

**Estado del conocimiento de los métodos para instalar y rehabilitar redes de
alcantarillado y acueducto con tecnologías Trenchless en Bogotá**

María Alexandra Guachetá Reyes

**Universidad Antonio Nariño
Facultad De Ingeniería Civil
Proyecto De Grado
Bogotá D.C
2021**

**Estado del conocimiento de los métodos para instalar y rehabilitar redes de
alcantarillado y acueducto con tecnologías Trenchless en Bogotá**

María Alexandra Guachetá Reyes

Código: 10481523164

**Proyecto de grado en la modalidad de monografía, para optar por el título de
Ingeniera Civil**

Director

Carlos Martin Molina

Universidad Antonio Nariño

Facultad De Ingeniería Civil

Proyecto De Grado

Bogotá D.C

2021

Nota De Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme fuerzas y sabiduría en todo momento a lo largo de mi formación como profesional, sobre todo en los momentos difíciles, que me han forjaron y hoy me permiten estar culminando una de las etapas más importantes de mi vida.

A mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mi madre que me impulsa a ser mejor cada día y a mi padre que desde el cielo siempre me ha acompañado, esto es para ellos.

También agradezco enormemente a todos los docentes que me han inculcado sus conocimientos y apoyo durante este camino, especialmente al ingeniero Carlos Molina quien fue el tutor de este proyecto de grado, y ha valorado todos los esfuerzos que he hecho, brindándome su opinión y ayuda en pro de mejorar.

RESUMEN

El crecimiento poblacional implica a su vez un aumento en la demanda de servicios públicos y la obsolescencia de las redes de acueducto y alcantarillado en las zonas urbanas hacen necesaria la ejecución de proyectos para rehabilitar y construir obras de infraestructura de ésta índole, una solución idónea y versátil es emplear tecnologías Trenchless o sin zanja por las numerosas ventajas que representan como la disminución de impactos ambientales y sociales, la eliminación de las implicaciones negativas del tráfico y las afectaciones a las zonas comerciales, entre otros; que contrarrestan los altos costos iniciales requeridos para su instalación.

El desarrollo del presente trabajo de investigación recopila y presenta información relevante sobre conceptos técnicos, funcionamiento y procesos constructivos de las diferentes tecnologías Trenchless para construir y rehabilitar redes de alcantarillado y acueducto; adicional se presenta el análisis técnico de un proyecto como estudio de caso desarrollado en la ciudad de Bogotá que se encuentra en ejecución y se llama “Construcción de la manija matriz de acueducto y obras complementarias, que conforman la Fase II de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca”, la red matriz de acueducto que abastece a la zona occidental de la ciudad ubicada bajo el corredor vial conocido como la Avenida Boyacá que presenta alto tráfico pesado, razón por la que se construirá una tubería paralela con la tecnología Trenchless Pipe Jacking permitiendo la continuidad del servicio durante el tiempo de ejecución de la obra.

Palabras Clave

Alcantarillado, Acueducto, Tubería, Trenchless, Zanja.

ABSTRACT

Population growth implies an increase in the demand for public services and the obsolescence of the aqueduct and sewerage networks in urban areas, make necessary to carry out projects to rehabilitate and build infrastructure works of this nature; An ideal and versatile solution is to use Trenchless technologies due to the numerous advantages that they represent, such as the reduction of environmental and social impacts, the elimination of the negative implications of traffic and the effects on commercial areas, among others, that counteract the high initial costs required for installation.

The development of this research work collects and presents relevant information on technical concepts, operation and construction processes of Trenchless technologies to build and rehabilitate sewer and aqueduct networks; In addition, the technical analysis of a project is presented as a case study developed in the city of Bogotá that is currently underway and is called Rehabilitation of Section 3 of the Tibitoc-Casablanca Line, the main aqueduct network that supplies the western area of the city located under the road corridor known as Boyacá Avenue, which has high heavy traffic, which is why a parallel pipeline with the Trenchless technology Pipe Jacking will be built allowing the continuity of the service during the execution time of the work.

Keywords

Sewer, Aqueduct, Pipeline, Trenchless, Ditch.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
2	Objetivos	2
2.1	Objetivo General	2
2.2	Objetivos Específicos	2
3	Marco Conceptual	3
3.1	Alcantarillado	3
3.2	Servicio público de acueducto	3
3.3	Sistema de Acueducto	4
3.4	Método a zanja abierta	4
3.5	Método Tecnología Trenchless	4
3.6	Métodos para renovación de tuberías	5
3.6.1	<i>Rotura de tuberías (Pipe Bursting)</i>	5
3.6.2	<i>Apretado de tuberías (Tight in pipe)</i>	5
3.6.3	<i>Re-entubado (Relining)</i>	6
3.6.4	<i>Revestimiento deslizante continuo (Sliplining)</i>	6
3.6.5	<i>Tubería polimerizada in situ (Cured in place pipe)</i>	7
3.6.6	<i>Tuberías fundidas (Thermoformed pipe)</i>	8
3.7	Métodos para la instalación de tuberías	8
3.7.1	<i>Apisonamiento de tuberías (Pipe Jacking)</i>	8

3.7.2	<i>Perforación de barrena horizontal (Horizontal Auger Boring)</i>	9
3.7.3	<i>Perforación Direccional Horizontal (Horizontal Directional Drilling)</i>	10
3.7.4	<i>Microtunelado (Microtunneling)</i>	11
3.7.5	<i>Hincado de tuberías (Pipe Ramming)</i>	11
5	Estado del arte	12
6	Planteamiento del Problema	21
7	Metodología	22
8	Estudio de caso	24
8.1	Localización	24
8.2	Generalidades	25
8.3	Descripción de la tubería Tibitoc – Casablanca Tramo 3	25
8.4	Rehabilitación de la tubería Tibitoc-Casablanca	26
8.5	Obras a desarrollar para la rehabilitación de Tramo 3	27
8.6	Selección de la Tecnología Trenchless	27
8.6.1	Descripción pozos de trabajo	29
8.6.2	Instalación de accesorios del sistema de acueducto	33
8.6.4	Costos	36
9	Resultados y discusión	38
10	Conclusiones	41
11	Recomendaciones	42

12	Referencias Bibliográficas.....	43
13	Anexos.....	48

Lista de Figuras

Figura 1	Clasificación de alcantarillados. Fuente (Acueducto,2006)	3
Figura 2	Relación sistemas de acueducto y alcantarillado. Fuente (Acueducto, 2006)	3
Figura 3	Rotura de tuberías. Fuente (Tracto, 2019)	5
Figura 4	Apretado de tuberías. Fuente (Tracto, 2019)	6
Figura 5	Esquema colocación método Re-entubado. Fuente (Felicidad et al., 2016)	6
Figura 6	Revestimiento deslizante continuo. Fuente (Terraigua,2011b)	7
Figura 7	Colocación tubería polimerizada in situ Fuente (Terraigua, 2011a)	7
Figura 8	Sistema de guiado Pipe Jacking. Fuente (Villanueva Valencia, 2020)	9
Figura 9	Instalación con la tecnología Apisonamiento de tuberías. Fuente (ISST, 2019) Trad. del inglés.....	9
Figura 10	Perforación de barrena horizontal. Fuente (Onsarigo & Adamtey, 2020)	10
Figura 11	Equipo Hincado de tuberías. Fuente (Villanueva Valencia, 2020)	11
Figura 12	Proyectos ejecutados con rotura de tuberías. Fuente (Ariaratnam et al., 2014) Trad. del inglés.....	12
Figura 13	Inspección CCTV de tuberías. Fuente (Kuliczowska & Zwierzchowska, 2016)	13
Figura 14	Metodología BIM para la construcción de un tramo de alcantarillado. Fuente (Chapman et al., 2020).....	15
Figura 15	Generalidades del proyecto en Beihai. Fuente (Wang et al., 2021)	18

Figura 16 Localización del proyecto en la avenida Jiangdong. Fuente (Zhang et al., 2016)	19
Figura 17 Paso subterráneo peatonal terminado. Fuente (Zhang et al., 2016)	20
Figura 18 Metodología. Fuente (Elaboración propia)	23
Figura 19 Localización del proyecto. Fuente (Google Earth)	24
Figura 20 Tramos de la Línea Tibitoc-Casablanca Fuente (Aldana, 2017)	27
Figura 21 Criterios de selección Tecnología Trenchless. Fuente (Elaboración propia)	28
Figura 22 Muro de lanzamiento Pozo de lanzamiento. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	32
Figura 23 Esquema pozo de lanzamiento. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	32
Figura 24 Esquema pozo de salida. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	33
Figura 25 Ubicación línea matriz existente y proyectada en paralelo. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	39
Figura 26 Tramo Línea Tibitoc desde el PL5 al PS5. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	48
Figura 27 Detalle del pozo de lanzamiento PL5. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	49
Figura 28 Detalle del pozo de salida PS5. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	49

Lista de Tablas

Tabla 1 . Proyectos ejecutados por BESSAC ANDINA en Bogotá. Fuente (Bessac, 2020)	17
Tabla 2 Pozos proyectados para la instalación con Pipe Jacking. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	30
Tabla 3 Hincas proyectadas. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)	35
Tabla 4 Rango de costos Tecnologías Trenchless. Fuente (Milena et al., 2016)	37

1 Introducción

Las tecnologías sin zanja o abreviado del inglés como TT (Trenchless technologies) representan una opción viable para la instalación y renovación de tuberías de alcantarillado y acueducto, por las ventajas que tienen frente al método convencional a zanja abierta, además representa una disminución en los costos constructivos, reducción de los tiempos y evita los movimientos del terreno (Felicidad et al., 2016).

Los proyectos de esta índole requieren una evaluación de costo-beneficio del método convencional frente al sin zanja, para evaluar los factores ambientales como la contaminación, afectación a la vegetación y los gases de polución generados por los equipos empleados en la operación; los factores sociales, económicos y los factores urbanísticos (Barbosa, 2013).

El deterioro e insuficiencia de las redes de alcantarillado hacen necesaria su renovación y mantenimiento, implementando tecnologías sin zanja se obtienen beneficios económicos a corto y largo plazo gracias a que minimizan las reparaciones eventuales (Najafi, 2011).

El desarrollo del presente trabajo de investigación pretende recopilar y presentar información relevante sobre conceptos técnicos, funcionamiento, procesos constructivos y aplicaciones de las tecnologías Trenchless. Además, realizar un análisis técnico del proyecto presentado como estudio de caso “Construcción de la manija matriz de acueducto y obras complementarias, que conforman la Fase II de la rehabilitación del tramo 3 de la línea Tibitoc-Casablanca” ubicado en la ciudad de Bogotá y que se encuentra en ejecución.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar un estado del conocimiento acerca de las Tecnologías Trenchless para instalar y rehabilitar redes de alcantarillado y acueducto, enfocado en un estudio de caso ubicado en la ciudad de Bogotá.

2.2 Objetivos Específicos

- Describir las tecnologías Trenchless empleadas en la instalación y renovación de redes de alcantarillado y acueducto.
- Revisar en bases de datos bibliográficas la información sobre el desarrollo de estas tecnologías y su aplicación a lo largo de la historia.
- Recopilar información sobre un estudio de caso en la ciudad de Bogotá desarrollado bajo las tecnologías Trenchless.
- Realizar un análisis técnico del proyecto presentado como estudio de caso.

3 Marco Conceptual

3.1 Alcantarillado

Es un sistema compuesto por una serie de tuberías, accesorios y estructuras necesarias para la recolección y evacuación de aguas residuales y lluvias (Acueducto, 2006). En la Figura 1 se ilustran los tipos de alcantarillado, de acuerdo con su uso.

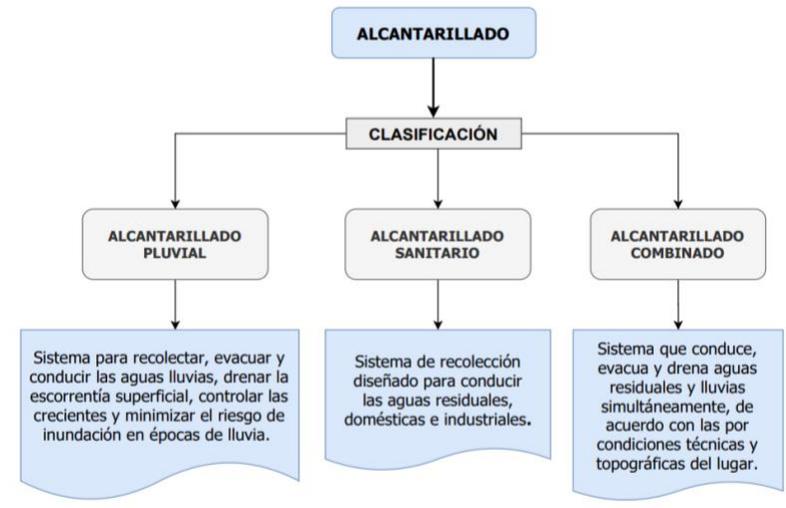


Figura 1 Clasificación de alcantarillados. Fuente (Acueducto,2006)

3.2 Servicio público de acueducto

Sistema de abastecimiento de agua potable apta para el consumo humano, que consta de los siguientes componentes: fuente de abastecimiento, obras de captación, obras de aducción, tratamiento del agua, almacenamiento y distribución como se muestra en la Figura 2 (Acueducto, 2006).

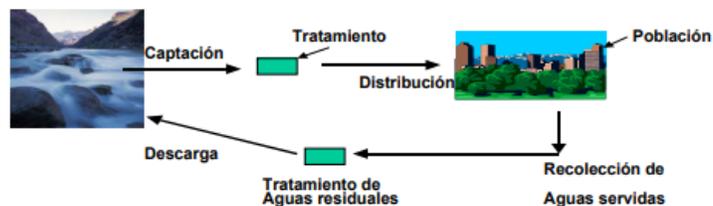


Figura 2 Relación sistemas de acueducto y alcantarillado. Fuente (Acueducto, 2006)

3.3 Sistema de Acueducto

La distribución del agua potable se realiza a través de la Red Matriz de Acueducto y las redes menores; la red matriz transporta el agua producida en las plantas de tratamiento hasta los principales tanques de almacenamiento, este sistema también incluye conducciones, estaciones de bombeo, tuberías de impulsión y estructuras de control, cuyos diámetros varían entre 16 pulgadas y 2.2 m; por otra parte las redes menores transportan el agua hasta las acometidas con diámetros inferiores a 12 pulgadas (Aldana, 2017).

3.4 Método a zanja abierta

Excavación a cielo abierto con equipos mecánicos y herramientas manuales, para ubicar una tubería en el fondo de la zanja, el material retirado debe ser reemplazado con el mismo o de características similares debidamente compactado; la zanja debe estar libre de infiltraciones de agua para impedir daños en la cama de soporte (EPM, 2013).

3.5 Método Tecnología Trenchless

Las tecnologías Trenchless son un conjunto de métodos y equipos empleados para instalar y rehabilitar redes de acueducto y alcantarillado, además presentan ventajas frente a los métodos convencionales a zanja abierta como la minimización del impacto ambiental, social y las implicaciones negativas del tráfico (Zaneldin et al., 2020).

Es un método innovador y eficiente para instalar y renovar tuberías, que surge tras la necesidad de abastecer con servicios públicos a la creciente población, emplea equipos de perforación rotatoria y taladros percutores (Kramer et al., 1992).

También se emplea un martillo neumático que fractura la tubería existente e instala una nueva de un diámetro igual o mayor (Garayar & César, 2015).

En los últimos años la demanda de estos avances ingenieriles desarrollados para la industria hidráulica subterránea ha aumentado significativamente, requieren de equipos especializados y representan una minimización en el impacto ambiental y social presentado con el método convencional a zanja abierta (Sedapal, 2016).

3.6 Métodos para renovación de tuberías

3.6.1 Rotura de tuberías (*Pipe Bursting*)

Método aplicado para colosales tuberías de materiales frágiles como gres, hormigón y fundición dúctil, consiste en el empuje de barras de tiro desde un pozo de lanzamiento hasta un pozo de salida (Nebula, 2020). Un martillo neumático fractura la tubería existente y un tambor hidráulico hala la nueva, para finalmente ejecutar los empalmes (Lueke et al., 2003).

En esta se emplean tres equipos diferentes dependiendo de las características del proyecto, el primero maneja potencias altas para tuberías de agua potable y de gas como se ilustra en la Figura 3, el segundo es neumático para alcantarillados donde fracturan la tubería existente con topes, finalmente el tercer equipo es portátil para tuberías cortas y con pequeños diámetros (Hammerhead, 2011).



Figura 3 Rotura de tuberías. Fuente (Tracto, 2019)

3.6.2 Apretado de tuberías (*Tight in pipe*)

La renovación de tuberías con la técnica TIP de sus siglas en inglés “Tight in pipe” se emplea para rehabilitar tuberías con roturas, permeabilidades y enraizamientos, consiste en

introducir una tubería nueva de polipropileno con diámetro menor en la tubería existente sin destruirla y el espacio restante entre las dos tuberías es mínimo y no requiere relleno, adicional este método reduce las deformaciones, el proceso de instalación se aprecia en la Figura 4 (Tracto, 2019).

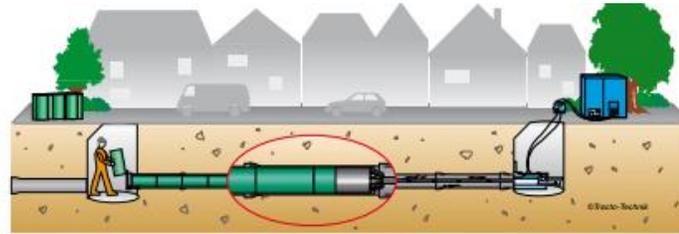


Figura 4 Apretado de tuberías. Fuente (Tracto, 2019)

3.6.3 Re-entubado (Relining)

Este proceso requiere una previa eliminación de sedimentos en la tubería, sellar las juntas de filtración y las grietas inyectando lechada química bajo presión con ayuda de un sistema de obturadores para introducir y deslizar la nueva tubería y finalmente rellenar el espacio vacío con material alcalino aislante (Felicidad et al., 2016). Los esquemas de colocación del método mencionado se visualizan en la Figura 5.



Figura 5 Esquema colocación método Re-entubado. Fuente (Felicidad et al., 2016)

3.6.4 Revestimiento deslizante continuo (Slip lining)

Se aplica para tuberías con diámetros de 100 a 1700 mm, consiste en un revestimiento con tubería PEAD (Polietileno de alta densidad) de menor diámetro que la tubería existente, se inserta desde el pozo inicial con un mecanismo de empuje hasta el pozo final y el espacio entre

las tuberías se llena con lechada a presión; mejorando la capacidad hidráulica y eliminando la infiltración (Terraigua, 2011b). La implementación de este método se aprecia en la Figura 6.



Figura 6 Revestimiento deslizante continuo. Fuente (Terraigua,2011b)

3.6.5 Tubería polimerizada in situ (Cured in place pipe)

Este método se emplea para rehabilitar tuberías de aguas residuales construidas en materiales como gres, hormigón, PVC, acero, en la Figura 7 se evidencia el proceso de colocación (Terraigua, 2011a).



Figura 7 Colocación tubería polimerizada in situ Fuente (Terraigua, 2011a)

Existen dos procedimientos, en el primero la tubería se impregna con resina y se endurece a vapor y el otro consiste en fibra de vidrio que se instala por tracción y endurece con luz ultravioleta (Pipelineinfrastructure, 2020).

En el CIPP se deben remover materiales y sedimentos localizados en la tubería existente para poder inspeccionarla, por otra parte, los equipos de presión empleados manejan presiones de 300 a 1200 psi (Pavco, 2011).

3.6.6 Tuberías fundidas (*Thermoformed pipe*)

Aplicado para alcantarillado sanitario con diámetros de 70 mm a 800 mm, la fundición de tuberías se clasifica en dos tipos, tuberías deformada y reformada que son fabricadas con polietileno y dobladas en forma de “U”, “C” y “H”, adicional requiere un proceso de termo formado para empotrar la nueva tubería y el revestimiento será completamente hermético (Trenchlesspedia, 2017).

3.7 Métodos para la instalación de tuberías

3.7.1 Apisonamiento de tuberías (*Pipe Jacking*)

Este método se caracteriza porque el revestimiento de la tubería se empuja desde un punto de partida llamada pozo de lanzamiento hasta un punto final conocido como pozo de salida (Sterling, 2020). Se emplea en la construcción de redes para suministro de agua, alcantarillado, gas, electricidad y telecomunicaciones, además la tecnología a emplear depende de las condiciones geológicas y la envergadura de los proyectos (Wang et al., 2018).

Esta tecnología se aplica de forma remota y guiada, con una tubería hincada que proporciona soporte continuo en el frente de la instalación aplicando presión mecánica o de fluido cuyo sistema se observa en la Figura 8; las tuberías instaladas con esta tecnología pueden ser de concreto, concreto reforzado, GRP, hierro fundido, PVC, acero y gres vitrificado, además se puede aplicar en terrenos blancos, compactos, sumergidos en alta permeabilidad y heterogéneos (Villanueva Valencia, 2020).

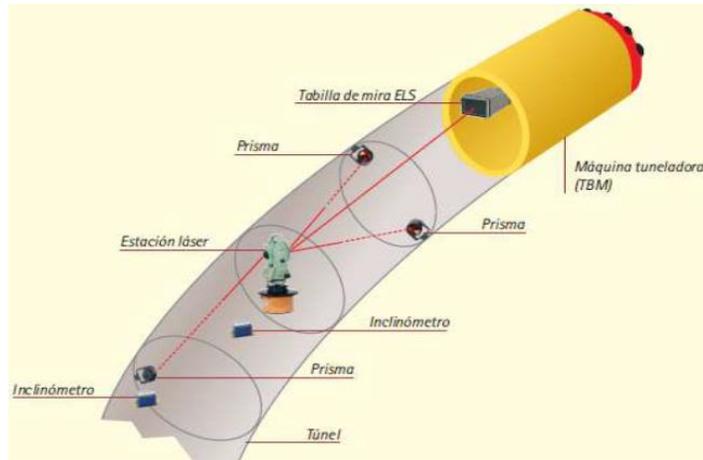


Figura 8 Sistema de guiado Pipe Jacking. Fuente (Villanueva Valencia, 2020)

Los proyectos de esta índole deben contar con sistemas integrados para instalar tuberías, tales como: gatos hidráulicos, sistema de bucle cerrado que transporte los residuos de la excavación, sistema de limpieza, sistema de lubricación para la parte externa de la tubería, sistema de suministro eléctrico y distribución de equipos, además de una grúa para transportar secciones de tubo hincado, los equipos de carga y escombros (Villanueva Valencia, 2020). El proceso anterior se evidencia en la Figura 9.

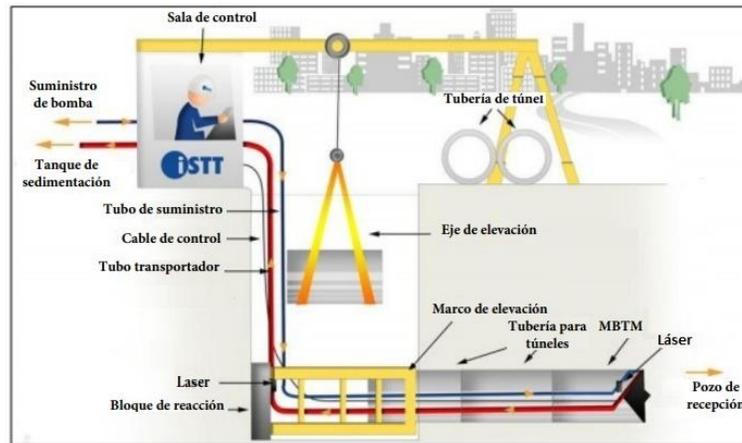


Figura 9 Instalación con la tecnología Apisonamiento de tuberías. Fuente (ISST, 2019) Trad. del inglés.

3.7.2 Perforación de barrena horizontal (Horizontal Auger Boring)

Estados Unidos fue pionero en la implementación de este método en el año 1936, consiste en una técnica de perforación con un cabezal de corte y una barrena de acero, el

cabezal excava el suelo y la barrena mueve el suelo removido de regreso al punto inicial (Sterling, 2020).

La perforación de barrena horizontal es una técnica que consiste en direccionar un taladro horizontal revestido a través del suelo para instalar tuberías desde un eje de transmisión hasta uno de recepción, los escombros resultantes se transportan al punto de inicio gracias a las paletas rotatorias del tornillo sin fin; se emplea en suelos blandos como arcilla, limo y arena; en la Figura 10 se emplea el proceso de instalación en terreno (Onsarigo & Adamtey, 2020).



Figura 10 Perforación de barrena horizontal. Fuente (Onsarigo & Adamtey, 2020)

El proceso constructivo consiste en una perforación piloto que se nivela para que siga el alineamiento deseado, la cabeza perforadora se direcciona y emite señales con información que permite maniobrarla, tras perforar se reemplaza la cabeza perforadora por una cortadora o escariador que ensancha el barrenado hasta el diámetro deseado, finalmente la tubería ensamblada se hala desde el pozo de salida hasta el de entrada (Villanueva Valencia, 2020).

3.7.3 Perforación Direccional Horizontal (Horizontal Directional Drilling)

Método de construcción sin zanja para instalar tuberías empleado en proyectos que representan un reto como cruzar bajo ríos, lagos, entre otros. El proceso consiste en perforar y

escariar un orificio piloto con un diámetro del doble de la tubería a instalar y un ángulo de entrada de 8 a 16° (Dong et al., 2020).

Los factores que influyen en la aplicación de ésta tecnología son las fuerzas de tracción como base del diseño, elección del equipo perforador, la estabilidad y reducción de arrastre de la tubería (Cai & Polak, 2019).

3.7.4 *Microtunelado (Microtunneling)*

Tecnología para instalar tubería mediante empuje hidráulico con un escudo de cara cerrada operado a control remoto y guiado con láser u otro dispositivo topográfico que proyecta un rayo lo que garantiza la precisión direccional de la tubería, esta tecnología mantiene un equilibrio de presión en el frente de corte que evita el colapso del terreno (ISST, 2019).

3.7.5 *Hincado de tuberías (Pipe Ramming)*

Sistema empleado para tuberías de acero, consta de un anillo de corte que refuerza el perfil transversal de las puntas de los tubos para romper los obstáculos rocosos, reduciendo la fricción y protegiendo el recubrimiento del tubo como se ilustra en la Figura 11, se deben tener contemplar aspectos como la alineación de la tubería, el espacio que ocupan en la superficie el pozo de salida y de lanzamiento, la longitud de aplicación de hasta 80 metros y que se pueden alcanzar diámetros de hasta 1,5 metros (Villanueva Valencia, 2020).

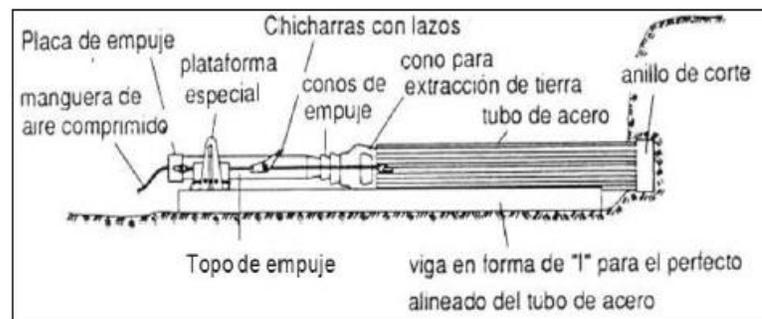


Figura 11 Equipo Hincado de tuberías. Fuente (Villanueva Valencia, 2020)

5 Estado del arte

Tras la segunda guerra mundial surgió la necesidad de reconstruir el continente europeo y mejorar la infraestructura y en el año 1946 Melsheimer construyó túneles que transportaban gas y petróleo con métodos de perforación dirigida, cincuenta años después en 1994 operaban 700 plataformas de este tipo en Estados Unidos y 300 en Europa (Felicidad et al., 2016).

En el año 1980, Reino Unido desarrolló el método Trenchless de rotura de tuberías aplicada a tuberías fundidas de gas y posterior de acueducto y alcantarillado, emplea fuerza estática o neumática para fragmentar una tubería existente; en América del Norte entre 2007 y 2010 se ejecutaron 886 proyectos con este método y su aplicación se muestra en la Figura 12, donde el alcantarillado sanitario representó un 52,8%, agua potable 24,4%, alcantarillado pluvial 13,1% y laterales de servicio 9,7% (Ariaratnam et al., 2014).

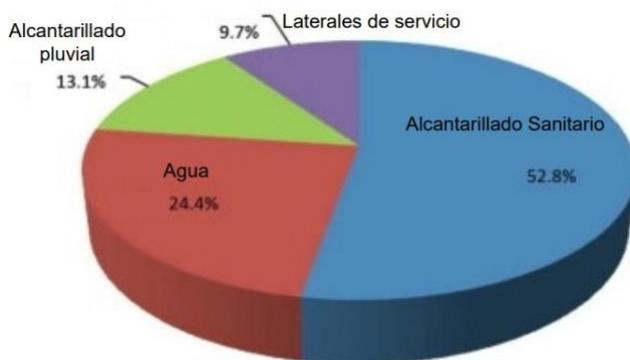


Figura 12 Proyectos ejecutados con rotura de tuberías. Fuente (Ariaratnam et al., 2014) Trad. del inglés

En 1986 se fundó la Sociedad Internacional para Tecnología Trenchless (ISTT) que incentivó la consolidación de sociedades con el mismo fin en diferentes países del mundo como Japón, Holanda, Suecia, Alemania, Francia y Estados Unidos inicialmente, en la actualidad existen 29 sociedades a nivel mundial entre las que destaca Colombia (Istt, 2020).

En China implementaron tecnologías Trenchless desde el primer simposio en el año 1996 en Beijing (Pekín), desde entonces han alcanzado significativos avances, cuentan con

200 contratistas dedicados a la construcción Trenchless y más de 2000 máquinas perforadoras direccionales horizontales, también han adoptado otros métodos como la perforación de micro túneles, la elevación, rotura y embestida de tuberías (Ma & Najafi, 2008).

La Universidad Tecnológica de Kielce de Polonia en 1991 fue pionera en el uso del sistema de circuito cerrado de televisión (CCTV) para inspeccionar tuberías, se empleaba un dispositivo portátil con una cámara de visión frontal a blanco y negro, colocada sobre patines y empujada a lo largo de la tubería con un cable flexible; en 2011 el sistema se modernizó con una camioneta equipada para monitorear, medir pendientes longitudinales, grietas, deformaciones y otros, los resultados obtenidos con este proceso de inspección se evidencian en la Figura 13 (Kuliczowska & Zwierzchowska, 2016).

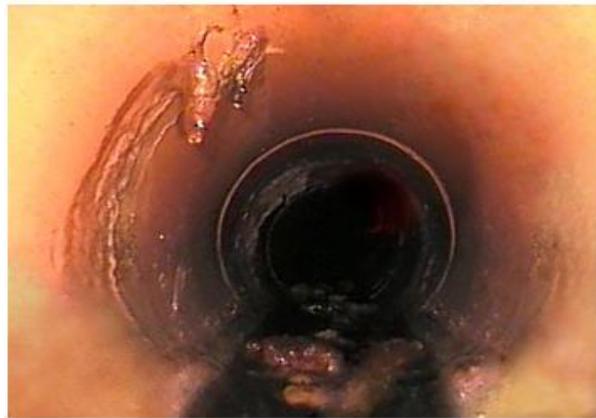


Figura 13 Inspección CCTV de tuberías. Fuente (Kuliczowska & Zwierzchowska, 2016)

El auge alcanzado por las tecnologías Trenchless fue tal que la empresa alemana Tracto-Technik en el año 2000 diseñó un robot llamado “Dragón de barro perforante” con un cabezal cónico, un dispositivo de giro y un equipo de impacto que revestía tuberías de polietileno, PVC y cables de fibra óptica (Zhonglin et al., 2006).

Otro sistema de estructura subterránea es el túnel de servicios públicos multipropósito, que permita la colocación, renovación, mantenimiento, reparación o revisión del servicio sin la

necesidad de realizar excavación (Luo et al., 2020). Adicional estas tecnologías de detección MTU permite determinar también las condiciones del suelo (Hao et al., 2012).

Más allá de los avances ingenieriles para instalar y renovar tuberías se busca la inspección y posterior análisis de las tuberías existentes, Estados Unidos emplea diversos programas con este fin, el Programa de evaluación y certificación de tuberías (PACP) analiza el estado de las tuberías, el SCREAM analiza alcantarillados usando principios científicos y matemáticos, el Método de Atributos Múltiples (MAM) calcula un puntaje de condición viable, el Trenchless Assessment Guide (TAG) incluye una base de datos en línea de los métodos para renovar las tuberías y el CREST evalúa costos, la vida útil y productividad de las alternativas de renovación (Vladeanu & Matthews, 2018).

La Sociedad Norteamericana de Tecnología sin Zanjas (NASTT) desarrolló un conjunto de métodos, materiales y equipos para la rehabilitación e instalación de infraestructura subterránea provocando una perturbación mínima en las áreas adyacentes, el criterio de selección se basa en un modelo y un análisis que involucra costo, vida útil y productividad para diferentes materiales, diámetros y defectos de alcantarillas (Matthews et al., 2018).

El Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC) en Portugal también desarrolló un software, el AWARE-P entre 2009 y 2013, que planifica proyectos de aguas residuales y contribuye a la gestión de activos de infraestructura al abordar la necesidad de un (PDCA) plan-hacer-verificar-actuar (Alvisi & Franchini, 2009).

Los avances en la tecnología Trenchless permitieron el desarrollo de un software que simula las propiedades de resistencia para construir tuberías de dos capas, tubería existente y revestimiento protector, determinando el espesor efectivo de recubrimiento (Orlov, 2016).

Por otra parte, las metodologías BIM (Building Information Modeling) aplicadas a la infraestructura subterránea permiten ingresar, almacenar y administrar datos de las propiedades del terreno, las estructuras involucradas e interferencias, información de la tubería y características de los materiales; para las tecnologías sin zanja el acceso a modelos 3D minimiza los riesgos que se puedan presentar durante la ejecución del proyecto, en donde la calidad de los datos y su visualización en el modelado son cruciales para tomar acciones necesarias oportunamente; en la Figura 14 se muestra la ubicación de un tramo de alcantarillado que ha sido sometido a evaluación dentro del entorno BIM (Chapman et al., 2020).



Figura 14 Metodología BIM para la construcción de un tramo de alcantarillado. Fuente (Chapman et al., 2020)

El sistema de modelado de sistemas SysML también permiten abstraer información constructiva de un proyecto, el modelo permite capturar y cuantificar los flujos esenciales, con el objetivo de evaluar la sostenibilidad, se aplicó para un proyecto de instalación de tuberías con la tecnología sin zanja Perforación direccional horizontal, que permite simular diferentes espacios, identificar las actividades y procesos para optimizarlos (Matar et al., 2017).

En Colombia las tecnologías Trenchless fueron implementadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en los años ochenta con un megaproyecto llamado Bogotá IV, que tenía como objeto instalar tuberías de un metro de diámetro y

longitudes entre 30 a 40 metros (Gutiérrez, J. 1997).

El auge de las tecnologías sin zanja en Colombia ha aumentado desde el año 2009, gracias a la fundación del Instituto Colombiano de Tecnologías de Infraestructura Subterránea (ICTIS) que busca difundir conocimientos e información sobre herramientas de diseño para la ejecución de proyectos sin zanja, basándose en estudio de casos (Ictis, 2020).

El interés por esta tecnología en Colombia es muy amplio y ha llevado a la ejecución de proyectos como Centro Parrilla en Medellín para el año 2012, que permitió la rehabilitación de 40.7 km de redes de acueducto y 34.6 km de alcantarillado, donde se implementaron tecnologías Trenchless en un 67% para acueducto y 71% para alcantarillado, tales como Close Fit Lining, Cured in place pipe” Pipe Bursting, “Horizontal Directional Drilling y Pipe Jacking (EPM, 2019).

Otro proyecto ejecutado recientemente en Colombia, fue la renovación del Colector de La Vieja y Las Delicias en Bogotá que drena las aguas lluvias y residuales del sector oriental en 15 barrios de la ciudad y cumplió 50 años de construcción, el Colector La Vieja consta de 3.52 km y Las Delicias 2.81 km, se implementaron métodos como el Pipe Jacking y el Spiral Wound para restaurar secciones de tubo formando enrollados internos sin comprometer corredores viales (Acueducto, 2019).

Por otra parte, cabe mencionar que la empresa colombiana BESSAC ANDINA S.A.S. se fundó en el año 2010 y es pionera en Colombia en la construcción, mantenimiento y rehabilitación de redes en servicio para alcantarillado, acueducto, gas, energía y telecomunicaciones; empleando tecnologías Trenchless eficientes y económicas, algunos de los proyectos ejecutados en la ciudad de Bogotá se muestran en la Tabla 1 (Bessac, 2020).

Tabla 1 . Proyectos ejecutados por BESSAC ANDINA en Bogotá. Fuente (Bessac, 2020)

PROYECTO	FECHA	DIÁMETRO (mm)	LONGITUD (m)
Construcción del interceptor de alcantarillado sanitario Zona Franca	2019-ACTUALMENTE	1200	2670
Construcción del colector pluvial Calle 183	ABR 2019-AG 2019	1200	438,43
Colector la Vieja y las Delicias	DIC 2018-NOV 2019	1700	605
Construcción del Bypass de la estación bombeo el recreo al interceptor Fucha Tunjuelo	NOV 2018 - EN 2019	1400	409,86
Cruce Avenida Ciudad de Cali calle 10 - Castilla Nueva	NOV 2016 - EN 2017	2000	62,5
Colector alcantarillado pluvial de los barrios Marco Fidel Suárez y San Jorge Etapa III	AG 2015 - MY 2016	1200-1600	651,7
Construcción del colector de la Calle 169B - Urbanización Parques De Granada	AG 2014 - NOV 2014	1200	203,5
Colector de la Calle 169B entre canal Córdoba y La Av. Boyacá	MZO 2014- OCT 2014	1400-2000	948,8
Colectores alcantarillado pluvial en los sectores Las Flores, Versalles, Villa Carmenza, Boston Oriente, Boston Occidente Y Avda. Centenario - Fontibón	DIC 2012-JUL 2013	600-900	672
Intersección a desnivel de la Avenida Laureano Gómez por la calle 94 y conexión con la Avda. Santa Bárbara	FEB 2013 - FEB 2014	900-1700	1107,6
Drenaje de aguas residuales del proyecto de vivienda Ciudad Verde	MY 2013 - DIC 2013	1200	331,7
Colector de la Calle 6ta al sistema de Transmilenio entre troncales Caracas Y NQS	ABR 2013 - NOV 2013	1600	442,5
Alcantarillado aguas residuales Avenida Primero De Mayo	JUN 2012 - DIC 2012	600	446,5
Interceptor Canoas	ENERO 2012	1400	82
Alcantarillado aguas lluvias en la zona VII del Relleno Sanitario Doña Juana	OCT 2011 - EN 2012	1200	237,5
Interceptor alcantarillado sanitario del Canal Arzobispo	SEP 2011 - DIC 2011	1200	198
Colector aguas lluvias en el costado sur del deprimido del Concejo Avenida Calle 26	My 2011 - JUL 2011	600	116
Canalización del Rio Fucha interceptor izquierdo del rio Fucha Pondaje	MZO 2011 - AG 2011	600	414
Colector de alcantarillado sanitario Calle 187	AG 2010 - ABR 2011	1200	938

Troncal Transmilenio Calle 26	MY 2010 - SEP 2010	1600	865
Colector alcantarillado pluvial Autopista Norte Calles 180 A 192	NOV 2009-MZO 2010	1600	833,4
Diseño y construcción del interceptor Río Tunjuelo Bajo	ABR 2008 - OCT 2010	600	1600

Un estudio de caso desarrollado con tecnologías Trenchless, es el túnel hidráulico en Beihai en China, construido con el método de túnel vertical (VTM), donde un tubo vertical se levanta desde un túnel horizontal existente hasta la superficie del suelo; el proyecto se localiza en la zona industrial del puerto de Tieshan, aproximadamente a 41 kilómetros de la ciudad de Beihai, China, las generalidades del proyecto se observan en la Figura 15 (Wang et al., 2021).

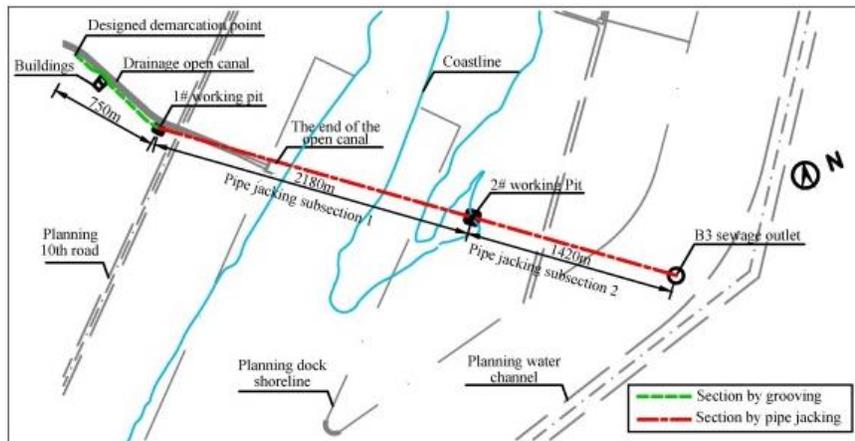


Figura 15 Generalidades del proyecto en Beihai. Fuente (Wang et al., 2021)

Se emplearon dos métodos constructivos, en la primera zona con ranurado y la zona restante se ejecutó con la tecnología Trenchless Pipe Jacking, para la que se contempló la construcción de dos pozos de trabajo, las longitudes para las subsecciones 1 y 2 fueron de 2.180 metros y 1.420 metros respectivamente, se instalaron 29 tuberías verticales para drenar las aguas residuales, con 12,5 metros de altura; este método mostró una alta eficiencia en la construcción; se emplearon cuatro gatos invertidos cada uno con la capacidad de 100 toneladas, la primera sección de la tubería vertical se enterró previamente durante la construcción de la tubería

horizontal, la segunda sección de la tubería vertical se sueldó con la primera sección de la tubería vertical enterrada previamente y después de que la soldadura superó la prueba ultrasónica, la primera sección de tubo vertical se elevó aplicando una fuerza de elevación remotamente (Wang et al., 2021).

Otro proyecto construido con la tecnología Pipe Jacking, es el paso subterráneo peatonal en Nanjing, China diseñado para transitar perpendicularmente bajo la concurrida avenida Jiangdong Road y atravesar los túneles de protección debajo de la línea 2 del metro de Nanjing como se observa en la Figura 16, tiene un ancho de 7 metros y una altura de 4,3 metros, se elevó 94,5 metros en arcilla limosa bajo una carretera transitada con 6,2 metros de suelo de sobrecarga; el eje de arranque y eje de recepción se construyeron en los extremos de la línea de elevación de la tubería (Zhang et al., 2016).

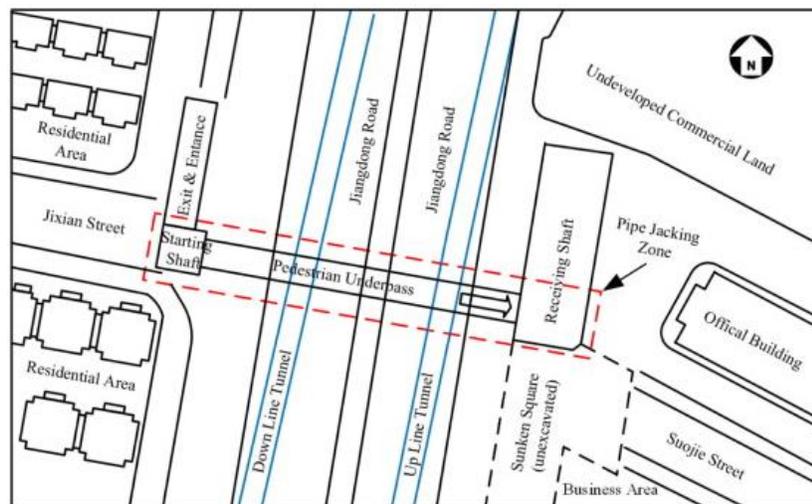


Figura 16 Localización del proyecto en la avenida Jiangdong. Fuente (Zhang et al., 2016)

En el diseño y construcción del proyecto, la excavación de los pozos de inicio y recepción no influyó en el desplazamiento vertical de los túneles, pero si en el desplazamiento horizontal, el proceso de elevación de tuberías se dividió en tres fases, incluidas la fase de asentamiento

inicial, la fase de elevación rápida y la fase de elevación constante, se llevó a cabo una simulación numérica y un monitoreo de campo que permitieron retroalimentar la deformación del túnel y del suelo, y así ajustar variables significativas oportunamente, tales como la fuerza de elevación, la velocidad de elevación, el volumen de lechada, la presión de lechada y otros parámetros para reducir la influencia de la construcción en el medio ambiente; el proyecto se completó con éxito y en el tiempo previsto, el resultado final se observa en la Figura 17 (Zhang et al., 2016).



Figura 17 Paso subterráneo peatonal terminado. Fuente (Zhang et al., 2016)

6 Planteamiento del Problema

En Colombia actualmente la población total oscila en los 50 millones de habitantes donde el 76,02% reside en las cabeceras municipales del país, cuando a mediados de los años cincuenta tan solo el 38.7% de la población total residía en estas zonas, estas cifras muestran una alta migración a las ciudades en los últimos años debido a factores económicos y sociales principalmente (DANE, 2018). El acelerado crecimiento poblacional requiere la optimización y mejoramiento de los procesos necesarios para satisfacer las necesidades básicas de la población, tales como el suministro de servicios públicos.

En el (RAS) Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, se establece que el período de diseño para las redes de alcantarillado de aguas lluvias y residuales, es de treinta años para sistemas con un alto grado de complejidad y veinticinco años para los demás sistemas (MINVIVIENDA, 2016). En cuanto al sistema de acueducto, el período de diseño depende de la tasa de crecimiento de la población, la curva de demanda y de la programación de las inversiones, para los sistemas con nivel de complejidad bajo y medio es de veinticinco años y para el nivel alto de treinta años (Ministerio de Vivienda, 2017).

En Bogotá aproximadamente el 62% de las tuberías alcantarillado y el 38% de acueducto tienen entre 50 y 80 años de construcción, han completado su vida útil y ésta obsolescencia implica graves afectaciones a la población y la infraestructura vial; cabe mencionar que la ciudad cuenta con 4.000 kilómetros de alcantarillado sanitario, 2.500 kilómetros de alcantarillado pluvial, 517 kilómetros de tubería matriz y 8.000 kilómetros de redes menores de acueducto e intervenir estas obras representa un desafío debido al limitado espacio por la urbanización y los corredores viales (GÓMEZ, 2012).

A partir de lo anterior se origina la pregunta: ¿En qué consisten las tecnologías

Trenchless para instalar y renovar tuberías y como ha sido su implementación en la ciudad de Bogotá?

7 Metodología

Este documento está enmarcado bajo la metodología de investigación descriptiva, en donde se presentan las actividades y procesos para cumplir con una finalidad específica, como lo es la rehabilitación e instalación de tuberías de acueducto y alcantarillado, con este método se recopila y analiza la información de tal forma que sea entendible para el lector.

El desarrollo de este trabajo comprende diferentes etapas mediante la recopilación documental en bases de datos verídicas como técnica de investigación; inicialmente contextualizar las tecnologías Trenchless para rehabilitar e instalar tuberías y su funcionamiento; conocer el diagnóstico de los antecedentes en Colombia y a nivel mundial sobre el auge e implementación que han tenido estas tecnologías.

La información sobre el estudio de caso fue suministrada por la empresa Ingeniería Hidráulica y de Trenchless S.A.S. (I.H.T. S.A.S) encargada de la Revisión del diseño para la construcción de la manija matriz de acueducto y obras complementarias, que conforman la fase II de la rehabilitación del tramo 3 Tibitoc-Casablanca.

Finalmente se procede con un análisis técnico de los documentos, bases de datos y planos suministrados, con enfoque en los métodos y procedimientos empleados; el resultado del análisis también se contextualiza en la discusión de resultados y conclusiones del documento, lo mencionado anteriormente se resume en la Figura 18.

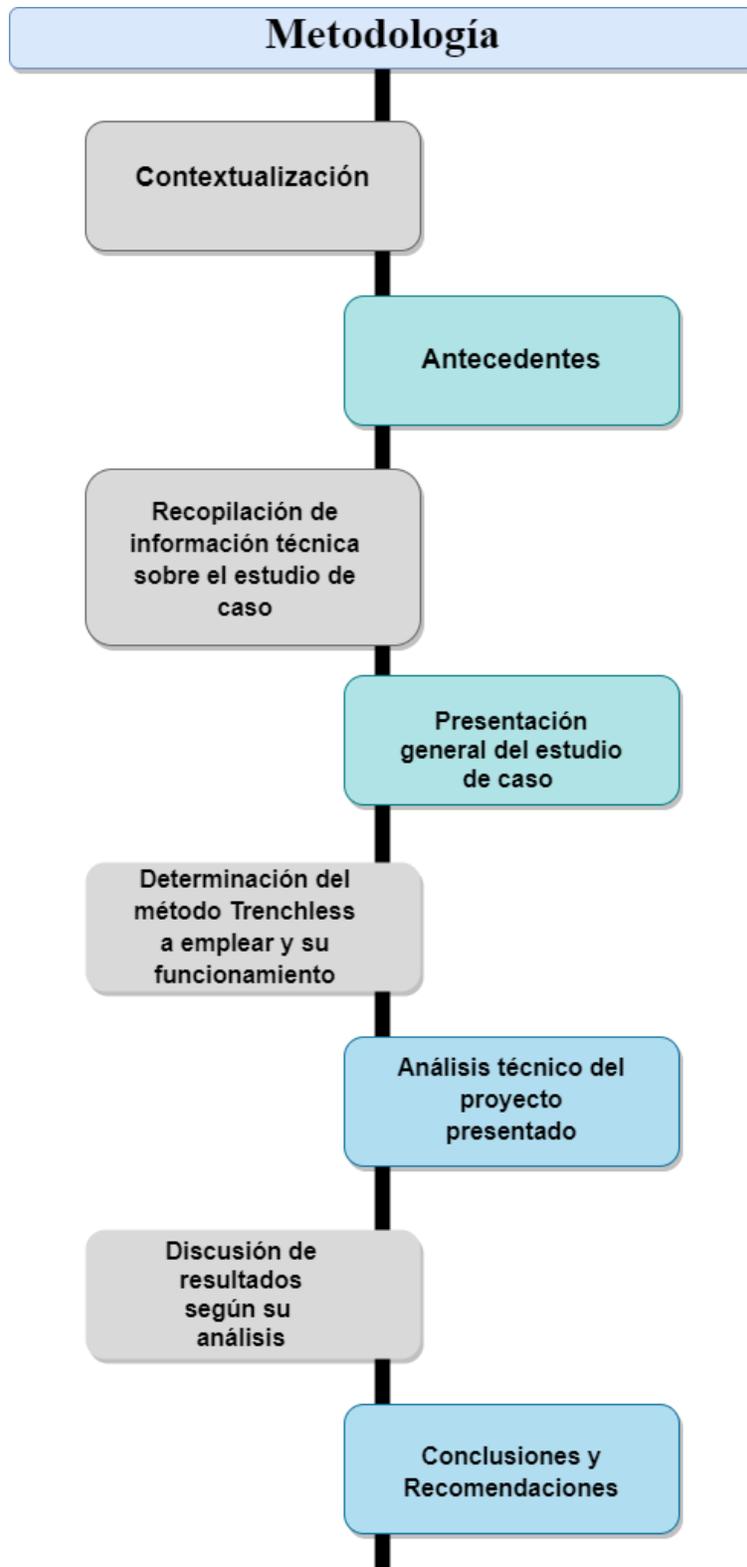


Figura 18 Metodología. Fuente (Elaboración propia)

8 Estudio de caso

La empresa I.H.T. S.A.S. (Ingeniería Hidráulica y de Trenchless S.A.S.) suministró la información del proyecto presentado como estudio de caso, con enfoque en la aplicación de las tecnologías sin zanja o Trenchless en la ciudad de Bogotá, quien a cargo del ingeniero Santiago Villanueva realizó la revisión del diseño del proyecto:

“CONSTRUCCIÓN DE LA MANIJA MATRIZ DE ACUEDUCTO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS, QUE CONFORMAN LA FASE II DE LA REHABILITACIÓN DEL TRAMO 3 DE LA LÍNEA TIBITOC-CASABLANCA, QUE SE LOCALIZARÁ EN LA AV. BOYACÁ ENTRE CALLE 80 Y AV. FERROCARRIL DEL SUR”.

8.1 Localización

Este proyecto se localiza en el corredor occidental de la Avenida Boyacá, entre la Calle 80 y la Transversal 72D Bis Sur (Avenida Ferrocarril del sur) en la ciudad de Bogotá D.C., tal como se evidencia en la Figura 19.

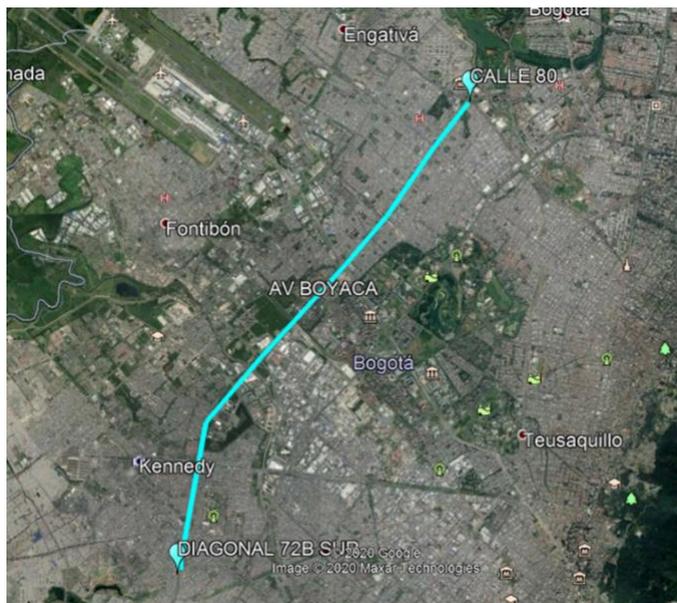


Figura 19 Localización del proyecto. Fuente (Google Earth)

8.2 Generalidades

El proyecto consiste en la construcción de una nueva tubería con un diámetro de 60 pulgadas para la red matriz de acueducto Tibitoc - Cantarrana tramo 3 y longitud de 16.300 metros aproximadamente a cargo de *Consortio Alianza 744*; la revisión del diseño se realizará para los tramos que se construirán utilizando la técnica de micro túneles e hincado y para los tramos que se construirán mediante zanja abierta, involucrando todas las actividades de instalación de accesorios y válvulas en línea, la instalación de pasos elevados en los cruces de los Canales Fucha y San Francisco, la instalación de los pasos subterráneos bajo la línea Férrea que va paralela al Canal San Francisco y las obras complementarias que incluyen la construcción de las derivaciones e interconexiones con las respectivas cámaras que serán utilizadas para interconectar la manija a construir con la línea Tibitoc-Casablanca garantizando su adecuada operatividad.

Los aspectos a evaluar para las actividades mencionadas se describen en los siguientes ítems:

- Viabilidad constructiva.
- Respaldo en cantidades de obra.
- Interferencias con redes húmedas y secas.
- Cercanía de las obras proyectadas a predios y a viviendas.
- Ocupación del medio de tráfico.

8.3 Descripción de la tubería Tibitoc – Casablanca Tramo 3

La tubería Tibitoc-Casablanca fue fabricada por la empresa American Pipe Construction bajo la norma AWWA C-301 de 1964, entre los años 1968 y 1972, cuenta con un diámetro de 78 pulgadas y es de tipo PCCP, un cilindro de acero embebido en concreto enrollado con un

alambrón de alta resistencia y revestido con mortero de cemento para proteger a la tubería contra la corrosión, además proporciona un empalme hermético sellado con un empaque de caucho redondo (Aldana, 2017).

La también denominada línea Tibitoc-Casablanca suministra agua potable a toda la zona occidental de Bogotá, que corresponde a las localidades de Engativá, Fontibón, Kennedy y Bosa y de forma parcial las localidades de Tunjuelito, Ciudad Bolívar y Puente Aranda y en la zona norte a los municipios de Chía y Cajicá; es abastecida por la planta Tibitoc ubicada en el municipio de Tocancipá y cuenta con dos tanques de almacenamiento (Aldana, 2017).

8.4 Rehabilitación de la tubería Tibitoc-Casablanca

La rehabilitación de esta tubería matriz se hace necesaria debido a las fallas presentadas quince años después en las tuberías de PCCP de grandes diámetros fabricadas bajo la norma AWWA C-301/1964 y requirió modificaciones en 1984. La tubería Tibitoc-Casablanca entre 1978-1989 presentó once fallas, dentro de las cuáles dos fueron catastróficas e implicaron pérdidas humanas (Aldana, 2017).

Otro factor que influye en la rehabilitación son las características de los corredores donde se instalaron, puesto que para su construcción en el año 1972 aún no se había construido la Avenida Boyacá (Aldana, 2017).

Por lo anterior la EAAB proyectó estudios para rehabilitar esta línea matriz y garantizar el correcto suministro de agua potable en la ciudad y tras los resultados en 1993 inició un contrato de consultoría con la firma Jason Consultants, que indicó que la mejor alternativa era la inserción de encamisados de acero o (GRP) Poliéster reforzado con fibra de vidrio y también sectorizó la línea en tramos con el fin de priorizar su rehabilitación, la sectorización dada se presenta en la Figura 20 (Aldana, 2017).

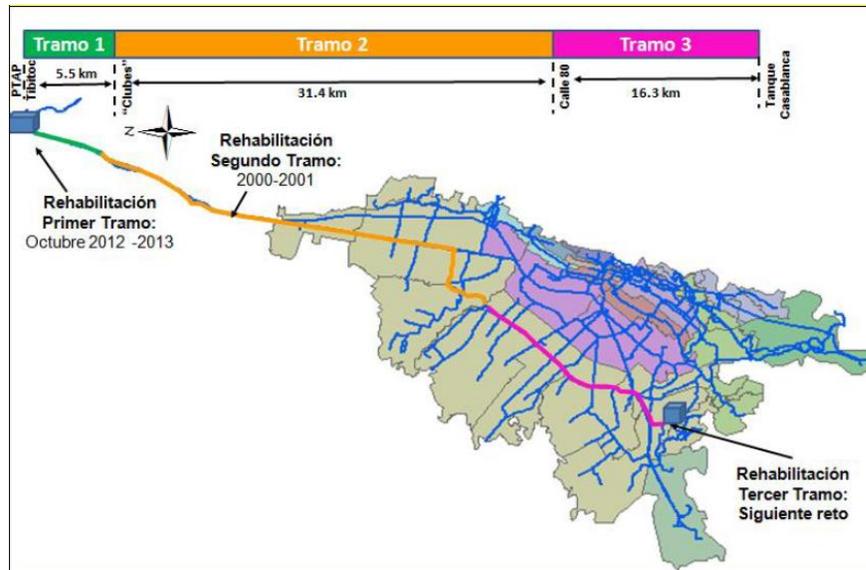


Figura 20 Tramos de la Línea Tibitoc-Casablanca Fuente (Aldana, 2017).

8.5 Obras a desarrollar para la rehabilitación de Tramo 3

En el año 2015 la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá realizó la contratación de los diseños detallados para la rehabilitación del Tramo 3, con un estudio de factibilidad que incluyó una evaluación de materiales y técnicas, los costos directos, los costos indirectos, impactos ambientales y sociales (Aldana, 2017).

La mejor alternativa consiste en rehabilitar la tubería matriz en toda su longitud y construir una obra complementaria paralela con diámetro de 60 pulgadas, para garantizar el suministro de agua potable con continuidad y generar mayor confiabilidad (Aldana, 2017).

8.6 Selección de la Tecnología Trenchless

La tecnología Trenchless seleccionada para la instalación de la red matriz de acueducto Tibitoc-Casablanca es el PIPE JACKING; su selección se basó en los criterios expuestos en la Figura 21.

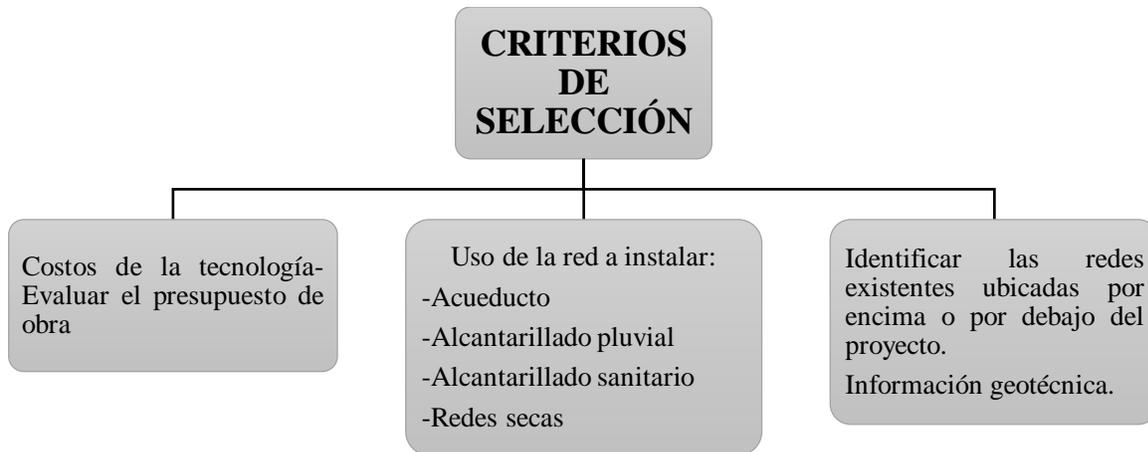


Figura 21 Criterios de selección Tecnología Trenchless. Fuente (Elaboración propia)

La instalación con Pipe Jacking se ejecutará en tres tramos a lo largo del proyecto:

- Primer tramo: Entre la calle 80 y la calle 23, abscisas K0+430 hasta K5+440 con aproximadamente 5010 metros de longitud.
- Segundo tramo: Entre la Calle 12 bis y la Calle 5A, abscisas K7+500 hasta K9+600 con aproximadamente 2100 metros de longitud.
- Tercer tramo: Entre la Av. 1 de mayo y la transversal 72D Bis sur abscisas K10+890 hasta K12+480 con aproximadamente 1580 metros de longitud.

El método de Pipe Jacking requiere la construcción de pozos de trabajos de dos tipos (pozos de salida y pozos de lanzamiento) que cumplan con los parámetros establecidos en la NS-077 versión 3.2, norma expedida por la (EAAB) Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá; en el diseño de estos pozos se debe tener en cuenta el funcionamiento de la máquina para hincado, el montaje de accesorios y válvulas, los tamaños de las cámaras, la instalación de tuberías y demás ítems que permitan un correcto funcionamiento y construcción.

También es importante verificar las áreas de trabajo donde se ubicarán las máquinas de hincado como la tuneladora, retroexcavadoras, contenedores y otros, además de la posible cercanía con los predios de la zona.

8.6.1 Descripción pozos de trabajo

El diseño de los pozos de trabajo es fundamental para la correcta ejecución de la obra y se debe basar en la información geotécnica de la zona a intervenir, es muy importante el diseño de los pozos, la cimentación y el diseño de obra complementarias como los entibados, anclajes, muros de reacción y las losas de fondo (Villanueva Valencia, 2020).

Se proyectó la construcción de 12 pozos de salida (nombrados con las letras PS) y 11 pozos de lanzamiento (nombrados con las letras PL) para poder llevar a cabo la instalación de la tubería con la tecnología Trenchless Pipe Jacking; en la Tabla 2 se consolida información de cada pozo como la nomenclatura, tipo de pozo, ubicación, abscisado, accesorio instalado, dimensiones, volumen de excavación, la cota eje del túnel y la cota de superficie.

Tabla 2 Pozos proyectados para la instalación con Pipe Jacking. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)

POZO No.	POZO PIPE JACKING		UBICACIÓN	ABSCISADO	INSTALACIONES	DIMENSIONES EXTERNAS CÁMARAS DEFINITIVAS (incluyen muros)			VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m3)	Cota eje de túnel	Cota superficie
						LARGO mín. (m)	ANCHO mín. (m)	ÁREA mín. (m2)			
1	PS1	Pozo salida simple	DIAGONAL 79A	418,58	PURGA	9,94	5,23	52	594	2.540,94	2.549,15
2	PL1	Pozo lanzamiento doble	CL.75A	884,33	PITÓMETRO	7,84	5,30	42	451	2.543,24	2.551,12
3	PS2	Pozo salida doble	CL.73	1.257,27	DPS-2	6,65	6,34	42	248	2.547,25	2.551,67
4	PL2	Pozo lanzamiento doble	CL.70	1.734,08	VENTOSA	7,50	5,00	38	329	2.544,99	2.551,42
5	PS3	Pozo salida doble	CL.68B	1.973,86	PURGA	5,00	4,27	21	271	2.543,88	2.551,20
6	PL3	Pozo lanzamiento doble	CL.66	2.354,60	INTERCONEXIÓN 1	24,82	7,18	178	996	2.545,41	2.550,97
7	PS4	Pozo salida doble	CL.63F	2.948,75	PURGA	5,20	4,80	25	347	2.541,09	2.550,26
8	PL4	Pozo lanzamiento doble	CL.55A	3.419,08	VENTOSA	7,50	5,00	38	372	2.542,27	2.549,76
9	PS5	Pozo salida doble	CL.51	3.918,48	VENTOSA	5,06	3,21	16	167	2.543,52	2.549,04
10	PL5	Pozo lanzamiento doble	CL.26	4.486,71	DPS-4	7,75	6,67	52	514	2.541,02	2.549,25
11	PS6	Pozo salida doble	Av La Esperanza	5.053,36	VENTOSA	5,00	3,00	15	229	2.540,63	2.548,76

12	PL6	Pozo lanzamiento simple	3 Elefantes CL.23b	5.434,06	PURGA	7,00	5,60	39	376	2.540,42	2.548,10
13	PL7	Pozo lanzamiento simple	CL15 (Lafayette)	7.494,98	DPS-7	8,04	7,74	62	550	2.539,47	2.546,64
14	PS7	Pozo salida doble	CL.12	7.906,89	VENTOSA	5,00	3,00	15	207	2.540,71	2.547,90
15	PL8	Pozo lanzamiento doble	CL.10	8.314,07	PITÓMETRO	7,78	5,18	40	361	2.542,03	2.548,00
16	PS8	Pozo salida doble	CL.7C BIS	8.893,27	VENTOSA	5,06	3,21	16	198	2.543,88	2.550,72
17	PL9	Pozo lanzamiento doble	AV. LAS AMERICAS N	9.397,90	INTERCONEXIÓN 4	21,62	7,18	155	1.326	2.545,50	2.553,21
18	PS9	Pozo salida simple	AV. LAS AMERICAS S	9.601,57	VENTOSA	5,00	3,00	15	211	2.546,14	2.553,51
19	PS10	Pozo salida simple	CL. 34 SUR	10.890,00	<i>N/A</i>	5,00	3,00	15	193	2.548,73	2.555,33
20	PL10	Pozo lanzamiento doble	CL37 SUR	11.290,30	PITÓMETRO	7,67	5,09	39	393	2.547,31	2.555,32
21	PS11	Pozo salida doble	CRA. 72H	11.581,98	PURGA	6,26	5,59	35	413	2.546,30	2.556,22
22	PL11	Pozo lanzamiento doble	DIAG. 39 SUR	12.012,09	DPS-11	8,44	7,04	59	556	2.547,42	2.555,03
23	PS12	Pozo salida simple	TRANSV. 72 D BIS	12.485,50	<i>N/A</i>	5,00	3,00	15	184	2.548,34	2.554,57

8.6.1.1 Pozos de lanzamiento

Los pozos de lanzamiento son estructuras donde se instala la máquina tuneladora, la cual debe ser empujada por un sistema neumático, para llevar a cabo el empuje se requiere la construcción de un muro de lanzamiento, como se observa en la Figura 22 y el esquema general del pozo se presenta en la Figura 23.



Figura 22 Muro de lanzamiento Pozo de lanzamiento. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)

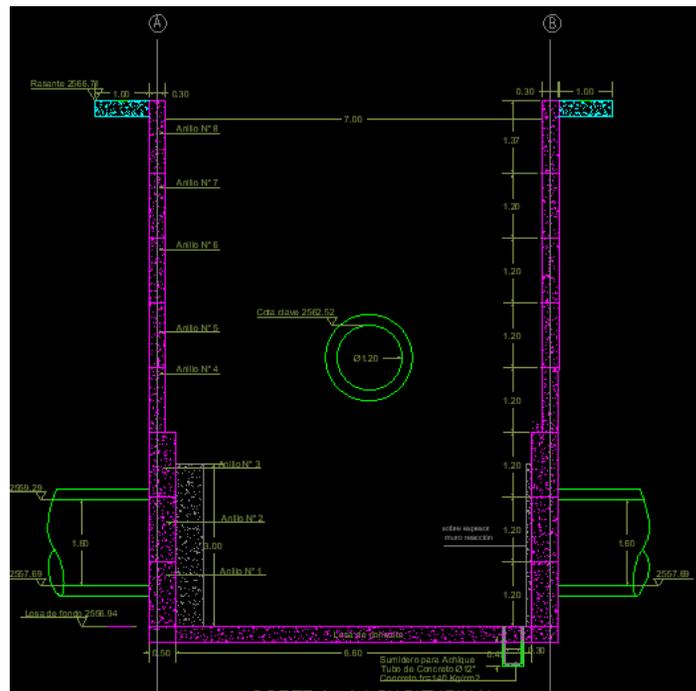


Figura 23 Esquema pozo de lanzamiento. Fuente (I.H.T. S.A.S, 2020)

8.6.1.2 Pozo de salida

El pozo de salida no requiere un muro de refuerzo, ésta estructura tiene la finalidad de recibir la máquina tuneladora, que ha sido enviada desde el pozo de lanzamiento con una trayectoria definida, el esquema se visualiza en la Figura 24.

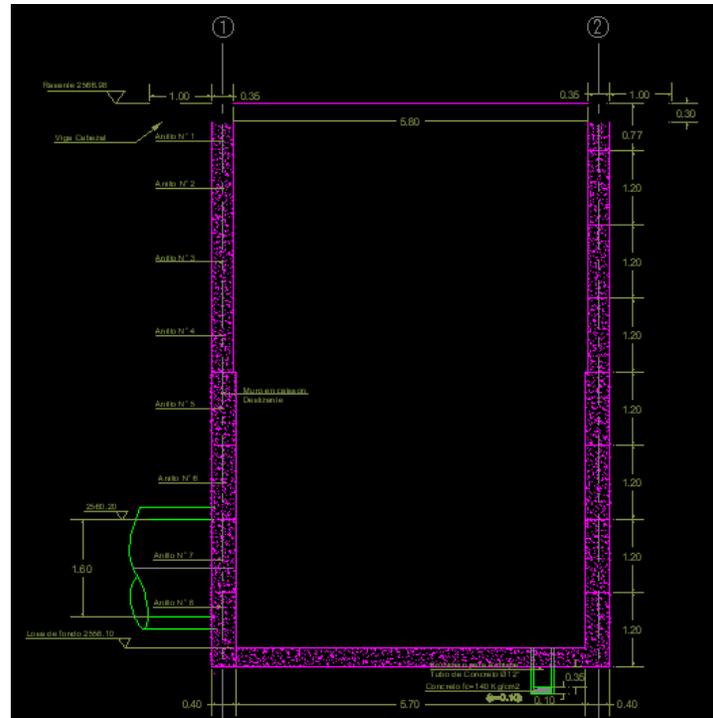


Figura 24 Esquema pozo de salida. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)

8.6.2 Instalación de accesorios del sistema de acueducto

Los pozos de trabajo deben contar con una estructura interna para instalar accesorios, en este caso para el sistema de acueducto, estos accesorios se instalan en estructuras llamadas cámaras que deben cumplir con los parámetros de diseño establecidos en la norma NS-O77 V3.2 EAAB y la descripción de los accesorios empleados en este proyecto se presenta a continuación:

- **Válvula de Purga:** Válvula utilizada para la limpieza y descarga de la red, tanto en redes matrices como en redes de distribución.
- **Válvula de Sectorización:** Son dispositivos que cierran el paso del agua en las

tuberías de distribución, con el fin de sectorizar la red. Usualmente son válvulas de compuerta con vástago fijo o válvulas mariposa con mecanismo de reducción de velocidad de cierre para evitar golpe de ariete.

- **Válvula de Ventosa:** Válvulas utilizadas para admisión y expulsión de aire en los procesos de vaciado y llenado de tuberías.
- **Válvulas Pitométricas:** Empleadas para medir variables hidráulicas del flujo del agua se ubicarán exactamente y en forma perpendicular en las claves de las tuberías.

8.6.3 Tuberías e hincado

Para el diseño de los tubos se deben contemplar las cargas hidrostáticas, cargas de manejo y almacenamiento, además de las fuerzas de fricción y fuerzas resultantes de las cargas excéntricas (Villanueva Valencia, 2020).

En el proyecto se emplearán dos máquinas tuneladoras que trabajarán simultáneamente, una se enfocará en el área norte del tramo (Tuneladora A) y la otra en el tramo sur (Tuneladora B), cada tuneladora realizará 10 hincas, las cuales se denotan en la Tabla 3, columna (Tuneladora-secuencia) con la letra A o B y un número que representa la hinca; por ejemplo la hinca 9 será realizada por la tuneladora A (A-9) saldrá desde el pozo de lanzamiento PL5 con una trayectoria definida y una longitud de 568,23 metros hasta llegar al pozo de salida PS5, los planos de este ejemplo se visualizan en las Figuras 26, 27 y 28 en anexos.

Tabla 3 Hincas proyectadas. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)

HINCA No.	ZONA	PL	PS	ABSCISADO INICIO (PL)	ABSCISADO FIN (PS)	L (m) de eje a eje de pozos	TUNELADORA - secuencia	TRAZADO
1	CL.75A hasta CL.DIAGONAL 79A	PL1	PS1	884,33	418,58	469,75	A-1	RECTO
2	CL.75A hasta CL.73	PL1	PS2	884,33	1.257,27	368,94	A-2	RECTO
3	CL.70 hasta CL.73	PL2	PS2	1.734,08	1.257,27	473,59	A-3	RECTO
4	CL.70 hasta CL.68B	PL2	PS3	1.734,08	1.973,86	239,78	A-4	RECTO
5	CL.66 hasta CL.68B	PL3	PS3	2.354,60	1.973,86	376,04	A-5	CURVO
6	CL.66 hasta CL.63F	PL3	PS4	2.354,60	2.948,75	587,06	A-6	RECTO
7	CL.55A hasta CL.63F	PL4	PS4	3.419,08	2.948,75	470,33	A-7	CURVO
8	CL.55A hasta CL.51	PL4	PS5	3.419,08	3.918,48	499,40	A-8	RECTO
9	CL.25C hasta CL.51	PL5	PS5	4.486,71	3.918,48	568,23	A-9	CURVO
10	CL.25C hasta CL.Av La Esperanza	PL5	PS6	4.486,71	5.053,36	566,65	A-10	RECTO
11	CL.23C hasta CL.Av La Esperanza	PL6	PS6	5.434,06	5.053,36	380,70	B-10	RECTO
12	CL15 hasta CL/IB BIS?	PL7	PS7	7.906,89	7.500,17	412,36	B-9	CURVO
13	CL10 hasta CL/IB BIS?	PL8	PS7	7.906,89	8.314,07	407,19	B-8	CURVO

14	CL10 hasta CL7C BIS	PL8	PS8	8.893,27	8.314,07	579,20	B-7	CURVO
15	AV. LAS AMERICAS Norte hasta CL.7C BIS	PL9	PS8	8.893,27	9.397,90	496,59	B-6	RECTO
16	AV. LAS AMERICAS Norte hasta AV. LAS AMERICAS Sur	PL9	PS9	9.601,57	9.397,90	199,08	B-5	RECTO
17	CL.37 SUR hasta CL. 34 SUR	PL10	PS10	11.290,30	10.890,00	400,53	B-4	RECTO
18	CL.37 SUR hasta CRA. 72H	PL10	PS11	11.290,30	11.581,98	291,67	B-3	RECTO
19	DIAG. 39 SUR hasta CRA. 72H	PL11	PS11	12.012,09	11.581,98	425,88	B-2	RECTO
20	DIAG. 39 SUR hasta TRANSV. 72 D BIS	PL11	PS12	12.012,09	12.485,50	473,40	B-1	CURVO
						TOTAL	8.686,37	

8.6.4 Costos

El costo de las tecnologías Trenchless se da por metro lineal de instalación y puede variar de acuerdo a las características del proyecto, en la Tabla 4 se muestran valores reales obtenidos bajo las cotizaciones de empresas nacionales que nos permite tener una visión del rango de los costos para estas tecnologías (Milena et al., 2016).

Tabla 4 Rango de costos Tecnologías Trenchless. Fuente (Milena et al., 2016)

TECNOLOGIA	DIAMETRO (IN)		RANGO DE COSTOS		FUENTE	OBSERVACIÓN
Auger Boring (AB)						
	27		\$ 1.230.918,55	\$ 1.538.648,19	PINTER 2013	Valor convertido de pesos a dolares y actualizado con el incremento del IPC 2016
	27		\$ 1.538.648,19	\$ 2.461.837,10	PINTER 2013	
Microtunneling (MT)						
	27		\$ 5.231.403,84	\$ 8.000.970,58	PINTER 2013	Valor convertido de pesos a dolares y actualizado con el incremento del IPC 2016
Horizontal Directional Drilling (HDD)			V/metro			
Minimo	4		\$ 240.000,00		Treltec Ingenieria Ltda - Cotización	
	6		\$ 390.000,00		Treltec Ingenieria Ltda - Cotización	
Mediano	8		\$ 560.000,00		Treltec Ingenieria Ltda- Cotización	
	10		\$ 800.000,00		Treltec Ingenieria Ltda- Cotización	
Maximo	12		\$ 1.176.000,00		Treltec Ingenieria Ltda- Cotización	
Pipe Ramming	Tuberia	Encamisado (Acero)	V/metro en suelos compresibles	V/ metro en roca		
	6	8	\$ 800.000,00	\$ 3.500.000,00	AINPRO S.A- Cotización	ALCANTARILLADO NOVAFORT
	8	12	\$ 1.200.000,00		AINPRO S.A- Cotización	ALCANTARILLADO NOVAFORT
	10	12	\$ 1.200.000,00		AINPRO S.A- Cotización	ALCANTARILLADO NOVAFORT
	12	16	\$ 1.500.000,00		AINPRO S.A- Cotización	ALCANTARILLADO NOVAFORT
	27	36	\$ 8.648.640,00	\$ 9.500.000,00	INGENIERIA, CONSTRUCCIONES Y SERVICIOS S.A.- Cotización	ALCANTARILLADO PVC
Pipe Jacking						
	27		\$ 2.000.242,65	\$ 3.538.890,83	PINTER 2013	Valor convertido de pesos a dolares y actualizado con el incremento del IPC 2016
	27		\$ 2.461.837,10	\$ 5.846.863,12	PINTER 2013	

9 Resultados y discusión

Los factores más influyentes en la implementación de la infraestructura subterránea para la ciudad de Bogotá obedecen al crecimiento de la población, que a su vez incrementa la demanda en redes de servicios públicos, y por otra parte las redes de alcantarillado y acueducto existentes han alcanzado su vida útil; además las tecnologías Trenchless reducen significativamente los impactos ambientales, sociales y económicos.

El sistema de distribución de agua de Bogotá abastece a una población de aproximadamente 9 millones de habitantes, las redes con las que cuenta son el resultado de más de 120 años de desarrollo e ingeniería y se requiere la optimización de los procesos de distribución, el desarrollo e implementación nuevos métodos para rehabilitar e instalar redes de alcantarillado y acueducto (Aldana & López, 2017).

La implementación de tecnologías Trenchless se ha impulsado en Colombia gracias a que es miembro de entidades como la Sociedad Internacional para Tecnología Trenchless (ISTT) y la fundación del Instituto Colombiano de Tecnologías de Infraestructura Subterránea (ICTIS) que tienen por objeto impartir conocimientos sobre la ejecución de proyectos sin zanja.

El proyecto presentado como estudio de caso es la rehabilitación del Tramo 3 de la Línea matriz Tibitoc-Casablanca ubicada bajo la Avenida Boyacá desde la Calle 80 hasta la Avenida Ferrocarril del sur, que consiste en la construcción de una red matriz paralela que garantizará la continuidad en la prestación del servicio de acueducto durante la ejecución de la obra, tal como se evidencia en la Figura 25, donde se indica la ubicación de la red existente y la red proyectada más cercana a la zona del andén; la red matriz se debe mover debido a que cuando se construyó en el año 1972 aún no se había construido la Avenida Boyacá y los cálculos de diseño de la red se realizaron bajo cargas de zonas verdes y actualmente ésta avenida es uno de los principales

Algunos de los aspectos constructivos que se deben tener en cuenta para la tecnología Pipe Jacking es la disponibilidad de espacio en la superficie por los equipos de operación requeridos para el manejo de la máquina tuneladora, además del espacio requerido para los pozos de lanzamiento y salida que pueden alcanzar dimensiones de hasta 9 por 4 metros (Villanueva Valencia, 2020).

Tras la recopilación de información sobre las técnicas Trenchless para rehabilitar y construir tuberías, su funcionamiento y antecedentes se logró identificar lo versátiles que pueden ser, porque a pesar que inicialmente representa un valor de inversión más elevado que la construcción tradicional a zanja abierta, durante el proceso constructivo y a largo plazo las ventajas son mayores, entre las que cabe destacar: la variedad de los diámetros y longitudes para las que se puede aplicar, la reducción de los efectos ambientales negativos, la eliminación de las afectaciones al tráfico y obras cercanas.

Desde un punto de vista técnico la tecnología Pipe Jacking presenta un alto rendimiento en suelos cohesivos, se puede implementar bajo el nivel freático y en zonas con temperaturas menores a 0° C; mientras que algunas desventajas son que no se puede implementar en suelos con rellenos antrópicos heterogéneos ni suelos rocosos que puedan comprometer el funcionamiento de la máquina tuneladora (Villanueva Valencia, 2020).

Es muy importante mencionar que este proyecto se está ejecutando desde el 3 de marzo del año en curso, bajo el contrato EAB 1-01-25400-01359-2019 por el Consorcio Alianza 744 compuesto por la empresa mexicana Recsa, Topos Hidromecánicos Mexicanos y la firma colombiana Alianza YDN; en la zona norte del Tramo 3 de la Línea Tibitoc, entre la Calle 76 y la Calle 75A (Ramírez, 2021).

10 Conclusiones

- Las Tecnologías Trenchless para instalar y renovar tuberías de alcantarillado y acueducto se describieron detalladamente, gracias al uso de fuentes bibliográficas con información verídica y confiable dentro de las que cabe resaltar las bases de datos a las que se tiene acceso por ser miembro de la Universidad Antonio Nariño. Además, ésta información se complementó con el análisis de documentos de proyectos desarrollados bajo este mismo enfoque y también fueron muy importantes los aportes de la empresa de ingeniería hidráulica I.H.T. S.A.S.
- Se realizó una revisión y descripción de la información referente al auge y desarrollo a nivel mundial que han tenido este tipo de tecnologías especialmente desde el nuevo siglo, además de los grandes beneficios que representa la implementación de las mismas en proyectos de ingeniería hidráulica.
- Dentro del análisis expuesto del estudio de caso se tuvo en cuenta que fuera un proyecto reciente o en proceso de planeación y ejecución, la empresa I.H.T. S.A.S. desde el año 2020 está llevando a cabo el estudio y diseño para la “Construcción de la manija matriz de acueducto y obras complementarias de la línea Tibitoc-Casablanca”, quien suministró documentación y planos del proyecto para presentar en el presente documento, teniendo en cuenta que toda la información sería usada bajo el carácter educativo, respetando los derechos de autor.

- Frente a la evidencia recaudada se realizó un análisis técnico de la información, en donde se destacan los planos de diseño y detalle, además de bases de datos en Excel que resumen las zonas a intervenir, los pozos de salida y lanzamiento a construir para instalar la máquina tuneladora, el número de hincas, longitud y otros parámetros para llevar a cabo la construcción de la red matriz con la tecnología Pipe Jacking.

11 Recomendaciones

- Teniendo en cuenta los grandes beneficios que presentan las tecnologías Trenchless, se sugiere la profundización en el desarrollo de estas técnicas e impartir información relevante que concientice a la sociedad de que las ventajas contrarrestan el valor económico que puede llegar a tener su implementación.
- Debido al desarrollo tecnológico e ingenieril a nivel mundial, se debe estar a la vanguardia de los nuevos procesos que surgen constantemente como lo son éstas tecnologías, por lo que se deben buscar los medios y recursos que permitan impulsar su implementación en el país.
- Es importante que los entes que regulan las normas de acueducto y alcantarillado en Colombia, incluyan en su contenido información técnica sobre los procesos constructivos, además de los beneficios que tienen las tecnologías Trenchless frente a los métodos convencionales a zanja abierta para la instalación y rehabilitación de tuberías, e incentiven a las empresas dedicadas a este tipo de construcciones a ponerlas en marcha.

- Para impulsar la creación de empresas dedicadas a estos procesos de ingeniería, se sugiere que el gobierno nacional brinde apoyo financiero para la investigación y la creación de empresas que permita ampliar la oferta en el mercado y tener una competencia de precios más justa.
- Se sugiere hacer un seguimiento al estudio de caso presentado en este trabajo de grado, en vista de que se está ejecutando y con la simple inspección visual de la zona intervenida se evidenciarán las múltiples ventajas que tienen para la ciudad como lo son las afectaciones medioambientales y al tráfico.

12 Referencias Bibliográficas

- Acueducto. (2006). PLAN MAESTRO DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO (Documento Técnico Soporte). <https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/empresa/DocumentotecnicoDTS.pdf>
- Acueducto. (2019, August 26). *Dos modernas tuberías recogerán el alcantarillado de la zona oriental de Bogotá*. <https://tinyurl.com/y2ysavww>
- Aldana, M. J. (2017). PROYECTO DE REHABILITACIÓN DEL TRAMO 3 DE LA LÍNEA TIBITOC-CASABLANCA. <https://ictis.org/images/docs/2017-09-25-no-dig-medellin-memorias/mauricio-jimenez.pdf>
- Aldana, M. J. (2017). Integral Network Management: A Case Study of Bogotá and the Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, EAB ESP. *Procedia Engineering*, 186, 654–665. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.282>
- Aldana, M. J., & López, F. S. (2017). Water Distribution System of Bogotá City and Its Surrounding Area, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAB E.S.P. *Procedia Engineering*, 186, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.281>
- Alvisi, S., & Franchini, M. (2009). Multiobjective Optimization of Rehabilitation and Leakage Detection Scheduling in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), 426–439. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2009\)135:6\(426\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2009)135:6(426))

- Ariaratnam, S. T., Lueke, J. S., & Michael, J. K. (2014). Current trends in pipe bursting for renewal of underground infrastructure systems in North America. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.04.003>
- Barbosa, G. (2013). APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS TRENCHLESS EN BOGOTÁ. Retrieved from https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1592/3/ARTICULO_APLICACION_DE_TECNOLOGIAS_TRENCHLESS_EN_BOGOTA.pdf
- Bessac. (2020). *CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES Y MICROTÚNELES*. <http://www.bessac-andina.com/images/files/brochure-Bessac-Andina.pdf>
- Cai, L., & Polak, M. A. (2019). A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.014>
- Chapman, D., Providakis, S., & Rogers, C. (2020). BIM for the Underground – An enabler of trenchless construction. *Underground Space (China)*, 5(4), 354–361. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.08.001>
- DANE. (2018). *Retroproyecciones de población con base en el CNPV*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Dong, S., Zeng, C., Ariaratnam, S. T., Ma, B., Yan, X., Li, Z., & Li, X. (2020). Experimental and performance analysis of reverse circulation reaming in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103128>
- EPM. (2013). *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín. E. S. P.* https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/normatividad_y_legislacion/agua/Norma_Diseño_Alcantarillado_2013.pdf
- EPM. (2019, May 7). *Con el proyecto Centro Parrilla, EPM renovó cerca de 42 kilómetros de redes de acueducto y 48 kilómetros de redes de alcantarillado*. <https://www.epm.com.co/site/epm-renueva-el-centro-de-medellin-con-el-proyecto-centro-parrilla>
- Felicidad, A. :, Santiago, M., & Marañón, C. O. (n.d.). *MÉTODOS DE EXCAVACIÓN SIN ZANJAS MEÉ TODOS DE EXCAVACIOÉ N SIN ZANJAS*. Retrieved October 23, 2020, from http://oa.upm.es/37225/1/Tesis_master_Felicidad_Minguez_Santiago.pdf
- Garayar, O., & César, J. (2015). *Análisis comparativo entre el método pipe bursting y el método tradicional en la renovación de tuberías de desagüe*. <http://hdl.handle.net/10757/556449>
- Gutiérrez, J. (1997). *Tecnología sin zanjas una solución para la instalación de tuberías subterráneas, sin excavación; estado de conocimiento usos y aplicaciones en Colombia [trabajo de grado], [Microfichas] Bogotá, Universidad Javeriana, Carrera de Ingeniería Civil.*

- GÓMEZ, Y. (2012, August 7). *La red de alcantarillado de Bogotá tiene más de medio siglo - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com*.
<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12107216>
- Hammerhead (2011), "Pipe Ramming Equipment", pdf disponible en:
<http://www.hammerheadmole.com>
- Hao, T., Rogers, C. D. F., Metje, N., Chapman, D. N., Muggleton, J. M., Foo, K. Y., Wang, P., Pennock, S. R., Atkins, P. R., Swingler, S. G., Parker, J., Costello, S. B., Burrow, M. P. N., Anspach, J. H., Armitage, R. J., Cohn, A. G., Goddard, K., Lewin, P. L., Orlando, G., ... Saul, A. J. (2012, March 1). Condition assessment of the buried utility service infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28(1), 331–344.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.10.011>
- Ictis. (2020, May 6). *Tecnología Sin Zanja*. <https://ictis.org/es/tecnologia-sin-zanja>
- ISST. (2019). *The International Society for Trenchless Technology (ISTT) - Glossary*.
<https://www.istt.com/index/glossary>
- Istt. (2020). *The International Society for Trenchless Technology (ISTT)*. <https://www.istt.com/>
- Kramer, S. R., McDonald, W. J., & Thomson, J. C. (1992). An Introduction to Trenchless Technology. In *An Introduction to Trenchless Technology* (pp. 1–16). Springer US.
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3058-9_1
- Kuliczowska, E., & Zwierzchowska, A. (2016). A qualitative analysis of early defects present in PVC-U sewers but not observed in rigid pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.03.013>
- Lueke, J. S., Ariaratnam, S. T., & AbouRizk, S. M. (2003). *Application of simulation in trenchless renewal of underground urban infrastructure*. 929–936.
<https://doi.org/10.1109/wsc.1999.816801>
- Luo, Y., Alaghbandrad, A., Genger, T. K., & Hammad, A. (2020). History and recent development of multi-purpose utility tunnels. In *Tunnelling and Underground Space Technology* (Vol. 103, p. 103511). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103511>
- Ma, B., & Najafi, M. (2008, July 1). Development and applications of trenchless technology in China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), 476–480.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.08.003>
- Matar, M., Osman, H., Georgy, M., Abou-Zeid, A., & El-Said, M. (2017). A systems engineering approach for realizing sustainability in infrastructure projects. *HBRC Journal*, 13(2), 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.04.005>
- Matthews, J. C., Allouche, E., Vladeanu, G., & Alam, S. (2018). Multi-segment trenchless technology method selection algorithm for buried pipelines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 295–301. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.01.001>
- Milena, S., Gutierrez, R., Lorena, C., & Garay, M. (2016). MATRIZ CUANTITATIVA DE

SELECCIÓN DE TECNOLOGIA TRENCHLESS PARA PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN DE ALCANTARILLADO EN COLOMBIA [UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA].

[https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14002/4/TRABAJO DE GRADO.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14002/4/TRABAJO_DE_GRADO.pdf)

- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico Sistemas de Acueducto*. Retrieved March 9, 2021, from <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulob-030714.pdf>
- MINVIVIENDA. (2016). *TÍTULO D Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias*. https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo_d.pdf
- Najafi, M. (2011). Pipeline rehabilitation systems for service life extension. In *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures* (pp. 262–289). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857090928.2.262>
- Nebula. (2020, October 23). *GRUNDOCRACK*. <https://nebula.wsimg.com/08cba5d729021e6975d87c05b3fbb8d1?AccessKeyId=2EDCC7347B4FAECF8939&disposition=0&alloworigin=1>
- Onsarigo, L., & Adamtey, S. (2020). Feasibility of state transportation agencies acquiring trenchless technologies: A comparison of open cut and horizontal auger boring. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95, 103162. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103162>
- Orlov, V. (2016). Computer Simulation of Optimal Thickness of Polyurea Coating Using for Trenchless Renovation of Potable Water Pipes. *Procedia Engineering*, 165, 1168–1175. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.835>
- PAVCO, (2011) “Renovación sin zanja PAVCO tecnología para rehabilitar tubería”, disponible en: pavco.com.co/, [accedido Agosto 26, 2011]
- Pipelineinfrastructure. (2020). *Soporte obras rehabilitacion tuberias manga CIPP*. <https://www.pipelineinfrastructure.com/consultoria-tecnologia-sin-zanja/soporte-operativo-en-obras-de-rehabilitacion-de-tuberias-con-manga-continua-cipp>
- Ramírez, L. (2021, March). La calzada occidental de la Avenida Boyacá entre calles 76 y 75A será cerrada. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/cierre-de-la-av-boyaca>
- Sedapal. (2016, October 23). *Tecnología sin Zanja*. <https://www.sedapal.com.pe/tecnologia-sin-zanja>
- Sterling, R. L. (2020). Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling. *Underground Space (China)*, 5(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.09.001>
- Terraigua. (2011a). *CIPP - Tubería polimerizada in situ - renovación de tuberías sin zanja*. http://www.terraigua.com/cipp_-_tuberia_polimerizada_in_situ.html
- Terraigua. (2011b). *SLIPLINING - Rehabilitación de tubería con inserción de tubo a tracción -*

http://www.terraigua.com/sliplining_-_insercion_a_traccion.html

- Tracto, T. (2019). El sistema estático de sustitución de tuberías. <https://nebula.wsimg.com/33ae762029f9603add8d471b5af0d151?AccessKeyId=2EDCC7347B4FAECF8939&disposition=0&alloworigin=1>
- Trenchlesspedia. (2017, September 30). *Thermoformed Pipe*. <https://www.trenchlesspedia.com/definition/3381/thermoformed-pipe>
- Villanueva Valencia, S. (2020). PROYECTO: 00114063 “PROMOCIÓN DE MEDIDAS QUE APORTEN AL FORTALECIMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGETICA, ENERGÍAS LIMPIAS Y CALIDAD AMBIENTAL EN EL SECTOR ELECTRICO”. [https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/P. MicrotuneladorasINFORME DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.pdf](https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/P.MicrotuneladorasINFORME%20DE%20ESPECIFICACIONES%20TÉCNICAS.pdf)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.11.025>
- Wang, J., Wang, K., Zhang, T., & Wang, S. (2018). Key aspects of a DN4000 steel pipe jacking project in China: A case study of a water pipeline in the Shanghai Huangpu River. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.12.012>
- Wang, X., Behbahani, S. S., Iseley, T., Azimi, M., Wei, X., Wei, G., & Shi, Y. (2021). Vertical tunneling in China-A case study of a hydraulic tunnel in Beihai. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 107, 103650. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103650>
- Zaneldin, E., Al Khatib, O., & Ahmed, W. (2020). Investigating the use of no-dig technologies for underground utilities in developing countries. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0265-5>
- Zhang, D., Liu, B., & Qin, Y. (2016). Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, 151–164. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.08.009>
- Zhonglin, Z., Qingxin, M., Liquan, W., & Hua, W. (2006). The construction designing and analyzing on turning device of “dragon of puncturing mud” robot. *2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2006, 2006*, 644–648. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2006.257647>

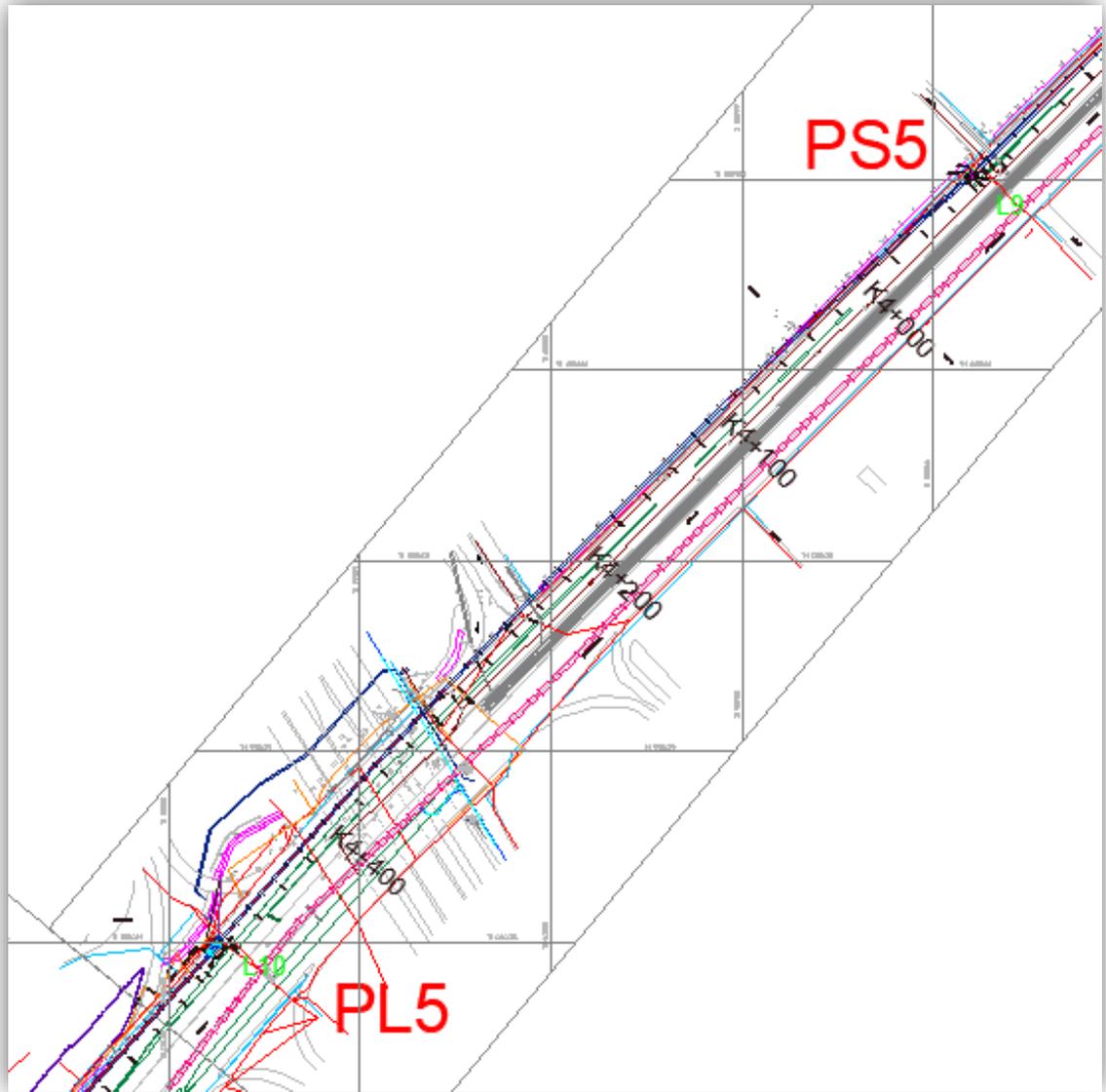


Figura 26 Tramo Línea Tibitoc desde el PL5 al PS5. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)

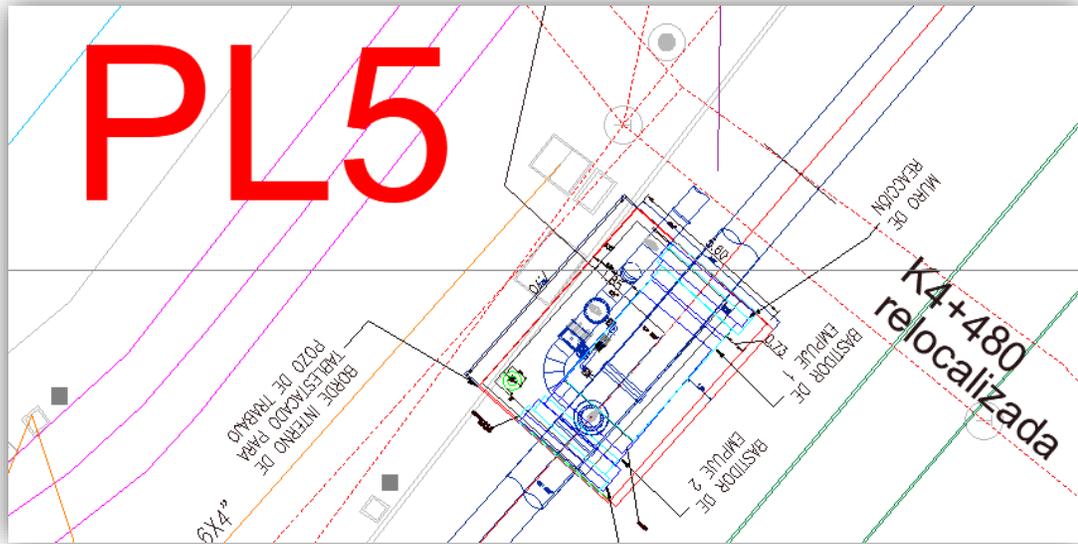


Figura 27 Detalle del pozo de lanzamiento PL5. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)

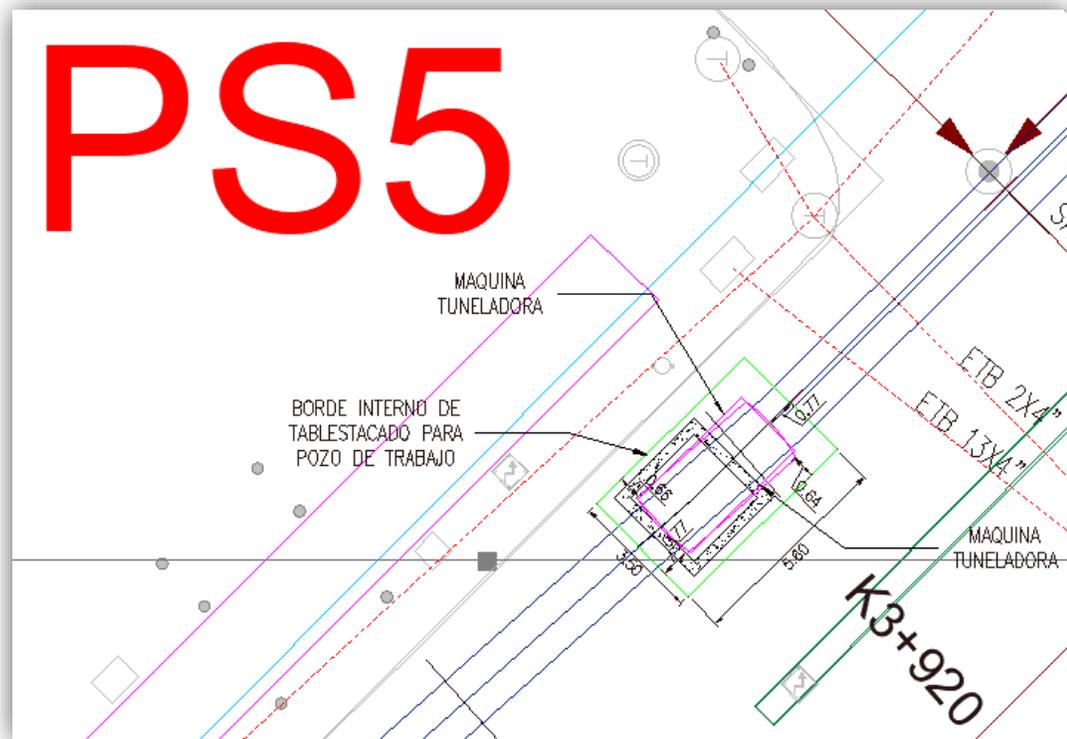


Figura 28 Detalle del pozo de salida PS5. Fuente (I.H.T. S.A.S., 2020)