada uno de los métodos, los procesos constructivos y especificaciones técnicas empleadas, adicionalmente se aplicaran encuestas aplicadas, para así poder calcular la viabilidad de la utilización de cada uno de los métodos, generando bases para su implementación, siendo una herramienta para entidades y profesionales interesados en el tema.

La tecnología sin zanjas es una nueva alternativa para la instalación tradicional o el reemplazo de la infraestructura subterránea con una interrupción mínima en la superficie y el subsuelo. Las ventajas de estos métodos son menos zanjas, operaciones de construcción respetuosas con el medio ambiente, rentabilidad y un mejor nivel de seguridad y productividad en el proceso de construcción. (Duque, 2018)

Según Mínguez (2015), la rotura de la tubería tiene ventajas considerables sobre los reemplazos a cielo abierto; Es mucho más rápido, más eficiente y, a menudo, más económico que el corte a cielo abierto, especialmente en el reemplazo de líneas de alcantarillado debido a la profundidad de las líneas de alcantarillado. El aumento de la profundidad del alcantarillado requiere excavación, apuntalamiento y otras acciones, lo que aumenta sustancialmente el costo de reemplazo a cielo abierto. El aumento de profundidad tiene un efecto mínimo en el costo de rotura de la tubería. Además de la ventaja de costo directo de la rotura de la tubería sobre el corte a cielo abierto, la rotura de la tubería tiene muchos ahorros de costos indirectos, como menos cierres de caminos o carriles, menos tiempo de reemplazo, menos interrupciones del comercio y menos perturbaciones del tráfico que el método a cielo abierto.

Mínguez (2015) también afirma que el beneficio exclusivo de la rotura de tuberías sobre otras técnicas sin zanja; como CIPP, deslizamiento, etc., es la capacidad de aumentar el tamaño de las líneas de servicio de modo que un aumento del 41% duplique la capacidad de la línea de alcantarillado sin considerar el impacto de la superficie más lisa de la nueva tubería. La técnica de rotura de tuberías es más ventajosa en comparación con las otras técnicas sin zanja en términos de costo cuando hay pocas conexiones laterales para reconectar dentro de una sección de reemplazo, cuando la tubería vieja está estructuralmente deteriorada, cuando se necesita capacidad adicional. Otras ventajas incluyen:

- Cantidad mínima de excavación requerida.
- Puede reducir los costos de remoción y reemplazo de pavimento.
- Tubería sin juntas que reduce la infiltración de raíces y agua.
- Puede aumentar el diámetro de la tubería existente.

Es evidente que los métodos no convencionales para la rehabilitación y mantenimiento de tuberías son una alternativa que en el futuro cercano serán implementados ampliamente por la industria de la construcción. En este sentido, los interventores que son los llamados a velar por la calidad e integridad de las obras deben conocer estas nuevas alternativas, por consiguiente, se plantea esta investigación, en la cual, con apoyo de trabajos previos, normativa e información existente obtenida a partir de diferentes autores, se recopilara y analizara la información de mayor relevancia en el tema abordado.

## **1.5 Delimitaciones**

### ***Delimitación operativa.***

El proyecto se llevará a cabo principalmente en dos fases, la primera fase tendrá el objetivo de investigar y estudiar toda la bibliografía posible comprendida en tesis, artículos, papers y proyectos relacionados al tema en cuestión, a través de bases de datos que garanticen la autenticidad de la información y de diferentes autores suministrados por docentes que tengan amplio conocimiento sobre el tema. La segunda etapa consistirá en la comprensión, análisis y conclusiones, de acuerdo con las evidencias relacionados con la comparación entre de cada uno de los métodos de excavación empleados en la rehabilitación de colectores de sistemas de alcantarillado. De esta manera la metodología a emplear será de manera progresiva, donde el trabajo realizado en la primera etapa será la base para la realización de la segunda.

#### ***1.5.1 Delimitación Conceptual.***

Se emplearán conceptos relacionados con: Alcantarillados, Métodos de excavación, procesos constructivos de rehabilitación de tuberías, métodos no convencionales de rehabilitación, entre otros.

#### ***1.5.2 Delimitación Geográfica.***

El proyecto será desarrollado en la ciudad de Ocaña, con el apoyo de la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

#### ***1.5.3 Delimitación Temporal.***

El proyecto se desarrollará en 4 meses

## Capítulo 2. Marco Referencial

### 2.1 Marco histórico

La rehabilitación de los componentes de los sistemas de alcantarillado es esencial para garantizar el rendimiento general de los sistemas, así como el de los componentes individuales. Además, la vida útil de los componentes a menudo se puede extender mediante la acción oportuna para corregir los defectos o el deterioro resultante de varios factores. Las actividades de rehabilitación pueden estar impulsadas por la necesidad de mejorar el desempeño del sistema o de los componentes individuales en términos de: comportamiento estructural (por ejemplo, aumento de la capacidad estructural); comportamiento hidráulico (por ejemplo, reducción de la rugosidad o de la infiltración) y comportamiento ambiental (por ejemplo, reducción de la exfiltración de aguas residuales al suelo adyacente). La bibliografía existente sobre rehabilitación de sistemas de alcantarillado es extensa. En esta investigación se presenta una clasificación estructurada de las diferentes técnicas, que proporciona información sobre las principales características y el potencial de aplicación. La selección de la técnica a utilizar en cada caso específico depende de las condiciones locales y la orientación metodológica se basa en criterios específicos para apoyar la selección de las técnicas más adecuadas.

Los servicios públicos subterráneos en muchas ciudades existen desde hace más de 100 años. Si bien los sistemas existentes han funcionado mucho más allá de la vida útil razonablemente anticipada, los sistemas subterráneos están en su mayoría deteriorados y necesitan mantenimiento y reparación costosos. Los problemas comunes incluyen la corrosión y el deterioro de los materiales de las tuberías, fallas o fugas en las juntas de las tuberías y la

reducción del flujo debido a la acumulación de depósitos minerales y escombros dentro de la tubería.

Los daños a las tuberías existentes también pueden ocurrir por movimientos del suelo debido a la actividad de construcción adyacente, asentamientos irregulares u otra inestabilidad del suelo. Esto conduce a un aumento de la infiltración y el flujo de entrada en los sistemas de alcantarillado. En los sistemas de agua, conduce a reducciones de flujo y presión, fugas persistentes (hasta el 30 por ciento del agua provista en algunos sistemas), roturas de tuberías y mala calidad del agua.

Estos problemas tienden a aumentar con la antigüedad de la red, donde el mantenimiento de esta gran red de tuberías subterráneas de alcantarillado, agua y gas es difícil y costoso. Los problemas anteriores se ven agravados por los impactos negativos significativos (de proyectos de reparación o reemplazo a cielo abierto) en la vida diaria, el tráfico y el comercio del área servida por ya lo largo de la tubería en cuestión. La ruptura de tuberías es un método sin zanjas bien establecido que se usa ampliamente para reemplazar tuberías deterioradas con una tubería nueva del mismo diámetro o mayor.

La rotura de tuberías es una alternativa económica de reemplazo de tuberías que reduce las molestias para los negocios y los residentes en comparación con la técnica a cielo abierto. La rotura de tuberías es especialmente rentable si la tubería existente está fuera de capacidad, profunda y/o por debajo del nivel freático. Reemplazar una tubería vieja por una más grande se denomina aumento de tamaño. La ampliación de tamaño único consiste en reemplazar la tubería

vieja con una tubería de un tamaño estándar más grande, por ejemplo, reemplazar la tubería de 8" por una de 10". De manera similar, el aumento de tamaño de dos tamaños reemplaza la tubería vieja con una tubería de dos tamaños estándar más grande, sustitución de tubería de 8" por una de 12".

La rotura de tuberías convencionalmente implica la inserción de un cabezal de rotura en forma de cono en una tubería vieja. La base del cono es más grande que el diámetro interior de la tubería vieja y ligeramente más grande que el diámetro exterior de la tubería nueva para reducir la fricción y proporcionar espacio para maniobrar la tubería. El extremo posterior del cabezal de ruptura se conecta a la nueva tubería de polietileno (PE) y el extremo frontal se sujeta a un cable o varilla de tracción. La tubería nueva y el cabezal de ruptura se lanzan desde el eje de inserción y el cable o la varilla de tracción se jalan desde el eje de extracción. El cabezal de ruptura recibe energía para romper la tubería vieja de una de las siguientes fuentes: cable o varilla, una fuente hidráulica o un compresor de aire. La energía rompe la tubería vieja en pedazos y expande el diámetro de la cavidad. A medida que el cabezal de ruptura se extrae a través de los desechos de la tubería vieja, se crea una cavidad más grande a través de la cual se extrae simultáneamente la tubería nueva desde el eje de inserción.

La ruptura de tuberías fue desarrollada por primera vez en el Reino Unido a fines de la década de 1970 por D. J. Ryan & Sons en conjunto con British Gas, para reemplazar las tuberías de gas de hierro fundido de diámetro pequeño de 3 y 4 pulgadas. El proceso involucró un cabezal de explosión en forma de cono accionado neumáticamente operado por un proceso de impacto



alternativo. Este método fue patentado en el Reino Unido en 1981 y en los Estados Unidos en 1986; estas patentes vencieron en abril de 2005.

Cuando se introdujo por primera vez, este método se usaba solo para reemplazar las líneas de distribución de gas de hierro fundido; más tarde se empleó para reemplazar las líneas de agua y alcantarillado. En 1985, el proceso se desarrolló aún más para instalar tuberías de alcantarillado de polietileno de densidad media de hasta 16 pulgadas de diámetro exterior. Actualmente, la rotura de tuberías se usa para reemplazar las líneas de agua, las líneas de gas y las líneas de alcantarillado en todo el mundo.

## **2.2 Marco contextual**

Con base en los reportes e información encontrada a través de búsquedas en Internet, las tecnologías sin zanjas no han tenido una amplia difusión en países como Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay, Uruguay.

El mercado de la tecnología sin trincheras se ha recuperado en los últimos años a medida que la economía mundial ha comenzado a salir de su caída. A medida que las ciudades de todo el mundo buscan formas de mejorar mejor sus sistemas de infraestructura en deterioro y envejecimiento, más personas están recurriendo al uso de tecnologías sin zanjas como método (Lu et al, 2020).

Los sistemas de infraestructura en los países de América del Sur no son diferentes de los de los Estados Unidos y Europa, ya que tienen una gran necesidad de actualizar, reemplazar y reparar sus líneas de agua y alcantarillado. Sin embargo, el costo de estos emprendimientos masivos requiere dinero e inversión, algo que los gobiernos de estos países no tienen los recursos para hacer (Gou et al, 2021).

La mayoría de los países de América del Sur han utilizado métodos sin zanjas de una forma u otra desde principios de la década de 1990, pero de ninguna manera son el modo de construcción predominante. Entre los países que han utilizado métodos sin zanja se encuentran Brasil, Argentina y Venezuela y, en menos medida, Perú, Colombia, Chile, Uruguay y Ecuador. Brasil ha sido, con mucho, el país sudamericano más activo en utilizar este tipo de tecnologías (Chapman et al, 2020).

Al describir el estado de la infraestructura de América del Sur con respecto a los sistemas de agua y alcantarillado, los líderes de la industria no se andan con rodeos. Dicen que los sistemas son viejos, están deteriorados y están frenando a los países. Además de las malas condiciones de las líneas, los gobiernos también deben lidiar con las conexiones ilegales o interferencias en la línea. Algunas personas roban el agua de esta manera. Sin embargo, una vez que se repara o reemplaza la línea, eso generalmente pone fin a ese método de obtención de agua (Chapman et al, 2020).

Las tecnologías sin zanja se introdujeron por primera vez en América del Sur a principios de la década de 1990, siendo la perforación direccional horizontal y la perforación de microtúneles entre las primeras que se utilizaron. El uso parece cobrar impulso en la época del auge de las

telecomunicaciones a fines de la década de 1990; sin embargo, la mayoría de los países aún se alejan de la nueva tecnología a pesar de que se ha probado en los Estados Unidos y Europa (Vladeanu y Matthews, 2018).

Hoy en día, casi todos los métodos sin zanja se han empleado en América del Sur, pero en diferentes escalas y no en todos los países. Los proyectos que involucran tecnología sin zanjas se concentran principalmente en distribución de gas y red de gas. Brasil también ha tenido resultados positivos con proyectos sliplining y CIPP. El deslizamiento con tuberías de PRFV se ha utilizado en Bogotá, Colombia, para rehabilitar alcantarillas de ladrillos” (Lu, Matthews y Iseley, 2020).

Quizás una de las experiencias más exitosas con tecnologías sin zanja en Colombia se registra en relación con la construcción de un interceptor en Bogotá por el método Pipe Jacking: El cual fue construido mediante la modalidad llave en mano. La primera etapa del Interceptor del Río Bogotá, consistió en un túnel de 10 km en suelos blandos, esta fue la primera obra de esta clase construida en Colombia, con resultados asombrosos en mitigación ambiental y en tasas de progresión de avance (Pizón, 2011).

Seguendo el informe del Banco Mundial se establece que: “Para el trabajo futuro en este Tema, se ha abierto una nueva perspectiva, ya que es posible utilizar tecnologías de punta que permitan la construcción de estas redes por túneles de suelos blandos, disminuyendo la el impacto ambiental y los costos derivados de las interrupciones del tráfico y posibles daños a los edificios y las carreteras, producidos por las excavaciones del método tradicional, como la apertura de zanjas a cielo abierto (...)” (Pizón, 2011).

En Colombia, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), empresa de servicios públicos, ha implementado sistemas de inspección tecnificados, mínimamente invasivos y muy precisos para el monitoreo y catastro de redes. Sin embargo, aún es necesario abrir una zanja para acceder a la tubería cuando existe la necesidad de reparar grietas o rectificar desalineamientos o pérdidas de sección, entre otros (EAAB, 2001). En otras ciudades del país la aplicación de Trenchless Technologies ha sido solo marginal y no es posible encontrar registros en Internet o en la literatura técnica, pero se mantiene la opción de utilizar esas tecnologías (Pizón, 2011).

### **2.3 Marco conceptual**

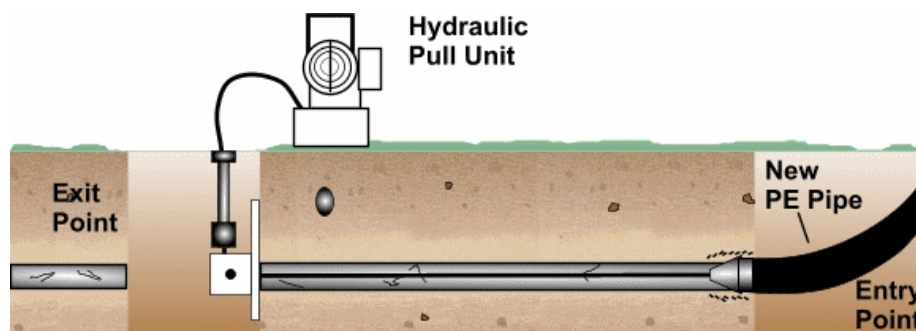
**Reemplazo de tubería a cielo abierto:** El reemplazo de tuberías a cielo abierto es el método más común y tradicional de instalación o reemplazo de la infraestructura subterránea. Según el tipo de trabajo, este método también incluye excavar e instalar, excavar y reparar o excavar y reemplazar. Este método incluye abrir zanjas en el suelo para colocar una tubería nueva o reemplazar la tubería vieja existente por una nueva y luego restablecer la superficie. Este proceso incluye la selección de una nueva ruta, levantamiento de superficie y sub-suelo, planificación y análisis, excavación de zanjas, cimentación, colocación de una nueva tubería, empotramiento y relleno con compactación con suelo seleccionado y reinstalación de la superficie del suelo (Bajaña, 2016).

**Pipe Bursting:** La rotura de tuberías o Pipe Bursting, es una tecnología sin zanjas que reemplaza una alcantarilla rompiendo y desplazando la tubería existente e instalando una tubería

de reemplazo en el vacío creado. El sistema utiliza una unidad de ruptura neumática, hidráulica o estática para dividir y romper la tubería existente, comprimiendo los materiales en el suelo circundante a medida que avanza (Simicevic y Sterling, 2001). La nueva tubería de reemplazo se tira o empuja simultáneamente con el cabezal de ruptura para llenar el vacío creado, como se indica en la figura 1.

**Figura 1.**

Proceso de pipe bursting.

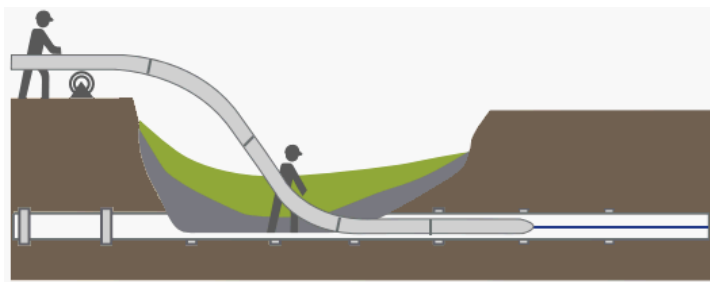


*Nota:* Simicevic y Sterling (2001).

**Sliplining:** El método Sliplining consiste en la inserción de revestimientos flexibles directamente en la alcantarilla. Se tiran o empujan tramos discretos de tubería continuos o articulados a través de la tubería existente, como se indica en la Figura 2. El deslizamiento crea una nueva tubería dentro de la alcantarilla vieja sin una excavación completa. La tubería deslizada se vuelve a conectar a la alcantarilla existente en ambos extremos (Rahamaninezhhas et al, 2020).

**Figura 2.**

*El proceso de Sliplining continuo.*

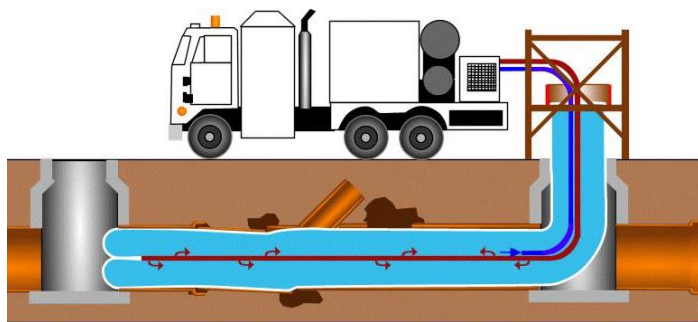


*Nota:* Rahamaninezhhas et al, (2020).

**Tubería Curada in Situ:** El proceso de tubería curada in situ (CIPP), la cual se aprecia en la figura 3, implica la instalación de un tubo flexible que ha sido impregnado con una resina termoendurecible en un tubo existente. Luego, la resina se cura para producir una tubería rígida dentro de la tubería principal. La combinación del material de la tela, con o sin fibras, y la resina puede diseñarse para producir una nueva tubería que tenga capacidades estructurales completas o capacidades semiestructurales (Jurado y Domínguez, 2019).

### Figura 3.

*El proceso de curado in situ.*



*Nota:* Jurado y Domínguez, (2019).

## 2.4 Marco teórico

El mantenimiento y la reparación generalmente se recomiendan para las alcantarillas cuya área de sección transversal se ha reducido debido a la deposición prolongada de lodo. El mantenimiento incluye el control metódico de las características del flujo de aguas residuales y la eliminación de obstrucciones. Las fugas locales se pueden reparar mediante reparaciones puntuales, la renovación tiene como objetivo eliminar los daños repetidos y las fugas de las líneas de alcantarillado completas. La sustitución suele administrarse cuando se producen daños graves y la renovación es imposible o muy costosa. La elección de una solución adecuada debe hacerse después de una cuidadosa consideración de la condición técnica de una línea de alcantarillado determinada, el tipo de material del que está hecha, la forma y el área de la sección transversal de la tubería, el lugar de trabajo y las condiciones del suelo circundante, el tipo del medio transportado, disponibilidad de tecnología específica y gastos necesarios.

La selección de la tecnología óptima es el último paso del proceso de toma de decisiones, que también debe incluir una descripción general de los métodos disponibles, los parámetros del alcantarillado y el entorno. Existen criterios y especificaciones documentados limitados para la evaluación del estado del alcantarillado y la elección de tecnologías de rehabilitación apropiadas. Cada uno de los países tiene sus propios estándares de rehabilitación de alcantarillado, pero solo hay suposiciones generales.

Los científicos están desarrollando diferentes modelos de optimización para que los ingenieros civiles encuentren una estrategia de renovación adecuada que consiste en un método de rehabilitación y un material de sustitución para cada falla en la tubería con un presupuesto

limitado. Se crean algoritmos especiales basados en datos como: antigüedad de las tuberías, material, localización (GIS), tipos de suelo y presupuesto.

#### ***2.4.1 Técnicas sin zanja versus excavación de zanjas a cielo abierto***

El desarrollo de la tecnología ha permitido la renovación de las redes de tuberías con el uso de técnicas sin zanja, lo que se traduce en una reducción del impacto ambiental. Los trabajos de rehabilitación deben estar precedidos por el análisis de aspectos económicos y técnicos, impacto social esperado, factores ecológicos y regulaciones legales.

El análisis económico debe considerar los costos de excavación, drenaje, ocupación de un carril de tránsito y restauración de la superficie de la carretera. El uso de la tecnología sin zanjas puede reducir estos costos incluso a la mitad. La infraestructura técnica urbana generalmente se encuentra debajo de la superficie de la carretera y el pavimento. En el caso de los métodos sin zanjas, los sitios de construcción no tienen que estar completamente separados del tráfico de automóviles y peatones, ya que en su mayoría están confinados a excavaciones puntuales.

La limitación de la excavación está asociada con una reducción en la cantidad de tierra que se extrae. El transporte de la tierra se realiza mediante camiones pesados que provocan ruido y vibraciones en la zona, destruyendo a menudo las superficies de las carreteras cercanas. Usando técnicas sin zanjas, se pueden evitar los atascos de tráfico paralizantes y la molestia del público. Las reparaciones de infraestructura son extremadamente onerosas para los residentes. La dificultad para moverse por la ciudad provoca el alargamiento del tiempo de viaje lo que es una



molestia y afecta tanto a automovilistas como a peatones y ciclistas. Con el uso de métodos sin zanjas para renovar la infraestructura subterránea, no es necesario construir puentes que crucen zanjas para vehículos y peatones.

Por otra parte, las protestas de los propietarios de comercios, restaurantes, hoteles y otros servicios ubicados en las inmediaciones de las trincheras, que suelen reclamar indemnizaciones por reducción de ingresos, son limitadas. El uso de métodos sin zanjas se justifica cuando se planea realizar la rehabilitación del alcantarillado a mayor profundidad en suelos difíciles o en el área donde las colisiones con los servicios subterráneos existentes son posibles. Los métodos sin zanjas también se recomiendan bajo vías férreas, cursos de agua, aeropuertos y edificios emblemáticos.

El uso de métodos de rehabilitación sin zanjas elimina el riesgo de ubicación incorrecta del alcantarillado en el suelo. El trabajo sin zanja requiere mucho menos tiempo que la excavación en zanja abierta, lo que ayuda a garantizar el cumplimiento de los plazos. Por otro lado, el trabajo de zanjas abiertas realizado en suelos difíciles puede causar problemas graves, como daños a las tuberías existentes, deterioro de la estabilidad de los edificios circundantes y daño a la vegetación urbana. Además, la erosión conduce a la contaminación de los recursos hídricos. La tecnología sin zanja reduce significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que podría ser la causa de problemas de salud. El método de excavación da como resultado la contaminación del suelo. La construcción a cielo abierto a menudo requiere la eliminación de árboles, lo cual es innecesario en la tecnología sin zanjas. Otra cosa es la contaminación acústica, que es producto nocivo de las construcciones de zanjas abiertas.

### ***2.4.2 Sistemas de reemplazo de tuberías sin zanjas y rotura de tuberías***

Las tuberías viejas existentes se pueden reemplazar por una de varias técnicas sin zanjas desarrolladas hasta la fecha. Existen tres métodos básicos para reventar tuberías: tracción neumática, hidráulica y estática. Además, existen sistemas patentados de reemplazo de tuberías sin zanjas que incorporan modificaciones significativas a la técnica básica de ruptura de tuberías. La diferencia básica entre estos sistemas está en la fuente de energía y el método de romper la tubería vieja y algunas diferencias de funcionamiento consecuentes que se describen brevemente en los siguientes párrafos. La selección de un método de reemplazo específico depende de las condiciones del suelo, las condiciones del agua subterránea, el grado de ampliación requerido, el tipo de tubería nueva, la construcción de la tubería existente, la profundidad de la tubería, la disponibilidad de contratistas experimentados, etc.

### ***2.4.3 Sistemas Neumáticos de Explosión***

El método de ruptura de tuberías más común es el sistema neumático. En el sistema neumático, la herramienta de ruptura es un martillo de desplazamiento del suelo accionado por aire comprimido y operado a una velocidad de 180 a 580 golpes por minuto. Es similar a una operación de hincado de pilotes en forma horizontal. La acción de percusión de la cabeza de martillo en forma de cono también es similar a clavar un clavo en la pared; cada martillo empuja el clavo una distancia corta. Con cada golpe, la herramienta de ruptura agrieta y rompe la tubería vieja, el expansor en la cabeza, combinado con la acción de percusión de la herramienta de

ruptura, empuja los fragmentos y los alrededores del suelo proporcionando espacio para tirar de la nueva tubería de PE. El expansor puede ser frontal (conectado al extremo frontal del martillo) para tuberías de menos de 12” o trasero (conectado a la parte trasera del martillo) para tuberías de más de 12”.

El expansor frontal permite retirar el martillo a través de la tubería de PE después de retirar el expansor de la boca de acceso existente en el eje de extracción sin dañar la boca de acceso. La tensión aplicada al cable mantiene la cabeza de ruptura alineada con la tubería vieja, mantiene la herramienta de ruptura presionada contra la pared de la tubería existente y tira de la nueva tubería de PE detrás de la cabeza. Se inserta una manguera de suministro de presión de aire a través de la tubería de PE y se conecta a la herramienta de ruptura. El estallido comienza una vez que (1) la cabeza está unida a la tubería nueva, (2) el cable del cabrestante se inserta a través de la tubería vieja y se une a la cabeza, (3) el compresor de aire y el cabrestante están ajustados a una presión constante y valores de tensión. El proceso continúa con poca intervención del operador hasta que el cabezal llega al eje de tracción, momento en el que se separa de la tubería de PE.

#### ***2.4.4 Sistemas de explosión estática***

El segundo método común de ruptura de tuberías es el sistema de tracción estática. En el sistema de tracción estático, se aplica una fuerza de tracción mayor al cabezal de expansión en forma de cono a través de un conjunto de varilla de tracción o un cable insertado a través de la tubería existente. El cono transfiere la fuerza de tracción horizontal a una fuerza radial,

rompiendo la tubería vieja y expandiendo la cavidad proporcionando espacio para la tubería de PE. Las varillas de acero, cada una de aproximadamente cuatro pies de largo, se insertan en la tubería vieja. del eje de tracción. Las varillas están conectadas entre sí mediante diferentes tipos de conexiones. Cuando las varillas alcanzan el eje de inserción, el cabezal de ruptura se conecta a las varillas y el tubo de PE se conecta a la parte trasera del cabezal. Una unidad hidráulica en el eje de tracción tira de las varillas una varilla a la vez y se retiran las secciones de la varilla. El proceso continúa hasta que el cabezal de ruptura llega al eje de tracción, donde se separa de la tubería de PE. Si se utiliza cable en lugar de varilla, el proceso de tracción continúa con una interrupción mínima, pero la fuerza de tracción de un cable en comparación con una sección de varilla es limitada.

#### ***2.4.5 Escariado de tuberías***

El escariado de tuberías es una técnica de reemplazo de tuberías que utiliza una máquina de perforación direccional horizontal (HDD) con modificaciones menores. Después de empujar las barras de perforación a través de la tubería vieja y conectar las barras a un escariador especial la nueva sarta de tubería de PE se conecta al escariador a través de un cabezal giratorio y de remolque. A medida que el equipo de perforación gira y retrocede simultáneamente, la tubería vieja se muele y se reemplaza por la tubería de PE nueva. La eliminación de la tubería vieja se logra mezclando el material triturado con el fluido de perforación y transfiriéndolo a un punto de salida para su eliminación mediante un camión aspirador.

Los contratistas de perforación direccional o contratistas de servicios públicos que usan un equipo HDD pueden agregar escariadores modificados de bajo costo de varios tipos para diferentes materiales de tubería y condiciones del suelo. El escariado de tuberías se limita al reemplazo de tuberías no metálicas. Según Nowak (Hayward 2002), las condiciones ambientales circundantes (aguas subterráneas, arena, roca, revestimiento de hormigón, etc.) que prohíben otros procedimientos no son obstáculos para una instalación exitosa.

## Capítulo 3. Diseño Metodológico

### 3.1 Tipo de investigación

La metodología usada para el desarrollo de la monografía se llevará a cabo principalmente en dos fases, la primera fase tendrá el objetivo de investigar y estudiar toda la bibliografía posible comprendida en tesis, artículos, papers y proyectos relacionados al tema en cuestión, a través de bases de datos que garanticen la autenticidad de la información y de diferentes autores suministrados por docentes que tengan amplio conocimiento sobre el tema. La segunda etapa consistirá en la comprensión, análisis y conclusiones, de acuerdo con las evidencias relacionados con la comparación entre de cada uno de los métodos de excavación empleados en la rehabilitación de colectores de sistemas de alcantarillado. De esta manera la metodología a emplear será de manera progresiva, donde el trabajo realizado en la primera etapa será la base para la realización de la segunda.

El desarrollo de este documento apunta al desarrollo de un objetivo general que consiste en Desarrollo de una guía para el seguimiento y control técnico en proyectos de rehabilitación de colectores de alcantarillado comparando métodos no convencionales con métodos tradiciones de excavación.

### 3.2 Población y muestra

#### 3.2.1 *Población.* Sistemas de colectores de alcantarillado.

**3.2.2 Muestra.** Métodos convencionales y no convencionales de rehabilitación de alcantarillados.

### 3.3 Diseño de instrumentos de recolección de la información y técnicas de análisis de datos

Las técnicas de recolección de información empleadas para desarrollar la investigación corresponden a:

- Búsqueda y recopilación de documentación e investigaciones relacionadas

### 3.4 Análisis de la información

Para el análisis de la información se plantea el uso de herramientas y métodos de análisis documentales y revisión bibliométrica.

### 3.5 Cronograma

Para el desarrollo de las etapas y a su vez de cada capítulo se seguirá el siguiente cronograma:

Capítulos \ Tiempo	Mes 1				Mes 2				Mes 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Capítulo 1.												
Capítulo 2.												
Capítulo 3.												
Capítulo 4.												
Revisión final y entrega												

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1. Establecer los principios y fundamentos conceptuales referentes a los métodos convencionales de excavación y rehabilitación con zanjas.

El sistema de alcantarillado es indispensable en todas las ciudades y es muy importante que funcione correctamente. Para que el sistema de alcantarillado funcione en forma adecuada, es necesario realizar un mantenimiento regular y cuidar los daños y posibles fugas en las tuberías. El buen mantenimiento del sistema de alcantarillado es un requisito previo para la gestión racional de esta infraestructura urbana y para unas buenas condiciones sanitarias en el entorno social y una buena protección del medio ambiente (Sandoval et al, 2012).

#### *4.1.1. Método de reemplazo de tubería a cielo abierto*

El reemplazo de tuberías a cielo abierto es el método más común y tradicional de instalación o reemplazo de la infraestructura subterránea. Según el tipo de trabajo, este método también incluye excavar e instalar, excavar y reparar o excavar y reemplazar. Este método incluye abrir zanjas en el suelo para colocar una tubería nueva o reemplazar la tubería vieja existente por una nueva y luego restablecer la superficie. Este proceso incluye la selección de una nueva ruta, levantamiento de superficie y sub-suelo, planificación y análisis, excavación de zanjas, cimentación, colocación de una nueva tubería, empotramiento y relleno con compactación con suelo seleccionado y reinstalación de la superficie del suelo (Bajaña, 2016).



Los principales elementos relacionados con el reemplazo de tuberías a cielo abierto se describen a continuación:

**4.1.1.1. Materiales de la tubería.** Según Duque (2013), un tipo de tubería en particular se puede considerar una tubería rígida o flexible. En ocasiones, se ha hecho referencia a las tuberías como semirrígidas o muy flexibles, pero en el caso de la tubería de reemplazo a cielo abierto se trata como tubería rígida o flexible. La resistencia es la capacidad de una tubería rígida para resistir la tensión que se crea en la pared de la tubería debido a la presión interna, el relleno, la carga viva y la flexión longitudinal, mientras que la rigidez es la capacidad de una tubería flexible para resistir la deflexión.

Los tubos rígidos son adecuados para cortes abiertos, como tubos de arcilla, tubos de concreto armado, tubos de concreto no reforzado y tubos cilíndricos de concreto pretensado. Las tuberías rígidas están diseñadas para transmitir la carga sobre la tubería a través de las paredes de la tubería hasta el suelo de cimentación debajo. La carga en la tubería enterrada se crea por la tierra de relleno colocada en la parte superior de la tubería y por cualquier sobrecarga y / o carga viva en la superficie de relleno sobre la tubería (Duque, 2013).

Las tuberías flexibles están diseñadas para transmitir parte de la carga de la tubería al suelo a los lados de la tubería, esta carga es creada por el suelo de relleno. Algunos tipos de tubería flexible son tuberías de acero, tubería de hierro dúctil, tubería de metal corrugado, tubería de fibra de vidrio, tubería de

cloruro de polivinilo (PVC), tubería de polietileno de alta densidad (HDPE), tubería de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Normalmente, a menos que el tipo de suelo limite el diseño, la tubería flexible se puede utilizar en el método a cielo abierto (Duque, 2013).

**4.1.1.2. Excavación de zanjas.** El primer paso físico en el método a cielo abierto es hacer una zanja en el suelo para iniciar la operación, ya sea instalando una nueva tubería subterránea o reemplazando la existente. Basado en Torbaghan et. al, (2020) el ancho de la zanja normalmente depende del diámetro exterior de la tubería, los métodos de construcción y los requisitos de inspección. Hay algunos supuestos de diseño como cierto ancho de zanja en la parte superior o inferior con respecto a la especificación del proyecto.

**4.1.1.3. Muro de trinchera** Según Torbaghan et. al, (2020), los soportes de los muros de la zanja, como láminas, arriostramientos, apuntalamientos o escudos de zanja, deben usarse en condiciones que incluyen:

- Donde lo requieran las regulaciones de seguridad.
- Donde los muros de zanja inclinados no son adecuados para proteger al personal de la zanja de deslizamientos, derrumbes, desprendimientos u otras condiciones inestables del suelo.
- Donde sea necesario para prevenir daños estructurales a edificios, caminos, servicios públicos, vegetación o cualquier otra cosa que no pueda ser removida.

- Cuando sea necesario para evitar interrupciones en las empresas, proporcionar acceso al tráfico, etc.
- Donde sea necesario para permanecer dentro de la servidumbre de la construcción del derecho de paso

Básicamente, hay dos tipos principales de muros de zanja, verticales e inclinados, de modo que cada uno incluye características específicas de parámetros de costo y está relacionado con el tipo de material de la tubería, el suelo y las condiciones del proyecto.

**4.1.1.4. *Lecho y tendido.*** El lecho es el material que se coloca en la parte inferior de la zanja para proporcionar un soporte uniforme a lo ancho de la tubería. Un soporte constante es esencial para sostener la tubería longitudinalmente, además de distribuir la carga en la parte inferior de la tubería. El lecho se coloca de manera que la tubería esté en la elevación y pendiente adecuadas cuando se coloque el tubo sobre el lecho. El grosor del lecho también varía según el tipo y tamaño de la tubería (Torbaghan et. al, 2020).

**4.1.1.5. *Incrustación.*** El empotramiento es el material que se coloca alrededor de la tubería para que actúe junto con la tubería como una estructura tubería-suelo para soportar las cargas externas en la tubería. Cada sistema de tubería-suelo ha sido seleccionado o diseñado para las condiciones específicas de la tubería, el empotramiento está diseñado para servir diferentes funciones para tubería rígida o flexible. El empotramiento para tubería rígida toma la carga en la parte

superior de la tubería, como muerta, viva o el peso de la tubería y distribuye la carga al suelo en la parte inferior de la tubería. En la tubería flexible, el empotramiento da la resistencia a la desviación de la tubería (Torbaghan et al, 2020).

**4.1.1.6. *Relleno y compactación.*** El relleno es el material colocado sobre el suelo y la tubería de empotramiento que, dependiendo de la altura del empotramiento, el relleno puede o no estar en contacto con la tubería. Por lo general, el material excavado de la zanja se utiliza como relleno, con algunas excepciones, como la extracción de grandes partículas de roca. Cuando se utiliza un material de relleno que se asentará en exceso, como materiales orgánicos o una gran masa de suelo suelta, la superficie del suelo debe montarse sobre la zanja, o deben tomarse otras medidas para evitar una depresión sobre la tubería (Torbaghan et al, 2020).

**4.1.1.7. *Aspectos adicionales***La excavación de zanjas abiertas es un método tradicional de construcción de alcantarillado y el método más común para reemplazar una tubería de alcantarillado, especialmente si la tubería original necesita ser ampliada (Molano et al, 2016). El trabajo incluye los siguientes pasos:

- Corte el pavimento y excave una zanja para instalar la tubería de alcantarillado principal.

- Corte el pavimento con sierra y excave zanjas desde la línea principal hasta la acera para instalar laterales de servicio de alcantarillado que conectan las propiedades con el alcantarillado público.
- Instale nuevas tuberías de alcantarillado y laterales.
- Cubra las zanjas abiertas con placas de acero al final de cada día según sea necesario mientras el trabajo está en progreso.
- Rellene las zanjas con arena o grava y aplique parches de asfalto temporales.
- Realizar inspecciones de control de calidad.
- Restauración permanente completa del pavimento de las zanjas parcheadas después de que el trabajo pasa las inspecciones.
- Repare cualquier panel de acera y acera dañado durante la construcción.
- Restaure cualquier vegetación alterada durante la construcción con tierra vegetal y semillas de césped.

Además de las principales actividades de construcción de alcantarillado, las siguientes actividades pueden requerir el uso de excavación de zanja abierta (Molano et al, 2016):

1. Instalaciones de limpieza de alcantarillado
  2. Reparaciones puntuales
  3. Reparación y reemplazo lateral del servicio de alcantarillado
- **Instalaciones de limpieza de alcantarillado**

Una limpieza de alcantarillado es una abertura tapada sobre el lateral del servicio de alcantarillado que conecta una propiedad o un edificio al alcantarillado público principal. Proporciona acceso para mantenimiento futuro para permitir que las cuadrillas limpien y repare esa conexión. Las limpiezas también pueden usarse para mantener el servicio de alcantarillado durante un proceso de revestimiento de tubería principal o para proporcionar ventilación durante ese proceso (Rodríguez y Herrera, 2015).

Las limpiezas se instalan típicamente cerca de la acera, pero también se pueden colocar en la franja de plantación entre la acera y la acera, en la acera cerca de una propiedad o edificio, o en una propiedad privada sobre el lateral del alcantarillado.

La instalación de limpieza de alcantarillado requiere cavar un agujero de diámetro pequeño donde se ubicará la limpieza. Los equipos excavan hasta el lateral de servicio, cortan en el lateral de servicio, conectan una tubería vertical a la superficie y agregan una tapa a nivel del suelo. Cada instalación de limpieza tarda hasta dos días en completarse (Rodríguez y Herrera, 2015).

- **Reparaciones puntuales**

Una reparación puntual es el reemplazo de una sección corta de tubería, no la longitud completa de la tubería desde la boca de inspección hasta la boca de inspección. Una reparación local requiere cavar una pequeña zanja para que las cuadrillas puedan reemplazar la sección corta de tubería rota. Los equipos cavarán una zanja, quitarán la sección de tubería rota, instalarán una

sección de tubería nueva, rellenarán la zanja, aplicarán un parche de pavimento temporal y luego volverán a pavimentar el área parcheada después de que el trabajo pase las inspecciones (Chumpitaz, 2015).

Pueden ser necesarias reparaciones puntuales para reemplazar pequeñas secciones de tubería de alcantarillado rota donde no es necesario reparar o reemplazar toda la tubería. También se puede usar para preparar la longitud total de una tubería principal para reemplazarla con métodos de construcción sin zanja, como el revestimiento de tubería curado en el lugar o el estallido de tubería. Para tener éxito, los métodos sin zanja requieren una tubería intacta. Reemplazar pequeñas porciones de tubería de alcantarillado deteriorada o colapsada permite instalar un revestimiento o tubería de alcantarillado nueva sin complicaciones. Es común que se realicen reparaciones puntuales unas semanas antes de las reparaciones de la tubería principal (Chumpitaz, 2015).

- **Reparación y reemplazo del lateral del servicio de alcantarillado**

Un lateral de servicio de alcantarillado es una tubería que proporciona una conexión de alcantarillado público para una casa, negocio o propiedad no desarrollada. Va desde la línea principal de alcantarillado público en la calle hasta la acera y se conecta a la línea de alcantarillado privado de la propiedad, o tiene un límite en la línea de la propiedad para uso futuro, por ejemplo, desarrollo futuro o resolución de una conexión de alcantarillado no conforme (Chumpitaz, 2015).

Un lateral de servicio de alcantarillado se puede reemplazar utilizando el método de excavación de zanja abierta o un método sin zanja, como revestimiento de tubería curado en el lugar o rotura de tubería.

#### ***4.1.2. Consideraciones de diseño***

**4.1.2.1. Cargas.** Al realizar el diseño, se debe tener en cuenta la carga impuesta en la zanja abierta, idealmente, la ruta de la zanja debe mantenerse alejada del tráfico. Sin embargo, si esto no se puede evitar, la carga de tráfico debe tenerse en cuenta en el diseño del soporte temporal. El soporte de la zanja también debe diseñarse adecuadamente para soportar la carga adicional de cualquier desperdicio excavado u otros materiales de construcción colocados a lo largo de los lados de la zanja (Duque, 2013).

Una zanja ubicada al pie de una pendiente puede reducir en gran medida la estabilidad de la pendiente hasta el punto de que pueda fallar catastróficamente, y debe evitarse siempre que sea posible. Si es inevitable, es importante que el soporte de la zanja esté diseñado para resistir la fuerza para garantizar que la estabilidad de la pendiente no se vea afectada negativamente por el trabajo de la zanja. También puede ser necesario un análisis de estabilidad de la pendiente afectada (Duque, 2013).

En los casos anteriores, se debe considerar el empleo de un ingeniero calificado profesionalmente para llevar a cabo el diseño del sistema de soporte temporal, incluso si las zanjas tienen menos de 4.5 m de profundidad.



**4.1.2.2. Drenaje.** Se deben proporcionar medidas de drenaje para evitar la entrada de escorrentía superficial independientemente de la profundidad de la excavación. Estas medidas son particularmente importantes para asegurar la estabilidad de cualquier talud natural o artificial ubicado debajo y en las cercanías de los trabajos de excavación de la zanja y cuando la zanja está abierta durante cualquier parte de la temporada de lluvias. La posible condición de inundación en el área, especialmente en los puntos de depresión de las carreteras, debe estimarse y considerarse en el diseño del drenaje (Duque, 2013).

Las medidas de drenaje tienen por objeto minimizar la escorrentía de agua desde la superficie hacia la zanja abierta y controlar la infiltración del agua de lluvia recolectada y la escorrentía desde la zanja abierta hacia el talud; Es probable que ambos escenarios tengan algunos efectos adversos sobre la estabilidad del talud.

Para hacer frente a la escorrentía superficial, son eficaces los soportes colocados a ambos lados de la zanja. Los montantes normalmente están hechos de bloques de concreto, o sacos de arena o terraplenes de relleno de tierra compactados cementados entre sí. El diseñador / contratista debe determinar la altura requerida del montante en función de las condiciones del lugar, pero en ningún caso la altura debe ser inferior a 100 mm (Duque, 2013).

**4.1.2.3. Control de aguas subterráneas.** Cuando se encuentra un nivel freático elevado, el agua puede controlarse mediante la deshidratación. La

deshidratación puede provocar la disminución del agua subterránea en el área alrededor de la excavación, lo que resultará en un aumento de la tensión efectiva del suelo y, por lo tanto, el asentamiento del suelo.

En los casos en que exista una preocupación sobre los efectos adversos del asentamiento del suelo cerca de la excavación adyacente a estructuras sensibles, como edificios antiguos sobre cimientos poco profundos, tuberías de gas y agua, carreteras con mucho tráfico, etc., se requiere una evaluación de los posibles efectos adversos de la deshidratación. La evaluación debe ser realizada por un ingeniero profesionalmente calificado, y él debe diseñar las medidas de precaución apropiadas y el monitoreo para garantizar la seguridad de las estructuras sensibles adyacentes (Duque, 2013).

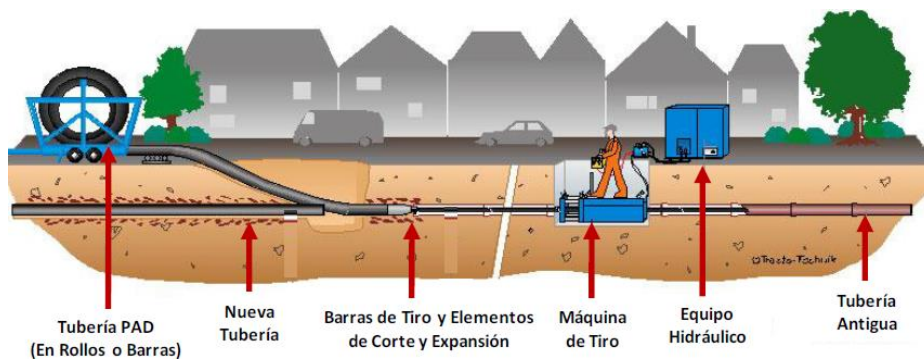
**4.1.2.4. Características de taludes artificiales.** Cuando las características de taludes existentes creadas por el hombre, como taludes cortados, taludes de relleno o muros de contención de mampostería, etc. Estén situados en las proximidades de la zanja planificada, la condición de estabilidad de las características de la pendiente debe examinarse y tenerse en cuenta en el diseño. Si se sospecha que alguna característica de la pendiente es marginalmente estable y particularmente vulnerable al movimiento del suelo, se deben tomar medidas de precaución para apoyar la característica de la pendiente (Duque, 2013).

**4.2. Analizar los métodos de excavación sin zanja para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado como el método pipe bursting mediante el análisis documental y estudios de caso.**

Los remplazos de tuberías se pueden reemplazar por una de varias técnicas sin zanjas desarrolladas hasta la fecha. Existen tres métodos básicos de Pipe bursting o reventar tuberías: tracción neumática, hidráulica y estática. Además, existen sistemas patentados de reemplazo de tuberías sin zanjas que incorporan modificaciones significativas a la técnica básica de ruptura de tuberías. La diferencia básica entre estos sistemas está en la fuente de energía y el método de romper la tubería vieja y algunas diferencias en la operación que se describen brevemente ente capítulo. La selección de un método de reemplazo específico depende de las condiciones del suelo, las condiciones del agua subterránea, el grado de ampliación requerido, el tipo de tubería nueva, la construcción de la tubería existente, la profundidad de la tubería, la disponibilidad de contratistas experimentados, etc.

**Figura 4.**

*Instalacion tubería Pipe Bursting.*



*Nota:* Sanchez, 2011.

#### ***4.2.1. Sistemas neumáticos de explosión***

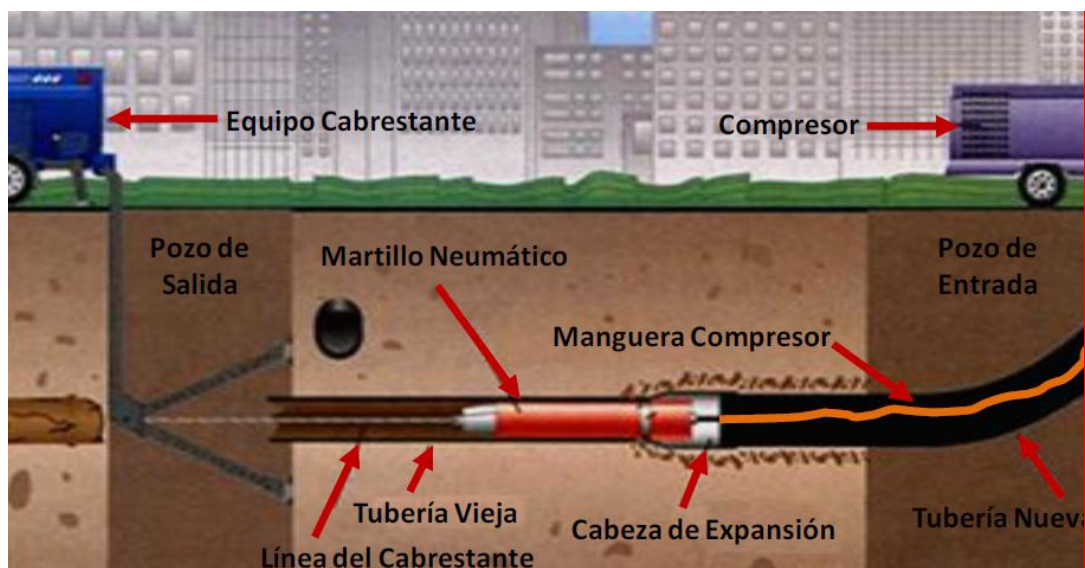
El método de ruptura de tuberías más común es el sistema neumático. En el sistema neumático, la herramienta de ruptura es un martillo de desplazamiento del suelo accionado por aire comprimido y operado a una velocidad de 180 a 580 golpes por minuto. Es similar a una operación de hincado de pilotes en forma horizontal. La acción de percusión de la cabeza de martillo en forma de cono también es similar a clavar un clavo en la pared; cada martillo empuja el clavo una distancia corta, como se muestra en la Figura 2. Con cada golpe, la herramienta de ruptura agrieta y rompe la tubería vieja, el expansor en la cabeza, combinado con la acción de percusión de la herramienta de ruptura, empuja los fragmentos y los alrededores. suelo proporcionando espacio para tirar de la nueva tubería de PE. El expansor puede ser frontal (conectado al extremo frontal del martillo) para tuberías de menos de 12” o trasero (conectado a la parte trasera del martillo) para tuberías de más de 12”. El expansor frontal permite retirar el martillo a través de la tubería de PE después de retirar el expansor de la boca de acceso existente en el eje de extracción sin dañar la boca de acceso.

La tensión aplicada al cable mantiene la cabeza de ruptura alineada con la tubería vieja, mantiene la herramienta de ruptura presionada contra la pared de la tubería existente y tira de la nueva tubería de PE detrás de la cabeza. Se inserta una manguera de suministro de presión de aire a través de la tubería de PE y se conecta a la herramienta de ruptura. El estallido comienza una vez que la cabeza está unida a la tubería nueva, el cable del cabrestante se inserta a través de la tubería vieja y se une a la cabeza, el compresor de aire y el cabrestante están ajustados a una

presión constante y valores de tensión. El proceso continúa con poca intervención del operador hasta que el cabezal llega al eje de tracción, momento en el que se separa de la tubería de PE.

### Figura 5.

*Pipe bursting neumático.*



Nota: (Sánchez, 2011).

#### 4.2.2. *Sistemas de explosión estáticos*

El segundo método común de ruptura de tuberías es el sistema de tracción estática. En el sistema de tracción estático, se aplica una fuerza de tracción mayor al cabezal de expansión en forma de cono a través de un conjunto de varilla de tracción o un cable insertado a través de la tubería existente. El cono transfiere la fuerza de tracción horizontal a una fuerza radial, lo que rompe la tubería vieja y expande la cavidad proporcionando espacio para la tubería de PE. Las varillas de acero, cada una de aproximadamente cuatro pies de largo, se insertan en la tubería vieja. del eje de tracción. Las varillas están conectadas entre sí mediante diferentes tipos de

conexiones. Cuando las varillas alcanzan el eje de inserción, el cabezal de ruptura se conecta a las varillas y el tubo de PE se conecta a la parte trasera del cabezal. Una unidad hidráulica en el eje de tracción tira de las varillas una varilla a la vez y se retiran las secciones de la varilla. El proceso continúa hasta que el cabezal de ruptura llega al eje de tracción, donde se separa de la tubería de PE. Si se utiliza cable en lugar de varilla, el proceso de tracción continúa con una interrupción mínima, pero la fuerza de tracción de un cable en comparación con una sección de varilla es limitada.

#### ***4.2.3. División de tuberías***

La Sociedad Norteamericana de Tecnología sin Zanjas (NASTT) define la división de tuberías como un método de reemplazo para romper una tubería existente mediante un corte longitudinal. Al mismo tiempo, se puede introducir una tubería nueva del mismo diámetro o mayor detrás de la herramienta de división (NASTT 2008). La división de tuberías se utiliza para reemplazar las tuberías de material dúctil, que no se fracturan utilizando las técnicas de estallido mencionadas anteriormente. El sistema tiene una rueda divisoria o cuchillos de corte que cortan la tubería longitudinalmente en dos líneas más a lo largo del costado de la tubería.

#### ***4.2.4. Escariado de Tuberías***

El escariado de tuberías es una técnica de reemplazo de tuberías que utiliza una máquina de perforación direccional horizontal (HDD) con modificaciones menores. Después de empujar las barras de perforación a través de la tubería vieja y conectar las barras a un escariador

especial, la nueva sarta de tubería de PE se conecta al escariador a través de un cabezal giratorio y de remolque. A medida que el equipo de perforación gira y retrocede simultáneamente, la tubería vieja se muele y se reemplaza por la tubería de PE nueva. La eliminación de la tubería vieja se logra mezclando el material triturado con el fluido de perforación y transfiriéndolo a un punto de salida para su eliminación mediante un camión aspirador. Los contratistas de perforación direccional o contratistas de servicios públicos que usan un equipo HDD pueden agregar escariadores modificados de bajo costo de varios tipos para diferentes materiales de tubería y condiciones del suelo. El escariado de tuberías se limita al reemplazo de tuberías no metálicas. Según Nowak (Hayward 2002), las condiciones ambientales circundantes (aguas subterráneas, arena, roca, revestimiento de hormigón, etc.) que prohíben otros procedimientos no son obstáculos para una instalación exitosa.

#### ***4.2.5. Proceso por impacto***

El proceso por impacto patentado es otro sistema que combina el HDD con la ruptura de tuberías, como se muestra en la Figura 6. El cabezal de ruptura (Impactor) recibe aire a través de los vástagos del HDD. El disco duro se conecta al suministro de aire y se coloca para perforar una boca de inspección de entrada. Luego, el vástago HDD se empuja a través de la tubería vieja hasta la siguiente boca de inspección y se perfora de nuevo hasta la boca de entrada. El dispositivo Impactor, después de acoplarlo a la columna de perforación ya la tubería de reemplazo se introduce en la tubería vieja. Mientras tira hacia atrás, el sistema Impactor se activa y revienta la tubería vieja. Las acciones combinadas, de tirar con el equipo HDD y martillar el

dispositivo Impactor, rompen la tubería vieja y la reemplazan con la tubería nueva. El sistema Impactor puede reducir la excavación y superar tuberías obstruidas

#### ***4.2.6. Material de tubería antigua***

En la mayoría de las aplicaciones de ruptura, la tubería vieja está hecha de un material rígido, como tubería de arcilla vitrificada (VCP), hierro dúctil, hierro fundido, concreto simple, asbesto o algunos plásticos. La tubería de concreto reforzado (RCP) se reemplazó con éxito cuando no estaba muy reforzada o si estaba sustancialmente deteriorada. El diámetro de la tubería vieja generalmente varía de 2 pulgadas a 30 pulgadas, aunque el estallido de diámetros más grandes está aumentando. Una longitud de 300 a 400 pies es una longitud típica para reventar; sin embargo, se completaron carreras mucho más largas con sistemas de explosión que son más potentes. Además, algunas reparaciones puntuales en la tubería vieja, especialmente las reparaciones realizadas con materiales dúctiles, pueden dificultar el proceso.

#### ***4.2.7. Nuevo material de tubería***

El polietileno de alta y media densidad (HDPE y MDPE) ha sido el reemplazo de tuberías más utilizado para aplicaciones de ruptura de tuberías. Las principales ventajas de la tubería de PE son su continuidad, flexibilidad y versatilidad. La continuidad, que se obtiene fusionando a tope segmentos largos en el campo, reduce la posibilidad de detener el proceso. La flexibilidad permite doblar la tubería para insertarla en ángulo en el campo. Además, es un material versátil que cumple con todos los demás requisitos para líneas de gas, agua y aguas residuales. La



superficie interior más suave (en relación con otros materiales de tubería) reduce la fricción entre el flujo y la pared de la tubería, lo que permite una mayor velocidad de flujo y una mayor capacidad de flujo. La tubería de PE no se erosiona, pudre, corroe ni oxida; tampoco es compatible con el crecimiento bacteriológico. Los coeficientes de expansión térmica relativamente más altos son el problema principal con las tuberías de PE, pero cuando la tubería de PE se instala y se restringe adecuadamente, la tubería se expande y contrae sin ningún daño. Cuando se utiliza en aplicaciones de ruptura de tuberías, se reduce la fricción entre el suelo y la tubería. La superficie interna de la tubería de PE es más lisa que la de las tuberías de concreto o arcilla. Para aplicaciones de gravedad, después de algunas manipulaciones algebraicas a la siguiente ecuación de Chezy-Manning, se puede demostrar que la capacidad de flujo del PE es un 44% mayor que la de las tuberías de hormigón o arcilla considerando el diámetro interno de la arcilla o el hormigón viejos. tubería es igual a la de la tubería de PE de repuesto.

Estas tuberías no se pueden ensamblar en una sola cadena de tuberías antes de la operación de ruptura; pero pueden colocarse en posición detrás del cabezal de ruptura o mantenerse comprimidos remolcándolos a través de una tapa conectada al cable o varilla que pasa a través de las tuberías. Por lo tanto, el sistema de tracción estática es el único sistema de ruptura que se puede utilizar con estas tuberías. Las uniones de estas tuberías deben estar diseñadas para instalaciones sin zanja

#### ***4.2.8. Pertinencia del método pipe bursting***

Para la reparación y el reemplazo, las técnicas convencionales han implicado excavaciones a cielo abierto para exponer y reemplazar la tubería. Alternativamente, la tubería se puede rehabilitar insertando un nuevo revestimiento o reemplazándola por rotura de la tubería. Hay varias tecnologías de revestimiento de tuberías disponibles, como tubería curada en el lugar, deformación y reforma, y revestimiento deslizante. La principal ventaja de los métodos de revestimiento sobre el estallido de tuberías es la necesidad de una excavación pequeña o sin acceso a la tubería. Por el contrario, la rotura de tuberías tiene la ventaja de aumentar la capacidad de la tubería en más del 100 %.

La ventaja única de la ruptura de tuberías sobre las técnicas de revestimiento de tuberías es la capacidad de aumentar el tamaño de las líneas de servicio. Un aumento del 15% y 41% duplica la capacidad de las líneas de alcantarillado y agua, respectivamente. La técnica es más rentable en comparación con las técnicas de revestimiento cuando hay pocas conexiones laterales para volver a conectar dentro de una sección de reemplazo, la tubería vieja está deteriorada estructuralmente y se necesita capacidad adicional.

Para aplicaciones de presión, un aumento del 41 % en el diámetro interior de la tubería duplica el área de la sección transversal de la tubería y, en consecuencia, duplica la capacidad de flujo de la tubería. Para aplicaciones de gravedad, después de cierta manipulación algebraica de la ecuación de Chezy-Manning mencionada anteriormente, se demostró que un aumento del 15 % y del 32 % en el diámetro interior de la tubería combinado con una superficie más suave de la tubería puede producir un aumento del 100 % y del 200 % en la capacidad de flujo, respectivamente.

La ruptura de tuberías tiene ventajas sustanciales sobre los reemplazos a cielo abierto; es mucho más rápido, más eficiente y, a menudo, menos costoso que el corte abierto, especialmente en aplicaciones de alcantarillado debido a las grandes profundidades a las que generalmente se instalan las tuberías de alcantarillado por gravedad. La mayor profundidad del alcantarillado requiere excavación, apuntalamiento y drenaje adicionales, lo que aumenta sustancialmente el costo del reemplazo a cielo abierto. El aumento de la profundidad tiene un efecto mínimo en el costo por pie de rotura de tubería, como se muestra en la Figura 7 (Poole et al 1985). Estudios específicos llevados a cabo en los EE. UU. han demostrado que los ahorros en los costos de rotura de tuberías alcanzan el 44 % con un ahorro promedio del 25 % en comparación con el corte a cielo abierto (Fraser et al 1992). Este ahorro de costos podría ser mucho mayor si el suelo es de roca dura porque la excavación en roca es extremadamente costosa en comparación con la ruptura de tuberías. Además, los cortes abiertos pueden causar daños significativos a los edificios y estructuras cercanos (Atalah 2004).

#### ***4.2.9. Consideraciones de diseño***

Las consideraciones de diseño evolucionan a partir de las condiciones del suelo, las condiciones del agua subterránea, el grado de ampliación requerido, la construcción y la profundidad de la tubería existente, etc.

**4.2.9.1. Condiciones del terreno.** Las condiciones de suelo más favorables para proyectos de rotura de tuberías son aquellas en las que el suelo que rodea la tubería puede compactarse fácilmente mediante la operación de rotura a

medida que se desplaza. Esto limitará los desplazamientos del suelo hacia el exterior a una zona cercana a la alineación de la tubería. También es favorable si el suelo que rodea la tubería permite que el orificio expandido permanezca abierto mientras se instala la tubería de reemplazo. Esto reducirá el arrastre en la tubería de reemplazo y, por lo tanto, reducirá las tensiones de tracción a las que se expone la tubería durante la instalación (Hashemi, 2008).

Las condiciones del suelo algo menos favorables para la rotura de tuberías implican suelos y rellenos densamente compactados, suelos por debajo del nivel freático y suelos dilatantes (suelos que se expanden en volumen a medida que se cortan, por ejemplo, arenas angulares). Cada una de estas condiciones del suelo tiende a incrementar la fuerza requerida para la operación de estallido y a incrementar la zona de influencia de los movimientos del suelo (Hashemi, 2008).

Los suelos especiales, como los suelos muy expansivos o los suelos colapsables, también causarán problemas. Para la mayoría de las condiciones del suelo, simplemente es necesario proporcionar la potencia requerida para efectuar la explosión, desplazar el suelo y tirar de la tubería de reemplazo a lo largo de la explosión y considerar el efecto potencial de los desplazamientos y vibraciones del suelo en los servicios públicos adyacentes y estructuras. Las ráfagas más largas se pueden lograr más fácilmente en condiciones favorables del suelo (Mendoza y Salazar, 2016).

En algunas condiciones del terreno, los problemas pueden deberse a una selección incorrecta del sistema de rotura de la tubería. Por ejemplo, los suelos de tipo arenas debajo del nivel

freático pueden causar un problema de rotura de tuberías neumáticas porque, debido a las vibraciones, los movimientos del suelo parecen desviar el suelo y los trozos de tubería rota por encima de la tubería, reduciendo así el peso sobre la tubería. Si la tubería de reemplazo es una tubería de polietileno liviana, tenderá a elevarse hacia arriba, a veces hasta dos pies por encima de la inversión original. La rotura de tuberías estáticas elimina este problema y parece ser una mejor alternativa en tales condiciones del terreno (Mendoza y Salazar, 2016).

Cuando el suelo proporciona un arrastre de alta fricción en la tubería y la longitud del tramo es lo suficientemente larga como para generar fuerzas de alta tensión en la tubería de reemplazo, se pueden inyectar lodos de lubricación de bentonita o polímero en el espacio anular detrás del cabezal de ruptura para ayudar a mantener el orificio abierto y reducir el arrastre por fricción en la tubería de reemplazo.

El suelo base debe poder soportar el peso de la unidad de ruptura de la tubería y la tubería de producto y las condiciones del suelo deben ser bastante uniformes alrededor de la tubería y consistentes a lo largo de la tubería. Si ha habido erosión del suelo alrededor de la tubería, el cabezal de ruptura y la siguiente tubería tenderán a desplazarse hacia el vacío o la región de menor densidad. Si hay una capa de suelo duro o una roca cerca de la tubería, la cabeza que estalla tenderá a desplazarse hacia el suelo más blando. En condiciones de poca profundidad, el suelo se desplazará principalmente hacia arriba, hacia la superficie del suelo y la tubería nueva tenderá a coincidir con la tubería anterior. Si la tubería es profunda en relación con su diámetro, el suelo tenderá a desplazarse más radialmente alrededor de la tubería vieja y la tubería nueva tenderá a ser concéntrica con la tubería vieja. Si las condiciones cambian sustancialmente a lo

largo del estallido, esto puede causar algún cambio en la pendiente y / o alineación de la tubería. Cuando la calificación es crítica, se deben considerar estas posibilidades (Hashemi, 2008).

**4.2.9.2. Condiciones del agua subterránea.** La rotura de tuberías por debajo del nivel freático aumenta la dificultad de las operaciones de rotura. Estallar en suelo saturado puede hacer que la presión del agua aumente alrededor del cabezal de ruptura, a menos que el suelo tenga una permeabilidad lo suficientemente alta como para permitir que la presión del agua se disipe rápidamente. El aumento de la presión del agua hace que disminuya la tensión efectiva en el suelo y puede hacer que el suelo se comporte más como un fluido viscoso. Cuando el suelo fluidizado desplaza el suelo circundante, los movimientos del suelo tienden a ser más extensos y los servicios cercanos pueden desplazarse más fácilmente (Celi, 2018).

En ciertas condiciones del suelo, el agua subterránea puede tener un efecto de flotación y lubricante en la operación de ruptura, con el agua subterránea fluyendo hacia el pozo de inserción abierto y el pozo de recepción a lo largo de la línea de zanja existente. Durante el estallido de la tubería, los hoyos de inserción y de recepción se mantienen preferiblemente secos. Si el agua subterránea se elimina en gran medida (por ejemplo, apuntando un pozo), puede producirse la consolidación / densificación del suelo que rodea la tubería existente, lo que aumenta significativamente las fuerzas de ruptura (Celi, 2018).

**4.2.9.3. Tuvo anfitrión.** La mayoría de los materiales de tubería quebradizos son buenos candidatos para la rotura de tuberías. Las tuberías dúctiles pueden

marcarse y luego cortarse como en las operaciones de división de tuberías descritas anteriormente. Las tuberías fabricadas con material abrasivo no dúctil pero con refuerzo dúctil son las más difíciles de reemplazar utilizando la mayoría de las técnicas de sustitución de tuberías (Najafi, 2010). Los tipos comunes de tubería y sus características de ruptura se indican a continuación:

- Las pipas de arcilla son buenas candidatas para reventar. Son frágiles y se fracturan fácilmente. Las tuberías de arcilla más nuevas pueden tener juntas de PVC. Dichos accesorios de plástico pueden dificultar ligeramente la operación de rotura y pueden necesitar herramientas de aplicación especiales, pero no representan una preocupación real. Los fragmentos de la tubería de arcilla pueden ser afilados y existe cierto nivel de preocupación por el desgarro o rayado de la tubería de reemplazo y la eventual carga puntual en la tubería de reemplazo. Las tuberías de manguito externo de sacrificio se utilizan a menudo para garantizar la protección de las tuberías de reemplazo de plástico para aplicaciones de tuberías de alta presión. Hay mucha menos preocupación por las aplicaciones de tuberías de alcantarillado por gravedad (Najafi, 2010).
- Los tubos de hormigón liso son buenos candidatos para reventar. Son relativamente frágiles y tienden a fracturarse fácilmente en tensión, especialmente cuando están deterioradas. Las reparaciones de la tubería de concreto simple grueso o reforzado pueden causar dificultad para reventar (Najafi, 2010).

- Las tuberías de hormigón armado presentan dificultades a menos que el hormigón y el acero de refuerzo estén deteriorados. Pueden romperse con equipos lo suficientemente potentes, pero puede ser necesaria una evaluación cuidadosa si las tuberías están más que ligeramente reforzadas y no están significativamente deterioradas (Najafi, 2010).
- Los tubos de hierro fundido son buenos candidatos para reventar. Las tuberías son relativamente frágiles incluso cuando están en buenas condiciones. Los fragmentos de la tubería de hierro fundido pueden estar afilados y existe preocupación por el desgarramiento o rayado de la tubería de reemplazo y la eventual carga puntual en la tubería de reemplazo. Las tuberías de manga de sacrificio se utilizan a menudo para garantizar la protección de las tuberías de reemplazo de plástico para aplicaciones de tuberías de alta presión. Es posible que sea necesario considerar las herramientas de aplicación especiales y la protección del cable del cabrestante, cuando se utilicen. Las abrazaderas de reparación dúctiles, las monturas de servicio y los accesorios pueden causar problemas para la operación de rotura y se pueden incorporar hojas de cortador endurecidas para cortar dichas abrazaderas (Najafi, 2010).
- Las tuberías de acero y hierro dúctil no son buenas candidatas para que estallen. Son fuertes y dúctiles. En diámetros más pequeños, se pueden reemplazar utilizando técnicas de división de tuberías (Najafi, 2010).



- Los tubos de PVC y otros plásticos se pueden reemplazar utilizando una combinación adecuada de rotura y técnicas de división según la resistencia y ductilidad de la tubería (Najafi, 2010).
- Las tuberías de fibrocemento son generalmente buenas candidatas para reventar. Se debe tener cuidado para determinar la clase de tubería existente. Las tuberías más gruesas y de mayor resistencia a la tracción (como las tuberías principales de agua de CA) tienden a "hacer bolas", lo que aumenta las fuerzas de ruptura necesarias. Las modificaciones a los cabezales de ruptura estándar deben incluir cuchillas de corte para dividir la tubería.

**Requisitos de tamaño y ampliación.** En los rangos de tamaño más pequeños, una tubería de diámetro pequeño puede ser más difícil de reventar que una tubería de mayor tamaño, porque las paredes son más gruesas en relación con el tamaño de la herramienta. Se considera que una tubería de 8 pulgadas es más fácil de reventar que una tubería de 4 pulgadas (Simicevic y Sterling, 2001).

El diámetro de la tubería principal y el tamaño requerido de la nueva tubería determinan la selección de la máquina. Hasta la fecha, es común aumentar el tamaño hasta en un 30% del diámetro original de la tubería, y se ha completado con éxito un mayor tamaño en muchos proyectos. Con tuberías de mayor diámetro (más de 18 pulgadas de diámetro), los proyectos con un alto porcentaje de ampliación deben examinarse cuidadosamente en términos de las fuerzas requeridas y los desplazamientos del terreno (Simicevic y Sterling, 2001).

**Profundidad y perfil** La profundidad de la tubería de acogida afecta la expansión del suelo circundante. Además, las consideraciones sobre el nivel freático varían con la profundidad. Los hoyos de inserción y recepción se hacen más grandes y complejos a medida que aumenta la profundidad.

El perfil existente del tramo de ruptura también puede afectar la planificación y ejecución de la operación de ruptura de la tubería, especialmente los cambios en la pendiente o las curvas. Si la inspección por video previa a la instalación revela un pandeo en la línea de alcantarillado existente más grande de lo aceptable (la mitad del diámetro de la tubería existente, por ejemplo), el pandeo debe eliminarse para instalar el tubo de reemplazo con un grado aceptable y sin el hundimiento. El pandeo puede eliminarse mediante una excavación local y llevando la parte inferior de la zanja de la tubería a un grado uniforme en línea con la tubería existente. Se puede esperar alguna reducción del pandeo de la operación de rotura, pero la medida en que se corrija el problema dependerá de la rigidez relativa del suelo que rodea la sección del pandeo (especialmente debajo). La presencia de roca debajo de la tubería existente puede crear un "golpe" en la tubería de reemplazo. Esto generalmente se considera inaceptable, pero en realidad es bastante raro (Kramer, 2012).

#### ***4.2.10. Servicios públicos circundantes***

Los servicios públicos circundantes pueden afectar la ubicación de los pozos de inserción y recepción. Los servicios que interfieran o puedan resultar dañados por la explosión deben

ubicarse y exponerse antes de la explosión. Para operaciones típicas de ruptura de tuberías, es poco probable que los servicios subterráneos en condiciones moderadas se dañen por vibraciones a distancias superiores a 2.5 pies desde el cabezal de ruptura y es poco probable que los desplazamientos del suelo causen problemas a distancias mayores de 2-3 diámetros desde la alineación de la tubería (MacKenzie, 2004).

Si bien no es común en todas las jurisdicciones, ocasionalmente la rotura de tuberías se produce a través de curvas horizontales o verticales. Aunque muchas ráfagas largas a través de curvas de radio relativamente corto han tenido éxito utilizando sistemas tanto estáticos (varillas) como neumáticos, se requiere una cuidadosa consideración de la metodología. Es prudente planificar los requisitos de espacio y excavación de un pozo en el punto medio de una carrera, como en el vértice de una curva (Kramer, 2012).

Se debe anotar cuidadosamente el historial de reparaciones de las líneas a reventar a partir de los registros de servicios públicos o de la inspección por video. Las reparaciones pueden implicar abrazaderas de reparación pesadas que pueden detener una operación de ruptura. A veces, las abrazaderas de reparación se pueden romper con éxito utilizando una cuchilla de corte en combinación con el cabezal de explosión, a menos que la cuchilla de corte se alinee con los pernos de las abrazaderas de reparación (Kramer, 2012).

Las masas de raíces gruesas también se consideran obstáculos porque las raíces envueltas firmemente alrededor de la tubería vieja pueden absorber muchos golpes sin romperse y, por lo tanto, hacer que la tubería sea más difícil de romper. Las obstrucciones en la tubería, como la

acumulación de sólidos pesados, la caída de la junta, el grifo de servicio que sobresale o la tubería colapsada, pueden evitar que la tubería estalle por completo. Si la obstrucción no se puede eliminar de la tubería con un equipo de limpieza convencional, puede ser necesario excavar y realizar reparaciones puntuales antes de que estalle. De lo contrario, el proceso de explosión puede ralentizarse o detenerse. Se deben considerar el riesgo y las posibles consecuencias antes de comenzar el trabajo para determinar si se debe abordar el problema si surge o si se deben tomar medidas preventivas. Generalmente, los elementos provisionales en el contrato para todas las eventualidades potenciales ayudarán a confirmar los costos finales (Kramer, 2012).

### **4.3. Comparar los métodos convencionales y no convencionales de rehabilitación de tuberías a partir de antecedentes y la evolución de las diferentes técnicas en Colombia.**

#### ***4.3.1. Excavación de zanja a cielo abierto***

La excavación de zanjas a cielo abierto es el método tradicional y más popular para la construcción, reparación o reemplazo de alcantarillas. La excavación de zanja a cielo abierto consiste en la excavación de una zanja para la instalación manual de tubería. Este método suele ser el menos costoso si la tubería está ubicada debajo de áreas no pavimentadas. El método de zanja de corte abierto implica excavar y exponer la tubería existente para que pueda repararse o reemplazarse y luego rellenarse. Si la excavación de zanja a cielo abierto está ubicada en un área sin pavimento, la excavación se puede rellenar con tierra y vegetación de superficie restaurada con semillas o césped (Baquero y Matamoros, 2021).

Cuando la excavación de la zanja a cielo abierto está ubicada debajo del pavimento, el pavimento existente debe cortarse con sierra y retirarse, la excavación se debe rellenar con relleno granular (piedra compactada o arena para evitar el asentamiento), y el pavimento debe reemplazarse (Baquero y Matamoros, 2021).

### **Ventajas**

- Puede ser menos costoso que los métodos sin zanja en áreas no pavimentadas.
- Aplicable para tubería colapsada, tubería severamente rota y obstrucciones de raíces pesadas.
- No requiere remover raíces o escombros de la tubería.

### **Desventajas**

- Se requiere más excavación que en comparación con los métodos sin zanja.
- Puede requerir la remoción del pavimento de calles y aceras, lo que aumenta el costo de la reparación.

#### ***4.3.2. Técnica sin zanja y pipe bursting***

La tecnología sin zanjas es una nueva alternativa para la instalación tradicional o el reemplazo de la infraestructura subterránea con una interrupción mínima en la superficie y el subsuelo. Las ventajas de estos métodos son menos zanjas, operaciones de construcción

respetuosas con el medio ambiente, rentabilidad y un mejor nivel de seguridad y productividad en el proceso de construcción. (Duque, 2018)

### **Ventajas y limitaciones de las tecnologías sin zanja**

Según Mínguez (2015), la rotura de la tubería tiene ventajas considerables sobre los reemplazos a cielo abierto; Es mucho más rápido, más eficiente y, a menudo, más económico que el corte a cielo abierto, especialmente en el reemplazo de líneas de alcantarillado debido a la profundidad de las líneas de alcantarillado. El aumento de la profundidad del alcantarillado requiere excavación, apuntalamiento y otras acciones, lo que aumenta sustancialmente el costo de reemplazo a cielo abierto. El aumento de profundidad tiene un efecto mínimo en el costo de rotura de la tubería. Además de la ventaja de costo directo de la rotura de la tubería sobre el corte a cielo abierto, la rotura de la tubería tiene muchos ahorros de costos indirectos, como menos cierres de caminos o carriles, menos tiempo de reemplazo, menos interrupciones del comercio y menos perturbaciones del tráfico que el método a cielo abierto.

Mínguez (2015) afirma que el beneficio exclusivo de la rotura de tuberías sobre otras técnicas sin zanja; como CIPP, deslizamiento, etc., es la capacidad de aumentar el tamaño de las líneas de servicio de modo que un aumento del 41% duplique la capacidad de la línea de alcantarillado sin considerar el impacto de la superficie más lisa de la nueva tubería. La técnica de rotura de tuberías es más ventajosa en comparación con las otras técnicas sin zanja en términos de costo cuando hay pocas conexiones laterales para reconectar dentro de una sección

de reemplazo, cuando la tubería vieja está estructuralmente deteriorada, cuando se necesita capacidad adicional. Otras ventajas incluyen:

- Cantidad mínima de excavación requerida.
- Puede reducir los costos de remoción y reemplazo de pavimento.
- Tubería sin juntas que reduce la infiltración de raíces y agua.
- Puede aumentar el diámetro de la tubería existente.

La rotura de tuberías tiene las siguientes limitaciones:

- Se necesita excavación para las conexiones laterales.
- Los suelos expansivos pueden causar dificultades para reventar.
- Una tubería colapsada o un pandeo excesivo en un punto determinado a lo largo del tramo de la tubería requiere una acción correctiva para arreglar el pandeo del tubo si este punto no se usa como un eje de inserción o de tracción
- Las reparaciones puntuales con material dúctil requieren algunas hojas de corte o rodillos especiales
- Si la antigua línea de alcantarillado está significativamente fuera de línea y pendiente, la nueva línea también tenderá a estar fuera de línea y pendiente, aunque es posible realizar algunas correcciones de hundimientos localizados.
- Los ejes de inserción y tracción son necesarios especialmente para ráfagas más grandes.

- Puede ser más costoso que la excavación de zanjas a cielo abierto en áreas sin pavimento.
- Las raíces y los desechos deben eliminarse de la tubería antes de la instalación.
- No se aplica a tuberías colapsadas, muy rotas o bloqueos de raíces pesados.

#### 4.3.3. Cuadro comparativo

En la tabla 1, se ha elaborado una recopilación de las principales ventajas y desventajas que poseen los métodos de Zanjas y Pipe Bursting, estableciendo algunos aspectos a nivel técnico, operativo y presupuestal de cada método.

Tabla 1

*Ventajas y desventajas de los métodos de zanja y pipe bursting.*

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>ZANJAS</b>	Instalación de tubería a profundidades menores a 1.0m	Alto costo en actividades como excavación, demolición y reparación.
	Aumento de la actividad laboral y la comercialización de materiales.	Problemas por asentamiento debido a la capacidad de compactación del material de relleno.
	Posibilidad de instalar y retirar cualquier tipo de material de tubería.	Aumento de la contaminación, auditiva, visual, aumento de material particulado y contaminación con material procedente de la excavación.
	No tiene dificultades con el tipo de terreno existente.	El aumento de la profundidad de la tubería genera mayores costos y riesgos de colapso y atrapamiento.
	Genera mayor capacidad de mano de obra.	La excavación a cielo abierto incrementa los accidentes laborales y la afectación a otras redes existentes.
	Cuenta con mayores estudios del comportamiento de los rendimientos de manos de obra y materiales.	Aumento en los tiempos de ejecución, recursos de mano de obra y materiales.



MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>PIPE BURSTING</b>	Reemplazo de tuberías en mal estado, sin la necesidad de realizar grandes volúmenes de excavación y demolición.	Alto costo de operación del sistema al momento de instalar la tubería.
	Incremento en el diámetro con respecto a la tubería existente, entre un 20 - 30%.	No es recomendable en suelos muy expansivos.
	Se puede usar en cualquier material fragmentable (PVC, Asbesto cemento, concreto simple, tubería cerámica (gres), Polietileno).	Para dar servicio o reemplazar a las conexiones (laterales) es necesario de excavación.
	Menor costo en actividades de excavación, demolición y reparación, en comparación con la excavación a cielo abierto.	La profundidad de la tubería a ser reemplazada no puede ser menores a 1.0m.
	Reducción de la contaminación auditiva, visual, por material particular en el aire del 98%, con respecto a la excavación zanja abierta.	Dificultades en tuberías de concreto reforzado, Hierro dúctil y materiales de difícil fragmentación.
	Se puede usar a grandes profundidades.	En raras ocasiones las vibraciones del equipo neumático pueden afectar las vías, andenes o tuberías aledañas.
	Ejecución de longitudes de hasta 100ml por jornada.	El proceso de estallido no debe utilizarse a menos de 300 milímetros de otro servicio público.
	Bajo costo y menor tiempo de ejecución en comparación con otros sistemas.	
	Se puede utilizar cualquier tipo de material, especialmente se trabaja con Polietileno de alta densidad (PEAD).	
	Mantenimientos a muy bajo costo.	

#### 4.3.3.1. Otros métodos de excavación sin zanja. Revestimiento de tubería

**curado en el lugar.** Una tubería curada en el lugar (CIPP) es un método de rehabilitación sin zanjas que se utiliza para reparar tuberías existentes. CIPP es una tubería dentro de una tubería sin juntas, con la capacidad de rehabilitar tuberías preexistentes. Un tubo de fieltro saturado de

resina hecho de poliéster se invierte o se introduce en un tubo dañado. Suele realizarse desde el punto de acceso río arriba que habitualmente se excava donde el lateral sale de la vivienda. El revestimiento se puede invertir usando agua o aire a presión. Se usa agua caliente, luz ultravioleta, curado al ambiente o vapor para curar la resina y formar una tubería de reemplazo resistente a la corrosión, sin juntas y ajustada (López, 2010).

### **Ventajas**

- Cantidad mínima de excavación requerida.
- Puede eliminar los costos de remoción y reemplazo de pavimento.
- Solo requiere un punto de acceso.
- Tubería sin juntas que reduce la infiltración de raíces y agua.

### **Desventajas**

- Puede ser más costoso que la excavación de zanjas a cielo abierto en áreas sin pavimento.
- Las raíces y los desechos deben eliminarse de la tubería antes de la instalación.
- No se aplica a tuberías colapsadas, muy rotas o bloqueos de raíces pesados.

#### ***4.3.4. Costos de la implementación***

La rehabilitación de la red de tuberías de servicios públicos es un gran desafío para las próximas décadas y seguramente llevará a las empresas de servicios públicos al límite de su capacidad financiera. A pesar de la desesperada situación financiera que se encuentra en casi

todas partes, las posibles opciones técnicas y políticas financieras aún no se están utilizando para hacer frente de manera rápida y rentable al desafío de la "rehabilitación de tuberías" (Harbuck, 2000).

Un ejemplo destacado para subrayar esta afirmación es la técnica de rotura de tuberías para la renovación de tuberías defectuosas. La rotura de tuberías ha demostrado su valor durante más de tres décadas al tiempo que proporciona enormes ahorros de tiempo y ventajas económicas en comparación con los métodos convencionales de apertura de zanjas abiertas, por lo que es difícil entender por qué tantas empresas prestadoras de servicio respaldan el uso de excavadoras y se muestran no consideran los métodos sin zanja como una oportunidad de reducción de gastos (Clark y Browning, 1992).

La sociedad industrial moderna se basa en un sistema de tuberías en funcionamiento. Nadie puede negar que las redes de gas, agua y alcantarillado realizan el "suministro y eliminación" asegurando el nivel de vida, salud y productividad. El problema es que dichos sistemas, como cualquier otra infraestructura, están sujetos al proceso de envejecimiento. Si bien el deterioro de los sistemas sobre el suelo es visible para todos, un deterioro sutil amenaza las instalaciones del sistema subterráneo, lo que es un peligro reconocido que permanece principalmente ignorado por el público en general. La tasa porcentual de pérdida de agua de la red de distribución de agua es probablemente el parámetro de calidad más significativo para la condición estructural de las tuberías. Si la red de tuberías está desactualizada, está en mal estado o se opera de manera descuidada, entonces la cuota de pérdida de agua será mayor. Una alta tasa de pérdida de agua en la red de distribución de agua significa que las tuberías y / o las

articulaciones están defectuosas, a menudo de vejez y que necesitan una renovación urgente (Harbuck, 2000).

Las tuberías de alcantarillado y drenaje exigen atención a la situación de la entrada de agua, por ejemplo, cuando el nivel del agua subterránea indica una posible infiltración. El mayor volumen de agua externa que fluye hacia las alcantarillas públicas puede provocar el colapso.

Desde hace muchas décadas, ni los activos de alcantarillado público ni privado han recibido las reinversiones técnicas necesarias para su mantenimiento y renovación. Y ahora, las ciudades y municipios se enfrentan a una enorme demanda de rehabilitación que, por un lado, es inevitable desde el punto de vista técnico y ecológico, por otro lado trae consigo una carga económica casi imposible de soportar. Según la DWA (asociación alemana de alcantarillado), las inversiones anuales de mil millones de euros (2003) para la rehabilitación de las redes de alcantarillado alemanas apenas son suficientes para asegurar en el futuro o incluso el actual statu quo subterráneo, que ya es muy insatisfactorio. Se requieren entre 50 y 55 mil millones de euros para las necesarias medidas de rehabilitación del sistema de alcantarillado público alemán a corto y medio plazo. Y muchos ciudadanos con bienes raíces también están al tanto de las débiles tuberías subterráneas: de un inventario total de tuberías de aprox. 1,5 millones de kilómetros, al menos el 40% de ellos requieren renovación (Onkar y Kadam, 2016).

El costo total de cada proyecto de tubería varía con muchos factores, como el tamaño de la tubería, el material de la tubería, la profundidad y la longitud de la instalación, el sitio del proyecto, las condiciones del subsuelo y el tipo de tubería o aplicación de servicios públicos.

Con la construcción a cielo abierto, se estima que aproximadamente el 70 por ciento de los costos directos de un proyecto se gastará únicamente en la restauración del terreno, no en la instalación de la tubería en sí (Najafi y Gokhale, 2005).

Una forma establecida de construcción sin zanjas es la rotura de tuberías. El Manual de rotura de tuberías de ASCE (2006) define la rotura de tuberías como "... un método de reemplazo en el que una tubería existente se rompe por una fractura frágil, utilizando fuerza aplicada mecánicamente desde adentro. Los fragmentos de tubería se introducen en el suelo circundante. Al mismo tiempo, se introduce una nueva tubería del mismo o mayor diámetro, reemplazando la tubería existente. La rotura de tuberías implica la inserción de una herramienta de forma cónica (herramienta de rotura) en la tubería existente para romper la tubería existente y forzar sus fragmentos hacia el suelo circundante por acción neumática o hidráulica. Se tira o empuja una tubería nueva detrás de la cabeza que estalla" (Onkar y Kadam, 2016).

En la comunidad de ingenieros, suele haber dudas y resistencia a la hora de aceptar nuevas tecnologías. Esto podría deberse a varias razones, como el riesgo y la incertidumbre involucrados, la falta de familiaridad con la nueva tecnología y, sobre todo, una idea errónea de que las nuevas tecnologías definitivamente costarían más que las tradicionales. Aunque ha habido varios estudios preliminares con respecto a la comparación de costos del método sin zanja con el método a cielo abierto, una comparación de costos más detallada será útil para la aceptación de estas nuevas tecnologías. En esta investigación, compararemos específicamente el costo de la rotura de tuberías a cielo abierto como un método de tecnología sin zanjas mediante el uso de encuestas, estudios de casos y análisis estadístico (Onkar y Kadam, 2016).

El método tradicional de construcción a cielo abierto incluye costos directos que aumentan enormemente por la necesidad de restaurar superficies del suelo como aceras, pavimento y jardinería. Además, teniendo en cuenta los factores sociales y ambientales en la comparación, los métodos abiertos tienen impactos negativos en las comunidades, las empresas y los viajeros debido a las interrupciones en la superficie y el tráfico (Kenter, 2006).

En comparación, las tecnologías sin zanjas se pueden utilizar para reparar, actualizar, reemplazar o instalar sistemas de infraestructura subterránea con interrupciones superficiales mínimas y ofrecer una alternativa viable a los métodos a cielo abierto existentes. Cuando se consideran nuevas tecnologías y métodos como métodos de construcción alternativos, suele haber dudas y resistencia a la hora de aceptar la nueva tecnología, principalmente debido a parámetros de costos desconocidos (Kenter, 2006)

**4.3.4.1. Costos asociados.** Según Kenter (2006), hay varios costos relacionados con un proyecto de renovación de tubería, ya sea con corte a cielo abierto o rotura de tubería. Los autores consideraron algunos parámetros relacionados con este tipo de proyectos; es decir, directa, social y ambiental. Afirmaron que la interrelación entre estos costos se está volviendo más importante con la creciente conciencia pública de los problemas sociales y ambientales. Proporcionaron dos fórmulas generales para métodos a cielo abierto y sin zanjas como:

$$\text{TCOC} = \text{FACTORES CDIRECT} + \text{CSOCIAL} + \text{CAMBIENTAL} + \text{COTHER}$$

$$\text{TCTT} = \text{FACTORES CDIRECT} + \text{CSOCIAL} + \text{CAMBIENTAL} + \text{COTHER.}$$

Donde:

TCOC = costo total del método a cielo abierto

TCTT = costo total de la tecnología sin zanja

CDIRECT = costo de movimiento de tierras, costo de restauración, costos generales, etc.

(incluido el costo de material, mano de obra y equipo).

CSOCIAL = costo de retraso de tráfico, pérdida de ingresos del negocio, etc.

CAMBIENTAL = costo de contaminación acústica, costo de contaminación del aire, etc.

COTHER

FACTORES = costo de pérdida de productividad, costo de riesgo de seguridad, costo de comportamiento estructural, etc.

Los autores concluyeron que con los parámetros anteriores, la rotura de tuberías como método sin zanjas sería menos costosa que la técnica a cielo abierto. Sin embargo, no consideraron ningún dato real del proyecto para la predicción de los costos de rotura de la tubería o a cielo abierto.

Woodroffe y Ariaratnam (2008) presentaron una comparación de los factores de riesgo de otra técnica de tecnología sin zanjas llamada perforación direccional horizontal (HDD) y compararon esos factores con las aplicaciones tradicionales de corte abierto. Descubrieron que la

HDD puede minimizar los riesgos y reducir los costos generales de construcción en un entorno urbano.

Najafi y Kim (2004) presentaron una investigación de los parámetros involucrados en la construcción de tuberías subterráneas con métodos sin zanjas en centros urbanos en comparación con el método convencional a cielo abierto. Su estudio incluyó un desglose de los costos de ingeniería y de capital de la construcción y los costos sociales para ambos métodos.

Consideraron el costo del ciclo de vida de un proyecto desde el punto de vista de los parámetros de preconstrucción, construcción y posconstrucción. Afirmaron que considerando los costos del ciclo de vida de un proyecto, los métodos innovadores y la tecnología sin zanjas son más rentables que el método tradicional a cielo abierto.

Gangavarapu (2003) presentó un estudio de caso para comparar el tráfico y los costos de interrupción de carreteras durante la construcción de servicios públicos cuando se utilizan métodos de construcción a cielo abierto y sin zanjas. El autor presentó un desglose de los costos sociales involucrados en la construcción de servicios públicos. Investigó las tasas y patrones de flujo de tráfico durante dos ejemplos de proyectos de construcción de servicios públicos para analizar el impacto de la construcción en el flujo de tráfico. Utilizando estimaciones de demoras de tráfico obtenidas del flujo de tráfico y la longitud de las carreteras desviadas, desarrolló un diagrama de flujo para estimar los costos de la interrupción del tráfico. No consideró los costos debido a daños al pavimento, impactos ambientales, problemas de seguridad y ruido y polvo en su estudio. Aunque consideró los costos sociales importantes de un proyecto de utilidad, no



comparó el costo directo de la tala abierta con las técnicas sin zanja, que es el tema principal de esta tesis.

Adedapo (2007) ha verificado y comparado el impacto del método tradicional a cielo abierto y la perforación direccional horizontal (HDD) como un método de tecnología sin zanjas en la vida útil de la estructura del pavimento. Consideró los aspectos de deterioro de la construcción a cielo abierto al pavimento de asfalto y concluyó que el HDD causaría menos daño al pavimento que el corte a cielo abierto. Su enfoque en esta investigación estuvo más en los aspectos físicos de dos métodos y no cubrió los aspectos de costos. En esta tesis, la atención se centra en la comparación de costos de los métodos de rotura de tuberías y a cielo abierto.

Atalah (2004) ha estudiado la interacción entre la rotura de la tubería y el suelo circundante, especialmente en arena y grava, con el objetivo de comparar la rentabilidad de la rotura de la tubería con la de corte abierto. Estudió una comparación de estos dos métodos basándose en las características del suelo. No se concentró en la relación entre el costo en función del diámetro y la longitud de la tubería para los métodos a cielo abierto y de rotura de tubería, que es el enfoque principal de esta tesis.

#### ***4.3.5. Impacto ambiental y sostenibilidad***

El desarrollo de la tecnología ha permitido la renovación de redes de tuberías con el uso de técnicas sin zanjas, lo que ha tenido como resultado un impacto ambiental reducido. Las obras de rehabilitación deben ir precedidas del análisis de los aspectos económicos y técnicos, el

impacto social esperado, los factores ecológicos y la normativa legal. El análisis económico debe considerar los costos de excavación, desagüe, ocupación de un carril de tráfico y restauración de la superficie de la carretera. El uso de la tecnología sin zanja puede reducir estos costos incluso a la mitad (Arce Obregon, 2016). La infraestructura técnica urbana generalmente se encuentra debajo de la superficie de la carretera y el pavimento. En el caso de los métodos sin zanjas, los sitios de construcción no tienen que estar completamente separados del tráfico de automóviles y peatones, ya que en su mayoría están confinados a excavaciones puntuales.

Usando técnicas sin zanjas, se pueden evitar los atascos paralizantes y la molestia del público. Las reparaciones de infraestructura son extremadamente onerosas para los residentes. Las dificultades para moverse por la ciudad provocan el alargamiento del tiempo de viaje lo que resulta una molestia y afecta tanto a los automovilistas como a los peatones y ciclistas. Con el uso de métodos sin zanjas de renovación de la infraestructura subterránea, no es necesario construir puentes que crucen zanjas para vehículos y peatones. Además, las protestas de los propietarios de tiendas, restaurantes, hoteles y otros servicios ubicados en las proximidades de las trincheras, que a menudo reclaman una indemnización por reducción de ingresos, son limitadas (Alarcón y Pachecho, 2014).

El uso de métodos sin zanja se justifica cuando se planea realizar la rehabilitación de alcantarillado a mayor profundidad en suelos difíciles o en el área donde son posibles colisiones con los servicios públicos subterráneos existentes. Los métodos sin zanjas también se recomiendan en vías férreas, cursos de agua, aeropuertos y edificios señalizados (Arce Obregon, 2016). El uso de métodos de rehabilitación sin zanjas elimina el riesgo de una ubicación

incorrecta del alcantarillado en el suelo. El trabajo sin zanja requiere mucho menos tiempo que la excavación de zanja abierta, lo que ayuda a garantizar el cumplimiento de los plazos. Por otro lado, el trabajo de zanja abierta realizado en suelos difíciles puede causar serios problemas como daños a las tuberías existentes, deterioro de la estabilidad de los edificios circundantes y daño a la vegetación urbana. Además, la erosión conduce a la contaminación de los recursos hídricos. La tecnología sin zanjas reduce significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que podría ser la causa de problemas de salud. El método de excavación da como resultado la contaminación del suelo (Duque, 2018). La construcción a cielo abierto a menudo requiere la eliminación de árboles, lo cual es innecesario en la tecnología sin zanjas. Otra cosa es la contaminación acústica, producto nocivo de las construcciones de zanjas abiertas (Duque, 2018).

Para el diseño y la construcción sostenible, la renovación y el reemplazo de las tuberías, los factores económicos, ambientales y sociales deben combinarse y pueden obtenerse la siguientes ventajas:

- Mejoras incrementales por encima de la práctica convencional reduciendo los impactos previamente esperados
- Sostenible: logra el equilibrio con las limitaciones ambientales y de recursos sin impactos adversos en la sociedad o costos excesivos; es decir, "no empeorar las cosas"
- Restaurativo: restaura los recursos y la capacidad ecológica, mejora los sistemas económicos y sociales; es decir, "invertir en el futuro"
- Una mejor gestión de los servicios públicos de agua y aguas residuales puede abarcar prácticas como la gestión de activos y los sistemas de gestión ambiental. La

consolidación y las asociaciones público-privadas también podrían ofrecer ahorros significativos a las empresas de servicios públicos.

- Precio de costo total para que las tarifas de los servicios públicos reflejen el costo real del servicio y el mantenimiento de sus activos.
- Ahorro de hasta un 44 62% con respecto a las técnicas convencionales.
- Menor cantidad de mano de obra necesaria para la renovación de tuberías.
- Reducción en el tiempo de ejecución de las obras necesarias para la renovación de tuberías.

#### ***4.3.6. Antecedentes en Colombia***

Con base en los reportes e información encontrada a través de búsquedas en Internet, las tecnologías sin zanjas no han tenido una amplia difusión en países como Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay, Uruguay.

El mercado de la tecnología sin trincheras se ha recuperado en los últimos años a medida que la economía mundial ha comenzado a salir de su caída. A medida que las ciudades de todo el mundo buscan formas de mejorar mejor sus sistemas de infraestructura en deterioro y envejecimiento, más personas están recurriendo al uso de tecnologías sin zanjas como método (Lu et al, 2020).

Los sistemas de infraestructura en los países de América del Sur no son diferentes de los de los Estados Unidos y Europa, ya que tienen una gran necesidad de actualizar, reemplazar y

reparar sus líneas de agua y alcantarillado. Sin embargo, el costo de estos emprendimientos masivos requiere dinero e inversión, algo que los gobiernos de estos países no tienen los recursos para hacer (Gou et al, 2021).

La mayoría de los países de América del Sur han utilizado métodos sin zanjas de una forma u otra desde principios de la década de 1990, pero de ninguna manera son el modo de construcción predominante. Entre los países que han utilizado métodos sin zanja se encuentran Brasil, Argentina y Venezuela y, en menos medida, Perú, Colombia, Chile, Uruguay y Ecuador. Brasil ha sido, con mucho, el país sudamericano más activo en utilizar este tipo de tecnologías (Chapman et al, 2020).

Al describir el estado de la infraestructura de América del Sur con respecto a los sistemas de agua y alcantarillado, los líderes de la industria no se andan con rodeos. Dicen que los sistemas son viejos, están deteriorados y están frenando a los países. Además de las malas condiciones de las líneas, los gobiernos también deben lidiar con las conexiones ilegales o interferencias en la línea. Algunas personas roban el agua de esta manera. Sin embargo, una vez que se repara o reemplaza la línea, eso generalmente pone fin a ese método de obtención de agua (Chapman et al, 2020).

Las tecnologías sin zanja se introdujeron por primera vez en América del Sur a principios de la década de 1990, siendo la perforación direccional horizontal y la perforación de microtúneles entre las primeras que se utilizaron. El uso parece cobrar impulso en la época del auge de las telecomunicaciones a fines de la década de 1990; sin embargo, la mayoría de los

países aún se alejan de la nueva tecnología a pesar de que se ha probado en los Estados Unidos y Europa (Vladeanu y Matthews, 2018).

Hoy en día, casi todos los métodos sin zanja se han empleado en América del Sur, pero en diferentes escalas y no en todos los países. Los proyectos que involucran tecnología sin zanjas se concentran principalmente en distribución de gas y red de gas. Brasil también ha tenido resultados positivos con proyectos sliplining y CIPP. El deslizamiento con tuberías de PRFV se ha utilizado en Bogotá, Colombia, para rehabilitar alcantarillas de ladrillos” (Lu, Matthews y Iseley, 2020).

Quizás una de las experiencias más exitosas con tecnologías sin zanja en Colombia se registra en relación con la construcción de un interceptor en Bogotá por el método Pipe Jacking: El cual fue construido mediante la modalidad llave en mano. La primera etapa del Interceptor del Río Bogotá, consistió en un túnel de 10 km en suelos blandos, esta fue la primera obra de esta clase construida en Colombia, con resultados asombrosos en mitigación ambiental y en tasas de progresión de avance (Pizón, 2011).

Siguiendo el informe del Banco Mundial se establece que: “Para el trabajo futuro en este Tema, se ha abierto una nueva perspectiva, ya que es posible utilizar tecnologías de punta que permitan la construcción de estas redes por túneles de suelos blandos, disminuyendo la el impacto ambiental y los costos derivados de las interrupciones del tráfico y posibles daños a los edificios y las carreteras, producidos por las excavaciones del método tradicional, como la apertura de zanjas a cielo abierto (...)” (Pizón, 2011).

En Colombia, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), empresa de servicios públicos, ha implementado sistemas de inspección tecnificados, mínimamente invasivos y muy precisos para el monitoreo y catastro de redes. Sin embargo, aún es necesario abrir una zanja para acceder a la tubería cuando existe la necesidad de reparar grietas o rectificar desalineamientos o pérdidas de sección, entre otros (EAAB, 2001). En otras ciudades del país la aplicación de Trenchless Technologies ha sido solo marginal y no es posible encontrar registros en Internet o en la literatura técnica, pero se mantiene la opción de utilizar esas tecnologías (Pizón, 2011).

## **Conclusiones**

El deterioro de los sistemas de infraestructura subterránea y la creciente demanda de servicios públicos han aumentado la necesidad de una instalación, inspección, reparación, rehabilitación y reemplazo más eficientes de los servicios públicos subterráneos. Teniendo en cuenta los factores sociales y ambientales, los métodos abiertos tienen impactos adversos en la comunidad, debido a la contaminación indeseable y las interrupciones del tráfico. Las tecnologías sin zanjas que se utilizan para reparar, actualizar, reemplazar o instalar sistemas de

infraestructura subterránea con una interrupción mínima de la superficie ofrecen una alternativa viable a los métodos abiertos existentes

Aun cuando en Colombia existe una normatividad que regula las tecnologías de renovación y rehabilitación de tuberías sin zanja, es importante que estas se actualicen conforme a las regulaciones internacionales, con países que han tenido amplia experiencia y casos de éxito en su utilización. Esto entendiendo las grandes ventajas que ofrecen estas alternativas, como lo son el tiempo y el costo principalmente, sin dejar de lado las implicaciones favorables a nivel social y medio ambiental.

En el país, se ha visto un cambio importante en los paradigmas de las empresas de servicios públicos respecto a la implementación de las técnicas de rehabilitación y renovación de tuberías en sistemas de alcantarillado sin apertura de zanja. Sin embargo, para el caso particular de Ocaña y la región, el conocimiento y la implementación de estas técnicas es reducido, como se pudo evidenciar con las encuestas desarrolladas, en las cuales solo 6 de los individuos encuestados conocen este tipo de métodos, y ninguno de ellos ha trabajado en proyectos de estas índoles. Así mismo, estos reconocen las principales ventajas del desarrollo de estos métodos, y destacan los atributos de su implementación.

Entre las ventajas del método de zanjas se destaca la posibilidad de instalar y retirar cualquier tipo de material de tubería, además de no presentar inconvenientes con el tipo de terreno existente, además se cuenta con amplia experiencia y estudios sobre la instalación y procedimientos de este método. Las principales desventajas son los altos costos para excavación,



demolición y reparación, los problemas de asentamiento y la posibilidad de mayores accidentes laborales.

Respecto a las ventajas del método de pipe bursting se destaca la posibilidad de reemplazar tuberías en mal estado sin realizar grandes volúmenes de excavación, incrementar hasta en un 30% el diámetro de la tubería existente, se puede emplear sobre una diversidad de materiales fragmentables, tiene un menor costo en actividades de excavación, demolición y reparación y se puede usar a grandes profundidades. Las desventajas de este método consisten en el alto costo de operación de los sistemas, su uso no es recomendado en suelos expansivos y las profundidades para reemplazo deben ser superiores a 1.0 m.

## Referencias

- Alarcón 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. (Tesis de pregrado). Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- Arce Obregon, J. (2016). Aplicacion de la tecnología sin zanja para mejorar la productividad en la rehabilitación de redes de alcantarillado, Comas 2016.
- Bajaña, L. J. (2016). Ventajas y desventajas entre el método tradicional (con zanja) y el método moderno (sin zanja) en la rehabilitación del alcantarillado en la ciudad de Guayaquil (casco comercial). (Tesis de Pregrado). Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- Baquero-Pardo, J. D., & Matamoros-Calderón, J. (2021). Análisis comparativo de la gerencia de obras usando un sistema de perforación horizontal dirigida vs. Excavación a cielo abierto, en la instalación de redes subterráneas. (Tesis de Especialización). Universidad Católica de Colombia.
- Barbosa, G. A. (2013). Estudio de la aplicación de tecnologías Trenchless en Bogotá. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá: Colombia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10983/1592>
- CCI pipeline systems, LLC. (2010). Csaing Pacers & en seals. Breaux Bridge. Los Angeles.
- Celi Andrade, M. F. (2018). Análisis comparativo entre los métodos de zanja abierta y Pipe Bursting en la rehabilitación de tubería de AA. SS de la la Av. Martha B. Roldós E 13R Cjon. 17B y Calle 1era (Tesis de pregrado) Universidad de Guayaquil. Ecuador.
- Chapman, D., Providakis, S., & Rogers, C. (2020). BIM for the Underground—An enabler of trenchless construction. *Underground Space*, 5(4), 354-361.

- Chumpitaz Caycho, J. A. (2015). Procesos constructivos en el mantenimiento y reparación de redes de alcantarillado. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.  
Recuperado de: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/4807>
- Clark, R. H. y Browning, K. R. (1992). Benefit/Cost Analysis of Trenchless Alternatives. American Association of Cost Engineers. Transactions of the American Association of Cost Engineer, Q.1.1. Obtenido de  
<http://search.proquest.com/central/docview/208191708/abstract/35757F19704C485EPQ/1>
- Duque Callejas, J. E. (2018). Beneficios socio-ambientales de las Tecnologías Sin Zanja en Colombia (Doctoral dissertation, Maestría en Gerencia de Proyectos).
- Duque Villarreal, N. (2013). Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado (Tesis de Maestría) Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Gangavarapu, B. S., Najafi, M., & Salem, O. (2003). Quantitative analysis and comparison of traffic disruption using open-cut and trenchless methods of pipe installation. In New pipeline technologies, security, and safety (pp. 1714-1724).
- Guo, P., Gong, X., Wang, Y., Lin, H., & Zhao, Y. (2021). incorporating Trenchless Technology Research. Tunnelling and Underground Space Technology, 115, 104027.
- Harbuck, H. (2000). Economic evaluation of trenchless technology. AACE International Transactions, RI12.1-RI12.7. Recuperado de:  
<http://search.proquest.com/central/docview/208187226/abstract/30DE910B7F9449BPQ/1>
- Hashemi, S. B. (2008). Construction cost of underground infrastructure renewal: A comparison of traditional open-cut and pipe bursting technology (Tesis de doctorado) University of Texas at Arlington: USA.

JTRP Group. (2010). JTRP Group. Recuperado de <https://rebar.ecn.purdue.edu>

Kenter, P. (2006). Social costs of sewer and water main construction. *Daily Commercial News and Construction Record*, 79, SW1,SW3. Recuperado de:  
<http://search.proquest.com/central/docview/224187862/abstract/846CB37BD2704209PQ/4>

Kramer, S. R. (2012). *An introduction to trenchless technology*. Springer Science & Business Media.

López, J. M. (2010). Tecnología sin zanja para una ciudad sin obstáculos: XII Jornada Internacional de Tecnología sin zanja. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (199), 22-25.

Lu, H., Behbahani, S., Azimi, M., Matthews, J. C., Han, S., & Iseley, T. (2020). Trenchless construction technologies for oil and gas pipelines: state-of-the-art review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(6), 03120001.

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*, 261, 121215.

Mendoza Rey, M. E., & Salazar Neira, L. M. (2016). Análisis técnico–económico, medición de rendimientos y determinación de cuadrilla tipo para el funcionamiento del equipo de fracturación de tubería (Tesis de pregrado). Universidad pontifica catoloca de Ecuadors.

Mínguez Santiago, F. (2015). *Métodos de excavación sin zanjas* (Tesis de Maestria) Universidad Politécnica de Madrid. España Recuperado de:  
<https://oatd.org/oatd/record?record=oai%5C%3Aoa.upm.es%5C%3A37225>

- Ministerio de desarrollo económico. (17 de Noviembre 2000). por la cual se adopta el Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico [Resolución No. 1096]. Recuperado de:  
[https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710\\_ras\\_titulo\\_a\\_.pdf](https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_a_.pdf)
- Molano Garay, C. L., Vargas Manrique, I. J., & Rodríguez Gutiérrez, S. M. (2016). Matriz cuantitativa de selección de tecnología Trenchless para procesos de construcción de alcantarillado en Colombia. Universidad Católica de Colombia. Recuperado de:  
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14002/5/RAE-institucional.pdf>
- Najafi, M. (2010). Trenchless technology Piping. Arlington, Texas, Estados Unidos: McGraw-hill.
- Najafi, M., & Kim, K. O. (2004). Life-cycle-cost comparison of trenchless and conventional open-cut pipeline construction projects. In Pipeline Engineering and Construction: What's on the Horizon? (pp. 1-6).
- Ngan, K. H., Rostami, A., Yi, Y., & Bayat, A. (2016). Predicting soil expansion force during static pipe bursting using cavity expansion solutions. *International Journal of Geomechanics*, 16(3), 45- 68.
- Ojeda Garayar, J. C. (2015). Análisis comparativo entre el método pipe bursting y el método tradicional en la renovación de tuberías de desagüe. (Tesis de Pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Perú. Recueprado de:  
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/556449>
- Onkar K. Chothe , V.S. Kadam . (2016). Comparative Study of traditional method and innovative method for trenchless technology. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4.

- Pérez Fernández, J. C., & Ramos Chumbes, M. (2017). Métodos constructivos tradicional VS Pipe Bursting en obras de agua potable y alcantarillado en zonas urbanas del Distrito de Moquegua, 2015. (Tesis de Pregrado). Universidad Peruana los Andes. Huancayo, Perú.
- Pinzón, J. A. (2011). Evaluación y perspectivas de la utilización de tecnologías sin zanja en redes de alcantarillado de Bogotá. (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7549>
- Rahmaninezhad, S. M., Han, J., Al-Naddaf, M., Jawad, S., Parsons, R. L., & Liu, H. (2020). Field evaluation of performance of corroded corrugated steel pipe before and after sliplining rehabilitation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 102, 103442.
- Rameil, M. (Ed.). (2007). *Handbook of Pipe Bursting Practice*. Vulkan-Verlag GmbH. Recuperado de: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=MJ9IWmWe0FoC&oi=fnd&pg=PA3&dq=pipe+bursting+statistics&ots=YORfGSx8Fy&sig=zZt7kqLPq40dozSvyUXWW4NaQO0#v=onepage&q=pipe%20bursting%20statistics&f=false>
- Rodríguez, F. P., & Herrera, J. M. A. (2015). El proceso de transformación de la gestión del servicio de limpieza de alcantarillado en la ciudad de Donostia-San Sebastián. In XXXIII Jornadas Técnicas de AEAS (p. 18). Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento.
- Sanchez, L. G. (2011). *Tecnologías promisorias para renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de alcantarillado*. (Tesis de Maestría). Universidad de los Andes. Bogota, Colombia.
- Sandoval, S., Torres, A., & Obregón, N. (2012). *Herramientas para la implementación de mantenimiento proactivo en alcantarillados urbanos utilizando confiabilidad de*

inundación y conceptos de entropía de información. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (65), 152-166.

Torbaghan, M. E., Curioni, G., Hayati, F., Royal, A., Chapman, D., Atkins, P., & Rogers, C. (2020). Investigating the relationship between trenching practice and road deterioration using a field trial. *Journal of applied Geophysics*, 174 (12), pp 103.  
<https://doi.org/10.1680/jinam.19.00052>

Vladeanu, G., & Matthews, J. C. (2018). Analysis of risk management methods used in trenchless renewal decision making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 272-280.

Woodroffe, N. J., & Ariaratnam, S. T. (2008). Cost and risk evaluation for horizontal directional drilling versus open cut in an urban environment. *Practice periodical on structural design and construction*, 13(2), 85-92.