



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

Ing. Luis Mauricio Perdomo Avendaño

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de ingeniería
Departamento de ingeniería civil
Bogotá Colombia 2021



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

Trabajo de grado para optar al título de:
Magister en Ingeniería Civil

Ing. Luis Mauricio Perdomo Avendaño

Director Ing. Diego Raúl Calderón Ballesteros M.Sc.

Codirector: Ing. Holmes Julián Páez. PH.D.

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de ingeniería
Departamento de ingeniería civil
Bogotá Colombia 2021

Tabla de contenido

1. Introducción.....
2. Pregunta de investigación.....
3. Hipótesis.....
4. Objetivos.....
5. Artículo de investigación.....

1. Introducción

La investigación está enfocada en el estudio comparativo de la huella de carbono producida por la construcción realizada para instalación de tuberías a zanja abierta versus la tecnología sin zanja por el método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto (Guided Auger Boring – Pilot Tube) (GAB-PT). El trabajo calcula la huella de carbono producida por los procesos constructivos realizados durante la construcción de un proyecto de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP), cuyo objeto fue la instalación de tubería de 750 mm (30”) mediante la instalación en dos tecnologías: zanja abierta: 215 m y GAB-PT: 1050 m. Con los resultados se desarrollaron modelos de simulación mediante software de elementos discretos para cada tecnología, permitiendo determinar las emisiones contaminantes por metro de construcción. Finalmente se presenta un comparativo de los resultados de las emisiones obtenidas en campo versus los resultados arrojados por los modelos.

2. Pregunta de investigación

¿Cuándo se comparan tecnologías de instalación de tuberías, qué factores deben tenerse en cuenta para el cálculo efectivo del impacto de la huella de carbono, para el caso específico de la instalación de tuberías por el método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto Guided Auger Boring – Pilot Tube versus la instalación a zanja abierta?

3. Hipótesis

La inadecuada escogencia de la tecnología sin zanja para el caso del método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto Guided Auger Boring – Pilot Tube impacta en los costos sociales, económicos y ambientales por huella de carbono, reduciendo los beneficios comprobados que provee sobre el uso de tecnología sin zanja.

4. Objetivos

Objetivo general

Realizar un análisis comparativo del impacto de la huella de carbono producida para la instalación de tuberías a zanja abierta y por el método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto Guided Auger Boring – Pilot Tube.

Objetivos específicos

Adaptar al entorno local la información disponible sobre investigaciones en emisiones de gases de efecto invernadero para la instalación de tuberías a zanja abierta y con la tecnología por el método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto Guided Auger Boring – Pilot Tube.

Implementar un modelo de cálculo de la huella de carbono para la tecnología de instalación de tuberías a zanja abierta y con la tecnología por el método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto Guided Auger Boring – Pilot Tube, adaptado a las condiciones locales.

Estimar la diferencia de emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) entre los métodos de instalación de tuberías a zanja abierta con la tecnología por el método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto Guided Auger Boring – Pilot Tube.

5. Artículo de investigación

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

Luis Mauricio Perdomo A, Diego Raúl Calderón, Holmes Julián Páez

Abstract.

Trenchless technologies have been developed to make pipe installations more friendly to the environment due to the lower generation of greenhouse gases (GHG), while also minimizing the social cost in public space. The objective of the article is to carry out a comparative analysis of the impact of the carbon footprint produced by the installation of pipes in an open trench and by the drilling method with a guided auger screw and pilot tube (GAB-PT). The study focused on the calculation of polluting emissions produced by construction machinery in a project of the Municipal Water and Wastewater Company of Bogotá (EAAB-ESP) for the installation of 750 mm (30") pipes for lengths of 215 m in open ditch and 1050 m GAB-PT. With the results, simulation models were developed using discrete element software for each technology, allowing the determination of polluting emissions per meter of construction. Finally, a comparison of the results of the emissions obtained in the field versus the results obtained by the models is presented.

Keywords.

Trenchless technology, Guided Auger Boring – Pilot Tube, Pipe jacking, Open-cut pipe line installation, Carbon footprint, Greenhouse gases, Discrete events system simulation, Queue networks, geotechnical study.

Resumen.

Las tecnologías sin zanja se han desarrollado para realizar instalaciones de tuberías más amigables con el medio ambiente por menor generación de gases de efecto invernadero (GEI), minimizando igualmente el costo social en espacio público. El objetivo del artículo es realizar un análisis comparativo del impacto de la huella de carbono producida para la instalación de tuberías a zanja abierta y por el método de perforación con tornillo sinfin guiado y tubo piloto (Guided Auger Boring – Pilot Tube) (GAB-PT). El estudio se centró en el cálculo de emisiones contaminantes producidas por la maquinaria de construcción en un

proyecto de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) para instalación de tuberías de 750 mm (30”) para longitudes de 215 m en zanja abierta y 1050 m GAB-PT. Con los resultados se desarrollaron modelos de simulación mediante software de elementos discretos para cada tecnología, permitiendo determinar las emisiones contaminantes por metro de construcción. Finalmente se presenta un comparativo de los resultados de las emisiones obtenidas en campo versus los resultados arrojados por los modelos.

Palabras clave.

Tecnología sin zanja, perforación con tornillo sinfín guiado – tubo piloto, hincado de tubería, instalación a zanja abierta, huella de carbono, gases de efecto invernadero (GEI), simulación de eventos discretos, redes de colas, estudio geotécnico.

1. Introducción

“Existen soluciones asequibles y escalables que nos permitirán dar el salto a economías más limpias y resilientes, es posible reducir las emisiones de carbono de aquí a 12 años y frenar el aumento de la temperatura media anual por debajo de los 2 °C, o incluso a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales” (“Cumbre Sobre La Acción Climática ONU 2019” 2019). La industria de la construcción no es ajena a esta problemática y desde la década 1980-1990 se ha venido desarrollando nuevas tecnologías que reducen la contaminación ambiental, impactando significativamente el medio ambiente y las emisiones de carbono debido a las actividades relacionadas con la energía incluyendo la fabricación de material de tubería, el transporte, el uso de equipos de construcción durante la instalación (Kaushal et al. 2020).

La Contaminación ambiental especialmente por producción de gases de invernadero, expresados en dióxido de carbono equivalente (CO_2e), generados por los equipos que intervienen en la instalación de tuberías, impactan negativamente en los costos sociales, económicos y ambientales por huella de carbono, generalmente la instalación en zanja abierta produce mayor contaminación ambiental que las tecnologías sin zanja, debido a la mayor duración de los procesos constructivos y a la necesidad de incrementar el número de equipos requeridos (Kaushal et al. 2020b), por su parte las tecnologías sin zanja son más sostenibles desde el punto de vista medioambiental (Ariaratnam et al. 2009), durante los

últimos años, han ido ganando popularidad en la instalación de servicios públicos enterrados debido a factores sociales y ambientales (Shang et al. 2011), especialmente en ambientes altamente urbanizados, sin embargo, sus ventajas usualmente deben ser evaluadas de manera específica para cada proyecto (Calderon 2020), uno de los principales obstáculos para la aceptación y el uso de nuevas tecnologías es la falta inicial de comprensión de las capacidades de la nueva tecnología, la selección inadecuada de la tecnología sin zanja puede conducir a un fracaso parcial o total del proyecto de construcción (McKim 1997). Para el caso de estudio, la decisión de escoger el sistema Guided Auger Boring-Pilot Tube (GAB-PT), presentó mayor generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que la opción a zanja abierta, debido a la conformación de los estratos y el nivel freático generaron un fenómeno de subducción, aumentando el tiempo de uso de equipos, pues las arenas encontradas y el agua subterránea, atascaron el tornillo sinfín, obligando a la construcción de pozos de rescate.

El objetivo del artículo es realizar un análisis comparativo del impacto de la huella de carbono producida para la instalación de tuberías a zanja abierta y por el método de perforación con tornillo sinfín guiado y tubo piloto GAB-PT, este objetivo se apoya en tres objetivos específicos: Adaptar al entorno local la información disponible sobre investigaciones en emisiones de gases de efecto invernadero para la instalación de tuberías a zanja abierta y con la tecnología por el método de perforación con tornillo sinfín guiado y tubo piloto GAB-PT; Implementar un modelo de cálculo de la huella de carbono para la tecnología de instalación de tuberías a zanja abierta y con la tecnología por el método de perforación con tornillo sinfín guiado y tubo piloto GAB-PT, adaptado a las condiciones locales; Estimar la diferencia de emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) entre los métodos de instalación de tuberías a zanja abierta con la tecnología por el método de perforación con tornillo sinfín guiado y tubo piloto (GAB-PT).

El artículo comienza con una breve descripción de la tecnología sin zanja, el capítulo 2 presenta en antecedentes: descripción de los proyectos de tecnología sin zanja, revisión de literatura, descripción de metodologías de cálculo de la huella de carbono, hace una explicación del método de cálculo desarrollado por la USEPA, antecedentes respecto a la modelación de elementos discretos, finaliza con la identificación de la brecha del conocimiento. El capítulo 3, describe el proyecto de estudio, presenta la metodología

desarrollada, continua el tipo de información a recopilar tanto para la modelación como para el cálculo de la huella de carbono, distribuciones estadísticas, programación en Symphony, validación de los modelos, finalizando con los gráficos. En el capítulo 4 se presenta la discusión de resultados, comparación con las alternativas simuladas, limitación de los resultados. El capítulo 5 presenta las conclusiones.

1.1. Descripción de la tecnología sin zanja y el sistema Guided Auger Boring – Pilot Tube (Perforación Guiada con Tornillo Sinfín y Tubo Piloto).

El término tecnología sin zanja (conocida en inglés como trenchless), es usado para describir una amplia variedad de tecnologías, procesos y técnicas de construcción, renovación y remplazo de estructuras enterradas con mínimas perturbaciones al subsuelo y la superficie (Kramer, McDonald, and Thomson 1992). Estos métodos brindan más oportunidades para la instalación directa de tuberías y conductos, reduciendo la posibilidad de fugas, desalineaciones y asentamientos (Kaushal et al. 2020b). Los tres factores principales de la construcción sostenible que deben considerarse durante la planificación y el diseño de nuevos proyectos son el costo directo, los costos sociales y los impactos ambientales (A. Alsadi, et al. 2020), (A. A. Alsadi et al. 2020b).

El sistema de perforación con tornillo sinfín y tubo piloto (GAB-PT), es un método alternativo rentable al micro túnel convencional, ya que combina la precisión del micro túnel, el mecanismo de dirección de un taladro direccional y el sistema de eliminación de escombros de una máquina taladradora (Najafi 2010). Emplea una barrena y un sistema de guía utiliza un teodolito montado en una cámara y un objetivo con diodos emisores de luz (LED) que asegura una alta precisión en línea y pendiente.

Inicialmente se instala un tubo de menor diámetro aproximadamente 100 mm (4”), sirve como guía a la tubería a instalar, la perforación se realiza por el corte de un eje broca equipado con bordes de corte tipo cincel, evacuando los escombros con el tornillo sinfín a través de la tubería siendo transportados hacia el inicio de la perforación. Esta tecnología permite instalaciones hasta de 240 m de longitud con control de dirección en los 360° vertical y horizontal), en zanja abierta se utilizan recursos como: equipos de topografía, teodolitos, estaciones, niveles, requiriendo más personal en el proceso de instalación.

El desarrollo de nuevas tecnologías en la instalación de tuberías ha permitido disminuir la

huella de carbono evitando el aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), derivadas de las actividades humanas que se acumulan en la atmósfera del planeta, es el principal responsable del cambio climático, debido a menor duración en el proceso de instalación y poca interrupción del tráfico (Kaushal et al. 2020b). La evaluación y control de estas emisiones, al igual que el mantenimiento de los ecosistemas, que absorben y almacenan carbono son la base de las medidas de mitigación del cambio climático, de modo que se logre cumplir con la meta para que la temperatura terrestre no exceda los 2° C. al año 2050” (“Cumbre Sobre La Acción Climática ONU 2019” 2019).

Para la realización del inventario nacional de GEI, Colombia adoptó la metodología expresada en el Panel Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), con el objeto de reportar resultados comparables ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (Pulido et al. 2020)

El inventario nacional colombiano está dividido en cuatro grupos: energía, procesos industriales - uso de productos, agricultura - silvicultura y residuos. Las emisiones de carbono de la construcción que pertenece al grupo de energía, representan el 6,7% de las emisiones globales de carbono producidas en Colombia (Pulido et al. 2012). En este sector los grandes aportantes son empresas que trabajan con altos hornos tales como: cementeras, acerías y fábricas de vidrio.

2. Antecedentes

2.1. Descripción de los proyectos de tecnología sin zanja.

Desde la década de 1950, ha sido relativamente común utilizar métodos de instalación sin zanja, entre los cuales se destaca el Pipe Jacking (PJ) para instalar cruces de tuberías y servicios públicos bajo carreteras y ferrocarriles,(Kramer et al. 1992). A nivel mundial, la tecnología sin zanja ha evolucionado considerablemente desde la década del 70, incluyen fabricación de equipos de perforación direccional horizontal (HDD) más potentes y versátiles, herramientas de localización y seguimiento de servicios públicos, equipos de micro túneles (MT) más sofisticados y evolución de los equipos de perforación horizontal con tornillo sinfín (GAB), igualmente mejores materiales de tubería y sistemas de juntas patentados (Najafi 2010).

En Colombia, el uso de las tecnologías sin zanja inicia en los años ochenta cuando la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, llevó a cabo un proyecto de gran envergadura conocido como Bogotá IV, en el cual se instalaron diámetros mayores a un metro y longitudes entre 30 y 50 m., para la ampliación del sistema de acueducto y alcantarillado en la capital (Alarcón and Pacheco 2014), durante este proyecto se empleó con éxito la tecnología sin zanja conocida como Tunnel Liner (método manual de construcción de túneles) para el cruce de algunas avenidas importantes. En el 2001 se realiza la primera instalación con PJ para el interceptor Torca – Salitre y en el 2007 y la primera instalación con el sistema GAB-PT para el proyecto Fontibón Oriental Fase II (Pinzón 2011). Otras ciudades de Colombia han venido implementando la instalación de tuberías con tecnologías sin zanja: Medellín, con sistema de Micro túnel, HDD y Tunnel Liner y Cali HDD.

2.2. Revisión de literatura

La instalación de tuberías mediante el método a zanja abierta genera contaminación ambiental, especialmente por producción de (GEI), expresados en dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Además, las instalaciones a zanja abierta producen inconvenientes sociales ocasionados por desviaciones del tráfico y caos vehicular (Kaushal et al.2020b). “En el contexto de la promoción de la producción ecológica, el método a zanja abierta no ha podido cumplir con los requisitos de protección ambiental” (Lu et al. 2020). La metodología adecuada para determinar emisiones contaminantes, preferiblemente desde la fuente emisora en los procesos constructivos ha sido objeto de estudio por los investigadores, (Sihabuddin et al. 2009) presentan el estado del arte para diferentes metodologías para el cálculo, y desarrollan un ejemplo utilizando las ecuaciones desarrolladas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA). Continuando con las emisiones de carbono en el proceso de construcción sin zanjas, investigadores de la universidad de Arizona (Ariaratnam et al. 2013) estudian los tres factores de impacto para desarrollar una clasificación general del Índice de Sostenibilidad Subterránea (USIR) que permite cuantificar los proyectos de servicios públicos con orientación para evaluar las tecnologías propuestas en función de los criterios de impacto ambiental al comparar seis emisiones en el aire: hidrocarburos (HC); monóxido de carbono (CO); óxido de nitrógeno (NO_x); dióxido de carbono (CO_2); dióxido de sulfuro (SO_2); material particulado (PM).

La tabla No 1 presenta la definición de gases contaminantes objetos de estudio en la presente investigación.

Tabla 1 Definición de gases contaminantes

Gases Contaminantes	Nombre	Definición
CO_2e	Dióxido de carbono equivalente.	* Medida para expresar en términos de CO_2 el nivel de calentamiento global que tienen los otros gases de efecto invernadero.
CO	Monóxido de carbono.	Producido por la combustión incompleta de combustibles fósiles y presente en niveles muy bajos en los motores diésel.
NO_x	Óxido de Nitrógeno.	Gases compuestos de nitrógeno y oxígeno que reaccionan entre sí durante la combustión.
HC	Hidrocarburos.	Reaccionan con el NO_x por la acción de la luz del sol para formar ozono a nivel del suelo (troposférico), que interviene en la formación de “smog” (niebla contaminante) y lluvia ácida.
CO_2	Dióxido de carbono.	Gas incoloro, denso y poco reactivo, que forma parte de la capa de la atmósfera más cercana a la tierra. Tiene un gran impacto en el llamado efecto invernadero
PM	Material Particulado	Material particulado no gaseoso compuesto de hollín, carbón y otros subproductos de la combustión.
SO_2	Dióxido de sulfuro	gas que se origina sobre todo durante la combustión de carburantes fósiles que contienen azufre (petróleo, combustibles sólidos),

Fuente: * Cartilla Inventario Nacional de Gases de efecto invernadero 3 ed.

Tecnología de bajas emisiones Cummins

Teniendo en cuenta los resultados de las mediciones (Kaushal et al. 2020b), presentan una revisión de la literatura sobre los avances adquiridos durante el período comprendido entre 1989 al 2019 lo largo de los años en la comprensión de los impactos ambientales de los

métodos a zanja abierta, analizan y comparan los impactos ambientales para alcantarillados sanitarios de pequeño diámetro utilizando la herramienta de la USEPA para la reducción y evaluación de la metodología de impactos químicos y otros impactos ambientales. Con base en la teoría relevante del cálculo de la huella de carbono durante la construcción (Lu et al.2020) presentan una variedad de métodos típicos de instalación y renovación sin zanjas, comparando el consumo de energía y la huella de carbono del método a cielo abierto y algunos métodos de construcción sin zanja en las mismas condiciones.

Para determinar la huella ambiental general de cada material, en las fases de fabricación, construcción y operación, (A. Alsadi et al. 2020) analizaron y compararon las emisiones de carbono equivalente (CO_2e), durante la fase de fabricación asociadas a los tres tipos de tubería: concreto con refuerzo pretensado y cilindro de acero (PCCP), policloruro de vinilo PVC, utilizado para diámetros de 900 mm, (36”) tuberías de alcantarillado a presión. donde se utiliza una huella o área de excavación más pequeña.

Cabe destacar los resultados obtenidos de algunos estudios (Ariaratnam et al. 2013) utilizó una calculadora para cuantificar las emisiones contaminantes. Los resultados demostraron que GAB-PT genera 48,36% de (CO_2), que la alternativa a zanja abierta.

2.2.1. Metodologías de cálculo de la huella de carbono.

Para estimar la huella de carbono existen muchas metodologías, las cuales se resumen en la tabla No 2, enmarcadas por ámbitos de aplicación, país y enfoque (Pulido et al. 2012).

Tabla 2 Metodologías para el cálculo de la huella de carbono

Metodología	Ámbito de aplicación	Enfoque
Carbon disclouser Project (CDP).	Aplicación voluntaria y de ámbito global, ampliamente adoptada.	Organización.
WBCSD/WRI GHG Protocol Corporate Standard.	Aplicación voluntaria y de ámbito global, ampliamente reconocida; base para otros estándares.	Organización.
ISO 14064:2006 (Parts 1 and 3).	Aplicación voluntaria y de ámbito global, Estándar internacional verificable.	Organización.
French Bilan Carbone.	Aplicación voluntaria y de ámbito europeo, ampliamente reconocida.	Organización.

Metodología	Ámbito de aplicación	Enfoque
DEFRA Company GHG Guidance.	Aplicación voluntaria y de ámbito europeo, ampliamente reconocida.	Organización.
UK Carbon Reduction Commitment (CRC).	Aplicación voluntaria y de ámbito europeo, cubre a los pequeños emisores.	Organización.
USEPA Climate Leaders Inventory Guidance.	Aplicación voluntaria y de ámbito USA. Provee incentivos.	Organización.
US GHG Protocol Public Sector Standard.	Aplicación voluntaria y de ámbito USA y al sector público.	Producto.
PAS 2050	Aplicación voluntaria, procedencia UK.	Producto.
Korea PCF,	Aplicación voluntaria, procedencia Corea del Sur.	Producto.
Carbon Footprint Program	Aplicación voluntaria, procedencia Japón.	Producto.
Carbon Index Casino.	Aplicación voluntaria, procedencia Francia.	Producto.
Greenext.	Aplicación voluntaria, procedencia Francia.	Producto.
Climate Certification System.	Aplicación voluntaria, procedencia Suecia.	Producto.
Cimatop	Aplicación voluntaria, procedencia suiza.	Producto.
GHG Protocol – Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.	Aplicación voluntaria, ámbito global.	Producto.
BO X30-323	Aplicación voluntaria, procedencia Francia.	Producto.
The Pipe Jacking Association	Aplicación Voluntaria, procedencia Reino Unido.	Producto.
GSTT-Information-27-DIN-A-4-manual-	Aplicación voluntaria, procedencia Alemania.	Producto.

Metodología	Ámbito de aplicación	Enfoque
Carbon-Calculator-2014-Ver-2-2-Engl-2		
ISO 14067	Aplicación voluntaria, ámbito global.	Producto.

Fuente: Cartilla Inventario Nacional de Gases de Invernadero (GEI) Colombia 2012

“Para Colombia el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), constituye el mecanismo que orienta la gestión y organiza los procesos de planificación nacional en materia de adaptación, y articula la implementación de políticas, planes, acciones y proyectos para reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad adaptativa ante los posibles impactos de fenómenos climáticos en el país” (Pulido et al. 2020). El gobierno nacional, calcula las emisiones de gases de efecto invernadero bajo las metodologías establecidas de Colombia, por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), las cuales permiten orientar la toma de decisiones para el diseño e implementación de las medidas de mitigación para la reducción de estos gases. Empresas como EAAB ESP., reportan bajo la norma ISO 14064. La presente investigación optó por el método desarrollado por la USEPA, debido principalmente a que corresponde a una metodología ascendente, “las emisiones se determinan a partir del funcionamiento real del equipo y la maquinaria” (Sihabuddin et al. 2009), proporcionando una medición más precisa en las emisiones.

2.2.2. Huella de carbono en relación con la tecnología sin zanja.

Se puede precisar que la tecnología sin zanja es reconocida como una alternativa para la reducción de las emisiones de GEI, esta aseveración se realiza con base en los resultados obtenidos en el análisis y comparación de los impactos ambientales para tubería de alcantarillado sanitaria de pequeño diámetro utilizando la herramienta de la USEPA (Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos) para la reducción y evaluación de la metodología de impactos químicos y otros impactos ambientales (TRACI, por sus siglas en inglés) del software SimaPro™; trabajo de investigación; realizado por (Kaushal et al. 2020a)). Lo anterior teniendo en cuenta que cuando la longitud de la construcción es corta (ej. 10 m.) o la instalación es muy poco profunda (ej. 1 m.), el consumo de energía y la huella de carbono del método sin zanja pueden ser más altos que el método a zanja abierta (Lu, et

al 2020). Sin embargo, este estudio no contempla la generación de GEI por las desviaciones al tráfico durante operaciones con zanja abierta, además generalmente las instalaciones con tecnología sin zanja no son utilizadas para longitudes cortas a poca profundidad debido al alto costo de equipos, personal y materiales; por lo cual se puede generalizar que en todos los casos técnico-efectivamente viables, la tecnología sin zanja es una alternativa que presenta menores emisiones que la opción a zanja abierta.

Basados en el modelo Nonroad de la USEPA, se utilizaron las ecuaciones explicadas por (Ariaratnam et al. 2009) para realizar el cálculo de GEI emitidos por cada tecnología, sin embargo y debido a que la USEPA publicó una actualización de las tablas para el año 2010, estas tablas fueron adoptadas para la realización de los cálculos. (USEPA 2010).

Ecuación 1 Emisiones de GEI producida por los equipos de construcción

$$Emisiones_i = EF_i * h * hp * LF * 0.01$$

Donde: Cantidad de emisiones generadas por la maquinaria de impacto i (Contaminantes);

- EF_i = factor de emisión para el impacto i [g / caballo de fuerza hora (hp-h)];
- i = tipo de contaminante [dióxido de carbono (CO_2), dióxido de sulfuro (SO_2), Oxido de nitrógeno NO_x , monóxido de carbono (CO), material particulado (PM) e hidrocarburos (HC)];
- h= horas de uso;
- hp = potencia nominal promedio del equipo, medidas en caballos de fuerza; y
- LF= factor de carga (hp de funcionamiento / hp nominal máximo).

El reporte No. NR-009d (USEPA 2010), explica la metodología y agrupa las tablas necesarias para la realización de los cálculos de los contaminantes.

El cálculo de gases de efecto invernadero GEI, tiene en cuenta los factores de emisión para gases contaminantes, tales como: factores de emisión HC, CO, NO_x , que se determinan mediante el producto del factor de emisión de estado estacionario (TAF) y el factor de deterioro (DF). El factor de emisión de material particulado (PM) depende del contenido de azufre del combustible, es decir que por cada sulfato de material particulado (PM) hay siete gramos de azufre. El factor de emisión para CO_2 se calcula en función del consumo de combustible específico (BSFC) por sus siglas en inglés (Sihabuddin et al. 2009).

Las emisiones debidas al transporte de materiales para efectos de la presente investigación se refieren únicamente a acarreo de materiales y residuos procedentes de la construcción, rehabilitación y demolición (RCD), no incluye el transporte de tuberías ni de equipos a los sitios de construcción. Por otra parte, no se realizan correcciones a factores debidos a ajuste por altitud.

El cálculo de gases contaminantes se realiza con base en las ecuaciones desarrolladas por Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) (US EPA 2010) basada: factores de emisión HC, CO, NO_x , el factor de emisión cero millas (EFZM) (por sus siglas en inglés), el factor de deterioro (D) durante la vida útil del vehículo, el factor de emisión de PM es una función de la clase del vehículo, modelo y kilometraje, los factores de emisión para CO_2 y SO_2 .

Las emisiones de transporte se calculan al determinar los factores de emisión finales para cada contaminante, mediante la ecuación general (Ecuación 2).

Ecuación 2 Emisiones debidas al transporte

$$Emisiones_i = EF_i \times n \times (D_o + D_R)$$

donde, $Emisiones_i$, emisiones del impacto i (es decir, contaminantes);

- EF_i , factor de emisión por impacto i (g / mi); i, tipo de contaminante (CO_2 , SO_2 , NO_x , CO, PM, HC);
- n, número de viajes del transporte;
- D_o , distancia de ida recorrida por el transporte al sitio (millas);
- D_R , distancia de retorno recorrida por el transporte desde el sitio (millas)

Para finalizar se calculan las emisiones totales del proyecto a partir de la suma de todos los equipos y transportes utilizados.

Ecuación 3 Emisiones totales del proyecto

$$Emisiones_{it} = \sum Emisiones_{ij} + \sum Emisiones_{ik}$$

Donde

- $Emisiones_{it}$, emisiones totales del contaminante (i) de todos los equipos (j) y transporte (k) utilizados en el método de construcción;
- $Emisiones_{ij}$, emisiones del impacto i (es decir, contaminantes) del equipo (j) utilizado en el método de construcción;
- $Emisiones_{ik}$, emisiones del impacto i (es decir, contaminantes) para el transporte (k) utilizado en el método de construcción. (US EPA 2010)

Las tablas 4- 6 para GAB-PT y tabla 8 para zanja abierta, presentan: potencia del motor medida en caballos de fuerza, TIER con base en el modelo, masa del motor, Potencian del motor en caballos de fuerza y horas trabajadas o recorrido realizado, según el caso, para la maquinaria y equipos que intervinieron en el proyecto, y que son requeridos para el cálculo de las emisiones contaminantes.

2.2.3. Modelación de elementos discretos.

La simulación de la construcción mediante la modelación de elementos discretos es una poderosa herramienta que permite evaluar productividad, análisis de riesgos, planificación de recursos, diseño y análisis de métodos constructivos (Sawhney et al. 1998a). Según (Wu et al. 2021) los proyectos de construcción comprenden una serie de procesos paralelos o simultáneos, que generan incertidumbre y aleatoriedad, permitiendo analizar: productividad, costos de construcción, riesgos y para el caso de la presente investigación el cálculo de la huella de carbono.

Teniendo en cuenta tanto las variables continuas como simulación de eventos discretos (Moradi et al. 2015a), proponen un modelado híbrido mediante combinación de dinámica de sistemas que afectan el desempeño de los procesos en simulación de proyectos constructivos. Para proyectos industriales complejos debido al tamaño, espacio tridimensional y tareas específicas en sitios congestionados, por su parte (Taghaddos et al. 2021a), proponen un marco automatizado de simulación personalizada que mediante información extractada de datos históricos, considera la naturaleza del recurso y las colas, evalúa si dos tipos de oficios pueden trabajar simultáneamente en un espacio compartido, automatiza la gestión del recurso contabilizándolos al igual que las colas, así como el espacio en el tamaño del proyecto.

El software de Symphony, se ha convertido en la base de varios sistemas de simulación de construcción (Sawhney et al. 1998a), ha sido desarrollado por las universidades más prestigiosas del mundo, es un software libre y para la presente investigación su uso fue autorizado por la Universidad de Alberta.

Para permitir el desarrollo de modelos individuales en los procesos que constituyen un proyecto, (Sawhney et al. 1998a), plantean una metodología de modelado CYCLONE, describen que la simulación a nivel de proyecto se realiza utilizando los siguientes cuatro pasos: a) identificar todos los procesos que se modelarán; b) identificar y definir los recursos necesarios para los procesos identificados; c) desarrollar modelos de procesos utilizando elementos de modelado CYCLONE y d) realizar la simulación simultánea de los procesos utilizando el fondo común de recursos, (Sawhney et al. 1998a).

Las programaciones industriales complejas debido a su tamaño, el espacio tridimensional y las tareas específicas en sitios congestionados no son fáciles de programar cuando falta información detallada. Se propone un marco de modelado híbrido mediante la combinación de dinámica de sistemas (SD), utilizando información histórica, opinión de expertos y simulación de eventos discretos (DES) para simular los proyectos de construcción,(Taghaddos et al. 2021b). Para operaciones de construcción se propone un marco de modelado híbrido que tenga en cuenta variables discretas: operaciones de construcción y la dinámica del entorno del proyecto que surge de la estructura interrelacionada de varios factores de influencia continua, (fatiga, interacción entre trabajadores) . (Moradi et al, 2015) (Taghaddos et al. 2021a)

En la presente investigación las variables continuas se incluyen en las distribuciones, pues son el resultado de tiempos reales de ejecución, por otra parte la instalación en zanja abierta y GAB-PT se realizan en espacios confinados y con alto riesgo de accidentalidad debido a la suspensión de carga sobre los trabajadores, a lo estrecho de los espacios y a la profundidad en que se encuentran, convirtiéndolos en proyectos complejos.

2.2.4. Identificación de la brecha del conocimiento

Muchos son los estudios realizados a lo largo del tiempo referentes al cálculo de la huella de carbono, para todas las etapas del proceso, fabricación, instalación, servicio y disposición

final (de la cuna a la tumba) (A. A. et al. 2020a) en instalación de tuberías para oleoductos, acueductos, alcantarillados entre otros, sin embargo en los documentos revisados a la fecha se evidencia pocas investigaciones realizadas que contemplen diseños erróneos que generen problemas sociales, ambientales por mayor producción de huella de carbono y económicos, generados por mayor duración de actividades. A nivel nacional se encontraron publicaciones como la presentada por la Universidad Eafit, que indica los inconvenientes durante la ejecución del proyecto de tecnología sin zanja en la ciudad de Medellín conocido como Centro Parrilla (Duque 2017), sin embargo, estudios como estos no presentan comparativos de emisiones de gases contaminantes con base en los métodos constructivos utilizados.

De otra parte, se evidencio una publicación cuyo objeto fue el desarrollo de un modelo de simulación para analizar la cantidad de emisiones de escape del uso de equipos en la construcción ferroviaria, comparándolo con un modelo alternativo realizado en Symphony (Jewbunchu et al.2018), la investigación realizada no evidenció modelos de eventos discretos que puedan predecir la evaluación de la huella de carbono, para la instalación de tuberías a zanja abierta y GAB-PT.

3. Metodología

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP, contrato la construcción del By pass de la estación de bombeo para la localidad de Bosa en la ciudad de Bogotá, con una longitud total de 1703 m. de instalación de tubería en concreto reforzado a 6 m. de profundidad y un diámetro de 750 mm (30”) figura 1. La figura 2 presenta las cantidades realmente ejecutadas a la fecha de entrega de la información para la realización del estudio: en zanja abierta 215 m, con una duración de 3 meses y por el sistema GAB-PT 1050 m. con una duración de 30 meses.

La estratigrafía encontrada, a partir de los 4,50 m. aflora el nivel freático y a partir de los 5,00 m. se encuentran depósitos de arenas finas, medias y gruesas formando capas llamadas “Quicksands”: material fácilmente removible con baja capacidad hidráulica figura 3. Estas capas generan varios inconvenientes para la construcción, sin embargo, en zanja abierta se tomó la decisión de sobre excavar 0,30 m. y reemplazarlos con rajón, al igual que su ejecución en tramos cortos.

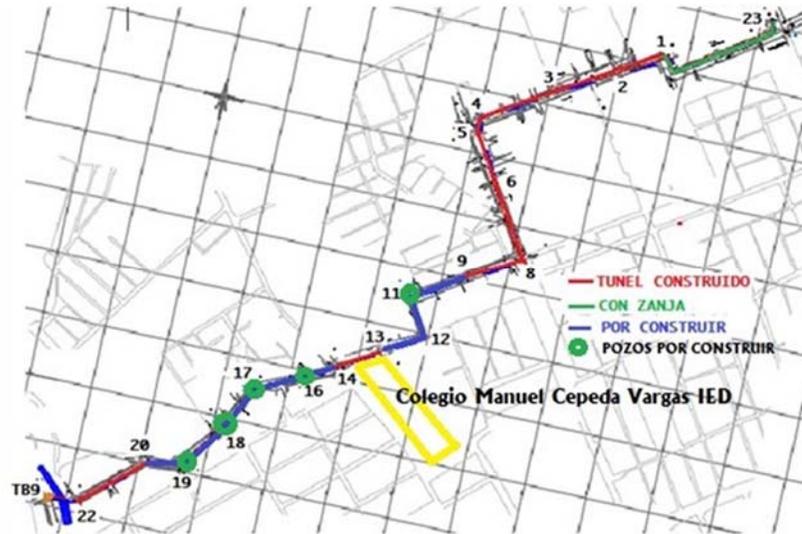


Figura No. 1 Planta de localización instalación By Pass de la estación de bombeo

Fuente: EAAB-ESP

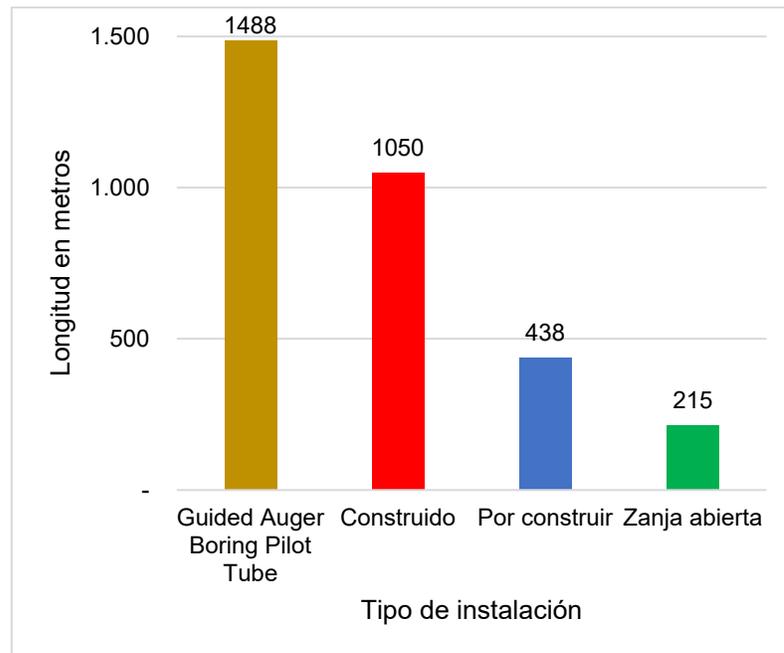
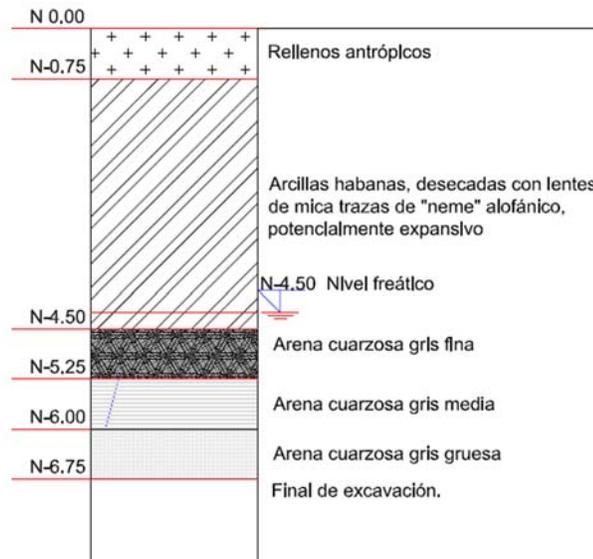


Figura No. 2 Cantidad total contratada y ejecutada

Fuente: Propia



Fuente: Propia

Figura No. 3 Perfil típico del terreno

En tecnología sin zanja la construcción de lumbreras se realizó en caissons prefabricados, en anillos de concreto de diámetro: 4,20 m. y 3,63 m. para pozos de lanzamiento y 3 m para pozos de recibo, con profundidades variables.

Durante la construcción se presentaron los siguientes problemas: El nivel freático con las arenas desestabilizó y desplomó los pozos, se presentó el fenómeno de subducción, al realizar el bombeo del agua para abatir el nivel freático, arrastró las arenas generando socavaciones y poniendo en peligro la estabilidad de las construcciones vecinas, igualmente las arenas taponaron el tornillo sinfin impidiendo su movimiento, este inconveniente final, incrementó la necesidad de construir pozos de rescate, para recuperar la barrena. Para estabilizar las arenas el ingeniero de suelos, ordenó inyecciones en mortero.

La metodología realizada en la investigación se presenta en forma esquemática en la figura No 4.

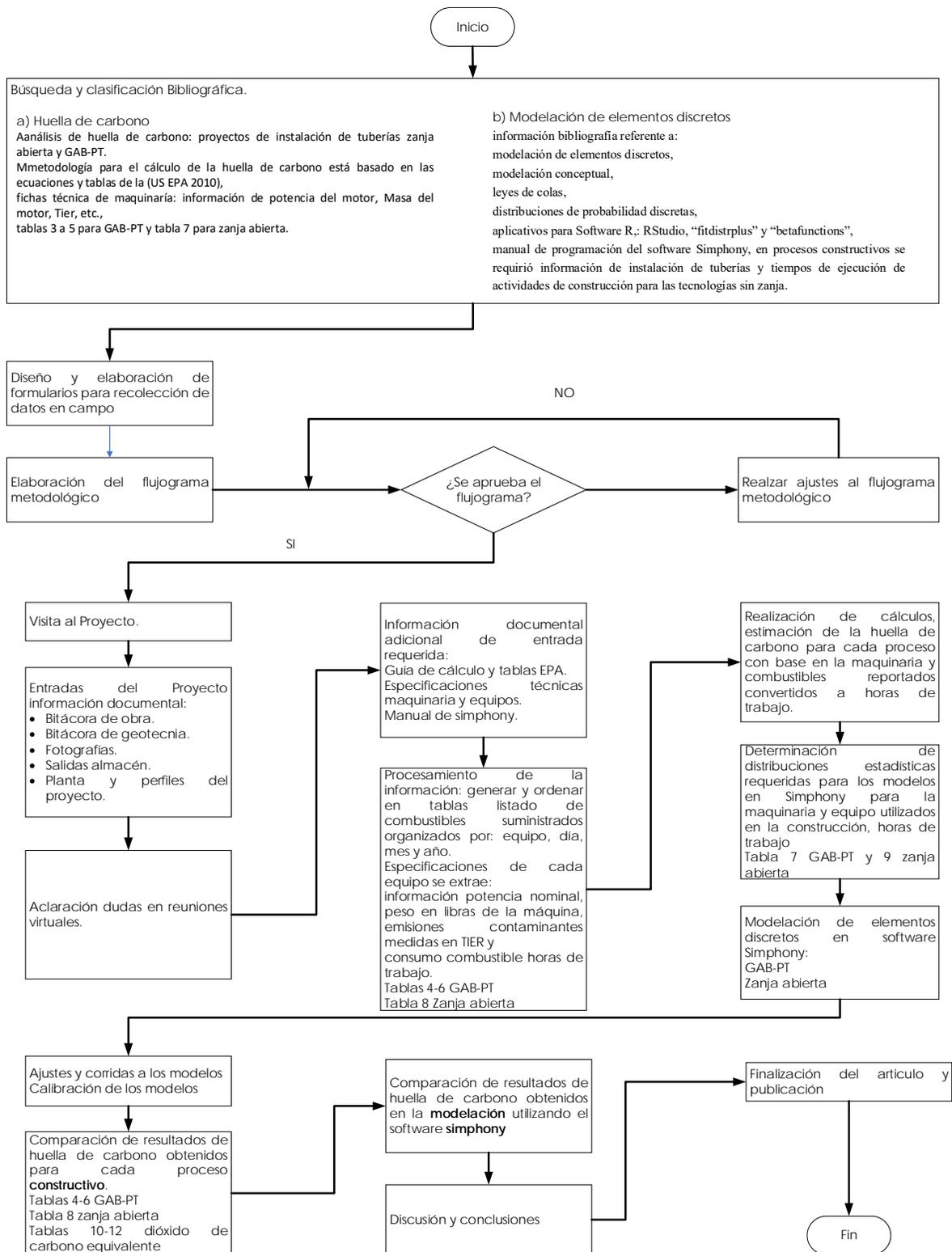


Figura No. 4 Flujograma metodológico.

Fuente: Propia

3.3.1 Cálculo de la huella de carbono

El cálculo de la huella de carbono se realizó siguiendo la metodología recomendada por (Sihabuddin et al.2009), de la cual se hace una breve descripción en el numeral 2.2, (US EPA 2010) publicó una actualización en el año 2010, por lo cual se utilizó esta información para el cálculo.

El cálculo de la huella de carbono equivalente se realizó con base en lo expuesto por la Unidad de Planeación Minero energética de Colombia (UPME) establece para el año 2021: 8,8085 $KgCO_2e/gl$ para gasolina y 10,1490 $KgCO_2e/gl$ para equipos Diesel.

Las tablas 10-12 presentan los resultados del calculo de la huella de carbono equivalente para los años 2018 a 2020 para los dos métodos constructivos utilizados.

3.3.2 Distribuciones estadísticas

Para determinar la distribución a la cual se ajusta la serie de datos, se utilizó el software libre R.Studio, PBC, versión 1.4.1717 aplicativos “fitdistrplus”. La función “descdist” proporciona un gráfico de asimetría y curtosis como el propuesto por Cullen y Frey para la distribución empírica ver figura 5 (Delignette et al. 2015), este gráfico muestra los valores de las distribuciones más comunes para ayudar a la elección de las distribuciones para los datos. Para algunas distribuciones (normal, uniforme, logística, exponencial), sólo hay un valor posible para la asimetría y la curtosis. Por lo tanto, la distribución está representada por un único punto en el gráfico (Delignette et al. 2015), ayudando a la elección de la distribución para los datos. La tabla 7 resume las distribuciones estadísticas para modelación de GAB-PT y la tabla 9 para modelo de zanja abierta.

Las pruebas de bondad y ajuste se realizan mediante la función “gofstat” pues el propósito de las estadísticas de bondad de ajuste tiene como objetivo medir la distancia entre la distribución paramétrica ajustada y la distribución empírica.

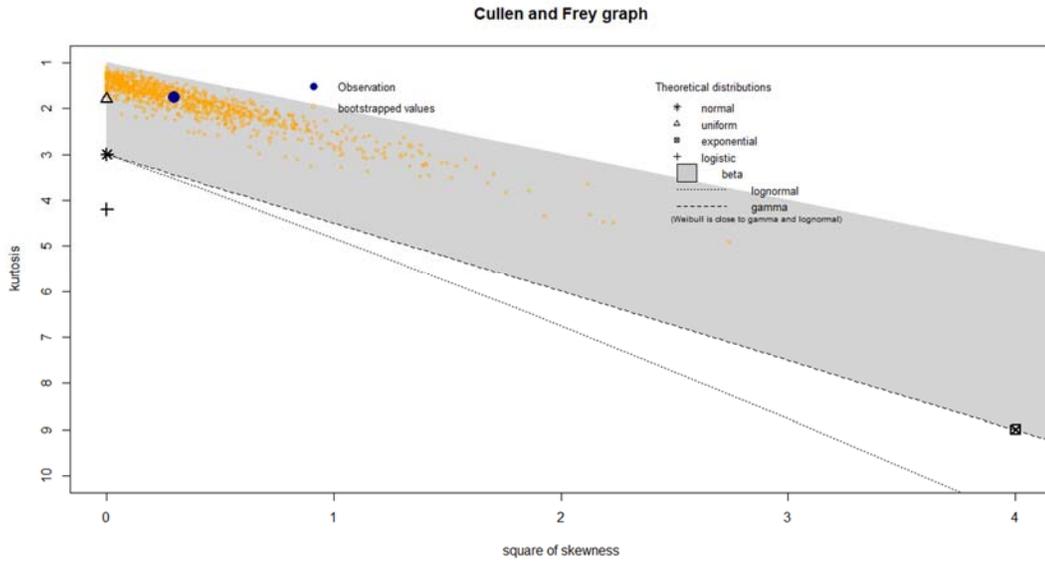


Figura No. 5 Determinación de la distribución estadística

Fuente: RStudio aplicativo fitdistrplus

3.3.3 Programación en Simphony.

La figura No 6 presenta el diagrama de flujo realizado para el proceso constructivo de la instalación de tubería por el sistema GAB-PT y la figura 7 presenta el modelo realizado en Simphony.

Para zanja abierta se presentan las figuras No. 8 y 9 flujograma y modelación de elementos discretos.

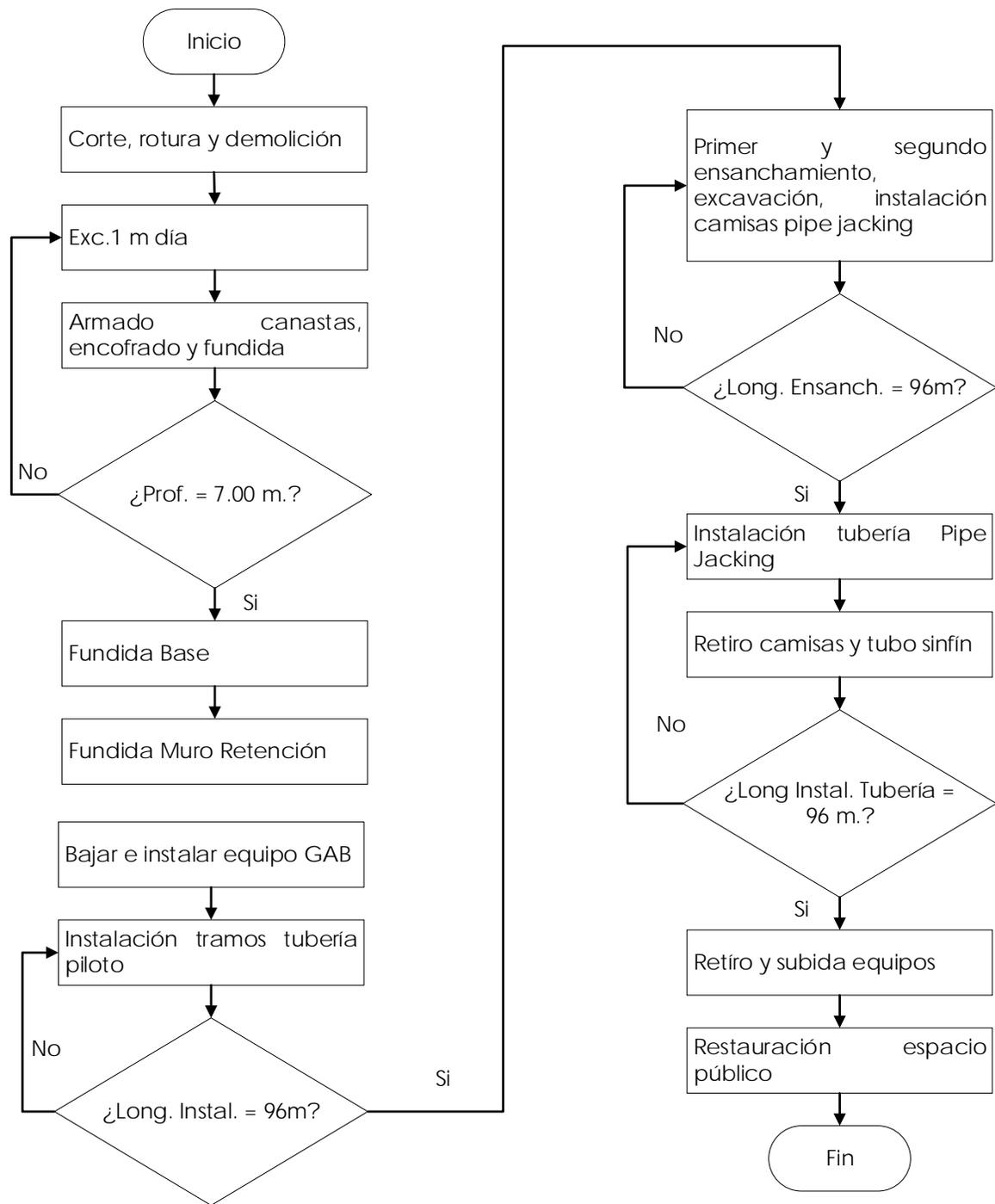


Figura No. 6 Diagrama de flujo Sistema constructivo GAB-PT

Fuente: Propia

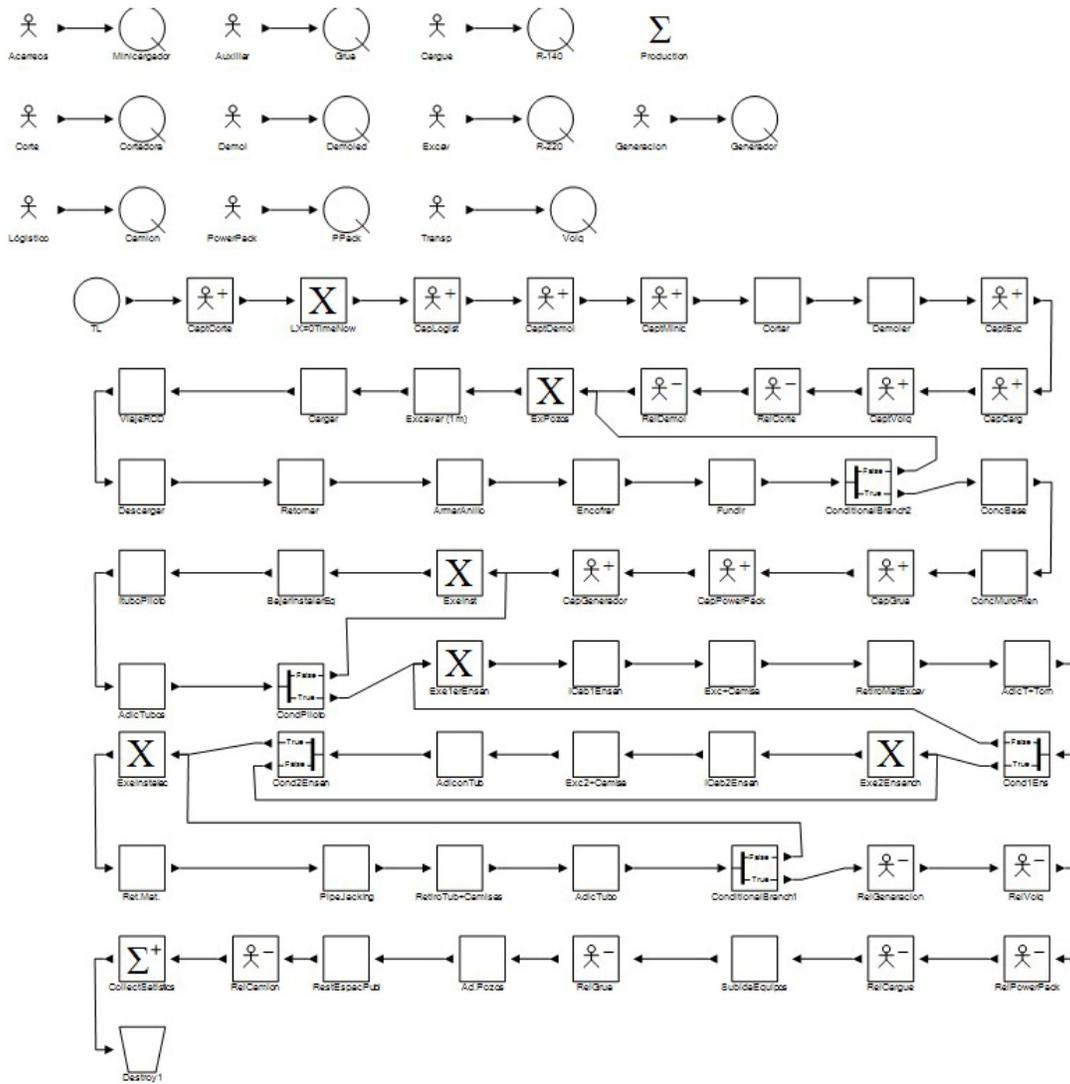


Figura No. 7 Modelo sistema constructivo GAB-PT

Fuente Simphony

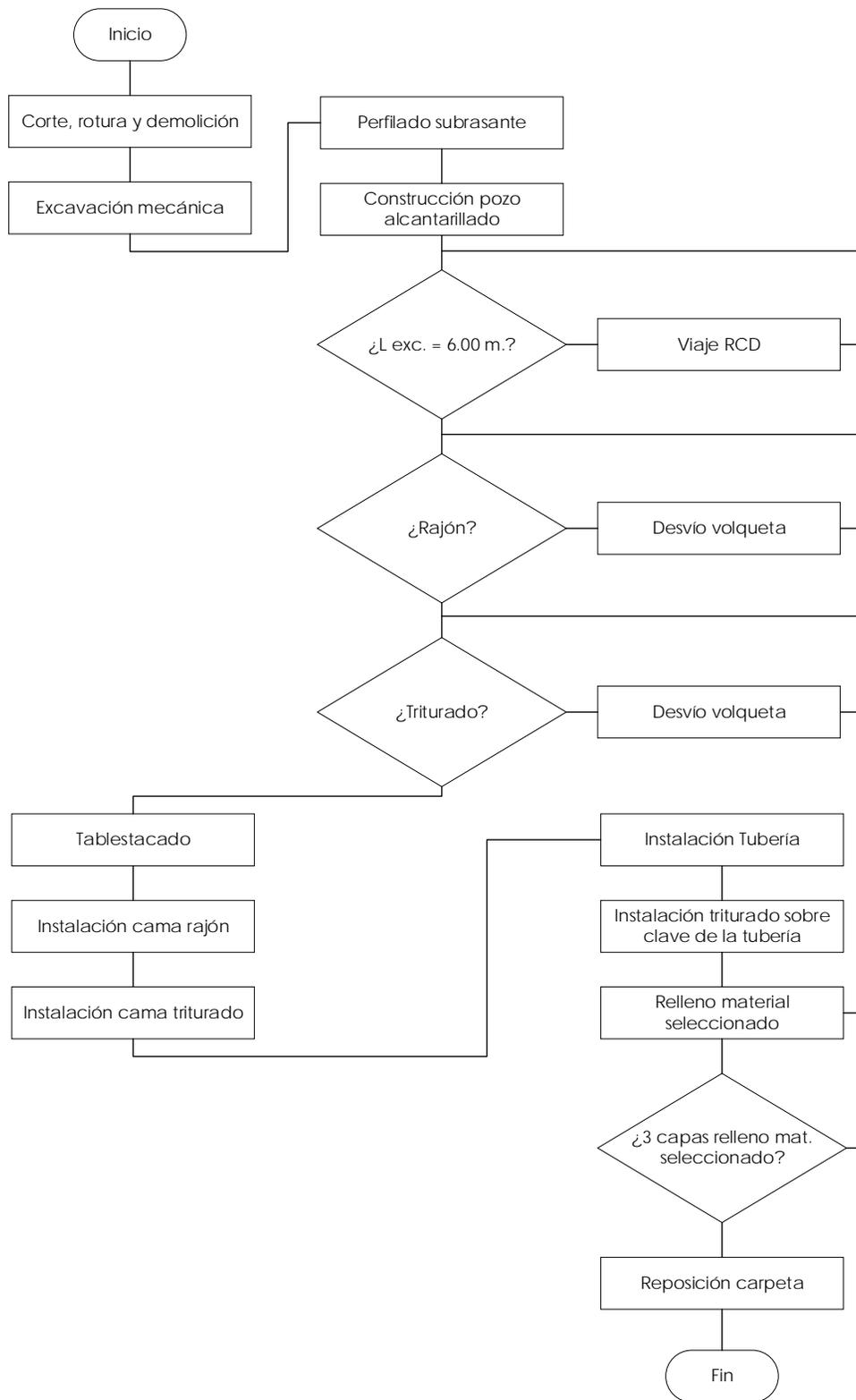


Figura No. 8 Flujograma sistema constructivo a zanja abierta

Fuente; Simphony

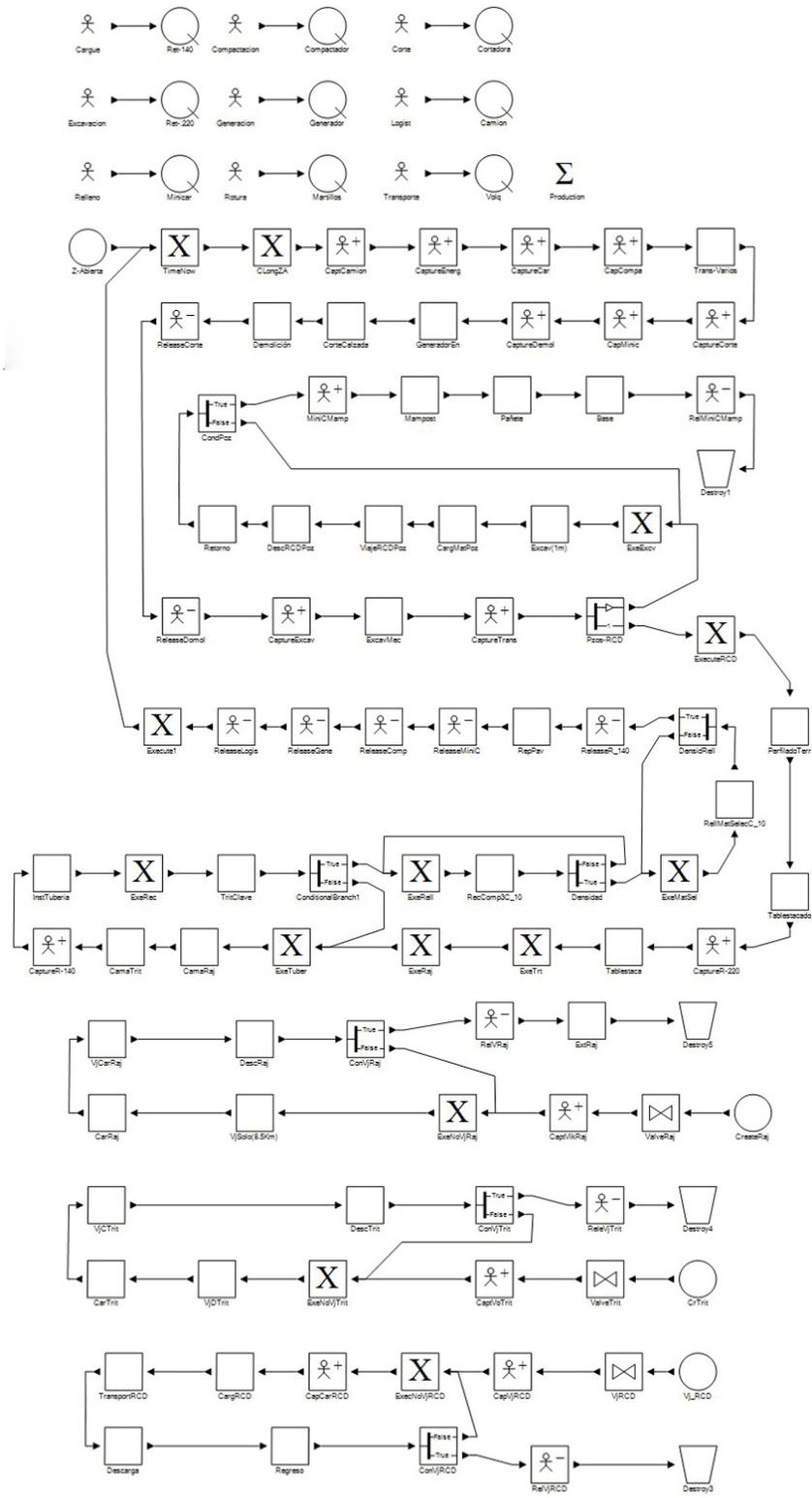


Figura No. 9 Modelo constructivo a zanja abierta

Fuente: Simphony

Finalizada la programación se alimentaron las actividades con sus correspondiente distribuciones estadísticas figura No. 10 y en los casos que no se tenía suficiente información para determinar la distribución se anotó el tiempo de ejecución. En los recursos se calibraron los contaminantes, Symphony ejecuta los cálculos con base en tiempos de ejecución y distribuciones estadísticas, se inició dando a cada contaminante el valor de 1.0, al conocer los valores resultados de la corrida del modelo, se calibraron con base en los resultados obtenidos de los cálculos descritos en el numeral 3.3.2, aproximándolos a la unidad, en las casillas correspondientes “Emission Rate Utilized” figura No. 11.

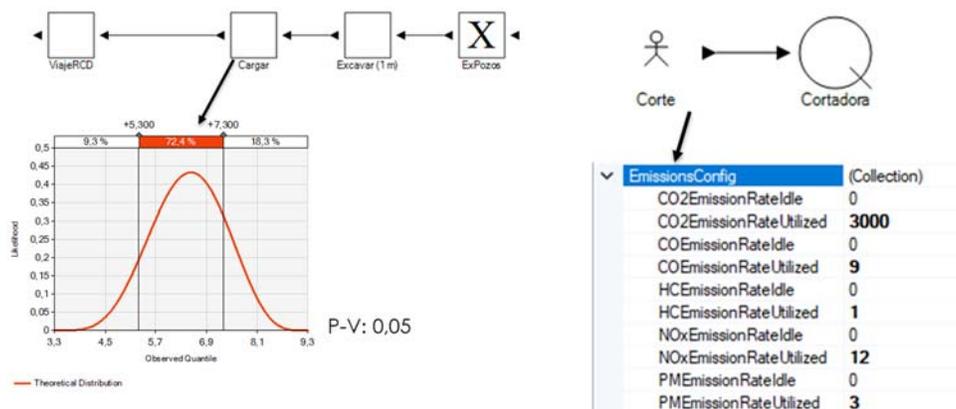


Figura No. 11 Alimentación del modelo con distribución estadística Fuente; Symphony.

Figura No. 10 Calibración para el cálculo de la huella de carbono del modelo. Fuente; Symphony

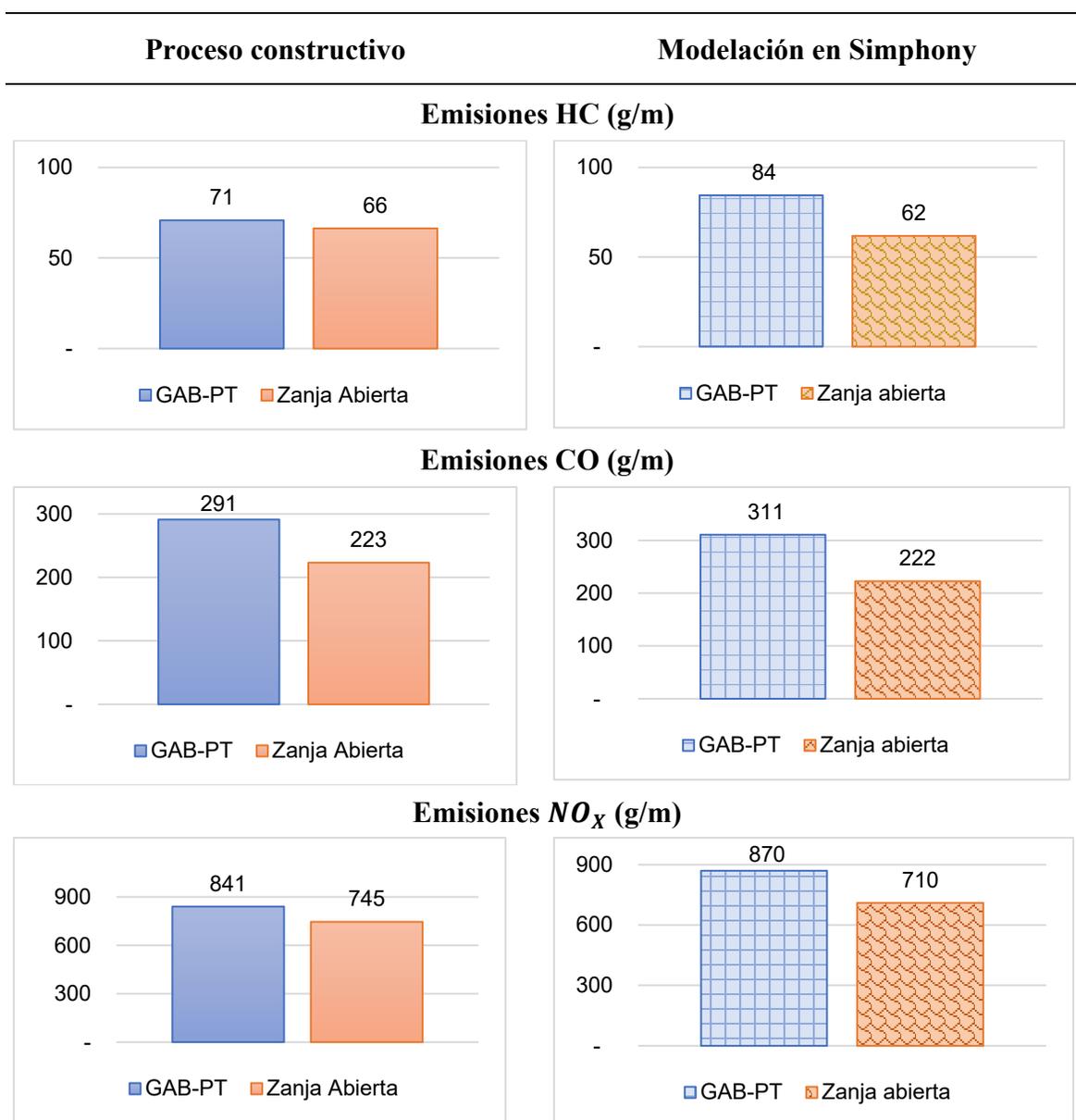
3.3.4 Validación

El recurso al desplegarse ver figura No. 11 presenta la opción: “EmissionConfig”, permitiendo calibrar las emisiones contaminantes: CO_2 , Co, HC, NO_x y PM, siempre en “EmissionRateUtilized”, debe tenerse en cuenta que los valores resultantes varían con base en las distribuciones y por lo tanto las cantidades deben calibrarse con los resultados obtenidos mediante las ecuaciones expuestas en el numeral 2.2.2, aproximando los valores a la unidad. Realizado esto se corre el modelo y se compara los resultados de la modelación con los resultados en el cálculo de la huella de carbono, al igual que las variaciones presentadas para cada tecnología utilizada.

La validación se podrá realizar cuando el modelo se compare con la ejecución de un proyecto de similares características.

3.1. Emisiones generadas durante la construcción proceso constructivo y modelación de elementos discretos

Las gráficas de las figuras 12 y 13 presentan la comparación entre resultados obtenidos del cálculo de la huella de carbono para GAB-PT vs zanja abierta, en el proceso constructivo y en la modelación para los seis gases contaminantes aproximados al metro de instalación. El análisis se realiza en el numeral 4.1.



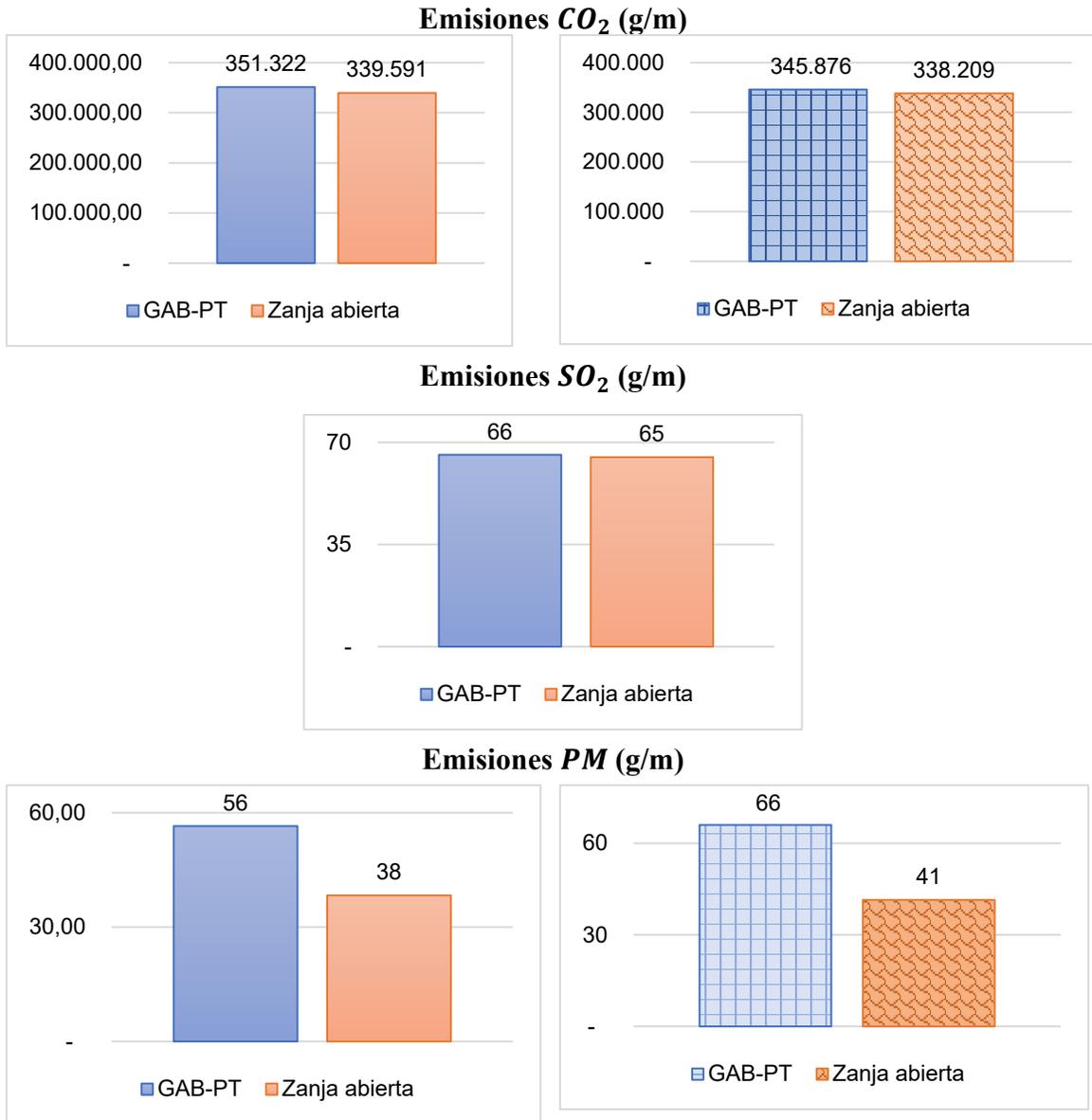


Figura No. 12 Comparativo de emisiones generadas proceso constructivo vs modelación en Simphony por metro de instalación
Fuente: Propia

La figura 13 presenta los resultados obtenidos del cálculo de la huella de carbono equivalente, extractado de las tablas 10-12, esta gráfica confirma que la cantidad de (CO₂e) medido en Kg/m de instalación es ligeramente superior GAB-PT respecto a zanja abierta.

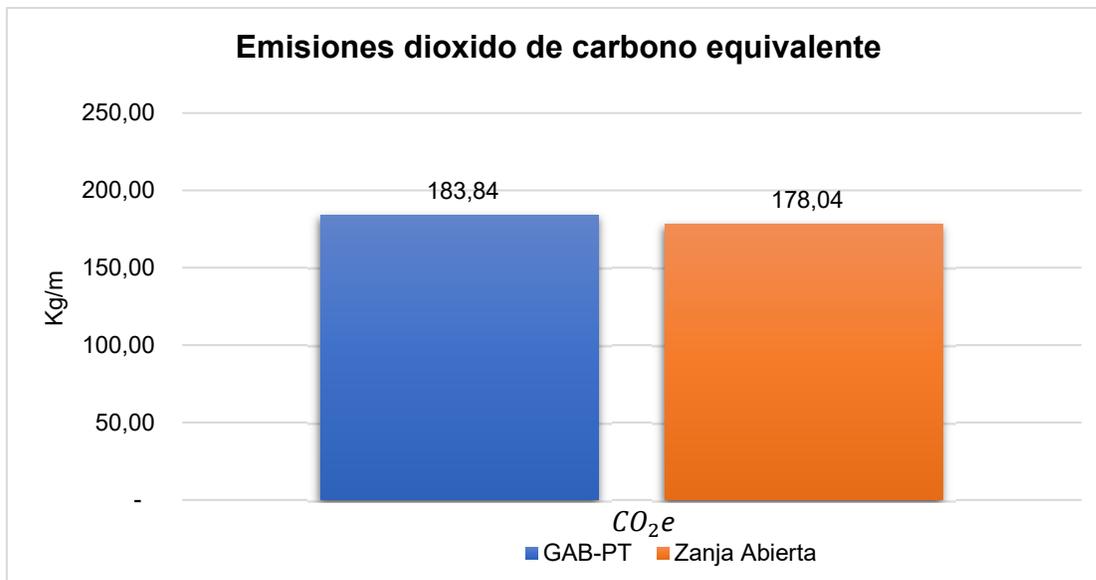


Figura No. 13 Carbono equivalente emitido por m. de instalación

Fuente: Propia

4. Discusión de resultados

4.1. Comparación de las distintas alternativas simuladas

El número de estudios que comparan las emisiones contaminantes con zanja abierta para procesos constructivos, investigadores de la Universidad de Texas (Kaushal et al. 2020b) evalúan tres estudios de caso encontrando que se puede lograr una reducción del 78% al 100% en los GEI usando tecnologías sin zanja, debido a que son considerablemente eficientes en la reducción de emisiones de CO₂ debido a la menor duración del trabajo y poca o ninguna interrupción del flujo de tráfico.

Por su parte investigadores de la Universidad de Arizona (Piratla et al. 2012) compararon emisiones de CO₂ en la construcción de tuberías a cielo abierto y Horizontal Directional Drilling (HDD) en la construcción de una línea de agua potable de 304 mm (12”) desarrollaron un modelo de hoja de cálculo basado en la base de datos USEPA para calcular el CO₂ emitido por la maquinaria de construcción para cada escenario constructivo. Concluyeron que HDD redujo las emisiones de CO₂ en un 47,6%, esta enorme reducción se debió principalmente a que se necesitó menos excavación, relleno, demolición de pavimento y restauración.

Mediante el análisis del índice de sostenibilidad para evaluar los proyectos de instalación

de servicios públicos y ayudar a los tomadores de decisiones a cuantificar el impacto ambiental de las tecnologías sin zanja investigadores de la Universidad de Arizona (Ariaratnam et al. 2013) estudiaron cuatro métodos de instalación de tuberías GAB-PT, microtunelación, HDD, zanja abierta, utilizando una calculadora para determinar las emisiones contaminantes. Los resultados demostraron que GAB-PT, generaron las emisiones más bajas, seguidas por microtunelación 48,36%, HDD 42,68% y zanja abierta 31,65% comparadas con GAB-PT.

De acuerdo con otros investigadores (Kaushal et al. 2020b), concluye “hay pocos estudios sobre instalaciones en zanja abierta”, muchos de estos estudios se enfocaron en la construcción de proyectos nuevos, estudiando el consumo de combustible, eliminación de RCD, la extracción, cargue y transporte de materiales de relleno (Loss et al. 2018)

Para el caso de estudio las emisiones de GEI a pesar de las ventajas de las tecnologías sin zanja fueron más altas como resultado de una mayor duración del proyecto y aumento en el requerimiento de maquinaria en la construcción de pozos de rescate, sin embargo, los resultados obtenidos por metro para 30 meses de construcción por el método GAB-PT comparados con los tres meses en la instalación a zanja abierta, permiten establecer que las tecnologías sin zanja son más amigables con el medio ambiente.

La tabla No 3, presenta los resultados obtenidos en las tecnologías estudiadas y la diferencia en porcentaje en la variación de las emisiones producidas por metro de instalación, tanto para lo realizado en campo, como por lo reportado en la modelación de elementos discretos, se observa que la cantidad de contaminantes emitidos al medio ambiente debido a la instalación de la tubería por el método GAB-PT es mayor que zanja abierta, sin embargo, las cantidades emitidas son similares, por lo tanto, teniendo en cuenta el tiempo de instalación 3 meses en zanja abierta contra 30 meses GAB-PT, se infiere que la instalación GAB-PT genera menor contaminación en GEI que zanja abierta, sin embargo, los resultados obtenidos son contrarios a los reportado en la literatura, no se encontraron estudios centrados en errores cometidos al escoger un sistema inadecuado de construcción y que presente resultados diferentes, siendo estos de gran importancia para el aprendizaje de diseñadores, constructores y empresas de servicios públicos.

Tabla 3 Diferencia en emisiones contaminantes / m.

Emisiones	Campo			Modelo		
	Zanja abierta (g/h)	GAB-PT (g/h)	Diferencia (%)	Zanja abierta (g/h)	GAB-PT (g/h)	Diferencia (%)
HC	66	71	6%	84	62	26,00%
CO	223	291	23%	311	222	28,29%
NO _x	745	841	11%	870	710	18,39%
PM	38	56	32%	66	41	37,87%
CO ₂	339.591	351.322	3%	345.876	338.209	2,21%

4.2. Limitaciones de los resultados

El cálculo de la huella de carbono se realizó únicamente para el proceso constructivo, no se incluyó transporte de materiales, maquinaria y equipos al sitio de instalación, tampoco se tuvo en cuenta los procesos realizados en fábrica. Igualmente se realizó con base en los reportes de combustibles suministrados por el contratista de la EAAB, para cada máquina utilizada en la construcción, el transporte de RCD a escombrera autorizada, y el cargue de materiales de relleno, para un solo proyecto en la ciudad de Bogotá.

5. Conclusiones

5.1. Implicaciones y resultados

La diferencia de emisiones de gases contaminantes y de emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), estimados por metro de instalación presentan un caso atípico; la investigación demostró que la instalación a zanja abierta generó menos contaminantes que la tecnología por el método GAB-PT, debido principalmente a la mayor duración en tiempos de instalación, a la necesidad de construir pozos de rescate para el equipo y a la gran cantidad de inyecciones de mortero que fue necesario realizar, confirmando la hipótesis de la investigación.

Se implementó un modelo de cálculo de la huella de carbono, basado en elementos discretos mediante el uso del software Symphony, principalmente por que se ha convertido en la base

de varios sistemas de simulación de construcción (Sawhney et al. 1998b), adicionalmente las aplicaciones reales reportaron mejoras significativas en la productividad de la construcción, siendo elogiado por su capacidad para estudiar un sistema del mundo real en cualquier detalle deseado (Shi 2002) el cual fue suministrado por la Universidad de Alberta; para las tecnologías de estudio, incluyendo los tiempos de duración, distribuciones estadísticas determinadas con base en el consumo de combustible de cada máquina convertidas a horas y las emisiones de gases contaminantes calculadas de acuerdo con USEPA.

La comparación de resultados de las emisiones contaminantes en campo versus las obtenidas de la calibración del modelo, presentaron una diferencia promedio para el sistema GAB-PT de 7,69% y para zanja abierta de 1,12%, confirmando la calibración del modelo, así como las distribuciones estadísticas que fueron las adoptadas.

La investigación demuestra la bondad de la modelación de elementos discretos, ya que permite al tomador de decisiones, conocer la generación de gases contaminantes que se pueden generar en campo, con base en las distribuciones de probabilidad para consumos de combustible para las tecnologías objetos de estudio.

6. Referencias

- Alarcón, Jonathan Armando, and José Luis Pacheco. 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." Pontificia Universidad Javeriana.
- Alsadi, Alhossin A., and John C. Matthews. 2020a. "Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during Installation, Operation, and Disposal Phases." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 11 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000422).
- . 2020b. "Evaluation of Carbon Footprint of Pipeline Materials during Installation, Operation, and Disposal Phases." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 11 (2): 04020005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ps.1949-1204.0000422](https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000422).
- Alsadi, Alhossin, John C. Matthews, and Elizabeth Matthews. 2020. "Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 11 (1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000395](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000395).
- Ariaratnam, Samuel T., Kalyan Piratla, Aaron Cohen, and Matthew Olson. 2013. "Quantification of Sustainability Index for Underground Utility Infrastructure Projects." *Journal of Construction Engineering and Management* 139 (12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000763).
- Ariaratnam, Samuel T., and Shaik S Sihabuddin. 2009. "Comparison of Emitted Emissions Between Trenchless Pipe Replacement and Open Cut Utility Construction." *Journal of Green Building* 4 (2): 126–40. <https://doi.org/10.3992/jgb.4.2.126>.

- Calderón, Diego Raúl. 2020. "Introducción a las tecnologías sin zanja para la inspección, rehabilitación, reposición y construcción de redes de acueducto y alcantarillado." In *Introducción a Las Tecnologías Sin Zanja Para La Inspección, Rehabilitación, Reposición y Construcción de Redes de Acueducto y Alcantarillado*, 7. Bogotá - Colombia: Encuentros Magistrales de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP.
- "Cumbre Sobre La Acción Climática ONU 2019." 2019. 2019.
<https://www.un.org/es/climatechange/un-climate-summit-2019.shtml>.
- Delignette-Muller, Marie Laure, and Christophe Dutang. 2015. "Fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions." *Journal of Statistical Software* 64 (4): 1–34.
<https://doi.org/10.18637/jss.v064.i04>.
- Duque, Juan Esteban. 2017. "Beneficios Socio-Ambientales de Las Tecnologías Sin Zanja En Colombia." Medellín: EAFIT.
- Jewbunchu, Tawat, and Vachara Peansupap. 2018. "Development of Simulation Model for Estimating Gas Emissions from Equipment in Railway Construction Processes." *International Journal of GEOMATE* 14 (46): 113–20. <https://doi.org/10.21660/2018.46.CEM141>.
- Kaushal, Vinayak, and Mohammad Najafi. 2020. "Comparative Assessment of Environmental Impacts from Open-Cut Pipeline Replacement and Trenchless Cured-in-Place Pipe Renewal Method for Sanitary Sewers." *Infrastructures* 5 (6): 48.
<https://doi.org/10.3390/infrastructures5060048>.
- Kaushal, Vinayak, Mohammad Najafi, and Ramtin Serajiantehrani. 2020a. "Sanitary Sewer Construction Cost Comparison Between Trenchless Cipp Renewal and Open-Cut Replacement." *Proceedings of International Structural Engineering and Construction* 7 (1).
[https://doi.org/10.14455/isec.res.2020.7\(1\).pip-01](https://doi.org/10.14455/isec.res.2020.7(1).pip-01).
- . 2020b. "Environmental Impacts of Conventional Open-Cut Pipeline Installation and Trenchless Technology Methods: State-of-the-Art Review." *JOURNAL OF PIPELINE SYSTEMS ENGINEERING AND PRACTICE* 11 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000459](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000459).
- Kramer, Steven R., William J. McDonald, and James C. Thomson. 1992. "Introduction and Overview." In *An Introduction to Trenchless Technology*, 1–16. Boston, MA: Springer US.
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7296-1_1.
- Loss, Andrea, Sara Toniolo, Anna Mazzi, Alessandro Manzardo, and Antonio Scipioni. 2018. "LCA Comparison of Traditional Open Cut and Pipe Bursting Systems for Relining Water Pipelines." *Resources, Conservation and Recycling* 128 (January): 458–69.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.001>.
- Lu, Hongfang, John Matthews, and Tom Iseley. 2020. "How Does Trenchless Technology Make Pipeline Construction Greener? A Comprehensive Carbon Footprint and Energy Consumption Analysis." *Journal of Cleaner Production* 261 (July).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121215>.
- McKim, Robert A. 1997. "Selection Method for Trenchless Technologies." *Journal of Infrastructure Systems* 3 (3): 119–25. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(1997\)3:3\(119\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(1997)3:3(119)).

- Moradi, Saeed, Farnad Nasirzadeh, and Farzaneh Golkhoo. 2015. "A Hybrid SD-DES Simulation Approach to Model Construction Projects." *Construction Innovation* 15 (1): 66–83. <https://doi.org/10.1108/CI-10-2013-0045>.
- Najafi, Mohammad. 2010. *Trenchless Technology Piping*. Edited by The McGraw-Hill Companies. 2010th ed. New York.
- Pinzón, Jorge Andrés. 2011. "Evaluación y Perspectivas de La Utilización de Tecnologías Sin Zanja En Redes de Alcantarillado de Bogotá." Pontificia Universidad Javeriana.
- Piratla, Kalyan R., Samuel T. Ariaratnam, and Aaron Cohen. 2012. "Estimation of CO2 Emissions from the Life Cycle of a Potable Water Pipeline Project." *Journal of Management in Engineering* 28 (1): 22–30. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000069](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000069).
- Pulido, Ana Deli. 2020. "Cartilla_INGEI.Pdf."
- Pulido, Ana Derly. 2012. "Cartilla_INGEI.Pdf."
- Pulido, Ana Derly Pulido, Rodrigo Jimenez, Juan David Turriago, and Javier Eduardo Mendoza. 2012. "Inventario Nacional de Gases de Invernadero (GEI) Colombia." IDEAM, PNUD, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2012. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf.
- Sawhney, Anil, Simaan M. Abourizk, and Daniel W. Halpin. 1998a. "Construction Project Simulation Using CYCLONE." *Canadian Journal of Civil Engineering* 25 (1): 16–25. <https://doi.org/10.1139/197-047>.
- . 1998b. "Construction Project Simulation Using CYCLONE." *Canadian Journal of Civil Engineering* 25 (1): 16–25. <https://doi.org/10.1139/197-047>.
- Shang, Min, Yiguo Xue, and Qiang Xu. 2011. "Application of Guided Boring Trenchless Technology on Pipeline Cross Railway." *2011 International Conference on Multimedia Technology, ICMT 2011*, 975–78. <https://doi.org/10.1109/ICMT.2011.6002789>.
- Shi, Jonathan Jingsheng. 2002. "Three Methods for Verifying and Validating the Simulation of a Construction Operation." *Construction Management and Economics*. <https://doi.org/10.1080/01446190210151032>.
- Sihabuddin, Shaik S., and Samuel T. Ariaratnam. 2009a. *Methodology for Estimating Emissions in Underground Utility Construction Operations. Journal of Engineering, Design and Technology*. Vol. 7. <https://doi.org/10.1108/17260530910947259>.
- . 2009b. *Methodology for Estimating Emissions in Underground Utility Construction Operations. Journal of Engineering, Design and Technology*. Vol. 7. <https://doi.org/10.1108/17260530910947259>.
- Taghaddos, Maedeh, Hosein Taghaddos, Ulrich Hermann, Yasser Mohamed, and Simaan AbouRizk. 2021a. "Hybrid Multi-Mode Simulation and Optimization for Subarea Scheduling in Heavy Industrial Construction." *Automation in Construction* 125 (January): 103616. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103616>.

- . 2021b. “Hybrid Multi-Mode Simulation and Optimization for Subarea Scheduling in Heavy Industrial Construction.” *Automation in Construction* 125 (January): 103616. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103616>.
- US EPA. 2010. “Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition.” *EPA-420-R-10-018. NR-009d. U.S. Environmental Protection Agency*, 1–141.
- Wu, Lingzi, and Simaan AbouRizk. 2021. “Numerical-Based Approach for Updating Simulation Input in Real Time.” *Journal of Computing in Civil Engineering* 35 (2): 04020067. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000948](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000948).

7. Anexos

Anexo No 1. tablas

Equipos utilizados en GAB-PT

Tabla 4 Año 2018 Listado de equipos utilizados GAB-PT

Equipo	Marca	Modelo	Peso del equipo (lb)	TIER	Potencia bruta (HP)	Potencia neta (HP)	Distancia (mi)	Tiempo (h)
Retroexcavadora PC-130	Komatsu	2011	28.987,00	3	96,70	91,70		130,00
Retroexcavadora 140 LC-9	Hyundai	2013	37.210,00	3	119,00	113,00		240,00
Retroexcavadora 160	Hitachi	2014	35.828,00	2	130,00	122,00		130,00
Retroexcavadora R220LC-9S	Hyundai	2014	55.600,00	4	167,00	157,00		109,00
Generador MP-105	Perkins	2018	2.401,00	4	105,00	103,00		220,00
Generador P-100	FG Wilson	2014	2.731,28	4	93,05	91,62		80,00
Minicargador	Bobcat 570	2014	2.079,00	4	160,00	60,00		
Minicargador	Bobcat 570	2014	2.079,00	4	180,00	60,00		91,00
Camion EX90C	Hyundai	2017	19.824,00	4	150,00	141,00	146,02	
Volqueta	Freightliner	2013	46.000,00	4	285,00	280,00	177,71	
Rodillo vibrocompactador	Equipmaster SvH-50	2017	295,10	1	10,00	9,85		690,00
Cortadora de cocconcreto	CCGMAX390	2017	242,29	1	13,00	12,80		40,00

Tabla 5 Año 2019 Listado de equipos utilizados GAB-PT

Equipo	Marca	Modelo	Peso del equipo (lb)	TIER	Potencia bruta (HP)	Potencia neta (HP)	Distancia (mi)	Tiempo (h)
Retroexcavadora con cargador 416E	CATERPILLAR	2011	14.881,00	3	94,00	89,00		110,00
Retroexcavadora ZAXIS - 120	HITACHI	2018	27.600,00	2	88,00	84,00		10,00
Retroexcavadora PC-130	KOMATSU	2011	28.987,00	3	96,70	91,70		110,00
Retroexcavadora 140 LC-9	HYUNDAI	2013	37.210,00	3	119,00	113,00		130,00
Retroexcavadora R220LC-9S	HYUNDAI	2014	55.600,00	4	167,00	157,00		110,00
Retroexcavadora 320	CATERPILLAR	2018	48.458,15	3	156,00	143,00		30,00
Generador P-100	FG Wilson	2014	2.731,28	4	93,05	91,62		180,00
Compresor 185 wjd	INGERSOLL RAND	2018	2.321,59	4	44,00	42,00		10,00
Minicargador	Bobcat 570	2014	2.079,00	4	160,00	60,00		310,00
Minicargador	Bobcat 570	2014	2.079,00	4	180,00	60,00		100,00
Camion EX90C	HYUNDAI	2017	19.824,00	4	150,00	141,00	279,62	
Volqueta	Freightliner	2013	46.000,00	4	285,00	280,00	99,42	
Rodillo vibrocompactador	Equipmaster SvH-50	2017	295,10	1	10,00	9,85		980,00
Cortadora de cocconcreto	CCGMAX390	2017	242,29	1	13,00	12,80		290,00

Tabla 6 Año 2020 Listado de equipos utilizados GAB-PT

Equipo	Marca	Modelo	Peso del equipo (lb)	TIER	Potencia bruta (HP)	Potencia neta (HP)	Distancia (mi)	Tiempo (h)
Retroexcavadora con cargador 416E	CATERPILLAR	2011	14.881,00	3	94,00	89,00		50,00
Retroexcavadora PC-130	KOMATSU	2011	28.987,00	3	96,70	91,70		10,00
Retroexcavadora 140 LC-9	HYUNDAI	2013	37.210,00	3	119,00	113,00		320,00
Retroexcavadora ZX160LC-5	HITACHI	2014	35.828,00	2	130,00	122,00		20,00
Retroexcavadora R220LC-9S	HYUNDAI	2014	55.600,00	4	167,00	157,00		320,00
Motoniveladora CAT 120G	CATERPILLAR	2014	36.242,29	3	93,00	87,42		10,00
Compactador Dynapac CA150 LAT-36A	DYNAPAC	2014	15.300,00	4	80,00	75,20		50,00
Generador P-100	FG Wilson	2014	2.731,28	4	93,05	91,62		570,00
Power Pack P-100E	AKKERMAN	2014	7.000,00	4	100,00	94,00		20,00
Volqueta	Freightliner	2013	46.000,00	4	285,00	280,00	236,12	
Grua	Terex RT230	1998	55.947,00	3	130,00	128,00		20,00
Minicargador	Bobcat 570	2014	2.079,00	4	160,00	60,00		730,00
Camion Hyunday EX90C	HYUNDAI	2017	19.824,00	4	150,00	141,00	242,33	
Rodillo vibrocompactador	Equipmaster SvH-50	2017	295,10	1	10,00	9,85		660,00
Cortadora de coconcreto	CCGMAX390	2017	242,29	1	13,00	12,80		70,00

Tabla 7 Distribuciones estadísticas para modelación GAB-PT

Equipo	Distribución	Alfa (Mu)	Beta (S)	Menor (h)	Mayor (h)
Minicargador	Logistic	9,0000	0,4448		
Cortadora	Beta	20,6132	34,5666	1,1385	22,7702
Demolidor	Gamma	2,3775	4,2722		
Camión	Logistic	10,0000	0,8900		
Volquetas	Weibull	28,3391	10,5973		
Retroexcavadora Hyundai 140	Logistic	12,6000	1,0241		
Retroexcavadora 220	Beta	3,6400	1,9000	1,4616	14,2171
Generador	Beta	0,3500	0,5000	2,2695	20,9509

Equipos utilizados en Zanja abierta

Tabla 8 Año 2018 Listado de equipos utilizados zanja abierta.

Equipo	Marca	Modelo	Peso del equipo (lb)	TIER	Potencia bruta (HP)	Potencia neta (HP)	Distancia (mi)	Tiempo (h)
Retroexcavadora 140 LC-9	HYUNDAI	2013	37.210,00	3	119,00	113,00		110,00
Retroexcavadora R220LC-9S	HYUNDAI	2014	55.600,00	4	167,00	157,00		111,00
Generador P-100	FG Wilson	2014	2.731,28	4	93,05	91,62		250,00
Camion EX90C	HYUNDAI	2017	19.824,00	4	150,00	141,00	77,67	
Minicargador	Bobcat 570	2014	2.079,00	4	180,00	60,00		310,00
Volqueta	Freightliner	2013	46.000,00	4	285,00	280,00	874,27	
Rodillo vibrocompactador	Equipmaster SvH-E	2017	295,10	1	10,00	9,85		360,00
Cortadora de coconcreto	CCGMAX390	2017	242,29	1	13,00	12,80		280,00

Tabla 9 Distribuciones estadísticas para modelación zanja abierta

Equipo	Distribución	Alfa	Beta	Menor (h)	Mayor (h)
Minicargador	Beta	0,5710	0,0270	5,1678	10,4500
Camion	llogis	6,7584	6,3410		
Generador	Beta	2,2145	0,2009	0,9530	10,8308
Retroexcavadora 220	Beta	0,0286	0,0219	5,5961	12,6683
EMACPM	Beta	0,2740	0,4574	2,1661	21,6612
EMGAS	Weibull	2,9182	11,1733		

Tabla 10 Cálculo huella de carbono equivalente GAB-PT (2018)

EQUIPOS	MARCA	MODELO	Combustible		CO ₂ e
			Diesel	Gasolina	
			(gl)	(gl)	(Kg)
RETROEXCAVADORA PC-130	KOMATSU	2011	392,64		3.984,86
RETROEXCAVADORA 140 LC-9	HYUNDAI	2013	1.076,83		10.928,74
Retro Hitachi ZX160LC-5	Hitachi	2014	123,73		1.255,70
RETROEXCAVADORA R220LC-9S	HYUNDAI	2014	1.181,04		11.986,37
GENERADOR PERKINS MP-105	Perkins	2018	1.065,66		10.815,37
GENERADOR FG WILSON P-100	FG Wilson	2014	428,06		4.344,40
Minicargador	Bobcat 570	2014	188,49		1.912,98
Minicargador	Bobcat 570	2014	220,32		2.236,01
Camion Hyunday EX90C	HYUNDAI	2017	437,10		4.436,16
VOLQUETA TLO221	Freightliner	2013	819,41		8.316,17
EMACPM (Rodillo Vibrocompactador Master SvH-50 Equipmaster)		2017	2.074,34		21.052,49
EMC (CORTADORA DE CONCRETO CCGMAX390)		2017		372,44	3.280,65
Valor total			8.007,61	372,44	84.549,91

Tabla 11 Cálculo huella de carbono equivalente GAB-PT (2019)

EQUIPOS	MARCA	MODELO	Combustible		CO ₂ e
			Diesel	Gasolina	
			(gl)	(gl)	(Kg)
RETROEXCAVADORA CON CARGADOR 416E	CATERPILLAR	2011	260,53		2.644,10
RETROEXCAVADORA ZAXIS - 120	HITACHI	2018	25,00		253,73
RETROEXCAVADORA PC-130	KOMATSU	2011	325,68		3.305,28
RETROEXCAVADORA 140 LC-9	HYUNDAI	2013	383,90		3.896,22
RETROEXCAVADORA R220LC-9S	HYUNDAI	2014	266,79		2.707,64
RETROEXCAVADORA 320	CATERPILLAR	2018	72,31		733,90
GENERADOR FG WILSON P-100	FG Wilson	2014	483,64		4.908,43
COMPRESOR INGERSOLL RAND 185 wjd	INGERSOLL RAND	2018	22,67		230,06
Minicargador	Bobcat 570	2014	357,94		3.632,72
Minicargador	Bobcat 570	2014	105,67		1.072,45
Camion Hyunday EX90C	HYUNDAI	2017	508,52		5.160,96
VOLQUETA TLO221	Freightliner	2013	457,99		4.648,11
EMACPM (Rodillo Vibrocompactador Master SvH-50 Equipmaster)		2017	1.352,11		13.722,56
EMC (CORTADORA DE CONCRETO CCGMAX390)		2017		243,96	2.148,93
Valor total			4.622,74	243,96	49.065,07

Tabla 12 Cálculo huella de carbono equivalente GAB-PT (2020)

EQUIPOS	MARCA	MODELO	Combustible		CO ₂ e
			Diesel	Gasolina	
			(gl)	(gl)	(Kg)
RETROEXCAVADORA CON CARGADOR 416E	CATERPILLAR	2011	139,16		1.412,35
RETROEXCAVADORA PC-130	KOMATSU	2011	16,41		166,57
RETROEXCAVADORA 140 LC-9	HYUNDAI	2013	1.158,32		11.755,75
Retro Hitachi ZX160LC-5	HITACHI	2014	30,45		309,04
RETROEXCAVADORA R220LC-9S	HYUNDAI	2014	960,25		9.745,60
Motoniveladora CAT 120G	CATERPILLAR	2014	36,63		371,76
Compactador Dynapac CA150 LAT-36A	DYNAPAC	2014	79,36		805,43
GENERADOR FG WILSON P-100	FG Wilson	2014	693,50		7.038,32
AKERMAN POWER PACK P-100E	AKKERMAN	2014	100,69		1.021,90
VOLQUETA TLO221	Freightliner	2013	1.083,81		10.999,58
Grua	Terex RT230	1998	100,00		1.014,90
Minicargador	Bobcat 570	2014	851,69		8.643,85
Camion Hyunday EX90C	HYUNDAI	2017	470,35		4.773,58
EMACPM (Rodillo Vibrocompactador Master SvH-50 Equipmaster)		2017	904,84		9.183,24
EMC (CORTADORA DE CONCRETO CCGMAX390)		2017		53,56	471,79
Valor total			6.625,47	53,56	67.713,66