

EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIDAR TERRESTRE (DETECCIÓN Y RANGO DE IMÁGENES POR MEDIO DE LÁSER), PARA SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN EN LA INTEGRIDAD DE LAS TUBERÍAS PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

CRISTIAN NICOLÁS MAHECHA OSORIO

**Proyecto integral de grado para optar al título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

Director:

**ELIANA MARÍA ALDANA ESCALANTE
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D. C.
2023**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Arian Mauricio Sarmiento Orjuela
Líder del jurado

Eliana M. Aldana
Tutor

Camilo García Vivas
Tutor GRS

William López Castrillón
Jurado

Bogotá, D. C., 26 de julio de 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dra. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director de Programa

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
RESEÑA HISTÓRICA	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
ANTECEDENTES	14
OBJETIVOS	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos	17
1 MARCO TEÓRICO	18
1.1 Tecnología LiDAR	18
1.1.1 Tipos de Escaneo LiDAR	18
1.1.2 Ventajas y Limitaciones del LiDAR	18
1.1.3 Diseño de tuberías de transporte	19
1.1.4 Normativa	22
1.1.5 Integridad de tuberías de transporte de hidrocarburos	23
1.1.6 Inspección de Tuberías de Transporte de Hidrocarburos	25
1.1.7 Aplicaciones de LiDAR en la Inspección de Tuberías de transporte de hidrocarburos	27
2 METODOLOGÍA	29

2.1 Factores Metodológicos de Éxito	29
2.2 Equipos y Software	30
2.3 La Ruta Metodológica	31
3 RESULTADOS	34
3.1 Criterios de Ingeniería Usados para Establecer un Buen Diseño de Tuberías	35
3.2 Evaluación del Funcionamiento de los Equipos y Cómo se Aplica en la Integridad de Tuberías	39
3.2.1 Como Facilitar los Métodos de Verificación Tradicionales	45
4 CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	50

RESUMEN

El presente documento tiene la intención de exponer, de una forma clara y concisa, los resultados de una investigación realizada durante la opción de grado pasantía en la carrera de Ingeniería de Petróleos de la Universidad de América, la cual tuvo como propósito evaluar el funcionamiento de la tecnología LiDAR y su posible implementación en la detección de problemas en la tubería de transporte de hidrocarburos. Así, la investigación que se realizó tuvo como base la idea de que el hecho de poder usar la tecnología LiDAR en el transporte de hidrocarburos podría facilitar la detección de problemas y aumentar la seguridad de las líneas de tubería. Para ejemplificar este punto, se hace necesario mencionar que la implementación de la tecnología LiDAR puede resultar sumamente útil para monitorear las tuberías de transporte de hidrocarburos, detectando averías, cortes, problemas de entorno y con el aditamento adecuado corrosión. De acuerdo con lo expuesto, cabe recalcar que el objetivo principal de esta investigación fue evaluar la eficacia y la viabilidad de la tecnología LiDAR como una herramienta innovadora para detectar problemas potenciales en las tuberías y mejorar el mantenimiento preventivo de estas.

Palabras clave: LiDAR, Tuberías, Tecnología, Hidrocarburos, Transporte, Software, Postproceso, Equipos.

INTRODUCCIÓN

LiDAR es el acrónimo de *Light Detection and Ranging*, lo que significa detección por luz y distancia [1].

Se trata de un sistema láser que permite medir la distancia entre el punto de emisión de este hasta un objeto o superficie. El tiempo que tarda ese láser en llegar a su objetivo y volver del mismo, es lo que permite medir la distancia entre los dos puntos. El resultado es que se puede obtener un mapa en 3D de alta resolución para conocer el terreno en cuestión. [2]

Hay tres (3) componentes principales de un instrumento LiDAR: el escáner, el láser y el receptor GPS. Otros elementos que juegan un papel vital en la recolección y análisis de datos son el fotodetector y la óptica. La mayoría de las organizaciones gubernamentales y privadas utilizan helicópteros, vehículos, aviones teledirigidos y aviones para adquirir datos LiDAR. [3]

Actualmente, la recolección de datos a la cual alude este sistema, en general, se realiza mediante tres procesos distintos: el LiDAR aerotransportado, el LiDAR terrestre y la Batimetría, los cuales se explican a continuación:

- LiDAR aerotransportado

En el LiDAR aerotransportado, se instala en un helicóptero o avión teledirigido para recoger datos. Tan pronto como se activa, el LiDAR aerotransportado emite luz hacia la superficie del suelo, que regresa al sensor inmediatamente después de golpear el objeto, dando una medida exacta de su distancia.

- LiDAR terrestre

A diferencia de los aerotransportados, los sistemas LiDAR terrestres se instalan en vehículos en movimiento o trípodes¹ en la superficie terrestre para recoger puntos de datos precisos. Este tipo de sistemas son comunes para observar las carreteras, analizar la infraestructura o incluso recoger nubes de puntos del interior y exterior de los edificios. Los sistemas LiDAR terrestres tienen dos tipos: LiDAR móvil y LiDAR estático. [3]

- LiDAR Batimétrico

Una batimetría se refiere al levantamiento del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, sea este el fondo del mar o el fondo de los lechos de los ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, etc. es decir, la cartografía de los fondos de los diferentes cuerpos de agua. [4]

Ahora bien, para entender qué es el LiDAR, resulta preciso entender, asimismo, cómo funciona:

[Este sistema de medición] sigue un principio sencillo: arrojar luz láser a un objeto en la superficie terrestre y calcular el tiempo que tarda en volver a la fuente LiDAR. Dada la velocidad a la que viaja la luz (aproximadamente 186.000 millas por segundo), el proceso de medición de la distancia exacta a través de LiDAR parece ser increíblemente rápido, sin embargo, es muy técnico. La fórmula que utilizan los analistas para llegar a la distancia exacta del objeto es la siguiente:

La distancia del objeto = (velocidad de la luz x tiempo de retorno) / 2. [3]

¹ En realidad, el trípode es utilizado para una variante del sistema LiDAR terrestre, llamado LiDAR estático.

RESEÑA HISTÓRICA

La empresa GRS GROUP se fundó en el año de 1971 para ofrecer soluciones innovadoras en el sector de la topografía, encabezada por su fundador Giorgio Santoni, topógrafo de alta experiencia en trabajos de obras civiles y diseño de oficinas, entre las que se destacan McGaughy, Marshall, Macmillian y Lucas entre 1956 y 1970. A lo largo de su amplia experiencia, Santoni tuvo una gran influencia en la elaboración de proyectos sumamente importantes como edificios a gran escala, centrales eléctricas, carreteras, autopistas y aeropuertos en diversos sectores del mundo como Europa, África y Oriente Medio. De este modo, el crecimiento de esta empresa ha sido progresivo durante el tiempo, llegando a posicionarse como una empresa de gran importancia en el campo topográfico.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día, el escaneo laser es una tecnología poco utilizada en Colombia, por lo que es pertinente cuestionarse: ¿Cuál es la razón principal por la que el país se ve considerablemente atrasado en este aspecto? Posiblemente, es una cuestión monetaria, puesto que el costo de la implementación de dicha tecnología resulta elevado para las empresas que pretenden implementarla.

ANTECEDENTES

La tecnología LiDAR ha sido probada en Colombia desde el año 2006 en distintos campos de la ingeniería, tanto por contratistas privados nacionales como internacionales, quienes realizan trabajos cartográficos con base en tecnología LiDAR aerotransportada y terrestre [5]. Sin embargo, en la industria petrolera colombiana aún no se ha probado, de modo que no existen antecedentes a nivel nacional de la implementación de este sistema, cuestión que hace que no se conozcan en Colombia los beneficios y las oportunidades que conlleva su ejecución.

En cuanto a la implementación del sistema LiDAR en otros países, se halla el ejemplo de Huesca, España, donde se han hecho trabajos como el de Calvo [6], quien, a partir de un estudio de campo realizó el texto titulado *Implementación del LiDAR terrestre en la caracterización y modelización de análogos de reservorios fluviales*, que arrojó como resultado que la utilización de la tecnología LiDAR permite alcanzar nuevas formas de interpretar y superar distintas dificultades y limitaciones que se tienen al momento realizar la caracterización de afloramientos fluviales. Así, Calvo [6] sugiere que este tipo de tecnología resulta útil en los cuerpos de agua que sean más extensos y que representan un mayor reto tanto en un sentido fisiográfico como en un sentido estratigráfico, puesto que, según muestra su estudio, son precisamente este tipo de terrenos en los que la tecnología ha mostrado “un mayor potencial para ayudar a incrementar sustancialmente la calidad y fiabilidad de las interpretaciones” [6].

En este sentido, es posible ver cómo, para Calvo [6], la implementación de tecnologías LiDAR suponen el avance tanto en “la modelización de afloramientos como análogos de reservorios fluviales como en la comprensión de los mecanismos y procesos que determinaron la evolución de sistemas fluviales antiguos” [6]. Aunado a ello, este estudio permite llegar a la conclusión de que la tecnología LiDAR llegará a ser más asequible económicamente para las empresas, motivo por el cual se incrementará su uso.

Adicionalmente, se debe mencionar que el trabajo de Tao y Hu [7], titulado *Assessment of airborne LiDAR and imaging technology for pipeline mapping and safety applications*, ofrece un precedente importante en cuanto a la utilización del sistema LiDAR. Dicho estudio indica que el uso de tecnologías como el LiDAR puede mejorar la precisión y la seguridad en el mapeo de tuberías. Los datos de LiDAR proporcionan información valiosa para identificar y evaluar riesgos, planificar nuevas líneas de tuberías y mejorar la capacidad de respuesta rápida en caso de accidentes, lo que, a su vez, tiene el potencial de reducir los peligros asociados con el transporte de recursos energéticos a través de las tuberías y mejorar la seguridad en general. Tao y Hu [7] dan cuenta del uso de sensores específicos, ya sea sobrevolando con aerotransportado o LiDAR terrestre, dependiendo del tipo de equipo, de escáner y de la topografía, poniéndolo como una planificación o estrategia de acuerdo con el terreno y los recursos para lograr un escaneo que se acomode a las condiciones y pueda sacársele el máximo provecho.

Partiendo de esto, Tao y Hu [7] aseguran que el uso de esta tecnología es de gran utilidad para prevenir los peligros geológicos, las corrosiones y los daños de terceros. Así, este texto muestra que la tecnología es efectiva para disminución de riesgos y garantizar que los procesos sean adecuados, pues recopila datos rápidamente para los distintos requerimientos del transporte, debido a que el LiDAR ofrece una fotografía digital, dando un valor agregado porque añade imágenes georreferenciadas para el mapeo y la seguridad de tuberías; como señala este texto: “Scientific advances in lidar systems and data processing techniques are opening up new technological opportunities to develop greater capacity to achieve pipeline mapping and safety applications” [7]. Teniendo en cuenta lo anterior, el trabajo de Tao y Hu [7] resulta fundamental como un precedente que expone el hecho de que el uso de tecnología garantiza la seguridad en el diseño y la detección de fugas en las tuberías; así, es posible comprobar la eficiencia del uso de LiDAR en transporte de hidrocarburos.

Con base en lo expuesto, es posible evidenciar cómo la tecnología LiDAR ha tenido buenos resultados a nivel internacional, permitiendo que los trabajos de detección y

georreferenciación puedan realizarse de una forma más precisa y ajustada las necesidades de las industrias. Asimismo, los textos propuestos dan cuenta de lo provechoso que resulta utilizar este tipo de tecnología como un elemento central dentro de su funcionamiento tanto en el campo de la ingeniería como en otros contextos. Según Tao y Hu [7], es posible tener un punto de partida claro para tener un escaneo completo siguiendo los principios principales, dado que se debe tener en cuenta la topografía, que en este caso es bastante compleja, además de la abundante vegetación, los tipos de escáner con los que se cuenta, los equipos y la tecnología a disposición; todo esto para poder tener un proyecto sólido, eficiente y efectivo al efectuar el escaneo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la tecnología LiDAR para su implementación en el transporte de hidrocarburos.

Objetivos Específicos

- Elaborar un proyecto de implementación de la tecnología LiDAR para garantizar un buen diseño de tuberías y minimizar el riesgo en cada una de las etapas de transporte, haciendo un proceso de vuelo con la tecnología y tomando las respectivas imágenes de nubes de puntos.
- Evaluar el funcionamiento de los equipos como GNSS (posicionamiento global por satélite multi frecuencia), equipos LiDAR terrestre y aéreo, drones UAV, computadores especiales, ecosonda monohaz. Además, softwares como Microstation y Civilcad para su reproceso y cómo se aplicarán a la integridad de tuberías en transporte de hidrocarburos.
- Facilitar la detección de daños en los oleoductos por medio del uso de los equipos de la tecnología LiDAR, superando así las barreras que imponen los medios de verificación manuales, tal como sucede con el trabajo de los recorres de línea, el cual no sólo pone en riesgo la integridad humana sino que no resulta tan eficaz como la detección de daños por falla en la conexión, daños por corrosión y daños por intervención humana a través de la tecnología.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Tecnología LiDAR

El sistema LiDAR tiene como principio la emisión de un láser a un objeto en la superficie terrestre para reflejarse y volver a la fuente LiDAR. El tiempo entre la emisión y la recepción de la onda es el valor que se procesa de la herramienta. Cabe señalar que, dada la velocidad a la que viaja la luz (aproximadamente 186 000 millas por segundo), el proceso de medición de la distancia exacta a través de LiDAR parece ser increíblemente rápido, pero es muy técnico. La fórmula que utilizan los analistas para llegar a la distancia exacta del objeto es la siguiente:

La distancia del objeto = (velocidad de la luz x tiempo de retorno) / 2.

1.1.1 Tipos de Escaneo LiDAR

- LiDAR aerotransportado
- LiDAR terrestre o estático
- LiDAR batimétrico

1.1.2 Ventajas y Limitaciones del LiDAR

- Ventajas: la tecnología permite generar datos tridimensionales con alto detalle geométrico y topográfico del entorno, los objetos y las superficies. De esta manera, el sistema LiDAR permite visualizar con calidad y facilidad los factores expuestos, debido a que puede cubrir una gran extensión de terreno en un tiempo sumamente bajo, automatizando procesos actuales. Esto significa una ventaja en cuanto a la recolección y el análisis de datos de gran escala en un entorno amplio. Además, se debe mencionar que, al no tener contacto físico, el sistema LiDAR no constituye una tecnología intrusiva, lo cual reduce el riesgo o el volumen de personal que se puede

traducir en costos y alteraciones con el medio ambiente. Es de resaltar su capacidad de poder omitir objetos vegetación o cualquier elemento entorno no deseada, por lo que es comparada con el ojo de un águila.

- Limitaciones: el costo del equipo para emplear el sistema LiDAR, en general, es elevado. Es por este motivo que pocas empresas en Colombia lo tienen, puesto que, en ocasiones, esta tecnología no es accesible para que todas las empresas. Otra limitación para tener en cuenta es que las limitaciones climáticas pueden ser un problema para el desarrollo del sistema LiDAR, debido a que la lluvia es un impedimento para el uso del equipo. De igual forma, se debe señalar que el equipo presenta problemas para tomar y analizar los datos de los objetos transparentes. Finalmente, hay que mencionar que los softwares son especializados y se necesita personal calificado para su manipulación, lo cual puede ser significativo en cuanto a los precios, pues no sólo se necesita tener en cuenta el costo del equipo sino también el del personal especializado.

1.1.3 Diseño de tuberías de transporte

En el ámbito de la ingeniería de transporte, el diseño de sistemas de líneas de tuberías destinados al transporte de hidrocarburos emerge como un aspecto de extrema relevancia y complejidad. Estas redes de tuberías desempeñan un papel crítico en la distribución eficiente y segura de recursos energéticos clave, como el petróleo y el gas, que impulsan diversas industrias a nivel mundial. El diseño preciso y cuidadosamente estructurado de estas líneas de transporte no solo garantiza la optimización de la distribución de hidrocarburos, sino que también aborda preocupaciones cruciales en términos de seguridad operativa y protección ambiental.

Algunos de los requisitos generales esenciales son los siguientes. Es fundamental familiarizarse con ellos porque son aplicables a cualquier modelo de tuberías en cualquier tipo de línea de transporte.

- Planificación y concepción: previo al inicio de la construcción, se emprende una etapa de meticulosa planificación que abarca aspectos como el trayecto de la tubería, las condiciones topográficas y geológicas, la selección de materiales y los imperativos normativos. El diseño tiene la responsabilidad de considerar variables técnicas y de seguridad, tales como la resistencia a la corrosión, la presión y el caudal.
- Preparación del terreno: se procede a llevar a cabo la limpieza y nivelación del terreno a lo largo de la senda predeterminada. Este proceso incorpora la supresión de vegetación, obstáculos y obstrucciones que pudieran interferir con el proceso de instalación de la tubería.
- Excavación y zanja: se procede a realizar una excavación a lo largo de la traza de la tubería, asegurándose de que esta sea lo suficientemente profunda y amplia como para albergar la tubería en conjunto con cualquier capa de protección que se requiera.
- Implantación de la tubería: la colocación de la tubería es llevada a cabo con precisión en la zanja, siendo soldada o conectada empleando técnicas de unión adecuadas. Resulta imperativo garantizar que las soldaduras sean robustas y cumplan con los estándares de seguridad.
- Recubrimiento y aislamiento: en pos de prevenir la corrosión y salvaguardar la tubería de los elementos del entorno, se aplica un recubrimiento especializado. Asimismo, se puede incorporar aislamiento térmico en situaciones que involucren el transporte de productos que exijan condiciones de temperatura específicas.
- Pruebas e inspecciones: antes de proceder al enterramiento de la tubería, se realizan pruebas integrales con la finalidad de asegurar la solidez y estanqueidad del sistema. Es común llevar a cabo pruebas hidrostáticas y de integridad, como medida para asegurarse de que no existan pérdidas ni problemas estructurales.
- Restitución y renovación: una vez que la tubería ha sido instalada y sometida a pruebas exitosas, se procede al relleno de la zanja y a la restauración de la superficie

del terreno, devolviéndola a su estado original o en conformidad con las regulaciones locales.

En el siguiente análisis, se explorará a fondo el área de diseño, un componente esencial en el proceso de construcción de sistemas de tuberías. En esta etapa, se hace evidente la relevancia de la tecnología, especialmente el LiDAR, que desempeña un papel crucial en la mejora de la eficiencia y precisión de este proceso.

El “Área de Diseño” en el contexto de la construcción de tuberías asume una carga de responsabilidad primordial. Su tarea principal es entregar un producto final completo y preciso que incluye no solo planos e isométricos detallados, sino también una gestión eficiente y precisa del material necesario. Este sector se destaca por su capacidad para proporcionar el material adecuado, contabilizado meticulosamente, lo que contribuye a la optimización de los recursos y evita posibles contratiempos durante la construcción. Además de esta responsabilidad crítica, el Área de Diseño también desempeña un papel integral en la disposición estratégica de los elementos que respaldan el funcionamiento de la red de tuberías, como equipos, boquillas y elementos estructurales.

La tecnología juega un papel esencial en la mejora y optimización de esta fase. En particular, el LiDAR, una tecnología de detección remota basada en láser, emerge como una herramienta valiosa en la recopilación de datos topográficos y estructurales. Esta tecnología permite obtener información precisa y detallada sobre el terreno y las estructuras circundantes, lo que resulta fundamental para una planificación efectiva del diseño. El LiDAR facilita la identificación temprana de posibles obstáculos en la ruta de la tubería, permitiendo ajustes precisos y evitando costosos retrabajos.

Es importante destacar que Bernal [8] resalta la importancia de los criterios de cálculo y diseño en tuberías para plantas petroquímicas. Estos conceptos son intrínsecos al proceso de diseño en general y respaldan la responsabilidad del "Área de Diseño". La tecnología, como el LiDAR, enriquece estos criterios al proporcionar datos actualizados y detallados que mejoran la toma de decisiones y la eficiencia general

1.1.4 Normativa

Dentro del ámbito del diseño de tuberías, las normas que predominan y guían las prácticas y criterios técnicos han encontrado su origen y desarrollo en los Estados Unidos. Estas pautas normativas representan un conjunto invaluable de directrices que abarcan desde aspectos de seguridad y calidad hasta cuestiones operativas y medioambientales. En este contexto, es esencial reconocer el papel central que desempeñan las principales asociaciones de ingeniería en la formulación y evolución de estas normas de diseño.

La norma B31.4, desarrollada por el Instituto Americano de Ingenieros de Petróleo (API) y otras organizaciones clave, adquiere un papel fundamental en el proceso de construcción de líneas de tuberías de transporte, especialmente cuando se integra la tecnología LiDAR. Esta normativa proporciona una guía esencial para garantizar la seguridad, la eficiencia y la fiabilidad de las redes de tuberías destinadas al transporte de hidrocarburos, gas, amonio y alcoholes [9].

En el contexto de la construcción de líneas de tuberías de transporte, la norma B31.4 cobra relevancia al abordar aspectos críticos del diseño y la operación. Esta norma especifica criterios para la selección de materiales resistentes a la corrosión y capaces de soportar las condiciones extremas a las que las tuberías estarán expuestas. También establece directrices para la soldadura, garantizando la calidad y la durabilidad de las uniones entre las tuberías.

La introducción del LiDAR en el proceso de construcción agrega una dimensión tecnológica significativa. El LiDAR, una tecnología de detección remota basada en láser, proporciona datos topográficos y estructurales precisos y detallados. Esto permite a los ingenieros y diseñadores obtener información valiosa sobre la topografía del terreno, las estructuras existentes y posibles obstáculos a lo largo de la ruta de la tubería.

Al incorporar los datos LiDAR en el proceso de diseño y construcción, las líneas de tuberías pueden ser trazadas con mayor precisión y eficiencia. Los datos LiDAR ayudan

a identificar potenciales desafíos, como cambios en el terreno o estructuras cercanas que podrían interferir con la construcción. Esto permite una planificación más precisa y la implementación de soluciones proactivas para evitar obstáculos y minimizar ajustes posteriores.

Además de la planificación y el trazado, la norma B31.4 también incluye consideraciones operativas y de seguridad. Aborda la evaluación de la presión, la gestión de la integridad del sistema y la implementación de medidas para prevenir fugas y responder a emergencias. La combinación de estas directrices normativas con los datos LiDAR mejora la seguridad operativa y la sostenibilidad a largo plazo de las líneas de tuberías de transporte.

Estas normas de diseño de tuberías abarcan diversos aspectos, desde la selección de materiales y métodos de soldadura hasta las consideraciones para la resistencia y durabilidad de las estructuras. Además, abordan temas esenciales como el manejo seguro de fluidos, la mitigación de impactos ambientales y la protección contra accidentes. Su alcance se extiende a la implementación de técnicas de inspección y pruebas, así como a la regulación de parámetros de diseño que aseguran la integridad de las tuberías a lo largo de su vida útil.

1.1.5 Integridad de tuberías de transporte de hidrocarburos

En el ámbito de la industria de hidrocarburos, la integridad de las tuberías de transporte emerge como un tema de crucial importancia. Estas infraestructuras, que desempeñan un papel esencial en la distribución de hidrocarburos a lo largo de vastas distancias, deben mantener niveles excepcionales de seguridad, confiabilidad y eficiencia operativa. La preservación de la integridad de estas tuberías no solo garantiza la entrega continua de recursos energéticos, sino que también minimiza los riesgos asociados con posibles fugas, daños ambientales y amenazas a la seguridad pública. En este contexto, el análisis de los métodos, tecnologías y prácticas que respaldan la integridad de las tuberías de transporte de hidrocarburos se convierte en un campo de estudio vital.

Uno de los puntos clave en la garantía de la integridad es el diseño y la construcción adecuados de las tuberías. Esto implica la elección de materiales resistentes a la corrosión y capaces de soportar las condiciones operativas previstas. Además, se considera la ruta de la tubería, evitando áreas sensibles y pobladas siempre que sea posible.

El monitoreo y el mantenimiento regular son pilares fundamentales en el mantenimiento de la integridad de las tuberías. Esto involucra inspecciones rutinarias, pruebas de integridad y evaluaciones de corrosión para identificar y abordar posibles problemas antes de que se conviertan en amenazas reales.

La prevención de fugas es otro aspecto crucial en la integridad. Esto implica la instalación de sistemas de detección avanzados y el uso de tecnologías y materiales que minimicen el riesgo de fallos. La gestión de riesgos es esencial para identificar y mitigar posibles amenazas, considerando factores como desastres naturales y actividades humanas cercanas.

La respuesta a emergencias también es parte integral de la integridad. Los planes de acción en caso de incidentes deben estar bien desarrollados, abordando cómo contener fugas, minimizar daños ambientales y garantizar la seguridad de las comunidades circundantes.

Las regulaciones gubernamentales y las normativas de la industria desempeñan un papel significativo al establecer estándares y requisitos para mantener la integridad de las tuberías. Cumplir con estas pautas no solo garantiza la operación segura, sino que también asegura el cumplimiento legal.

La tecnología desempeña un papel en constante crecimiento en la integridad de las tuberías. Sensores avanzados, sistemas de monitoreo en tiempo real y herramientas de análisis de datos permiten un enfoque más proactivo en el mantenimiento y la detección temprana de problemas.

En el contexto de la inspección de tuberías, resulta imperativo abordar las distintas problemáticas asociadas a las fugas, tanto en términos de su magnitud como de su impacto potencial en la seguridad y el medio ambiente. De acuerdo con Afzal y Udpa como se citaron en Meléndez et al. [10], las fugas en tuberías pueden presentarse en variados niveles de gravedad, siendo clasificadas en pequeñas y grandes. Las fugas de mayor envergadura, a menudo vinculadas a cambios significativos en la presión y temperatura, pueden dar lugar a consecuencias perjudiciales tanto para la integridad del sistema como para el ecosistema circundante. Específicamente, las fugas de ruptura, aunque poco frecuentes, encierran un potencial destructivo que subraya la importancia de una detección y prevención efectiva.

Por otro lado, las fugas de menor magnitud también merecen una atención precisa, puesto que pueden ser igualmente peligrosas debido a su dificultad de detección. La acumulación de volúmenes considerables de hidrocarburos a lo largo del tiempo puede ocasionar graves daños antes de ser detectada y abordada.

Es en este contexto que la tecnología LiDAR emerge como una herramienta de gran utilidad. El LiDAR, basado en la detección remota mediante láser, ofrece la capacidad de identificar y mapear minuciosamente el terreno circundante y las estructuras de la tubería. Su utilización posibilita una detección temprana y precisa problemas de fugas, potenciales obstáculos y, en consecuencia, la identificación de áreas propensas a fugas o daños. La tecnología LiDAR, al proporcionar información detallada y actualizada, contribuye significativamente a mejorar la eficacia de los procesos de inspección y a prevenir la acumulación de fugas no detectadas.

1.1.6 Inspección de Tuberías de Transporte de Hidrocarburos

- Importancia de la inspección: la seguridad y la integridad de las tuberías son aspectos básicos para el cumplimiento de la norma, un rendimiento operativo eficiente y, finalmente, la protección del medio ambiente. Esto asegura una fiabilidad en la operación y las tuberías.

- Métodos de inspección tradicionales
 - Inspección visual: esta inspección es realizada por recorredores que están al pendiente de las fallas que pueda presentar una tubería. Teniendo en cuenta lo anterior, es posible afirmar que este método de inspección obliga a hacer un despliegue de personal para hacer una inspección directa para identificar: anomalías, grietas, corrosión, desgaste, tubería con fugas o que presente deformaciones.
 - Inspección por magnetismo: esta técnica es conocida como inspección magnética y consiste en la detección de cambios magnéticos. Funciona llevando un control de los campos magnéticos generados por los problemas en tubería.
 - Inspección por ultrasonido: esta inspección funciona creando ondas de ultrasonido a una frecuencia alta, que viajan por la tubería.

Cabe anotar que los métodos tradicionales presentan defectos tales como la dependencia de la accesibilidad, el despliegue de personal que implica el uso de recorredores y sus largos desplazamientos, que además de implicar un alto costo operativo, significa riesgo para la seguridad e integridad física de los trabajadores. La interpretación subjetiva también es una desventaja, dado que se está sujeto a la experiencia del recorredor para inspeccionar y dar un veredicto; lo anterior se traduce en dinero y tiempo que son malgastados por las empresas. Asimismo, es posible ver que hay un gran problema con la detección temprana de defectos de la tubería, debido a que no hay un método preventivo para ello que sea eficaz y beneficioso en términos del proyecto. Todo esto se puede traducir en tiempo y costos, pues requieren bastante tiempo entre inspecciones, lo cual es contraproducente y termina siendo costoso en términos monetarios.

- Tecnologías emergentes: el avance de la tecnología es inevitable y ha permitido que el trabajo de la ingeniería se haya hecho cada vez más fácil de efectuar. Son precisamente estos avances los que permiten la creación de nuevas herramientas como robots o cámaras de alta tecnología para el ingreso en tuberías, además de la

realización de inspecciones internas, permitiendo así una variedad de opciones útiles para ello.

La adopción de la tecnología LiDAR en la inspección de tuberías de transporte de hidrocarburos se justifica por sus notables mejoras en comparación con los métodos de inspección tradicionales. La capacidad del LiDAR para proporcionar un escaneo tridimensional altamente preciso del entorno circundante brinda la oportunidad de detectar deformaciones sutiles en las tuberías y cambios topográficos que podrían pasarse por alto en las inspecciones visuales convencionales. Además, su eficiencia en la cobertura de áreas extensas en un tiempo relativamente corto supera las limitaciones de los enfoques tradicionales, que podrían requerir más tiempo y recursos. La inspección remota habilitada por el LiDAR reduce los riesgos para el personal y permite un análisis detallado de zonas potencialmente peligrosas o de difícil acceso. Esta tecnología no solo mejora la planificación y eficiencia en operaciones de mantenimiento y reparación, sino que también promueve una gestión más proactiva al identificar problemas en etapas tempranas. En síntesis, la incorporación del LiDAR en la inspección de tuberías de transporte de hidrocarburos optimiza la seguridad, confiabilidad y eficacia de la gestión de estas infraestructuras críticas.

1.1.7 Aplicaciones de LiDAR en la Inspección de Tuberías de transporte de hidrocarburos

- **Cambios topográficos:** la tecnología LiDAR puede detectar cambios topográficos con sus modelos del terreno, permitiendo entender en dónde se encuentran las tuberías. Con fundamento en lo anterior, se pueden detectar de un modo preciso los cambios topográficos en el lugar que pueda afectar las tuberías en cuestión, los cuales pueden ser problemas de deslizamientos, la erosión o los cambios del terreno. Así, la tecnología LiDAR permite tener medidas preventivas para no tener problemas graves.
- **Identificación de derrames y fugas:** la tecnología LiDAR puede detectar irregularidades a lo largo de las tuberías, estas podrían mostrar fugas o derrames;

todo esto se logra con la generación de las nubes de puntos con los detalles requeridos. Con la tecnología es posible, además, identificar cambios en la tubería, tales como cortes, abolladuras, soplos de la tubería, deformaciones y desajustes.

- Inspección de estructuras relacionadas con tuberías: el sistema LiDAR no sólo permite inspeccionar las tuberías, sino que, si se requiere, también se puede emplear la tecnología para revisar las estructuras relacionadas, como instalaciones de control, estaciones de bombeo, tanques. Esto, preventivamente, puede dar a conocer problemas como corrosión, desgaste o deterioro de la infraestructura, lo que puede ser útil para ayudar a prevenir algunos de los problemas acá expuestos.
- Control de la vegetación cercana: un problema que es difícil de controlar o prevenir es la naturaleza, debido a su cualidad cambiante. De tal manera, la convivencia permanente de la naturaleza con las tuberías es un alto riesgo, pues pueden caer sobre ella las raíces, lo cual causaría que puedan ceder las estructuras o las tuberías. En ese orden de ideas, la naturaleza perjudica las operaciones y afectan tanto en un sentido temporal como en uno económico. Es así que la tecnología LiDAR puede ser sumamente funcional para solucionar este problema, puesto que esta tecnología no solo monitorea y hace un control a las tuberías, sino también a todo su entorno, incluyendo su crecimiento, altura, densidad y expansión. De esta forma, la tecnología LiDAR ayuda a controlar este problema preventivamente de una manera continua y permanente, para así evitar siniestros importantes.
- Análisis de desplazamientos y deformaciones: con el modelo 3D de las tuberías es posible visualizar y controlar las deformaciones y los desplazamiento que deja el paso del tiempo. Esto permite llevar el control de la geometría de las tuberías y, de esa manera, prevenir complicaciones relacionadas con su integridad, lo cual puede ser útil para anticiparse a los problemas y llegar a decisiones correctas y positivas.

2 METODOLOGÍA

La metodología de la pasantía consistió en evaluar la efectividad de LiDAR, recopilar datos con equipos LiDAR, reproceso y análisis los datos, una socialización y entrega adecuada a las especificaciones del cliente.

2.1 Factores Metodológicos de Éxito

Una parte fundamental de la pasantía fue la familiarización con los equipos necesarios para implementar la tecnología LiDAR, a fin de lograr los objetivos propuestos para esta investigación. El hecho de conocer el funcionamiento del equipo y software permite llegar a conclusiones más acertadas al respecto de la evaluación final del uso de la tecnología LiDAR en el transporte de hidrocarburos. En ese sentido, es posible notar que tanto la forma de trabajo como la familiarización con los equipos fueron factores que me permitieron tener éxito dentro de la investigación. Lo anterior no sólo fue útil para realizar el trabajo de la mejor forma, sino que me permitió realizar un diagnóstico acertado acerca del uso de la tecnología LiDAR en el transporte de hidrocarburos, sino también entender su alcance y limitaciones.

Así como el hecho de estar familiarizado con los equipos y softwares relacionados al sistema LiDAR, las visitas a campo son un factor de éxito crucial dentro de la investigación. Para aclarar este punto, se debe indicar que estas visitas jugaron un papel sumamente importante dentro del proceso, dado que, desde un primer momento, permitieron observar y analizar el uso del equipo en una situación real. El hecho de poder implementar esta tecnología en campo ayudó a entender las ventajas y desventajas que tiene este equipo, dependiendo del tipo de entorno en el que se desenvolvía. De la misma forma, el uso real (no simulado) de este equipo condujo a tener conclusiones más precisas acerca de su correcta implementación, además de la forma en la cual se podría utilizar para lograr los objetivos propuestos para esta pasantía.

En el texto titulado *Optimized inspection of upstream oil and gas methane emissions using airborne lidar surveillance*, Rashid et al. [11] aseveraron lo siguiente:

The LiDAR strategy described here employs a comprehensive monitoring program in which all regulated wells in a region are investigated at facility level using airborne LiDAR, and then component level OGI inspections are performed only on those sites where a significant facility level emission is detected.

A partir de ello, se puede tener una evidencia de que utilizando la tecnología, en este caso aéreo, siendo este otro tipo de LiDAR, se pueden evidenciar averías o fallas en tuberías con las imágenes generadas con el equipo, logrando así detectar estas en un menor tiempo y generando un registro preventivo de las tuberías, con lo que se optimizan y alcanzan mejoras en seguridad, costos y tiempo.

2.2 Equipos y Software

El uso de los equipos fue fundamental dentro del proceso metodológico de la presente investigación, puesto que me permitió entender de una mejor forma las funciones que tenían cada una de las partes que tenía el sistema LiDAR y la importancia que tenían al momento de realizar el trabajo de campo. De tal modo, es posible notar cómo el uso de las distintas herramientas que componen el sistema LiDAR fue crucial para lograr evaluar la pertinencia que tienen en el transporte de hidrocarburos. A pesar de que no se aborda a detalle cada uno de los elementos que componen el sistema LiDAR, se expone la pertinencia que tuvieron algunos de estos elementos dentro del desarrollo de la presente investigación.

- LiDAR: esta fue, posiblemente, la herramienta más importante dentro del desarrollo de este trabajo. El uso de esta fue fundamental para obtener datos precisos, encontrar anomalías, evaluar la integridad estructural de las tuberías y crear modelos 3D detallados, con el objetivo de conocer el estado de las tuberías y su entorno.
- Equipos GNSS: esta tecnología tuvo una relevancia invaluable para el proceso de esta investigación, puesto que me permitió controlar la posición y la trayectoria del escáner LiDAR, registrar las coordenadas globales de los datos y mejorar la eficiencia en el campo, permitiendo proporcionar una georreferenciación precisa de los datos

LiDAR. En este sentido, es posible ver cómo los equipos GNSS fueron cruciales para el resultado final, dado que posibilitaron aprender el funcionamiento y el uso adecuado de los equipos, pues su uso es indispensable para poder manejar correctamente la tecnología LiDAR.

- Software Microstation: el uso de esta herramienta fue de suma importancia, dado que permitió realizar de la mejor forma el procesamiento y análisis de datos LiDAR. De igual forma, este software fue útil para la creación de modelos 3D, por lo que es evidente que fue fundamental por el hecho de que facilitó el análisis, la evaluación y la integración de datos complementarios, la creación de informes y la presentación de resultados de manera efectiva y real.
- Software RiSCAN PRO: al igual que la herramienta anterior, este software permitió que el procesamiento y el análisis de datos LiDAR se pudiera realizar de la mejor manera. De tal manera, es posible notar que este software facilitó el registro y la fusión de escaneos, la extracción de características, el análisis avanzado, la creación de informes y la divulgación de resultados. Las herramientas especializadas y las capacidades avanzadas de RiSCAN PRO fueron esenciales para obtener resultados precisos y llegar a conclusiones más acertadas.

2.3 La Ruta Metodológica

Para el desarrollo de la presente investigación, se decidió emplear una ruta metodológica que me permitiera evaluar la pertinencia del uso del sistema LiDAR dentro del transporte de hidrocarburos. De esta forma, la estructura que decidí seguir me proporcionó la información necesaria para poder llegar a conclusiones más acertadas al respecto de este tema; a continuación, se muestra el esquema seguido para la investigación.

Para empezar el proceso, se decidió hacer la planificación del escaneo. Este proceso permitió lograr identificar la tubería o el lugar de importancia que fueron sometidos a exploración. Así, se pudo establecer los valores de captura pertinentes, como la definición espacial, la frecuencia de muestreo y el campo de visión; la planificación del

escaneo permitió definir el plan de exploración, que podría involucrar capturas estáticas, en movimiento o aéreas, dependiendo de las particularidades del entorno y los conductos a inspeccionar.

El siguiente paso seguido dentro de la investigación fue la captura de datos. El hecho de haber efectuado correctamente este paso implicó ajustar y calibrar el dispositivo LiDAR, a través de la verificación de su correcta instalación y configuración. De igual forma, este paso me hizo posible realizar la exploración de las tuberías y su entorno, asegurándose de abarcar completamente el área de interés. Asimismo, lo anterior hizo posible que pudiera registrar la posición y orientación del escáner LiDAR en cada punto de la adquisición mediante sistemas GNSS y unidades de medición inercial (IMU).

Posteriormente, empleé el procedimiento de preprocesamiento de los datos. Para el procedimiento de este paso, fue necesario transferir los datos LiDAR adquiridos a un programa especializado, como RiSCAN PRO, con el propósito de procesarlos en etapas posteriores. Procesar y analizar los datos arrojados por la tecnología LiDAR permitió efectuar una evaluación visual preliminar de los datos para detectar y eliminar elementos no deseados, tales como objetos en movimiento o reflejos indeseados. Igualmente, el procesamiento de datos implicó aplicar metodologías de filtrado y depuración para suprimir puntos irregulares y mejorar la calidad general de los datos obtenidos.

Seguidamente, otro paso necesario dentro mi investigación fue el registro y la alineación de los escaneos. El hecho de seguir con este paso permitió registrar y alinear los distintos escaneos LiDAR efectuados desde ubicaciones o momentos diversos en un sistema de coordenadas global unificado. Asimismo, este punto posibilitó emplear puntos de referencia o marcadores conocidos para establecer las transformaciones requeridas y garantizar la coherencia espacial de los datos.

Después de esto, fue necesario empezar la generación de un modelo 3D. Para lograr tal objetivo, fue preciso aplicar algoritmos de procesamiento para crear la creación de un modelo tridimensional, el cual cuenta con un detalle alto y una precisión exacta de las tuberías y su entorno. Además, este paso me permitió reconstruir las superficies de las

tuberías y otros elementos relevantes utilizando los puntos LiDAR y técnicas de interpolación; esto permitió agregar información de color o textura al modelo tridimensional mediante imágenes RGB u otros sensores complementarios para lograr una representación más completa.

Tras haber recolectado este tipo de información, el siguiente paso a seguir fue analizar tales datos. De esta forma, se hizo un análisis cualitativo y cuantitativo de los datos LiDAR para encontrar anomalías, deformaciones, corrosión u otros problemas de tuberías. Para lograr tal objetivo, fue necesario emplear herramientas de análisis sofisticadas, que puedan obtener dimensiones, alineación y desplazamientos exactos de las tuberías. En este sentido, el análisis de datos permitió realizar comparaciones entre los resultados obtenidos y las inspecciones anteriores o datos de referencia para evaluar el estado de las tuberías y analizar la evolución de posibles daños a lo largo del tiempo.

El último paso a seguir fue el de la representación y visualización de los resultados obtenidos mediante la tecnología LiDAR. De tal forma, este sistema crea informes detallados que brinden resultados del análisis y las conclusiones de la inspección LiDAR; igualmente, se debe mencionar que este paso permitió lograr la comprensión y la comunicación de los hallazgos, puesto que hizo posible la creación de las representaciones visuales de los datos obtenidos, por medio de imágenes y modelos tridimensionales fáciles de comprender.

3 RESULTADOS

- Detección de anomalías con mayor precisión: el sistema LiDAR hace posible generar mediciones de las tuberías de hidrocarburos que tienen una mayor precisión que otros procesos de medición (tales como la medición manual). Así mismo, se debe mencionar que estas mediciones tienen una mayor relevancia que otras, puesto que incluyen factores como la geometría del tubo, la alineación que tienen y el desplazamiento que han sufrido. Con ello, es posible afirmar que la tecnología LiDAR logra detectar y evaluar con alta precisión anomalías como deformaciones, abolladuras, cortes, desgaste y otros daños en la infraestructura de las tuberías.
- Ahorro de tiempo y efectividad: la utilización del LiDAR mostró ser mucho más efectiva que los métodos tradicionales en cuanto a la inspección de tuberías de transporte de hidrocarburos. Para hacer más claro este punto, se debe decir que, a través del uso de esta tecnología, se logró cubrir grandes áreas de tuberías en menos tiempo del que se hubiera requerido mediante el uso de los métodos tradicionales, lo que resulta en un ahorro significativo de recursos y costos operativos.
- Mejora en la seguridad y gestión de riesgos: el sistema LiDAR demostró ser sumamente útil para evaluar la integridad estructural de las tuberías. De igual modo, este sistema mostró ser efectivo en la identificación de secciones de exposición potencial, lo que permite una gestión más efectiva de los riesgos, porque se pueden identificar puntos de problemas potenciales y tomar las medidas preventivas adecuadas para garantizar la seguridad de los oleoductos.
- Visualización y presentación de datos: la tecnología LiDAR permitió la creación de modelos detallados en tres dimensiones de los oleoductos y el entorno que lo rodea. Estos modelos hacen que los datos capturados sean visualizados con el mayor detalle y facilita su entendimiento, y ello hace sencillo el análisis de los resultados y su presentación eficaz a los interesados en el tema.

- Integración de datos complementarios: la tecnología LiDAR permitió que el análisis y la evaluación de las tuberías de transporte de hidrocarburos fuera sumamente fructífera, debido a la integración de los datos arrojados por este sistema con otros datos complementarios, como imágenes satelitales y datos geoespaciales. Así, este sistema contribuyó a un resultado final más preciso debido a la compaginación de datos, la cual permitió lograr una interpretación visual más completa.

3.1 Criterios de Ingeniería Usados para Establecer un Buen Diseño de Tuberías

Dando respuesta a nuestro primer objetivo. el procedimiento de diseño de tuberías para el transporte de hidrocarburos es una actividad complicada que requiere una disposición metódica y un punto de vista interdisciplinar. Después, y como nos habla Meléndez et al. [10], se exponen los criterios fundamentales para realizar el diseño de conductos de hidrocarburos.

- Recopilación de datos: el primer paso es juntar información importante acerca de la ruta sugerida para la tubería. Esto contiene datos sobre la fuente y el destino, la clase de hidrocarburo que se transporta, la distancia total, la topografía del terreno, la existencia de infraestructura y otras particularidades importantes.
- Estudio de factibilidad: se lleva a cabo una investigación de viabilidad para determinar la viabilidad financiera y técnica del programa. Lo anterior implica examinar características como la necesidad de transporte de hidrocarburos, los costos relacionados a la creación y operación de la tubería, los permisos y legislaciones necesarios, y las posibles consecuencias ambientales y sociales.
- Selección de materiales y diámetro de la tubería: se escogen los componentes de la tubería apropiados para su construcción, teniendo en cuenta las características de la sustancia, la fuerza y la temperatura de transporte, y las circunstancias del ambiente. De igual modo, se conoce el diámetro de la tubería en cuestión para garantizar un desplazamiento eficaz y sin riesgos

- Diseño del trazado: se planifica la ruta de la tubería en consideración a la geografía del sitio, las legislaciones y restricciones ambientales, y en la minimización de impactos con otras infraestructuras. De tal forma, lo que se busca es hallar una senda que sea segura, económica y con menor efecto ecológico.
- Análisis de riesgos y seguridad: se realiza un análisis de riesgos para identificar posibles peligros y vulnerabilidades a lo largo de la tubería. Tomar las medidas de seguridad adecuadas para prevenir y mitigar los riesgos, y formular planes de contingencia ante emergencias.
- Diseño de estaciones y equipos asociados: además del proyecto de las tuberías, se planifican y diseñan puestos de recolección, controles, instrumentos y otros elementos necesarios para la conducción segura y cómoda de los hidrocarburos.
- Evaluación económica y ambiental: se lleva a cabo una investigación económica y ambiental para examinar los provechos y costos del programa, además de su efecto en el ecosistema y la comunidad. Se investigan métodos para reducir los efectos dañinos y garantizar la viabilidad del programa.
- Permiso y aprobaciones: se requieren las aprobaciones y los permisos necesarios de las entidades encargadas de las respectivas aprobaciones para iniciar el proceso de construcción.
- Construcción y puesta en marcha: se termina de construir la tubería de acuerdo con la disposición y los requerimientos iniciales. Una vez concluida la edificación, se inicia la operación y se realizan pruebas para garantizar la correcta operatividad del conducto.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible afirmar que el aspecto de mayor relevancia en la implementación de la tecnología LiDAR es el diseño del trazado de tuberías, que puede ser de utilidad en el diseño de tuberías para el transporte de hidrocarburos.

Ahora bien, el diseño del trazado es una etapa fundamental dentro del procedimiento de conductos de fluidos de petróleo, porque define la senda por la cual los conductos se desplegarán sobre el terreno. El procedimiento en cuestión tiene como objetivo hallar el trayecto óptimo que se adecue a los requerimientos de la técnica, la economía, el medio ambiente y las personas, garantizando la fiabilidad y la eficiencia de la transportación de hidrocarburos. La demarcación del trazado es importante para este proceso, además de los siguientes elementos:

- Topografía del terreno: La topografía influye en cómo se traza la ruta de la tubería. Identificar las elevaciones, las pendientes y otros detalles topográficos ayuda a minimizar la necesidad de cortes y rellenos costosos, y a garantizar que la tubería siga una trayectoria factible y segura.
- Minimización de impactos ambientales: la elección del trazado puede tener efectos significativos en el medio ambiente y los ecosistemas circundantes. Evitar áreas sensibles y hábitats protegidos es fundamental para minimizar los impactos en la biodiversidad y los ecosistemas frágiles, lo que asegura la sostenibilidad y la aceptación social del proyecto
- Interferencias con infraestructuras existentes: evitar interferencias con infraestructuras existentes, como carreteras y líneas eléctricas, es esencial para la seguridad y la eficiencia de la operación de la tubería. Esto reduce el riesgo de daños accidentales y garantiza la coexistencia armoniosa con otras infraestructuras.
- Estabilidad del suelo: la estabilidad del suelo a lo largo del trazado es crucial para prevenir fallas en la tubería. Evaluar la composición y las características del suelo asegura que la tubería se instale en áreas geotécnicamente adecuadas, evitando hundimientos, deslizamientos o deformaciones que puedan poner en peligro la integridad del sistema.
- Acceso y mantenimiento: la facilidad de acceso al sitio de la tubería es esencial para la construcción, la inspección y el mantenimiento. Un trazado bien planificado

garantiza que el personal y los equipos puedan llegar a la tubería sin dificultades, lo que reduce el tiempo de respuesta en caso de reparaciones o mantenimiento.

- Análisis económico: un análisis económico riguroso ayuda a tomar decisiones informadas sobre la ruta de la tubería. Encontrar la combinación óptima entre costo y eficiencia es esencial para garantizar un diseño rentable y competitivo, lo que a su vez influye en la viabilidad financiera del proyecto.

Es preciso señalar que el diseño del trazado busca encontrar la ruta más adecuada para la tubería bajo los aspectos anteriormente señalados, para garantizar la estabilidad del suelo y optimizarlos aspectos económicos. Un diseño del trazado bien planificado es fundamental para el éxito y la sostenibilidad de un proyecto de transporte de hidrocarburos, debido a que permite asegurar una mayor durabilidad de la tubería ante las exigencias del entorno y cualquier evento que pueda presentarse.

La tecnología LiDAR es esencial para cumplir con los estándares API y ASME al construir tuberías, porque proporciona datos precisos y completos en varias etapas del procedimiento. Seguidamente, se expone cómo LiDAR puede ayudar a mantener estos estándares en la construcción de tuberías.

- Topografía precisa y minimización de impactos ambientales:

API 1102: “La topografía detallada del terreno debe ser considerada durante el diseño del trazado de la tubería para minimizar los impactos ambientales” [12].

El LiDAR puede cumplir con esta norma al generar modelos tridimensionales precisos del terreno y su entorno. Esto permite a los ingenieros diseñar rutas que se ajusten a la topografía natural, minimizando la necesidad de cortes y rellenos. Al proporcionar una representación exacta del terreno, el LiDAR garantiza que el trazado se ajuste de manera adecuada a la topografía existente y minimice el impacto ambiental, en línea con la norma API 1102.

- Detección de interferencias y planificación de acceso:

ASME B31.4: “Se deben tomar precauciones para evitar interferencias con otras instalaciones y para garantizar el acceso para operaciones de mantenimiento”.

La tecnología LiDAR puede cumplir con esta norma al identificar infraestructuras existentes, como carreteras, edificios y líneas eléctricas, en el entorno de la tubería. Al proporcionar datos detallados sobre la ubicación y la altura de estas estructuras, el LiDAR ayuda a los ingenieros a planificar rutas libres de interferencias y asegura que el acceso para operaciones de mantenimiento esté garantizado, cumpliendo así con los requisitos de seguridad y accesibilidad según la norma ASME B31.4.

- Estabilidad del suelo y seguridad en la construcción:

ASME B31.8: “Los sistemas de tuberías deben ser diseñados y construidos para resistir las cargas de diseño, incluyendo las debidas a la topografía y estabilidad del suelo” [13].

El LiDAR puede cumplir con esta norma al proporcionar información geotécnica detallada del terreno. Al detectar características como hundimientos o deslizamientos potenciales, el LiDAR permite a los ingenieros seleccionar rutas seguras y diseñar tuberías que se adapten a las condiciones del suelo. Esto garantiza la resistencia estructural y la seguridad en la construcción, en conformidad con la norma ASME B31.

3.2 Evaluación del Funcionamiento de los Equipos y Cómo se Aplica en la Integridad de Tuberías

Dando respuesta a nuestro segundo objetivo. La justificación para esta evaluación radica en su potencial para proporcionar una visión más precisa y detallada del entorno circundante y las estructuras de las tuberías. Al comprender en profundidad cómo se aplicarán estas tecnologías en la preservación de la integridad de las tuberías, se establece una base sólida para abordar desafíos actuales y futuros, garantizando una operación segura y eficiente.

- **GNSS:**

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), una clase de dispositivos de posicionamiento satelital global multifrecuencia, son recursos tecnológicos cruciales utilizados en una variedad de campos para identificar la ubicación geoespacial con alta precisión. Para determinar las coordenadas de posición, velocidad y tiempo en tiempo real, estos sistemas utilizan señales enviadas por una constelación de satélites en órbita terrestre para calcular coordenadas de posición, velocidad y tiempo en tiempo real.

- **Funcionamiento:**

La recepción de señales de satélites en órbita es necesaria para el funcionamiento del equipo GNSS. Estas señales incluyen datos sobre la ubicación del satélite y la hora en el momento de la transmisión. La ubicación del equipo GNSS en la Tierra se determina trazando la intersección de las señales que recibe de varios satélites. La geometría de los satélites visibles y el calibre de las señales recibidas determinan la precisión del posicionamiento.

- **Parámetros:**

Estos equipos emplean elementos cruciales como la corrección diferencial y la capacidad de recepción multifrecuencia para aumentar la precisión del posicionamiento. La corrección diferencial reduce los errores sistemáticos al contrastar la señal del satélite con una señal corregida de una estación de referencia terrestre cercana. Al tener en cuenta la ionosfera y otras variables que pueden afectar la propagación de la señal, la recepción multifrecuencia permite una mayor precisión.

- **Cómo se utiliza:**

Las aplicaciones para equipos GNSS van desde navegación y posicionamiento de vehículos hasta topografía y mapeo geoespacial. El acceso en tiempo real a datos de ubicación precisos es esencial propagación de una señal.

- **LiDAR:**

El LiDAR, una contracción de las palabras “Detección y Medición de Luz”, representa una tecnología avanzada que posibilita la generación de mapas tridimensionales altamente detallados y la obtención precisa de datos sobre la superficie terrestre y otros elementos. Esta tecnología ha emergido como una herramienta esencial en diversas aplicaciones.

- **Funcionamiento.**

El principio de funcionamiento del LiDAR radica en la emisión de pulsos láser hacia un objetivo y el cálculo del tiempo que demora la luz en rebotar y retornar al sensor. A través de la combinación de esta información con la velocidad de la luz, el sistema logra calcular la distancia entre el sensor y el objeto. Mediante la repetición ininterrumpida de este proceso a una velocidad que supera miles de veces por segundo y con el movimiento del sensor, se crea una representación en forma de nube de puntos que describe con precisión la forma y altitud de la superficie.

- **Parámetros:**

Los componentes críticos del LiDAR comprenden factores como la frecuencia del láser, la resolución espacial y la tasa de repetición de pulsos. La frecuencia del láser incide directamente en la exactitud de la medición de distancia. La resolución espacial, por su parte, se refiere a la separación entre los puntos en la nube generada, influyendo en el nivel de detalle y la calidad del modelo. Finalmente, la tasa de repetición de pulsos establece la densidad de puntos capturados en un período determinado.

- **Cómo se utiliza:**

La operación del LiDAR involucra la instalación del dispositivo en vehículos, aeronaves o plataformas estacionarias, seguido de la ejecución de un escaneo láser en el área de interés. Durante esta fase, el sensor registra los puntos de datos mientras la fuente láser emite los pulsos correspondientes. Subsecuentemente, los datos recolectados son procesados para generar un modelo en tres dimensiones de la superficie, incorporando

detalles precisos sobre la elevación y conformación de los objetos presentes en el sector analizado.

- **Software de postproceso y reproceso:**

Un programa de software especializado en el reproceso y postproceso de datos LiDAR constituye una herramienta fundamental en el ámbito de la tecnología geoespacial y la cartografía. Su finalidad principal es la de perfeccionar y ajustar la precisión de los datos tridimensionales obtenidos a través de la tecnología LiDAR, la cual emplea pulsos láser para adquirir información detallada acerca de la topografía y los elementos presentes en la superficie terrestre.

- **Funcionamiento:**

El funcionamiento de este software se basa en algoritmos matemáticos y procesamiento de datos. En la fase de reproceso, los datos originales del LiDAR, que pueden contener ruido o imprecisiones debido a condiciones atmosféricas o interferencias, son sometidos a análisis y ajustes. Se aplican correcciones, eliminación de ruido y calibraciones para optimizar la precisión de los puntos de datos.

- **Parámetros:**

Entre los parámetros fundamentales se encuentran las opciones de filtrado de ruido, la densidad de puntos y la calidad del ajuste. Los usuarios tienen la posibilidad de personalizar estos parámetros en función de las características específicas de los datos y de los requerimientos del proyecto.

- **Cómo se utiliza**

La utilización de software de reproceso y postproceso de LiDAR conlleva la carga de los datos originales capturados durante el escaneo LiDAR en la aplicación. A través de una interfaz intuitiva, los usuarios aplican los ajustes y correcciones necesarias para mejorar la calidad y precisión de los datos. Una vez procesados, los resultados optimizados se pueden exportar en diversos formatos compatibles con herramientas de análisis, modelado 3D o cartografía.

Los equipos GNSS (Sistemas de Navegación por Satélite Global), LiDAR y los software de reproceso y postproceso, en conjunto con las normas API (Instituto Americano del Petróleo) y ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos), pueden desempeñar un papel fundamental en garantizar el cumplimiento de estándares rigurosos en la construcción y mantenimiento de tuberías de transporte de hidrocarburos. A continuación, se destacan cómo estos elementos pueden contribuir al cumplimiento de las normas:

- API 570 - Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-Service Piping Systems [14]:
 - Uso de LiDAR: El escaneo LiDAR puede proporcionar datos detallados sobre la geometría y las condiciones de la tubería, permitiendo una inspección visual precisa y no intrusiva. Esto puede contribuir a evaluar daños y deformaciones, especialmente en áreas de difícil acceso.
 - Equipos GNSS: Los equipos GNSS pueden ayudar a georreferenciar las ubicaciones de inspección, asegurando que todas las áreas críticas se inspeccionen de acuerdo con los protocolos de la norma.
 - Software de Procesamiento: Los software de procesamiento de datos LiDAR pueden ayudar a analizar y visualizar los datos capturados, facilitando la identificación de defectos y daños.
- API 574 - Inspection Practices for Piping System Components [15]:
 - LiDAR y GNSS: la combinación de LiDAR y equipos GNSS puede proporcionar datos geoespaciales precisos para la ubicación de componentes, como válvulas y accesorios, asegurando que la inspección se realice en los lugares correctos.
 - Software de Procesamiento: los software de procesamiento pueden ser utilizados para crear modelos 3D detallados de componentes, lo que facilita la planificación y ejecución de inspecciones.

- API 579-1/ASME FFS-1 - Fitness-for-Service [16]:
 - LiDAR y Equipos GNSS: Mediante el escaneo LiDAR y el uso de equipos GNSS, es posible recopilar datos para evaluar el daño y las deformaciones, esenciales para determinar la aptitud para el servicio de las tuberías según esta norma.
 - Software de Procesamiento: Los software de procesamiento pueden ser empleados para analizar los datos LiDAR y GNSS y calcular la aptitud para el servicio de acuerdo con las metodologías establecidas en la norma.
- ASME B31.3 - Process Piping [17]:
 - LiDAR y GNSS: la información geoespacial proporcionada por LiDAR y GNSS puede contribuir al diseño y la planificación de la ruta de la tubería, asegurando que cumpla con los requisitos de distancias y alineación establecidos por la norma.
 - Software de Procesamiento: los softwares de procesamiento pueden ser utilizados para generar modelos 3D de las tuberías, lo que ayuda en la fase de diseño y permite identificar posibles conflictos con otras infraestructuras.

En el análisis de la inspección de tuberías de transporte de hidrocarburos, es esencial considerar una serie de factores que pueden contribuir a posibles fallas estructurales en el sistema. Un punto crucial se plantea en el trabajo de Cabezas como se citó en Meléndez et al. [10], donde se explora la influencia de los movimientos de masas de tierra sobre estas infraestructuras críticas. Este fenómeno, al generar niveles significativos de esfuerzos sobre el material de las tuberías, puede desencadenar situaciones extremadamente desafiantes que incluso llevan a la ruptura de las mismas.

Como se evidencia, las masas de tierra en movimiento imponen cargas considerables sobre el sistema de transporte de hidrocarburos. Tales cargas resultan en esfuerzos que, en algunos casos, superan la capacidad del material de la tubería para resistirlos. El riesgo de ruptura se convierte en una preocupación real, especialmente cuando las tuberías quedan desprovistas de soporte debido al movimiento de la tierra; este escenario puede ser aún más acentuado por el peso del propio sistema y el flujo del fluido transportado Meléndez et al. [10].

En este contexto, la tecnología LiDAR surge como un recurso fundamental en la detección y prevención de los problemas mencionados. Al emplear el LiDAR, es posible obtener una visión precisa y detallada de los cambios topográficos y los movimientos de tierra en las inmediaciones de las tuberías. Esta tecnología ofrece la capacidad de detectar alteraciones en el terreno que puedan potencialmente afectar la integridad de las tuberías, incluso antes de que estos cambios resulten en una falla estructural.

La utilidad del LiDAR radica en su capacidad para proporcionar datos en tiempo real sobre la topografía circundante. Al identificar movimientos de tierra y cambios en el terreno, la tecnología LiDAR permite a los operadores y responsables de la inspección tomar medidas preventivas y correctivas a tiempo. Este enfoque proactivo es esencial para evitar que las masas de tierra en movimiento generen esfuerzos perjudiciales y potencialmente catastróficos en el sistema de transporte de hidrocarburos.

3.2.1 Como Facilitar los Métodos de Verificación Tradicionales

El trabajo de los recorredores en la inspección de tuberías de transporte de hidrocarburos implica una serie de pasos esenciales que se llevan a cabo en campo para asegurar la integridad y el correcto funcionamiento de estas infraestructuras críticas. Estos profesionales realizan un monitoreo exhaustivo a lo largo del derecho de vía del oleoducto, con el objetivo de identificar condiciones que puedan afectar la seguridad y operación del sistema. Este proceso incluye la observación directa de la superficie adyacente a la tubería y otras actividades en las inmediaciones.

Durante el patrullaje, los recorredores prestan especial atención a una variedad de factores, incluyendo la presencia de escape de fluidos, construcciones no autorizadas, excavaciones, cambios en el terreno y cualquier otra condición anormal que podría poner en riesgo la integridad de la tubería. Estos profesionales también se enfocan en verificar que no haya interferencias con la tubería provenientes de actividades externas, como la construcción de carreteras o la limpieza de diques [18].

Por otro lado, la revisión manual de las tuberías de transporte de hidrocarburos involucra una inspección visual detallada realizada por personal capacitado. Este proceso puede incluir la revisión directa de la tubería y sus componentes, como las soldaduras y las juntas, en busca de signos de corrosión, erosión, deformaciones u otras anomalías. Además, se verifica el estado de los recubrimientos y aislamientos para prevenir daños y pérdida de integridad.

Ambos enfoques de inspección, recorridos y revisión manual, son parte integral de la estrategia de mantenimiento y seguridad de las tuberías de transporte de hidrocarburos. Aunque estos métodos han sido efectivos, la introducción de tecnologías como el LIDAR ha abierto oportunidades para mejorar aún más la precisión y eficiencia de estas prácticas. El LIDAR proporciona una visión detallada y objetiva del entorno circundante y las estructuras de la tubería, permitiendo una detección más temprana y precisa de problemas potenciales y reduciendo la exposición al riesgo en entornos desafiantes. En resumen, tanto los recorridos como la revisión manual siguen siendo parte esencial de la inspección de tuberías, mientras que el LIDAR emerge como un complemento tecnológico valioso para mejorar la seguridad y la eficacia en la preservación de la integridad de estas infraestructuras críticas.

La tecnología nos ayuda a hacer una primera inspección de este modo los corredores de línea puedan hacer una inspección más rápida abarcando más terreno en mucho menos tiempo, se ahorra el ir venir de detectar ir por herramientas y volver para corregir. Desde el carro lo puedo volar y Ahorro uso gasolina camionetas y personal.

Dando respuesta a nuestro tercer objetivo. La tecnología permite hacer una primera inspección de este modo los corredores de línea puedan hacer una inspección más rápida abarcando más terreno en mucho menos tiempo, se ahorra el ir venir de detectar ir por herramientas y volver para corregir. Desde el carro lo puedo volar y se ahorra el uso de gasolina, camionetas y personal.

La tecnología LiDAR está emergiendo como un cambio transformador en la forma en que los recorridores de líneas y técnicos de campo abordan las inspecciones y el

mantenimiento de infraestructuras críticas. A medida que las industrias como la energía, el petróleo y el gas continúan evolucionando, LiDAR está demostrando su capacidad para mitigar las tareas laboriosas y costosas que tradicionalmente implica el proceso de detección, reporte y reparación de problemas.

A través de LiDAR, las empresas pueden reducir drásticamente el tiempo y los recursos necesarios para resolver problemas. En lugar de seguir el enfoque convencional que implica enviar a recorredores de líneas al campo para identificar un problema, luego notificarlo y finalmente realizar reparaciones; la tecnología LiDAR permite un enfoque más ágil y eficiente.

En el nuevo paradigma, un dron equipado con sensores LiDAR puede ser desplegado desde el campamento base. Dicho dron es capaz de escanear y mapear con precisión la infraestructura, capturando datos en tiempo real y detectando anomalías y defectos potenciales. Estos datos son transmitidos instantáneamente a los operadores, quienes pueden analizarlos de manera remota y tomar decisiones informadas.

Al identificar problemas desde el principio, las empresas pueden evitar el ciclo engorroso de múltiples viajes al lugar del incidente. Los recorredores no necesitan ir al terreno para detectar problemas, reportarlos y luego regresar para repararlos. En cambio, las reparaciones pueden ser planificadas con precisión y ejecutadas de manera más rápida y efectiva, lo que se traduce en un menor tiempo de inactividad y una mayor eficiencia operativa.

Este enfoque no solo ahorra tiempo, sino que también reduce la necesidad de una gran flota de vehículos en el campo, minimiza el consumo de combustible y disminuye la exposición del personal a entornos potencialmente peligrosos. Además, LiDAR permite una recopilación de datos exhaustiva y detallada, lo que mejora la toma de decisiones y la planificación estratégica a largo plazo.

La tecnología LiDAR emerge como una valiosa mejora en comparación con los métodos de verificación manuales existentes, como se destaca en el estudio de Castro [18] sobre

los ductos de transporte de hidrocarburos. Mientras el código ASME B 31.4 establece la importancia de un patrullaje periódico del ducto para observar las condiciones en la superficie adyacente al derecho de vía y actividades relacionadas, el LiDAR ofrece una ventaja significativa en términos de precisión y alcance. A diferencia del patrullaje manual que puede estar limitado por la subjetividad y la frecuencia de inspección, el LiDAR proporciona una representación tridimensional detallada y objetiva del área de interés. Este enfoque permite una detección más temprana y precisa de condiciones que podrían afectar la seguridad y operación del oleoducto, incluidas actividades de construcción, excavaciones y cambios topográficos. Además, la capacidad del LiDAR para inspeccionar cruces subacuáticos y evaluar recubrimientos es un aspecto esencial en la preservación de la integridad de los ductos, particularmente ante amenazas como inundaciones y daños mecánicos. En consecuencia, el LiDAR emerge como una herramienta tecnológica superior que amplía la eficacia y confiabilidad de los métodos de verificación manuales actuales en el contexto de los ductos de transporte de hidrocarburos.

4 CONCLUSIONES

Al principio de la pasantía, se planteó una serie de objetivos que fueron cumplidos por medio de la realización de esta investigación. Esta investigación pretendía responder a la pregunta de si la implementación de la tecnología LiDAR resultaría útil y práctica en el transporte de hidrocarburos. Es de mencionar que la respuesta a esta pregunta es que, en efecto, la utilización de la tecnología LiDAR resulta ventajosa frente a los métodos tradicionales en el transporte de hidrocarburos.

Durante la investigación, en la cual se hizo uso de la tecnología LiDAR para inspeccionar las tuberías de transporte de hidrocarburos, se pudieron encontrar resultados sumamente significativos e interesantes que demostraron las ventajas, la utilidad y la eficacia que tiene este tipo de tecnología en el mantenimiento preventivo, seguridad y monitoreo de las fallas que pueden tener los tubos que transportan hidrocarburos. Para ahondar más en esto, se debe señalar que esta tecnología logró mostrar las imágenes en tercera dimensión, permitiendo observar hasta el más mínimo detalle y, así, detectar cualquier problema que se pueda presentar en la tubería, así como en su entorno y su estructura.

En este punto, es importante aclarar que el sistema LiDAR no sólo es posible visualizar con detalle la tubería sino también su entorno, lo que es una cuestión que posibilita la minimización de cualquier riesgo que viole la seguridad de la tubería. Con esto, es posible concluir que la tecnología LiDAR es un sistema que puede ayudar a automatizar los procesos de seguridad en tuberías y prevenir problemas en estas, así como en su estructura o su entorno. Con lo anterior, se puede concluir que la tecnología LiDAR sí resulta útil para el transporte de hidrocarburos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. K. Killinger, "10 - Lidar (light detection and ranging)," in *Laser Spectroscopy for Sensing. Fundamentals, Techniques and Applications*, Woodhead Publishing, 2014, pp. 292-312.
- [2] N. Martínez, "Qué es la tecnología LIDAR y por qué está vinculada con los vikingos o el coche autónomo," 15 noviembre 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.nobbot.com/tecnologia-lidar/>.
- [3] El blog de franz, "¿Qué es la tecnología LiDAR y cómo funciona?," 10 abril 2019. [En línea]. Disponible en: <https://acolita.com/que-es-la-tecnologia-lidar-y-como-funciona/>.
- [4] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], "Agua / Batimetrías," s.f. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/batimetrias>.
- [5] I. Osorio, "Estudio de la variable altimétrica (Z) sobre un modelo digital de elevación por medio de Tecnología LiDar terrestre," Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D. C., 2016.
- [6] R. Calvo, "Implementación del lidar terrestre en la caracterización y modelización de análogos de reservorios fluviales: desarrollo y aplicación de nuevas metodologías en afloramientos del abanico fluvial de Huesca (Mioceno de la Cuenca del Ebro)", Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona, 2016.
- [7] V. C. Tao and Y. Hu, "Assessment of airborne lidar and imaging technology," *cora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings*, 2002.

- [8] S. M. Bernal, "Criterios para el cálculo, selección y diseño de tuberías para plantas petroquímicas", Tesis de pregrado, Escuela Colombiana de Carreras Industriales, Bogotá, D. C., 2014.
- [9] American Society of Mechanical Engineers, "ASME B31.4: Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. (API Recommended Practice 1102)," The American Society of Mechanical Engineers, 1992.
- [10] F. Meléndez, J. González, Z. Comas, B. Núñez and P. V. Vilorio, "Integridad estructural de tuberías de transporte de hidrocarburos: panorama actual," *Revista Espacios*, vol. 38, no. 17, pp. 1-10, 2017.
- [11] K. Rashid, A. Speck, T. P. Osedach, D. V. Perroni and A. E. Pomerantz, "Optimized inspection of upstream oil and gas methane emissions using airborne LiDAR surveillance," *Applied Energy*, vol. 275, 2020.
- [12] American Petroleum Institute [API], "Recommended Practice for Linear, Flexible, and Rigid Piping Calculations (API Recommended Practice 1102)," American Petroleum Institute, 1993.
- [13] American Society of Mechanical Engineers, "ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems," The American Society of Mechanical Engineers, 1986.
- [14] American Petroleum Institute [API], "Piping Inspection Code: Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-Service Piping Systems (API 570)," American Petroleum Institute, 1998.
- [15] American Petroleum Institute [API], "Inspection Practices for Piping System Components (API 574)," American Petroleum Institute, 2009.
- [16] American Petroleum Institute & American Society of Mechanical Engineers, "Fitness-for-Service (API 579-1/ASME FFS-1)," API Publishing, 2007.

- [17] American Society of Mechanical Engineers [ASME], "ASME B31.3: Process Piping," ASME Press, 2018.
- [18] P. N. Castro, "Recorridos del derecho de vía como in-put en metodología RBI para ductos de transporte de hidrocarburos," Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, D. C., 2018.
- [19] A. Mohammadzadeh and M. J. Valadan Zoej, "A state of art on airborne lidar application in hydrology and oceanography: a comprehensive overview," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.
- [20] M. B. M. E. Muhammad, I. R. Ehigiator and S. O. Oladosu, "Application of LIDAR Technology in Oil and Gas Pipeline Route," *Journal of Remote Sensing & GIS*, vol. 10, no. 5, pp. 1-8, 2021.
- [21] S. V. Alimov, S. V. Kascheev, D. V. Kosachev, S. B. Petrov and A. P. Zhevlakov, "Multifunctional lidar for needs of oil-and-gas pipes," Petersburgo, 2007.
- [22] V. M. Petoukhov, Z. K. Petoukhova, R. A. Akhtiamov, G. I. Il'in, O. Morozov and Y. E. Pol'Skii, "Lidar technologies application to leakage detection in oil product pipelines," Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 3588, 1999.
- [23] W. E. Roper and S. Dutta, "Oil Spill and Pipeline Condition Assessment Using Remote Sensing. Using New Tools for Using New Tools for Situational Awareness Situational Awareness," George Mason University, 2006.