



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización 3D de galerías subterráneas combinando  
tecnología LiDAR y diseño asistido por ordenador*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Tirso de Gracia García

**DIRECTORES:** Iván Puente Luna  
Xavier Núñez Nieto

**CURSO ACADÉMICO:** 2016-2017

Universida<sub>d</sub>eVigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización 3D de galerías subterráneas combinando  
tecnología LiDAR y diseño asistido por ordenador*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo



# **RESUMEN**

El desarrollo de la investigación dirigida a la descripción del espacio subterráneo es uno de los pilares básicos de la innovación en el campo tecnológico militar debido a la relevancia táctica que supone el conocimiento de las instalaciones situadas bajo tierra. En esta línea, se presenta la caracterización mediante técnicas de prospección no destructivas, de una instalación compuesta por un túnel y un entramado de galerías, emplazados en la Escuela Naval Militar (ENM).

La metodología creada en este trabajo combina el escaneado láser (tecnología LIDAR) y la creación e implementación de un algoritmo a través de una herramienta de software matemático que, de manera ágil y eficiente logra definir geoméricamente este espacio en su situación y estado real.

Por último, haciendo uso de una herramienta integrada en el software matemático, se crea una interfaz mediante la cual un usuario no familiarizado con el programa, puede obtener de una manera sencilla los datos resultantes de la aplicación del algoritmo sobre el túnel de la ENM.

## **PALABRAS CLAVE**

LiDAR, espacio subterráneo, Matlab®, automatización algorítmica, herramienta de visualización



## AGRADECIMIENTOS

*Cruza el arco,  
respira lento,  
siente el miedo.  
Déjalo todo atrás, quieto.  
Con paso seguro afronta el reto.  
Respira, suspira, admira.  
Cómo tras cinco años sobre este texto,  
de amigos, risas y algún llanto,  
de penas, alegrías y algún canto.  
No importa el daño, importa el hecho,  
de pagar con palabras lo que os debo,  
de regalaros este agradecimiento.*

*GRACIAS.*

*A la mujer que me otorgó la vida,  
a quien entre sus manos, llevó a esta familia.  
Quien me enseñó, que aunque el camino es largo,  
vale la pena vivir todos los días.  
A mi familia, por ser la inspiración que necesito.  
Por enseñarme el valor de la razón,  
cuando apremia el corazón,  
y altera mi equilibrio.*

*GRACIAS.*

*A mis amigos, mis compañeros.  
A la yankee tres por demostrar,  
que sólo creces,  
cuando te sabes levantar.*

*A mis tutores,  
pero muy en especial,  
a quien me ha sabido aguantar,  
y quien me ha animado,  
a luchar, no desesperar.*

*GRACIAS.*

*A quien de verdad me ha acompañado,  
a quien día tras día me ha tendido la mano  
y me ha ayudado.  
Por todos estos años, incondicionales,  
sin pedir nada a cambio.  
Nunca perdonaré,  
Como perdí mis primaveras y el orgullo  
Por buscar en otros ojos,  
la luz que tienen los tuyos.*

*GRACIAS.*

## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Contexto del trabajo y motivación .....	7
1.2 Ubicación .....	8
1.3 Objetivos .....	8
1.4 Estructura del trabajo .....	9
1.5 Metodología general .....	10
2 Estado del arte .....	11
2.1 Introducción .....	11
2.2 Túneles .....	11
2.2.1 Introducción .....	11
2.2.2 Historia y evolución de los túneles .....	12
2.2.3 Aplicación militar de los túneles .....	15
2.2.4 Túnel de la Escuela Naval Militar .....	19
2.3 LiDAR.....	21
2.3.1 Antecedentes del uso del LiDAR .....	22
2.3.2 Aplicaciones del LiDAR.....	23
2.4 Equipo utilizado .....	24
2.4.1 Láser escáner terrestre. Faro Focus <sup>3D</sup> X330.....	24
2.4.2 Trípode.....	24
2.4.3 Otros .....	24
2.5 Software utilizado .....	25
2.5.1 SCENE®.....	25
2.5.2 RiSCAN Pro 1.8.1. ....	25
2.5.3 Matlab® R2016b .....	26
3 Desarrollo del TFG.....	29
3.1 Descripción general.....	29
3.2 Segmentación y numeración de las galerías del túnel.....	29
3.3 Estudio de campo .....	30
3.3.1 Planificación de la toma de datos .....	30
3.3.2 Toma de datos.....	33

3.4 Preparación de los archivos para el registro.....	35
3.4.1 Descripción .....	35
3.4.2 Importación de los datos al software SCENE®.....	35
3.4.3 Exportación de los datos a formato ASCII (.xyz).....	35
3.5 Trabajo con RiSCAN Pro: registrado, procesado y segmentación .....	35
3.5.1 Descripción .....	35
3.5.2 Creación de un nuevo proyecto .....	36
3.5.3 Importación de escaneos.....	36
3.5.4 Registro de las nubes de puntos.....	36
3.5.5 Procesado de las nubes de puntos .....	38
3.5.6 Segmentación de la nube de puntos.....	42
3.6 Creación del algoritmo en Matlab.....	43
3.6.1 Introducción.....	43
3.6.2 Descripción del algoritmo.....	43
3.6.3 Interfaz de usuario “Guide” .....	52
4 Resultados .....	55
4.1 Descripción general.....	55
4.2 Trabajo con RiSCAN Pro. Resultados obtenidos .....	55
4.2.1 Visualización de la nube de cada escaneo .....	55
4.2.2 Tabla de desviaciones .....	58
4.2.3 Registro de las nubes de puntos.....	58
4.3 Trabajo con Matlab®. Resultados obtenidos .....	60
4.3.1 Pasillo central sección 1.....	62
4.3.2 Galería 1B recto .....	63
4.3.3 Galería 4B .....	64
4.3.4 Aplicación de la interfaz de usuario creada .....	65
5 Conclusiones y líneas futuras .....	67
5.1 Conclusiones .....	67
5.1.1 Introducción.....	67
5.1.2 Conclusiones previas .....	67
5.1.3 Conclusión general .....	70
5.2 Líneas futuras .....	70
6 Bibliografía.....	71
Anexo I: Resultados obtenidos en Matlab®. Caracterización completa del túnel de la ENM. ....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación de la Escuela Naval Militar .....	8
Figura 1-2 Flujo de trabajo de la metodología general .....	10
Figura 2-1 Imagen ficticia del túnel ideado por Tomé de Garamond bajo las aguas del Canal de la Mancha (proyecto presentado en 1867 en la Exposición Universal) (Extraída de [1]) .....	12
Figura 2-2 Túnel de Eupalinos. Isla de Samos (extraída de [4]) .....	13
Figura 2-3 Mina de Daroca (extraída de [5]).....	14
Figura 2-4 Construcción de túnel de Pajares (extraída de [6]).....	15
Figura 2-5 Trincheras japonesas en Iwo Jima (extraída de [7]) .....	16
Figura 2-6 Entramado de túneles japoneses en la defensa de Iwo Jima (extraída de [7]).....	16
Figura 2-7 Explicación túneles de Cu Chi (extraída de [8]).....	17
Figura 2-8 Ubicación del pabellón deportivo “GM Barrutia” dentro de la ENM .....	20
Figura 2-9 Túnel de la ENM. (A) Representación en planta (B) Representación 3D [10] .....	21
Figura 2-10 Faro Focus <sup>3D</sup> X330 [22].....	24
Figura 2-11 Trípode (extraída de [23]).....	24
Figura 2-12 Interfaz del programa SCENE® .....	25
Figura 2-13 Interfaz del programa RiSCAN Pro.....	26
Figura 2-14 Interfaz del programa Matlab® R2016b.....	27
Figura 3-1 Secciones y galerías del túnel .....	29
Figura 3-2 Posición escaneos en el túnel completo. Vista de planta.....	30
Figura 3-3 Posición escaneos en el túnel completo. Vista de perfil.....	31
Figura 3-4 Sección 2 del túnel. Detalle de las escaleras.....	31
Figura 3-5 Sección central del túnel. Detalle de las escaleras y entrada al túnel.....	31
Figura 3-6 Nube de puntos tomada desde la posición de escaneo 0 .....	32
Figura 3-7 Galería 1B. Detalle de la posición 12 de escaneo.....	32
Figura 3-8 Interfaz de la pantalla del láser escáner. (A) Menú principal; (B) Modo "administrar"; (C) Modo "parámetros"; (D) Submodo "resolución y calidad” .....	33
Figura 3-9 Ecuaciones de conversión de coordenadas esféricas en cartesianas [27] .....	34
Figura 3-10 Imágenes de la toma de datos en el interior del túnel.....	34
Figura 3-11 RiSCAN Pro. (A) Proyecto; (B) Escaneos; (C) Importar ASCII file .....	36
Figura 3-12 RiSCAN Pro. Matriz "SOP" para la ScanPos002.....	37
Figura 3-13 RiSCAN Pro. Búsqueda de pares de puntos .....	38
Figura 3-14 RiSCAN Pro. Vista general .....	39
Figura 3-15 RiSCAN Pro. (A) Nube filtrada; (B) Nube original .....	40
Figura 3-16 RiSCAN Pro. (A) Filter data; (B) Export Pointcloud.....	41

Figura 3-17 Flujo de trabajo del algoritmo en Matlab® .....	44
Figura 3-18 MATLAB® (A)Nube de puntos rotada; (B)Nube de puntos sin rotar .....	45
Figura 3-19 Matlab®. Representación de los puntos de la trayectoria sobre la nube .....	46
Figura 3-20 Matlab®. Secciones a lo largo del túnel .....	48
Figura 3-21 Matlab®. Ejemplo sección 8 .....	48
Figura 3-22 Matlab®. (A) Array “Cortes”; (B) Representación del "convhull" frente a la sección real.....	49
Figura 3-23 Matlab® (A) Plano deseado para calcular la altura (B) Plano deseado para calcular la anchura .....	50
Figura 3-24 Representación de las secciones sobre la nube.....	51
Figura 3-25 Matlab®. Script creado.....	52
Figura 3-26 Matlab®. Interfaz de diseño .....	54
Figura 4-1 Representación tridimensional del registro completo del túnel. Los escaneos individuales se visualizan en distintos pseudocolores. ....	59
Figura 4-2 Vista de la nube registrada y representada con atributos de intensidad .....	59
Figura 4-3 Detalle del interior del pasillo central con galerías a los lados y visualización en pseudocolor .....	59
Figura 4-4 Ejemplo de escasez de puntos en la nube .....	60
Figura 4-5 Ejemplo punto máximo/mínimo solitario.....	61
Figura 4-6 Ejemplo error en la creación del vector normal.....	61
Figura 4-7 Galerías seleccionadas para ejemplificar.....	62
Figura 4-8 Pasillo central sección 1 .....	62
Figura 4-9 Galería 1B recto.....	63
Figura 4-10 Galería 4B.....	64
Figura 4-11 Interfaz de usuario creada en "Guide" .....	65
Figura A1-0-1 Pasillo central marcado sobre el túnel completo .....	75
Figura A1-0-2 Pasillo central sección 1 .....	75
Figura A1-0-3 Pasillo central sección 2 .....	77
Figura A1-0-4 Galería 1A marcada sobre el túnel completo .....	78
Figura A1-0-5 Galería 1A recto .....	78
Figura A1-0-6 Galería 1A izquierda.....	79
Figura A1-0-7 Galería 2A marcada sobre el túnel completo .....	80
Figura A1-0-8 Galería 2A recto .....	80
Figura A1-0-9 Galería 2A izquierda.....	81
Figura A1-0-10 Galería 3A marcada sobre el túnel completo .....	82
Figura A1-0-11 Galería 3A recto .....	82
Figura A1-0-12 Galería 3A izquierda.....	83

Figura A1-0-13 Galería 3A derecha .....	84
Figura A1-0-14 Galería 1B marcada sobre el túnel completo.....	85
Figura A1-0-15 Galería 1B recto.....	85
Figura A1-0-16 Galería 1B derecha .....	86
Figura A1-0-17 Galería 2B marcada sobre el túnel completo.....	87
Figura A1-0-18 Galería 2B recto.....	87
Figura A1-0-19 Galería 2B derecha .....	88
Figura A1-0-20 Galería 3B marcada sobre el túnel completo.....	89
Figura A1-0-21 Galería 3B recto.....	89
Figura A1-0-22 Galería 3B derecha .....	90
Figura A1-0-23 Galería 3B izquierda.....	91
Figura A1-0-24 Galerías 4 marcadas sobre el túnel completo .....	92
Figura A1-0-25 Galería 4B.....	92
Figura A1-0-26 Galería 4 A .....	93
Figura A1-0-27 Datos galería 4A .....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Parámetros Faro Focus <sup>3D</sup> X330 .....	33
Tabla 3-2 Segmentación del túnel .....	42
Tabla 4-1 Resultados de los escaneos .....	57
Tabla 4-2 Registro de las nubes de puntos .....	58
Tabla 4-3 Datos sección 1 del pasillo central .....	63
Tabla 4-4 Datos galería 1B recto .....	64
Tabla 4-5 Datos galería 4B .....	64
Tabla A1-0-1 Datos sección 1 del pasillo central .....	76
Tabla A1-0-2 Datos sección 2 del pasillo central .....	77
Tabla A1-0-3 Datos galería 1A recto .....	79
Tabla A1-0-4 Datos galería 1A izquierda .....	79
Tabla A1-0-5 Datos galería 2A recto .....	80
Tabla A1-0-6 Datos galería 2A izquierda .....	81
Tabla A1-0-7 Datos galería 3A recto .....	82
Tabla A1-0-8 Datos galería 3A izquierda .....	83
Tabla A1-0-9 Datos galería 3A derecha .....	84
Tabla A1-0-10 Datos galería 1B recto .....	85
Tabla A1-0-11 Datos galería 1B derecha .....	86
Tabla A1-0-12 Datos galería 2B recto .....	87
Tabla A1-0-13 Datos galería 2B derecha .....	88
Tabla A1-0-14 Datos galería 3B recto .....	89
Tabla A1-0-15 Datos galería 3B derecha .....	90
Tabla A1-0-16 Datos galería 3B izquierda .....	91
Tabla A1-0-17 Datos galería 4B .....	92

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Contexto del trabajo y motivación

La necesidad del ser humano de superar las barreras naturales o artificiales que se presentan en diferentes entornos y situaciones supone un reto que en ocasiones solamente puede ser solventado mediante la construcción de un túnel. Las técnicas de construcción de túneles se han ido desarrollando a la vez que lo hacían las del resto de construcciones de ingeniería civil como carreteras, infraestructuras ferroviarias puentes o instalaciones energéticas. Sin embargo, el uso militar de los túneles como herramienta de guerra por parte de diferentes ejércitos o grupos terroristas deriva en que el conocimiento del espacio subterráneo sea un elemento imprescindible dentro del ámbito militar.

Los túneles, en su aplicación militar, han sido utilizados en combate numerosas veces a lo largo de la historia y la mayoría de ellas con gran éxito. Son utilizados en los tres niveles de decisión militar: el estratégico, el operacional y el táctico. En el ámbito estratégico adquieren un valor importante puesto que, por ejemplo, las decisiones tomadas por un país contra otro pueden verse condicionadas si se conoce que dicho país tiene un importante entramado de túneles en la frontera. En el ámbito operacional los túneles adquieren de nuevo especial relevancia, ya que la manera de desarrollar una operación puede verse influenciada si existen túneles o galerías que, de algún modo u otro, permitan alcanzar el objetivo de la misión. Por último, en el ámbito táctico, es quizás donde los túneles adquieren un mayor protagonismo explotando su uso como táctica de guerra a nivel de unidad menor tipo sección o equipo de fuego.

La mayoría de las bases militares disponen de algún tipo de entramado de túneles o de galerías que fueron construidos por diversos fines. En algunos casos se proyectaron por motivos de defensa o escape frente a posibles ataques enemigos y en otros, para entrenamiento del personal de las unidades. También existen algunos túneles que fueron diseñados únicamente para almacenamiento, ventilación o incluso para construir calabozos.

En el caso de la Escuela Naval Militar se conoce la existencia de un túnel localizado debajo del pabellón deportivo. Se desconoce por qué fue originalmente construido y no se dispone de ningún tipo de plano ni tan siquiera esquema de su geometría interna, lo que provoca que el túnel se encuentre mayormente en desuso y en estado de abandono.

Con el objetivo de crear una nueva zona de entrenamiento para los alumnos de Infantería de Marina, se procede a desarrollar una metodología que permita caracterizar geométricamente el túnel obteniendo los datos de altura y anchura para cada sección mediante un proceso de ingeniería inversa a través de la tecnología LiDAR. De esta manera, el mando podrá conocer cómo es exactamente el túnel por dentro y podrá decidir sobre la realización de ejercicios en él.

## 1.2 Ubicación

La Escuela Naval Militar se encuentra localizada en la Villa de Marín, provincia de Pontevedra (Figura 1-1), desde el año 1945. Dentro de la Villa de Marín, ocupa un lugar privilegiado al lado del puerto y con acceso directo a la ría. El túnel se encuentra localizado debajo del pabellón deportivo “GM Barrutia” tal y como se representa en la Figura 2-8 Ubicación del pabellón deportivo “GM Barrutia” dentro de la ENM



Figura 1-1 Ubicación de la Escuela Naval Militar

## 1.3 Objetivos

El objetivo general de este proyecto es crear una metodología de trabajo que, mediante la combinación de la adquisición de datos con tecnología LiDAR y el procesamiento de los mismos con un algoritmo creado en un software matemático, obtenga de manera automática los datos necesarios que conformen la caracterización del túnel de la Escuela Naval Militar.

Para lograr la caracterización del túnel se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Obtención de las nubes de puntos de los diferentes pasillos y galerías del túnel de la ENM mediante el uso de la tecnología LiDAR terrestre.
- Creación de un modelo 3D completo, robusto y preciso formado a partir del registro de las diferentes nubes de puntos obtenidas en cada escaneo con el láser escáner terrestre.
- Diseño e implementación de un algoritmo genérico que, de una manera rápida y eficiente, divida la nube de puntos completa del túnel en diferentes segmentos definidos por el usuario, y calcule sus secciones y las caracterice geoméricamente.
- Creación de una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permita interactuar con el algoritmo de manera que pueda decidir en qué punto del túnel desea conocer el área, altura y anchura del mismo.
- Geolocalización del túnel mediante un estudio SIG.

## 1.4 Estructura del trabajo

La estructura del siguiente proyecto se articula en torno a dos grandes bloques de trabajo. En primer lugar, la adquisición no destructiva de los datos mediante la tecnología LiDAR y, en segundo lugar; la creación de un algoritmo que permita procesar estos datos y calcular los resultados necesarios para la caracterización del túnel. Por lo tanto, el trabajo se estructura en base a estos dos grandes bloques que han sido redactados siguiendo el orden temporal en el que se han desarrollado.

El primer apartado del trabajo recoge el estado del arte en donde se hace un breve repaso a la historia de la construcción y uso de los túneles, tanto en el ámbito civil como en el militar. Dentro del estado del arte se concreta además el caso de estudio, el túnel de la ENM. Debido a la gran importancia que tiene la tecnología LiDAR en el desarrollo de este trabajo, se explica en profundidad sus fundamentos, así como sus antecedentes y las distintas aplicaciones que tiene. Por último, se detallan los elementos necesarios para la realización del trabajo como son el equipo físico utilizado y los diferentes softwares empleados para el tratamiento de las nubes de puntos y para la creación del algoritmo.

Al finalizar el apartado del estado del arte, comienza el desarrollo del trabajo. En este apartado se analiza con detalle todo el procedimiento que se ha seguido para la realización del trabajo. Este apartado está ordenado según los dos grandes bloques. En primer lugar, se describe el proceso de toma de datos y registro de las nubes de puntos. Una vez se obtiene la nube de puntos general, se procede a explicar el desarrollo del algoritmo y su posterior implementación.

Los resultados obtenidos de ambos bloques se presentan en un apartado propio. En este apartado se muestran las nubes de puntos resultantes de cada escaneo, así como una vista general de la nube completa una vez registrada. También se adjuntan los resultados obtenidos tras aplicar el algoritmo creado. Además se discuten los resultados obtenidos valorando posibles motivos que lleven a error y analizando cómo varía la altura y anchura del túnel en cada galería o pasillo.

Por último, se crea el apartado de “conclusiones y líneas futuras” en el cual se exponen las impresiones y lecciones aprendidas. Se enumeran además, cuáles son las posibles vías de estudio que emanan del trabajo.

El trabajo se acompaña de diversas figuras y tablas ilustrativas con el objetivo de facilitar el entendimiento de los procesos descritos.

En resumen, el trabajo consta de dos bloques de trabajo principales:

- Tecnología LiDAR para la obtención de los datos.
- Creación del algoritmo para conseguir caracterizar el túnel al completo.

Los contenidos de este trabajo se desarrollan a través de los siguientes capítulos:

- Estado del arte.
- Desarrollo del trabajo.
- Resultados.
- Conclusiones y líneas futuras.

## 1.5 Metodología general

Con el objetivo de dar a conocer al lector, de una manera visual, fácil e intuitiva cómo funciona la metodología general desarrollada para alcanzar los objetivos, se presenta un flujo de trabajo global del proyecto en el que se pueden observar las diferentes entradas y salidas, las distintas actividades que se llevan a cabo a lo largo de la metodología y la parte que corresponde a cada uno de los dos bloques principales en los que está dividido el trabajo.

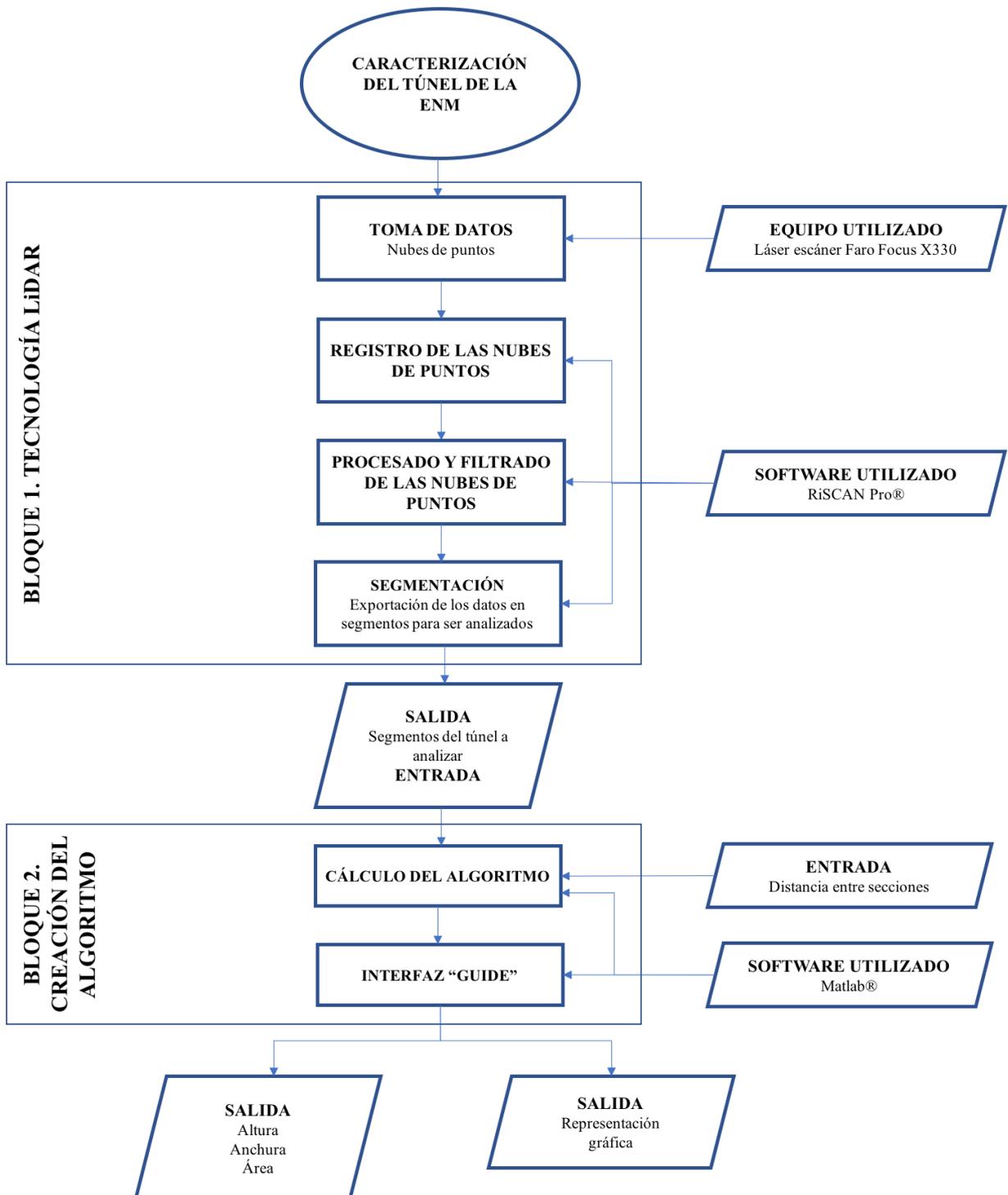


Figura 1-2 Flujo de trabajo de la metodología general

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

En este apartado se introduce, en primer lugar, el origen de las construcciones subterráneas y su desarrollo a lo largo de la historia. Asimismo, se explica la evolución de las aplicaciones militares de este tipo de construcciones a través de diferentes conflictos y también, cómo fueron y son utilizados a modo de estrategia de guerra. Para la elaboración de estos contenidos se ha obtenido información de las fuentes [1], [2] y [3].

Posteriormente, se concreta el objeto de estudio del trabajo: el túnel de la Escuela Naval Militar, que se explica y se define desde una perspectiva general que deja abierta la vía de investigación desarrollada a lo largo del presente trabajo.

A continuación, se definen los principios de funcionamiento de la tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging), haciéndose hincapié en las ventajas que supone el uso de este sistema de adquisición de datos frente a otros también utilizados hoy en día. Se explican además los antecedentes en el uso de esta tecnología y se enumeran someramente, algunas de las aplicaciones en las que dicha tecnología está siendo utilizada.

Además, dentro de este subapartado se define de manera más específica el equipo concreto láser escáner utilizado, así como los elementos auxiliares que fueron necesarios para el proceso de toma de datos dentro del túnel de la Escuela Naval Militar.

En el último punto, se procede a explicar las distintas aplicaciones informáticas que han sido utilizadas en la realización del trabajo: para el procesado de los datos adquiridos y unión de las nubes de puntos se ha utilizado el software Riscan Pro, de Riegl®, mientras que para la creación del algoritmo de caracterización del túnel se ha utilizado el software Matlab R2016b, de la casa comercial MathWorks®. Una explicación detallada del modo de utilización de estos programas se desarrolla en el apartado 3 de este trabajo “Desarrollo del TFG”.

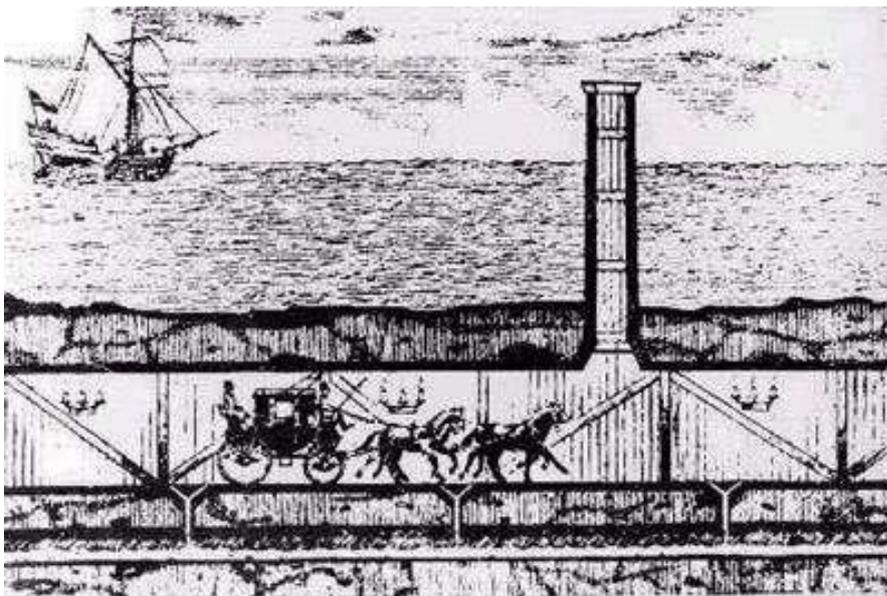
### 2.2 Túneles

#### 2.2.1 Introducción

La construcción de túneles tiene su origen en la necesidad del ser humano de superar barreras naturales para obtener un beneficio y así conseguir un objetivo. Estos objetivos pueden ser de diversa índole y se han visto modificados a lo largo del tiempo. El paso de vehículos y de ferrocarriles, el abastecimiento de agua, el uso peatonal o el almacenamiento de residuos son algunos ejemplos que nos encontramos hoy en día (Figura 2-1).

El beneficio de la creación de un túnel tiene que ser superior al coste que supone construirlo, y así, desde los inicios del desarrollo de los túneles se ha visto que superar las barreras naturales tales como un macizo montañoso, un curso de agua o una zona urbana altamente edificada era algo necesario.

Para analizar la construcción y desarrollo de los túneles desde sus inicios hasta la actualidad se define en primer lugar el concepto de túnel. Para ello, se toma la segunda acepción del Diccionario de la Lengua Española que dice así: “Instalación cubierta y alargada que comunica dos puntos y sirve para distintos fines”. De lo anterior se concluyen dos ideas fundamentales, la primera es que para que una construcción sea denominada túnel tiene que estar íntegramente cubierta, excepto los accesos y la segunda es que un túnel debe comunicar al menos dos puntos.



**Figura 2-1 Imagen ficticia del túnel ideado por Tomé de Garamond bajo las aguas del Canal de la Mancha (proyecto presentado en 1867 en la Exposición Universal) (Extraída de [1])**

### *2.2.2 Historia y evolución de los túneles*

A lo largo de la historia numerosas civilizaciones han desarrollado diversas técnicas de perforación y construcción de túneles. A través de escrituras de antiguos historiadores como Diodoro de Sicilia, Heródoto o Estrabón, llegan a nuestros días documentos que acreditan la construcción del primer túnel de la historia en el año 2200 a.C. en Babilonia. Este túnel, que unía el Palacio y el Templo de Belos era, en realidad, un falso túnel pues fue construido primero a cielo abierto y posteriormente recubierto.

La primera técnica de perforación de la tierra conocida es la denominada como técnica del fuego, que consiste en provocar un incendio en el foco de ataque para posteriormente ser rápidamente sofocado con agua. Esta diferencia de temperatura brusca en cuestión de segundos provoca un resquebrajamiento de la roca, lo que hace que poco a poco se vaya construyendo el túnel. Esto, como es evidente provoca unos gases tóxicos que hacen que sólo unos pocos de los que antiguamente trabajaban en la construcción de estos túneles consiguieran sobrevivir.

Las razones que motivaron el desarrollo de las primeras técnicas de perforación y construcción de túneles fueron religiosas o místicas. Los primeros datos disponibles acerca de una obra de carácter ingenieril datan del siglo X a.C. en las Tierras de Canaán en donde se construyeron túneles con el fin de abastecer y captar agua para las ciudades. Se cree que el motivo principal que les llevo a realizar este tipo de construcciones cubiertas fue la escasez de agua en la zona y la necesidad de conseguir que no se evaporara debido a las altas temperaturas alcanzadas en la región.

Sin embargo, el desarrollo de los túneles asociándolos al concepto que hoy en día se tiene, definido en el apartado anterior, corresponde a las civilizaciones Griega y Romana.

En el caso de las construcciones helenas cabe destacar el túnel de la Isla de Samos (Grecia), construido en el año 550 a.C. que servía para el abastecimiento de agua de la capital de la isla. Este túnel, de algo más de un kilómetro de longitud es el primero de la historia del que se conoce el nombre del ingeniero que lo construyó, Eupalinos de Megara y llegó a ser utilizado durante casi un milenio (Figura 2-2).



**Figura 2-2 Túnel de Eupalinos. Isla de Samos (extraída de [4])**

Hablando del Imperio Romano, cabe destacar que es esta civilización la responsable de introducir el concepto del uso militar de los túneles, como se explicará más adelante, además de otros muy diversos motivos como la minería o las calzadas para el paso de personas y carruajes.

Dentro de las construcciones del Imperio Romano es de especial mención el túnel del monte Salvando, utilizado para canalizar el agua del lago Pucino, sin salida natural. El túnel, que fue descubierto en el año 1862 tiene 5600 metros de longitud y en algunos tramos de su recorrido llega a alcanzar hasta 181 metros de profundidad debajo de la superficie. Se estima que trabajaron para su construcción unos 30000 hombres a lo largo de 11 años.

Durante la Edad Media la construcción de los túneles entendidos como una gran obra ingenieril pasa a un segundo plano y se consolida la minería como principal impulso para el desarrollo de las técnicas de construcción. A lo largo de este período de la historia los únicos túneles que se construyen dentro de los núcleos urbanos o de las fortificaciones son pequeñas galerías destinadas a ser mazmorras o pasadizos.

Ya en el Renacimiento, junto con el resurgir del ser humano y sus obras y proyectos se referencia el desarrollo de los túneles más allá que por el simple motivo de la minería. Por ejemplo, en algunos proyectos de ciudades diseñadas por Leonardo da Vinci se conciben niveles subterráneos o perforaciones en barreras montañosas allá donde los canales de agua no podían continuar.

Construida en el año 1555 la Mina de Daroca (Figura 2-3), en la provincia de Teruel, constituye la primera mina conocida del Renacimiento. Fue construida para desviar las aguas de las lluvias que asolaban la ciudad, mide un total de 600 metros de largo, 6 de ancho y una altura aproximada de 7 metros.



**Figura 2-3 Mina de Daroca (extraída de [5])**

A partir del siglo XIX, comienza el verdadero desarrollo importante de las técnicas de construcción de túneles, se extiende el uso de la maquinaria en detrimento del trabajo manual y crece el interés y la competitividad del hombre por crear túneles más largos y grandes. La Revolución Industrial marca sin duda un antes y un después en la historia de los túneles.

En el año 1803 se inaugura el primer ferrocarril del mundo, aún tirado por caballos y de madera. Sin embargo, muy pocos años después, en el año 1825 comienza a circular el primer tren empujado por una locomotora de vapor creado por Stephenson.

Apenas un año después, en el 1826 se construye el primer túnel de ferrocarril del mundo, el túnel de Terre-No ir, en Francia. Tiene una longitud de 1476 metros, 5 metros de altura y casi 3 metros de anchura. Cabe destacar que por este túnel aún se circulaba con ferrocarril tirado por caballos.

Es en Gran Bretaña, a lo largo del siglo XIX, donde la industria del ferrocarril recibe un mayor impulso, en especial en la primera mitad del siglo. Es en este país donde se inaugura la primera línea de ferrocarril regular fraccionado por locomotora de vapor del mundo. Esta línea circulaba de Liverpool a Manchester y atravesaba la montaña por dos túneles, uno de 4800 metros y otro de 1600 metros, obra del ingeniero Isambard Kingdom Brunel.

Ya en la segunda mitad del siglo XIX, gracias a la incorporación de las máquinas taladradoras accionadas por aire comprimido se consiguen importantes avances en la construcción de los grandes túneles alpinos de ferrocarril.

La aparición de la electricidad y de la potencia eléctrica empujan definitivamente el desarrollo no sólo de los túneles como medios de paso, sino también como fin en sí mismos. Por ejemplo, la aparición del ferrocarril subterráneo y el desarrollo de los motores de combustión interna para vehículos propician la construcción de entramados de galerías por el subsuelo de las grandes ciudades que, además, compiten entre ellas por prestar unos mejores servicios para sus ciudadanos.

Hoy en día la ingeniería de túneles se basa en la construcción mediante gigantescas máquinas tuneladoras (Figura 2-4) que permiten acortar los plazos de construcción, proporcionar seguridad a los trabajadores y construir túneles más grandes y seguros para los usuarios.



Figura 2-4 Construcción de túnel de Pajares (extraída de [6])

### 2.2.3 Aplicación militar de los túneles

La primera referencia histórica que se tiene acerca del uso de los túneles con aplicación militar data del siglo II a.C. durante la época del Imperio Romano y fue durante el asedio a la ciudad de Ambracia, perteneciente a la entonces Liga Etolia. Las legiones romanas pasaron días excavando en los alrededores de la ciudad, escondiendo cuidadosamente los montículos de tierra excavada con la intención de construir un túnel que les permitiera lanzar el asedio desde dentro de la propia fortificación enemiga. Sin embargo, los etolios se dieron cuenta y cavaron su propio túnel que, al interceptar el túnel romano, llenaron de humo asfixiando así a todos los soldados romanos.

Tras la época del Imperio Romano, los túneles como estrategia de guerra caen en desuso debido al poco desarrollo de las técnicas de construcción. Esto suponía que el uso de los túneles fuera más peligroso para aquellos soldados que los construían que el daño que se pretendía causar, y por lo tanto carecía de sentido su empleo en la guerra.

Durante la Edad Media, especialmente a lo largo del siglo XIII, se percibe una vuelta al escenario del uso de túneles y galerías con propósito militar. La técnica usada en la época consistía en excavar galerías debajo de los muros de las fortificaciones y apuntalarlas con maderas de tal manera que, a la hora del asedio, las maderas fueran incendiadas y con el derrumbe de las mismas se propiciara el desmoronamiento de los muros que se encontraban sobre ellas. Para evitar la construcción de estos túneles debajo de las fortificaciones por parte del enemigo, los arquitectos ubicaban los castillos sobre terreno rocoso o terreno pantanoso muy húmedo haciendo que excavar fuese prácticamente imposible o muy peligroso para el enemigo.

El uso del túnel como herramienta de guerra fue prácticamente abandonado después de la Edad Media y no fue reintroducido hasta el siglo XIX, cuando las fortificaciones volvieron a ser una característica más común de la guerra.

Durante la Guerra Civil Americana, el ejército de la unión utilizó de manera sistemática las minas subterráneas, aunque sin mucho éxito. Por ejemplo, en el asedio a la ciudad de Vicksburg en el año 1863. Sin embargo, un año más tarde, durante el asedio a la ciudad de Petersburg, los ingenieros de la unión construyeron un túnel de pequeñas dimensiones pero que acercaba la línea del frente unos 200 metros hacia las fortificaciones confederadas que rodeaban la ciudad. Cuando se encontraban debajo

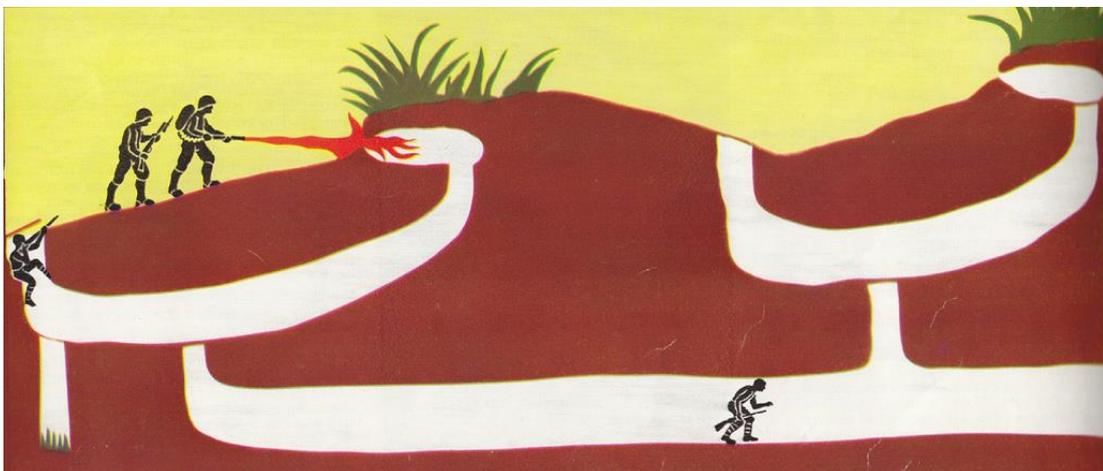
de la línea confederada, los ingenieros diseñaron un entramado de galerías a los lados del eje principal del túnel. Se colocaron casi 4 toneladas de pólvora repartidas unos 6 metros por debajo de las líneas enemigas que, al detonar, provocaron una explosión ensordecedora que instantáneamente mató a unos 300 soldados confederados. La explosión fue de tal magnitud que provocó un cráter de unos 10 metros de profundidad y 80 metros de diámetro. Y por esto mismo, esta batalla es conocida como “La batalla del cráter”.



**Figura 2-5 Trincheras japonesas en Iwo Jima (extraída de [7])**

En el año 1917, durante la Batalla de Messines tuvo lugar un ataque utilizando túneles por parte de los británicos contra las tropas defensivas alemanas. En el período de casi un año, mineros británicos y canadienses excavaron un entramado de 21 galerías a lo largo de 17000 metros bajo las trincheras alemanas y los llenaron con más de 450 toneladas de alto explosivo.

Esta explosión, causó la baja de 10000 soldados alemanes y es conocida como la mayor explosión no nuclear de la historia de la guerra. Según los escritos y los relatos de algunos testigos, la detonación se pudo escuchar en Londres y sentirse en ciudades como Dublín. Cambió incluso la geografía del terreno, provocando diversos cráteres de hasta 100 metros de diámetro y casi 20 metros de profundidad.



**Figura 2-6 Entramado de túneles japoneses en la defensa de Iwo Jima (extraída de [7])**

Cabe destacar también el uso de los túneles en distintas guerras a lo largo del siglo XX como la Segunda Guerra Mundial, especialmente en las batallas del Pacífico occidental que enfrentaron a Japón contra Estados Unidos. Los japoneses utilizaron con frecuencia la guerra de los túneles, especialmente en el ámbito defensivo, en batallas como la de la Isla de Peleliu y la playa de Iwo Jima (Figuras 2-5 y 2-6) en donde construyeron los famosos túneles de Suribachi.

En la guerra de Corea, la táctica de los túneles fue ampliamente utilizada por las fuerzas chinas a lo largo de todos los combates, provocando una numerosa pérdida de efectivos al ejército estadounidense. Fue tan numerosa la pérdida de soldados americanos que esta técnica del uso de túneles fue prohibida por las Naciones Unidas y los comandos a su servicio procedieron a cerrarlos, según relatan los últimos prisioneros de guerra en los interrogatorios. Estos prisioneros cuentan también que, oficiales del ejército chino llegaron a matar a sus propios soldados al ver a estos cavando una salida en los túneles para entregarlo al Comando de las Naciones Unidas.

En la segunda mitad del siglo XX destaca el uso de la técnica de la guerra de túneles en la guerra de Vietnam. Para conseguir mantener una alta intensidad de combate en el Sur del país mediante la guerra de guerrillas, fue necesario construir una gran cantidad de bases camufladas a las que se accedía mediante túneles y galerías para abastecer a todas las poblaciones que sostenían el combate durante un largo período de tiempo. Según algunos informes redactados durante el transcurso de la guerra, era de obligado cumplimiento para cada aldeano vietnamita cavar casi un metro de túnel al día. La base subterránea más grande que se encuentra en Vietnam es la de Cu Chi (Figura 2-7) que tiene una longitud total de 248 kilómetros, divididos en 3 niveles a 6, 8 y 10 metros de profundidad, donde llegaron a vivir más de 10000 personas. Estos túneles jugaron un papel decisivo en la victoria de los vietnamitas en la guerra de Vietnam.

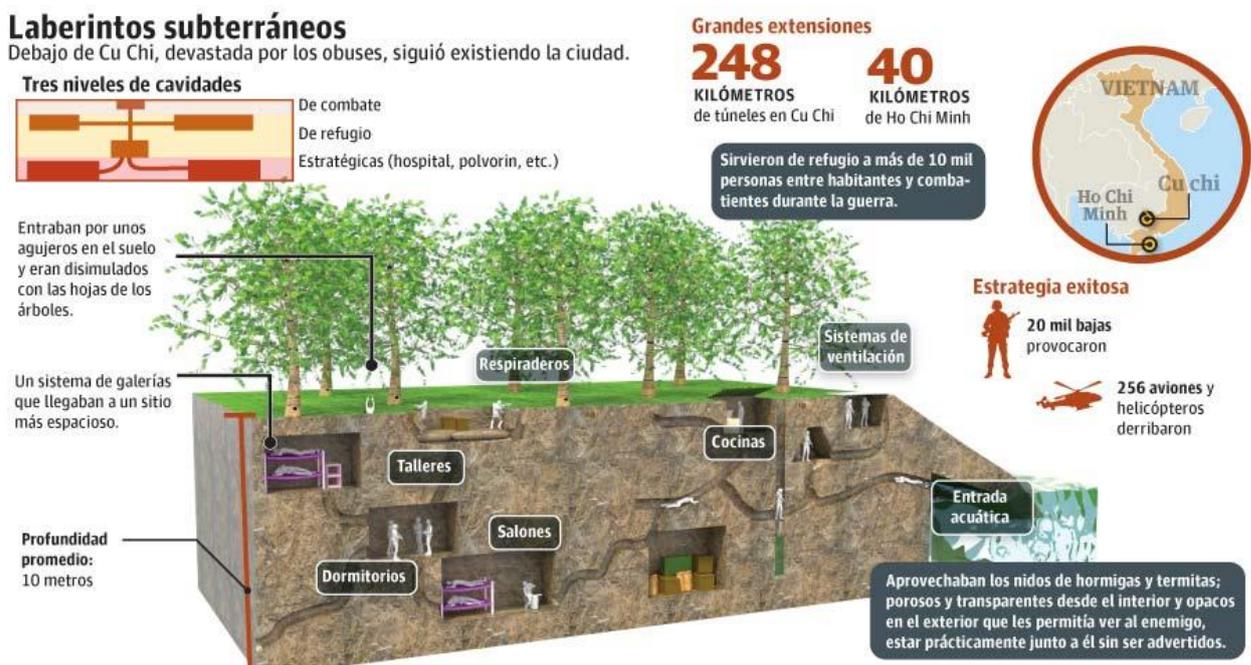


Figura 2-7 Explicación túneles de Cu Chi (extraída de [8])

Los túneles fueron descubiertos por casualidad por un sargento americano quien jamás llegó a imaginar la magnitud de los mismos. En un principio las técnicas utilizadas por los americanos para persuadir a los vietnamitas del uso de los túneles fueron el uso de gases nocivos, explosivos o inundaciones de agua de lluvia. Sin embargo, estas técnicas no eran efectivas más allá de los primeros cientos de metros por lo que los americanos, tras el primer rechazo de los jefes a enviar soldados dentro de los túneles, procedieron a ello. Se mandaron soldados con perros adiestrados para buscar los accesos a los túneles pero estos eran fácilmente distraídos por el ejército vietnamita utilizando

uniformes de soldados americanos abatidos. Tras este fracaso de nuevo, los mandos americanos decidieron crear la brigada denominada “ratas de túnel” cuyo único objetivo era la guerra dentro de los túneles.

En los inicios de la guerra, los túneles no fueron construidos con fines militares, sino con el objetivo de albergar a la población civil que allí se refugiaba de los ataques y bombardeos del enemigo. Estos túneles eran una completa ciudad subterránea, todo se encontraba allí, cocinas, hospitales, talleres, áreas para dormir, zonas de mando y comunicaciones, arsenales e incluso zonas destinadas para el ocio (Figura 2-7). Los túneles poco a poco adquirieron el valor estratégico militar y se convirtieron en un objetivo primordial para el ejército americano, como anteriormente se ha mencionado, debido a que los vietnamitas podían esconderse y realizar un ataque con posterior huida sin apenas ser vistos causando numerosas bajas y daños.

Además de las guerras mundiales o la guerra de Vietnam, a finales del siglo XX tuvieron lugar otros dos importantes conflictos en donde el uso de túneles con fines militares fue de nuevo, un elemento decisivo en el transcurso de la batalla. En primer lugar, la guerra afgana en donde se llegaron a explotar túneles de hasta 400 metros de profundidad y que sumaban un total de 25 km de longitud. En segundo lugar, la guerra de Bosnia. En este conflicto se construyó un túnel que, cruzando el aeropuerto de Sarajevo, unía los barrios de Dobrinja y Butmir permitiendo así recibir en la ciudad provisiones, suministros de guerra y ayuda humanitaria. Este túnel fue una de las principales maneras de evitar el embargo internacional de armas impuesto y proporcionar armamento y munición a los defensores de la ciudad.

Para combatir las guerrillas desarrolladas en los túneles en los conflictos transcurridos a lo largo del siglo XX, tanto la URSS como el ejército de los EEUU tuvieron que crear unas fuerzas especiales cuya principal misión era la de combatir en este entorno.

Durante los primeros años del siglo XXI se ha producido el mayor desarrollo de la guerra de los túneles llegando a ser el eje de la batalla, el elemento sobre el que gira la estrategia del conflicto. De hecho, la guerra Palestina-Israel, que actualmente sigue en curso, en ocasiones es llamada “la guerra de túneles”. El entramado de galerías y pasillos excavados en la zona de la Franja de Gaza es construido en su mayoría por el grupo islamista Hamás, es impresionante. El ejército israelí destina una importante cantidad de recursos en detectar y combatir tanto la construcción como el uso de estos túneles con fines bélicos. Con el objetivo de destruir los túneles, las tropas israelíes realizan incursiones en territorio Palestino que son respondidas con el lanzamiento de proyectiles de mortero contra los soldados.

Los palestinos utilizan este entramado de túneles con tres objetivos distintos:

- Abastecimiento. Se han excavado túneles desde la zona de la ciudad de Rafah en la Franja de Gaza hasta el área de Rafah en Egipto. Estos túneles se usan para introducir una gran variedad de material en la Franja de Gaza, algunos para uso civil, alimentos y combustible, pero también una gran cantidad de suministros militares como armas, municiones y otros equipos militares.
- Arma de guerra. Se han excavado túneles debajo de posiciones defensivas de Israel llenos de explosivos y que en ocasiones han sido detonados causando numerosas bajas en el ejército israelí.
- Túneles de contrabando. También conocidos como túneles de infiltración. Son pasadizos que cruzan la frontera por el subsuelo y que son utilizados con diferentes fines, desde el tráfico de personas, secuestros de soldados israelíes y por supuesto, contrabando de objetos o sustancias. Estos túneles son los más extendidos ya que son económicamente lucrativos para sus constructores debido a los ingresos generados por su uso.

A lo largo de los últimos 10 años, el ejército israelí ha llevado a cabo innumerables operaciones con el objetivo de detectar e impedir el uso de estos túneles encontrando y destruyendo cientos de ellos de todo tipo.

En julio del año 2006, se produjo un suceso en la frontera norte de Israel que dio lugar al inicio de la guerra líbano-israelí. Un grupo de militantes del brazo armado del partido Hezbollah cruzó la frontera desde El Líbano hasta Israel matando a tres soldados israelíes y secuestrando a otros dos. Debido al poderío aéreo del ejército israelí, los soldados de Hezbollah se vieron en la necesidad de construir algún tipo de barrera defensiva frente a estos ataques que les permitieran a la vez que defenderse, atacar con cohetes de manera constante sin ser localizados. Para ello, excavaron un sistema de túneles y búnkeres subterráneos que contaba con medios antiaéreos, unidades anticarro de combate y zonas de explosivos.

Esta red de túneles se componía de más de 25 km de longitud y disponía de sistemas de comunicación por fibra óptica, depósitos para sostener misiles y galerías de entrenamiento. Para la construcción de esta red, Hezbollah contó con el apoyo de Corea del Norte y sus capacidades fueron aumentadas por la provisión de armamento moderno que recibió por parte de Irán.

Muchos de los túneles que en su día fueron utilizados como arma de guerra son ahora una atracción turística debido a su gran importancia en la historia. Por ejemplo, el túnel de Sarajevo es ahora el museo de la guerra de Bosnia y Herzegovina o el túnel de Hebei Ranzhuang es un sitio de interés turístico nacional en China.

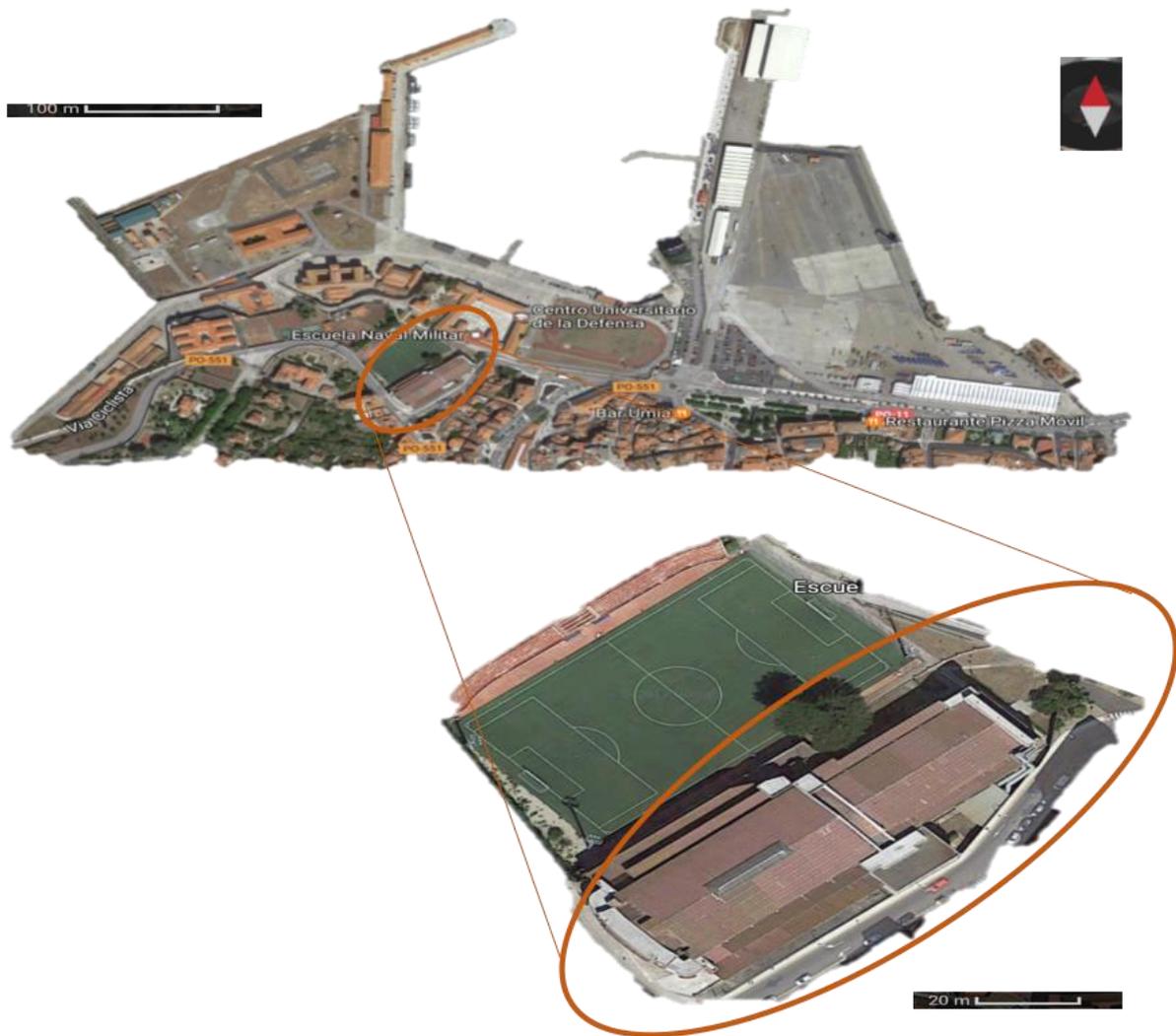
No cabe duda de que los túneles son una herramienta militar importantísima y así ha quedado demostrado a lo largo de la historia. Por ello, en numerosas bases y unidades militares existen túneles contruidos con diferentes propósitos; instrucción para la tropa, almacenes, vías de escape ante un posible ataque o incluso calabozos. En muchos casos, dichos túneles se encuentran en desuso y se desaprovecha su existencia. La caracterización de estos con el objetivo de que puedan ser utilizados por el personal militar de las bases o unidades supone un importante objeto de estudio. Esta caracterización también permite conocer el estado actual en el que se encuentran estos túneles.

Las fuentes principales de las que se ha obtenido información para la realización de este subapartado han sido [3], [8] y [9].

#### *2.2.4 Túnel de la Escuela Naval Militar*

El lugar elegido para realizar la caracterización y estudio de las galerías subterráneas es un túnel que se localiza dentro de la Escuela Naval Militar (Figura 2-8), concretamente debajo del pabellón deportivo “Guardiamarina Barrutia”. Dentro de este pabellón deportivo existe una piscina y una pista de fútbol sala. El túnel se ubica debajo de ambas instalaciones y tiene su entrada por la cara NE del edificio.

En el trabajo [10], único estudio realizado hasta el momento sobre este túnel, se describen los usos actuales del túnel como son: almacén general, conducto de ventilación para las posibles humedades del suelo de la pista de fútbol generadas por la piscina y lugar de prácticas para los alumnos del cuerpo de Infantería de Marina. Según el Plan General de Seguridad de la Escuela Naval Militar se desconoce cómo fueron contruidos esos túneles ni con qué objetivos fueron diseñados cuando se proyectó y se inició la construcción de la ENM en el año 1938. Es por todo esto que actualmente no se dispone de ningún tipo de plano original que nos permita conocer cómo es exactamente el túnel por dentro. La existencia de este túnel es incluso desconocida para un gran porcentaje del personal que actualmente trabaja en la ENM, siendo un lugar muy poco transitado en las actividades diarias dentro de la escuela.



**Figura 2-8 Ubicación del pabellón deportivo “GM Barrutia” dentro de la ENM**

La inexistencia de estos planos relativos a su construcción y el desconocimiento actual acerca del uso o de las medidas del mismo, hacen del túnel de la ENM un lugar ideal para llevar a cabo el estudio y caracterización mediante tecnología LiDAR que propone este proyecto puesto que no se ha realizado anteriormente.

Previamente a la realización de este trabajo, en la referencia citada [10], solo se conocía parte de la caracterización del túnel mostrándose el diseño en planta de tan solo de una fracción del túnel (Figura 2-9 Túnel de la ENM. (A) Representación en planta (B) Representación 3D) y su localización debajo de la pista de fútbol sala del pabellón de deportes de la Escuela. En dicho estudio se describe el túnel como un largo pasillo que posee dos galerías simétricas a ambos lados. Al final del pasillo central, existe una trifurcación que marca el final de este pasillo dividiéndose en una galería simétrica a cada lado similar a las anteriores y un pasillo largo y estrecho que es la continuación del pasillo central. El túnel presenta diferentes alturas (Figura 2-9B) en todas sus secciones y galerías e incluso alturas distintas a lo largo del pasillo central. La entrada a cada galería es diferente, estando incluso algunas en pendiente ascendente. Todas las galerías son de menor tamaño que el pasillo central, en ninguna cabe una persona de pie mientras que en el pasillo central sí.

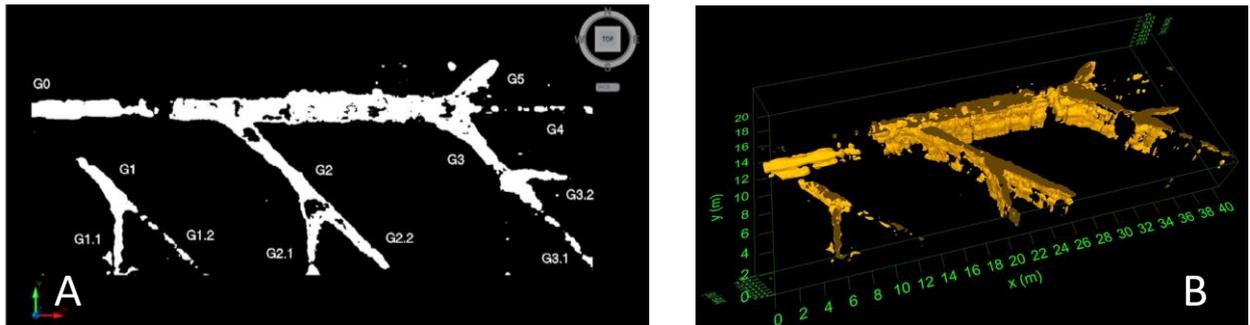


Figura 2-9 Túnel de la ENM. (A) Representación en planta (B) Representación 3D [10]

Como se puede observar en la Figura 2-9, las imágenes obtenidas en [10] mediante la técnica del georradar o GPR (del Inglés, Ground Penetrating Radar o Radar de Penetración Terrestre) muestran tan solo la parte sur del túnel y el pasillo central, con las galerías previamente descritas. Según dicho estudio, el resto del túnel es inapreciable para el radar debido a la gran cantidad de humedad presente. Además, este estudio con la técnica del Radar de Penetración Terrestre en el suelo no permite conocer cuál es el estado actual del túnel. Sin embargo, mediante la tecnología LiDAR es posible además hacer una reconstrucción volumétrica que permita conocer un poco más acerca del estado de sus paredes, suelo o techo.

Con estos datos previos y esta información, además de la experiencia de haber estado en el túnel anteriormente se procede a la realización de una primera inspección visual del túnel para el desarrollo del trabajo. En esta primera toma de contacto con el túnel se observan las descripciones del túnel redactadas en [10], sin embargo, se aprecia también que el túnel dispone de otra parte que no viene descrita en el estudio. Esta nueva parte se sitúa al NE del pasillo central debajo de la piscina del pabellón. Se decide caracterizar el túnel en su totalidad con ambas partes, la ya conocida y la nueva.

Tras esta inspección inicial, se procede a la toma de datos, descrita en el apartado 3.3.2, y después del procesado de los mismos (apartado 3.5), se puede concretar como es el túnel exactamente.

## 2.3 LiDAR

LiDAR es acrónimo de Light Detection And Ranging (detección y medición de distancias por luz), que también se conoce como LADAR, acrónimo de Laser Detection And Ranging (detección y medición de distancias por láser). Es una tecnología óptica para medir la distancia u otras propiedades de un objeto iluminándolo normalmente mediante pulsos de luz láser.

El fundamento de los dispositivos basados en la tecnología LiDAR es el cálculo del tiempo de vuelo (TOF - Time Of Flight) de los pulsos láser, de manera que, conociendo la velocidad del mismo, las características angulares con las que fue emitido, y la diferencia de tiempos entre el rayo emitido y el reflejado se puede determinar de manera sencilla la distancia a la que se encuentra el obstáculo/objeto con el que el rayo impactó. Esto permite, con gran exactitud, conocer las coordenadas de la posición de objetos o superficies con respecto del sistema de coordenadas del propio dispositivo. Existen además otros dispositivos LiDAR que basan su funcionamiento en la diferencia de fase entre el pulso láser emitido y el reflejado e incluso, hay escáneres de triangulación siendo los más apropiados para escaneos a distancias muy cortas pero con una precisión muy elevada.

Los primeros usos de la tecnología LIDAR se remontan a la década de los años 60, realizándose los primeros estudios acerca de mediciones medioambientales. La gran cantidad de años que lleva esta tecnología siendo estudiada ha permitido mejorar en gran medida la precisión de los sistemas de detección, dando lugar a nuevos usos, como por ejemplo, la aplicación de esta tecnología en el ámbito de la ingeniería civil. Debido al uso de tecnología láser, normalmente se utiliza el término láser

escáner, o simplemente láser, para referirse a un dispositivo LIDAR. Según Fernández Caramés en [11] este sensor presenta algunas ventajas frente a otros tipos, que son:

- Las medidas se pueden considerar instantáneas. Un sónar, por el contrario, obtiene las medidas con bastante retardo en comparación.
- Es muy preciso: el error en la medida es del orden de unos pocos milímetros, y la resolución angular está típicamente en el rango 0.25 - 1°.
- Los datos representan directamente distancias reales a objetos, y el pulso emitido apenas tiene apertura cónica en comparación con un sónar.

Por enunciar algunas desventajas, se indica su elevado precio, y que las superficies que proporcionan una reflexión especular son invisibles para el sensor. El láser escáner es completamente efectivo sobre las superficies lambertianas e inefectivo sobre las superficies especulares.

Esta tecnología de teledetección tridimensional mide la distancia a puntos distantes mediante haces de luz láser. Para ello, combina el cartografiado con imágenes enfocadas por láser con la reflexión de la luz para calcular distancias, según el tiempo que tarda la luz reflejada en volver. Existen dos tipos de sistemas LIDAR según el tipo de haz de luz empleado: los sistemas de micro pulso, que al emplear una potencia láser baja no requieren de sistemas de seguridad, y los de alta potencia, comunes en la investigación atmosférica. Estos sistemas pueden fijarse a medios aéreos o terrestres.

Todos estos sistemas están constituidos esencialmente por: un láser, que proporciona el haz de luz y cuyas propiedades varían según la aplicación para el que están diseñados; un escáner, que realiza el barrido del objetivo y así permite la captación de imágenes; foto detectores, que recogen la luz láser emitida inicialmente; un sistema de posicionamiento global (GPS) y una unidad de medición inercial (IMU), que determina la posición absoluta y orientación del sensor LIDAR; estos dos últimos puntos tan solo los recogen los equipos modernos. Cualquier software CAD puede ofrecer una representación en 3D de las nubes obtenidas y los sistemas de información geográfica (GIS) además pueden trabajar con la información geográficamente referenciada [12].

El LIDAR estático (TLS) proporciona un conjunto de nubes de puntos desde una ubicación estática. Normalmente, el sensor está montado en un trípode y es totalmente portátil, con un rango basado en un láser y sistema de imágenes. Estos sistemas pueden recopilar nubes de puntos LIDAR en el interior de estructuras o de edificios, así como en el exterior.

### *2.3.1 Antecedentes del uso del LiDAR*

En algo más de medio siglo, las sociedades avanzadas y el mundo en general, han dado un salto sin precedentes en el campo de las Tecnologías de Información Geoespacial (conjunto de sistemas, instrumentos y técnicas que nos proporcionan datos e información que se caracterizan por su componente espacial, en el sentido geográfico).

En un principio, la carrera espacial en plena guerra fría fue el motor y principal impulsor de nuevas técnicas e instrumentos. Más adelante aparecieron dispositivos capaces de utilizar un nuevo tipo de luz, como fue el láser en 1960. Según Fua y Cacciani en [12], a inicios de los años 60 uno de los profesores más conocidos del Departamento de Ingeniería Eléctrica en el MIT, Louis Smullin, seleccionó a un joven Giorgio Fiocco para desarrollar un instrumento óptico capaz de medir la distancia de la luna: se trataba de un primer radar óptico también llamado LIDAR, derivación obvia del acrónimo RADAR.

En el año 1969, durante la misión espacial Apollo 11, se empleó la tecnología para determinar la distancia entre la Tierra y la Luna. Los astronautas depositaron un retro reflector sobre la superficie de la Luna sobre el que incidió un haz láser proveniente de la Tierra según el informe de la NASA en [13]. Otros reflectores fueron situados por astronautas americanos y vehículos robotizados rusos en los años setenta. Durante décadas, los científicos han analizado el tiempo de ida y vuelta de los destellos luminosos para hacer medidas cada vez más exactas de la forma de la Luna, sus tambaleos, su

distancia de la Tierra y sus características físicas. Hoy el margen de error es inferior a los 2,5 centímetros y existen planes para construir un observatorio láser todavía más preciso.

A continuación, se fue generalizando su constante penetración en numerosos sectores y actividades, pasando por la rápida expansión tecnológica y de la informática a partir de los años 80, hasta la aceleración experimentada por este conjunto tecnológico con la irrupción de la web global a finales de los años 90.

Durante la década de los 2000, las aplicaciones en el ámbito de la ingeniería civil crecen rápidamente desarrollándose nuevos sistemas como el MLS (Mobile Laser Scanning) o el TLS (Terrestrial Laser Scanning). El LIDAR terrestre fijo (TLS) proporciona un conjunto de nubes de puntos desde una ubicación estática. Normalmente, el sensor está montado en un trípode y es totalmente portátil, con un rango basado en un láser y sistema de imágenes. Estos sistemas pueden recopilar nubes de puntos LIDAR en el interior de estructuras o de edificios, así como en el exterior.

### *2.3.2 Aplicaciones del LiDAR*

Según el Colegio Nacional de Ingenieros Industriales en [14], el LIDAR se emplea mayormente para realizar mapas de alta resolución, con aplicaciones en agricultura, arqueología, geografía, geología, meteorología, silvicultura, sismología, entre otros.

En agricultura, al cartografiar la superficie de los cultivos se optimizan los sistemas de regadío y drenaje, se determina el ritmo de crecimiento, etc. En arqueología, se cartografían extensas áreas de vegetación frondosa de una forma rápida localizando estructuras ocultas. En geografía, se obtienen representaciones de la superficie del terreno con una exactitud vertical de 15 cm, útil para medir el grosor de hielo de los polos o los efectos de los terremotos. Esta tecnología también permite cartografiar grutas de una forma exacta, como reflejan diversos autores en [15].

El sistema LIDAR también es utilizado para buscar afloramientos mineros y reservas petrolíferas, ya sea en tierra o en el mar. En silvicultura se realizan mapas de fuego a tiempo real, determinando así la evolución del fuego según las condiciones atmosféricas. La altura, estratificación y densidad de las nubes, así como temperatura, presión, viento, humedad, la concentración de gases (ozono, metano, óxido nitroso, etc.) son medidos por medio de sistemas LIDAR de alta energía.

En el ámbito militar y en el civil, el LIDAR juega un papel fundamental en el cartografiado de una zona específica. Para ello se suele montar un dispositivo en un medio aéreo, ya sea un avión o un helicóptero, dependiendo de la calidad buscada. Para zonas más amplias se suele usar avión, mientras que el helicóptero puede trazar planos más precisos al recoger mayor cantidad de puntos. También es de aplicación estratégica en la digitalización de edificios o estructuras en 3D, para lo cual es más apropiado el uso de escáneres terrestres de tipo móvil.

Según indican desde el proyecto Ingeniatic de la EUITT-UPM [16], últimamente los sistemas LIDAR están sustituyendo a los radares de medición de velocidad debido a que son muy superiores en cuanto a prestaciones. Son más rápidos, precisos y con mayor grado de seguridad (debido a que los detectores de radar particulares avisan al usuario cuando ya ha sido tomada la medida).

Además, se pueden encontrar numerosas aplicaciones desarrolladas en los últimos años en el ámbito de la ingeniería civil como las descritas en los estudios y artículos recogidos en [17] [18] [19] [20]. Estas aplicaciones se basan en la ingeniería inversa, es decir, obtener datos de edificios, puentes, carreteras o monumentos para posteriormente analizarlos y obtener datos de su estructura, estado o construcción.

Las fuentes principales de las que se ha obtenido información para la realización de este subapartado han sido [16], [21] y [22].

## 2.4 Equipo utilizado

### 2.4.1 Láser escáner terrestre. Faro Focus<sup>3D</sup> X330

El láser escáner utilizado para la realización del presente proyecto es el modelo Focus<sup>3D</sup> X330 (Figura 2-10 de la casa comercial Faro. A continuación se detalla un resumen de las características básicas del escáner [22]:

- GPS integrado.
- Puede escanear directamente contra la luz del sol.
- Alcance extendido, hasta 330 metros.
- Ligero, transportable con facilidad y tamaño reducido.
- Autonomía extendida. Capacidad de cambiar baterías.
- Visualización de las nubes de puntos en su pantalla integrada.



Figura 2-10 Faro Focus<sup>3D</sup> X330 [22]

### 2.4.2 Trípode

Base de tres patas que se utiliza para el apoyo del láser escáner con el objetivo de obtener resultados más precisos gracias a la estabilidad que le otorga (Figura 2-11). Es necesario equilibrar el trípode para que el láser escáner opere de manera paralela horizontal y para ello es posible ajustar sus tres patas en función de un pequeño nivel que viene incorporado en el sistema.



Figura 2-11 Trípode (extraída de [23])

### 2.4.3 Otros

Para la realización del proyecto se han utilizado también una caja de transporte para el láser escáner, una tarjeta SD para almacenar los datos de las mediciones, una escalera portátil para facilitar el acceso a las galerías y un par de baterías para asegurar la autonomía del láser escáner durante el proceso de toma de datos.

## 2.5 Software utilizado

### 2.5.1 SCENE®

SCENE® es el software propio de la casa comercial FARO®, a la que pertenece también el láser escáner utilizado. Este programa se ha utilizado exclusivamente por motivos de compatibilidad entre el formato en el que trabaja el láser escáner “.fls”, y el formato necesario para trabajar con el software RiSCAN Pro “.xyz”, de RIEGL®. El procedimiento seguido para la conversión de los datos viene detallado en el apartado 3.4 Preparación de los archivos para el registro.

El software SCENE® procesa los datos escaneados de manera eficiente y sencilla, utilizando el reconocimiento automático de objetos y auto posicionamiento. Además, ofrece las opciones de renderizado de superficies, mapeo HD y modelado automático de superficies en 3D. Las características del programa se pueden consultar en [24].

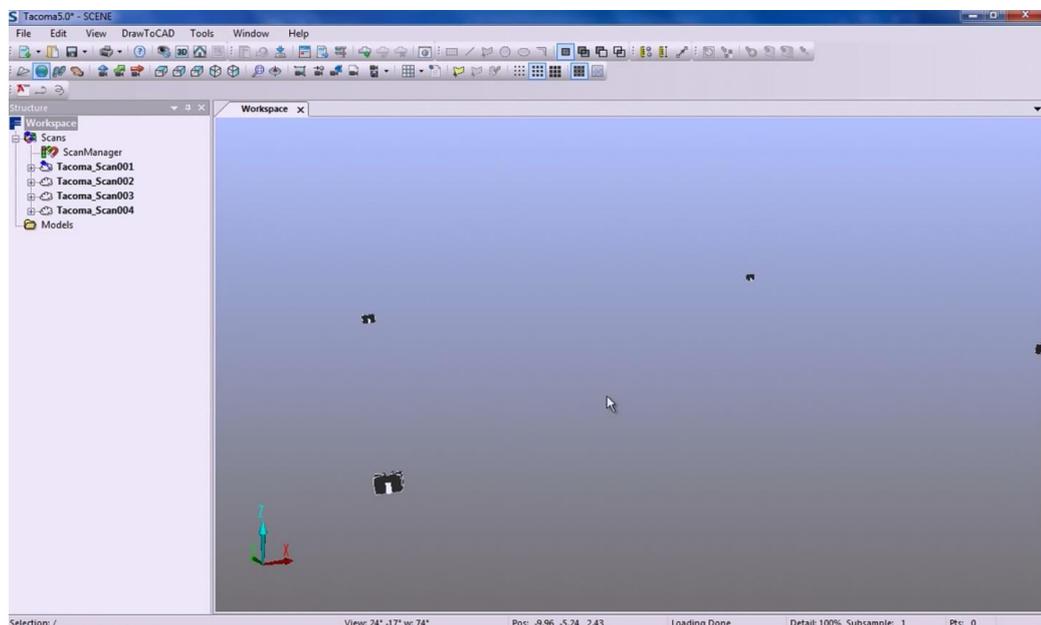


Figura 2-12 Interfaz del programa SCENE®

### 2.5.2 RiSCAN Pro 1.8.1.

Para el desarrollo del procesamiento de las nubes de puntos y obtención de la nube de puntos final se ha optado por utilizar el software Riscan Pro, de la casa comercial Riegl®. En la Figura 2-13 se puede apreciar una captura de pantalla de la interfaz del programa. A pesar de que no sea el software correspondiente a la misma casa comercial que el láser escáner, ha sido seleccionado para su uso debido a las numerosas ventajas y características que tiene en cuanto al procesamiento de las nubes [25], y que, se detallan a continuación:

- Registro de las nubes rápido y eficiente basado en la posición del escáner y su orientación.
- Registro manual o automático basado en puntos de control.
- Si el escáner dispone de receptor GPS, permite el registro automático de la nube por coordenadas.
- Creación de ortofotos.
- Medición de distancia entre dos puntos.

- Medición de ángulos entre dos planos.
- Medición del volumen o de la superficie de áreas seleccionadas o definidas.
- Creación de diferentes vistas con posibilidad de seleccionar la resolución.
- Filtrado y eliminado de puntos dentro de la nube.
- Creación de mallas y modelos triangulados.

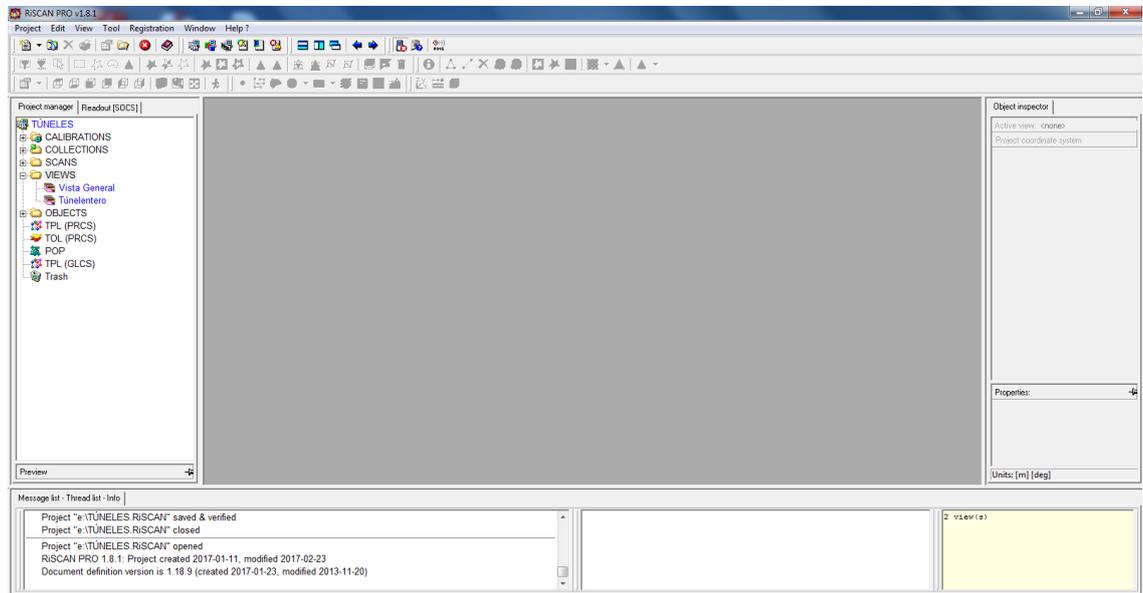


Figura 2-13 Interfaz del programa RiSCAN Pro

### 2.5.3 Matlab® R2016b

Para la creación del algoritmo que permite seccionar el túnel y obtener las alturas para cada punto de este, se ha decidido utilizar el software de la casa comercial MathWorks®, Matlab R2016b. Este programa es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje propio de programación (lenguaje M).

Matlab es la abreviatura de MATrix LABoratory y es utilizado tanto por matemáticos como por científicos a lo largo de todo el mundo. Su uso está muy extendido y abarcan temas muy diversos, desde el procesamiento de imágenes o simulación de comunicaciones hasta algoritmos utilizados para la compra venta de acciones en la bolsa o simulaciones de robótica.

Matlab permite operar con grandes cantidades de datos, *arrays* de matrices o incluso nubes de puntos. Además, utilizando el lenguaje propio del programa (lenguaje M), permite programar algoritmos para resolver tanto problemas ingenieriles como científicos. A continuación, se describen las características principales del software [26]:

- Interfaz ajustada para exploración iterativa, diseño y resolución de problemas.
- Gráficos para visualizar datos en 2D y 3D y herramientas para crear gráficos personalizados.
- Aplicaciones para ajuste de curvas, clasificación de datos, análisis de señales, ajuste de sistemas de control y muchas otras tareas.
- Cajas de herramientas complementarias para una amplia gama de aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas.
- Interfaces a C / C ++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft® Excel®.

Como se puede observar en la Figura 2-14 la interfaz del software Matlab dispone de tres ventanas básicas:

- **Current Folder:** A través de la cual se accede al directorio donde se guardan los archivos.
- **Command Window:** Donde se introducen los comandos a ejecutar, es una línea y los comandos van precedidos del símbolo (>>).
- **Workspace:** Donde se observan los datos que se han creado o importado.
- **Editor:** Donde se desarrolla el código si se desea hacer un programa o función. Este código o función cuando es llamado en el Command Window se ejecuta entero.

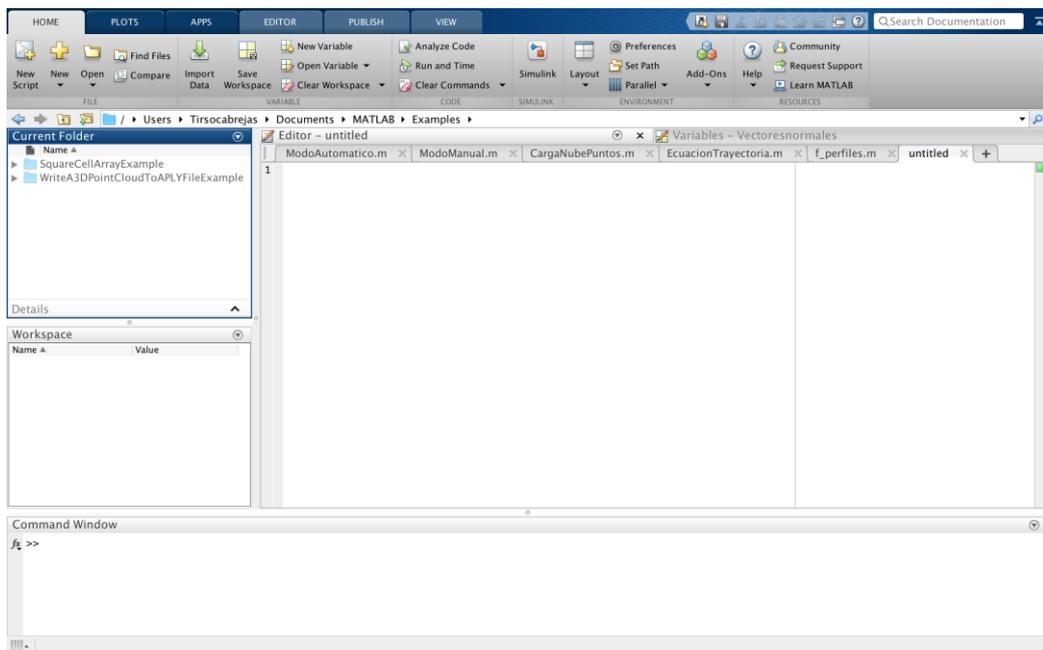


Figura 2-14 Interfaz del programa Matlab® R2016b



## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Descripción general

A lo largo del presente capítulo se desarrollan aquellos puntos en los que consisten la metodología desarrollada. Además, se explica cómo se alcanza esta metodología a través del trabajo realizado en cada paso. En primer lugar, se realiza a raíz de una vista general del túnel, una segmentación en secciones y galerías. A continuación, se describe de manera general cómo se realiza el trabajo de campo, que consiste en la planificación y la toma de datos. Posteriormente, se procede a explicar más detalladamente los dos grandes bloques de los que consiste el trabajo: el procesado de las nubes de puntos y la creación del algoritmo para el cálculo de las secciones y caracterización.

### 3.2 Segmentación y numeración de las galerías del túnel

Con el objetivo de facilitar la explicación del análisis y procesado de las diferentes secciones y galerías que componen el túnel, se decide realizar una segmentación en dos secciones: sección 1, situada debajo de la pista de fútbol sala, y sección 2, localizada debajo de la piscina y alrededores. Además, se procede a dar una numeración a las diferentes galerías existentes en cada sección (Figura 3-1).



Figura 3-1 Secciones y galerías del túnel

### 3.3 Estudio de campo

En el presente apartado se describe cómo se desarrolla la toma de datos del interior del túnel aplicando la tecnología LiDAR. En primer lugar, se explica la preparación que supone el proceso de toma de datos y más tarde, cómo se realiza.

#### 3.3.1 Planificación de la toma de datos

El proceso de planificación a la hora de realizar la toma de datos cobra una vital importancia cuando se trabaja con el láser escáner terrestre. Es importante saber que, posteriormente a la toma de datos, se va a realizar un registro de las nubes de puntos obtenidas y que, para poder realizar un registro correcto sin perder ningún dato, es necesario que cada escaneo obtenido tenga suficientes puntos en común con el siguiente y con el anterior.

El número de puntos en común tiene que ser como mínimo de 4 para realizar el registro, 3 para restringir los movimientos entre las nubes y 1 de confirmación. Esto se debe a la propia dinámica del sólido rígido, que cuenta con seis grados de libertad (traslación y rotación en los tres ejes de coordenadas).

Sabiendo que tener al menos 4 pares de puntos en común entre las nubes de puntos obtenidas con el láser escáner es una condición fundamental para el registro posterior de las nubes, se establecen los objetivos para realizar una correcta planificación, que son:

- Optimizar los recursos disponibles.
- Alcanzar la máxima efectividad en las mediciones.
- Emplear el mínimo tiempo posible en el proceso.

Para conseguir estos objetivos se dispone de dos herramientas fundamentales. Por un lado, la posición en la que se va a realizar cada escaneo y el número de estos. Por otro lado, el equipo laser escáner Faro Focus<sup>3D</sup> X330 permite multitud de configuraciones dependiendo del escenario en el que vayan a desarrollar las mediciones.

##### 3.3.1.1 Elección de las posiciones de escaneo

En cuanto a la ubicación y número de escaneos a realizar, conceptos que van íntimamente ligados, se opta por realizar un total de 24 mediciones repartidas a lo largo de todo el túnel. Cabe destacar que los escaneos se numeran del 0 al 24, a excepción del escaneo 19 que fue desechado por un problema de autonomía de la batería.

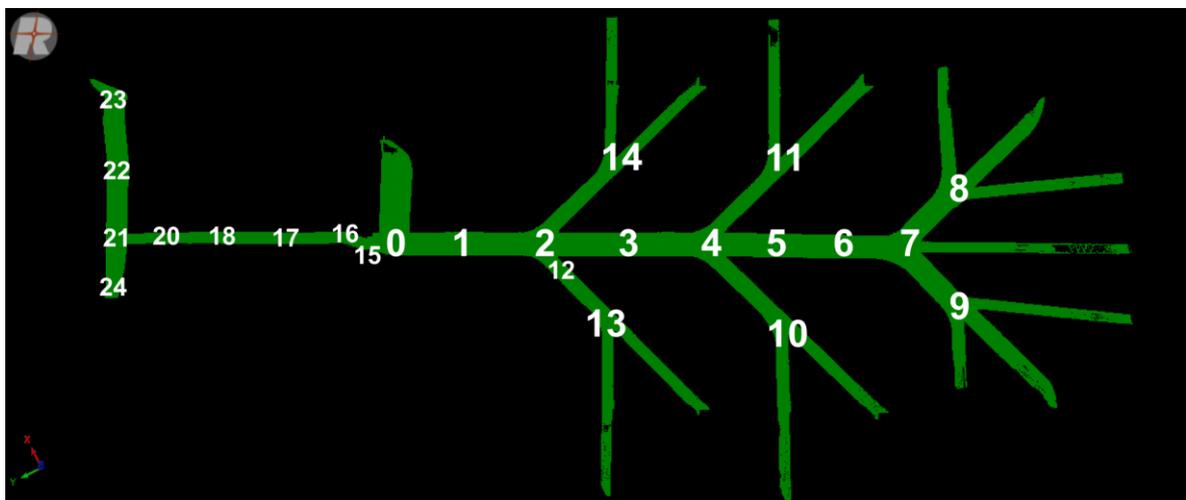


Figura 3-2 Posición escaneos en el túnel completo. Vista de planta

Debido a que, como se ha mencionado anteriormente, es necesario tener puntos en común para el posterior registro de las nubes de puntos obtenidas en cada posición, se deben tener en cuenta dos factores. En primer lugar la distancia en horizontal entre las posiciones de escaneo y en segundo lugar, debido a que las distintas galerías del túnel se encuentran a diferentes alturas y con cambios de rasante que dificultan la toma de datos, se debe tener en cuenta también la diferencia de altura entre las posiciones, con el objetivo de que no quede ningún sector ciego para el láser escáner.

Se realiza la distribución de las posiciones del láser escáner representada en planta en la Figura 3-2 y en perfil en la Figura 3-3.

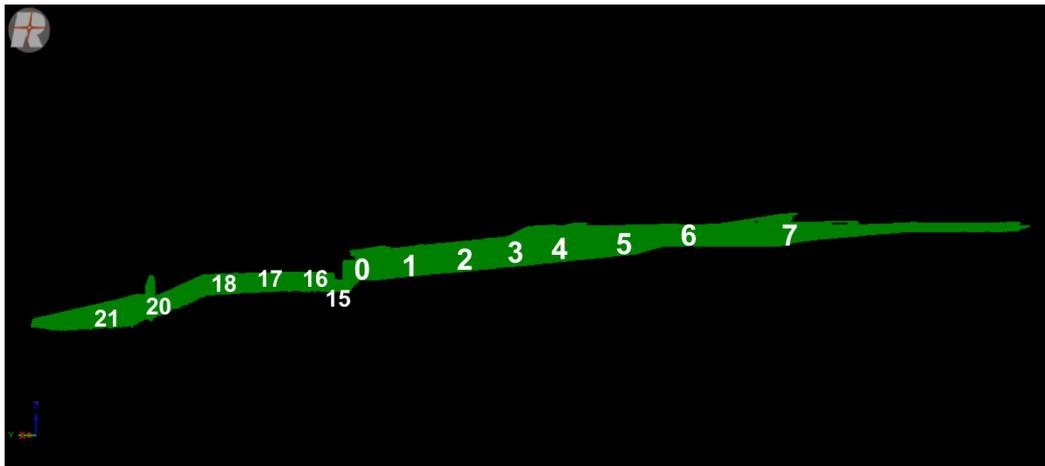


Figura 3-3 Posición escaneos en el túnel completo. Vista de perfil

A continuación, se procede a detallar cómo son las posiciones de escaneo para aquellas partes concretas del túnel que presentan alguna característica especial, bien sea por incremento de altura (Figura 3-4, 3-5 y 3-6), o por giros y bifurcaciones del propio túnel (Figura 3-5).

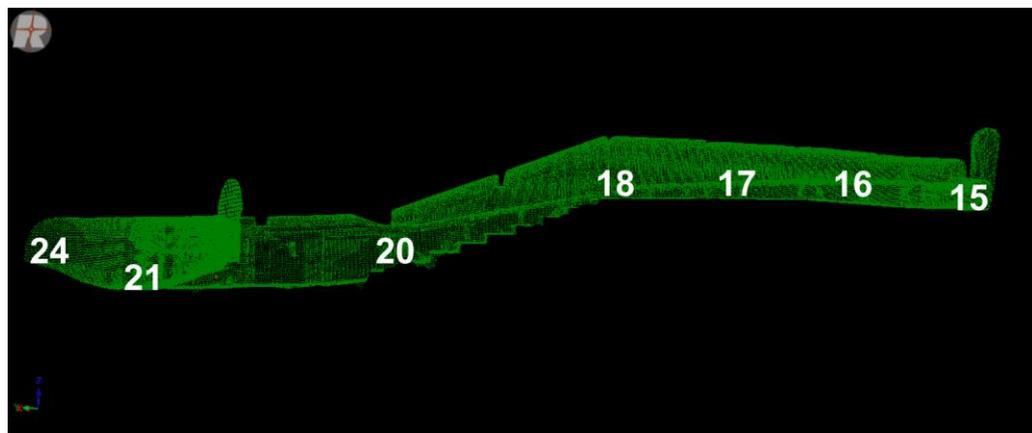


Figura 3-4 Sección 2 del túnel. Detalle de las escaleras

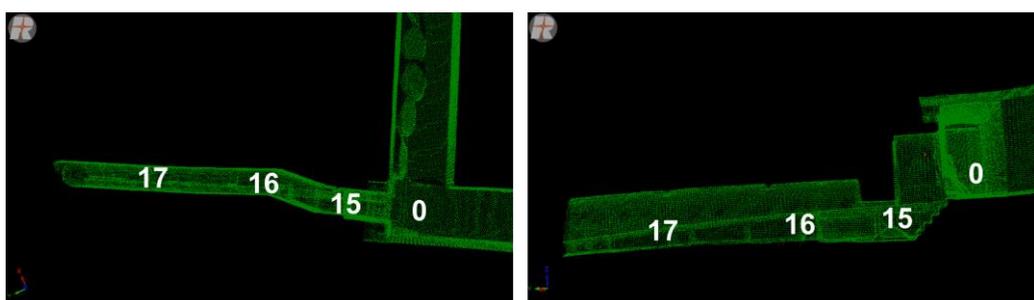


Figura 3-5 Sección central del túnel. Detalle de las escaleras y entrada al túnel



Figura 3-6 Nube de puntos tomada desde la posición de escaneo 0

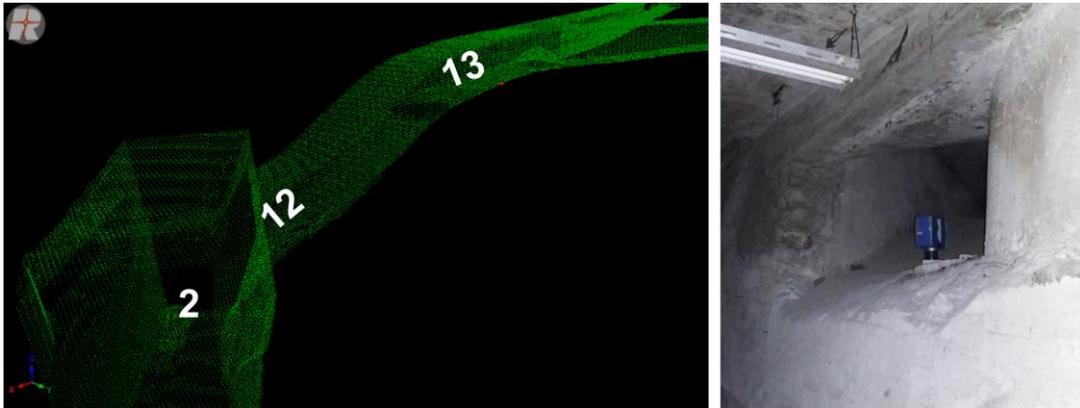


Figura 3-7 Galería 1B. Detalle de la posición 12 de escaneo

### 3.3.1.2 Configuración del láser escáner Faro Focus<sup>3D</sup> X330

Cabe destacar que gracias a la interfaz que presenta la pantalla táctil LCD que viene integrada en el láser escáner, su configuración se realiza de una manera sencilla e intuitiva teniendo en todo momento control de los parámetros a configurar. Las instrucciones acerca de la configuración del equipo que a continuación se exponen son extraídas de [22].

En primer lugar, desde el menú principal (Figura 3-8A) se accede al modo “administrar” (Figura 3-8B) en donde se crea un proyecto en el que se guardarán todos los escaneos realizados en el túnel y se concreta el nombre base de archivo, que será el nombre que se otorgue a cada escaneo. A continuación, se selecciona dentro del submodo perfiles aquel perfil de escaneo más conveniente para el proyecto. Es de señalar que el láser escáner permite la creación de perfiles personalizados. En el caso del túnel se selecciona interior hasta 10 metros ya que posiciones de escaneo contiguas nunca van a estar separadas más de esa distancia. El sistema tiene diferentes sensores incorporados como son temperatura, clinómetro, brújula, GPS y altímetro. Para la realización del proyecto se ha utilizado tan sólo el clinómetro con el objetivo de hacer que el plano horizontal real coincida con el plano horizontal del equipo.



**Figura 3-8** Interfaz de la pantalla del láser escáner. (A) Menú principal; (B) Modo "administrar"; (C) Modo "parámetros"; (D) Submodo "resolución y calidad"

En segundo lugar, se procede a ajustar los parámetros del escaneo, entrando para ello en el modo “parámetros” (Figura 3-8C). Este modo nos ofrece la posibilidad de configurar diversos aspectos. Dentro de este modo se permite de nuevo volver a introducir el perfil seleccionado, en el caso de que se deseara cambiar para cada escaneo. Es importante definir dos conceptos para entender las posibilidades de configuración que nos ofrece el equipo.

- **Resolución:** Es la distancia entre puntos y se relaciona con la densidad de la nube de puntos [mm/10m].
- **Calidad:** Cantidad de veces que se mide el mismo punto, el sistema devuelve como valor real un promedio del número seleccionado de mediciones.

Dentro del submodo “resolución y calidad” (Figura 3-8D) el sistema permite modificar dichos valores entre unos rangos determinados y en función de los valores seleccionados nos devuelve la duración del escaneo en tiempo, el tamaño del escaneo, los megapuntos y la distancia de puntos.

Para la realización de este proyecto han sido seleccionados los siguientes parámetros en los 24 escaneos realizados:

Parámetros configurables	Datos del sistema	Valores
Perfil seleccionado		Interior hasta 10m
Resolución		1/8
Calidad		3x
	Duración del escaneo	04:55 [mm:ss]
	Tamaño del escaneo	5120 x 2134 [Ptos.]
	Megapuntos	10.9
	Distancia entre puntos	12272 [mm/10m]
Escaneo con color		OFF

**Tabla 3-1** Parámetros Faro Focus<sup>3D</sup> X330

### 3.3.2 Toma de datos

Una vez definida la configuración de los parámetros del láser escáner y decididas las posiciones en dónde se va a ubicar el láser escáner se procede a realizar las mediciones correspondientes. En primer lugar, se debe tener en cuenta que durante el tiempo que el láser escáner adquiere los puntos de cada

escaneo, hay que evitar el movimiento en la zona que va a ser escaneada, cualquier interferencia se traduce en distorsiones en la nube de puntos que posteriormente deben ser filtradas. El sistema del láser escáner guarda cada punto de la nube bajo un sistema de coordenadas esféricas que posteriormente transforma de manera automática en coordenadas cartesianas mediante las siguientes ecuaciones:

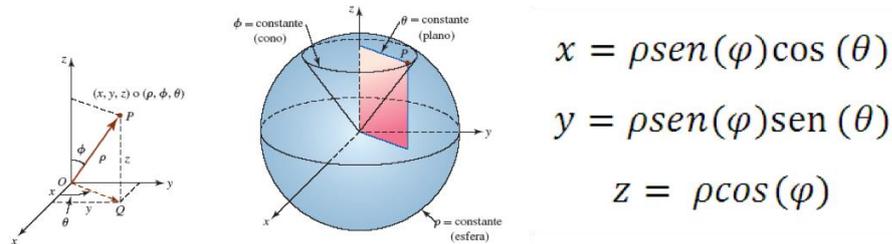


Figura 3-9 Ecuaciones de conversión de coordenadas esféricas en cartesianas [27]

Además, para cada punto de la nube el láser escáner mide la intensidad del haz de retorno reflejado. Esta intensidad depende de dos factores fundamentales, las características físicas de la superficie reflejada y el ángulo de incidencia.

La ausencia de luz dentro del túnel no supone un problema para el cálculo de la intensidad del haz puesto que no depende de este factor. Además, para la realización del trabajo no se necesitan imágenes con color que sí necesitarían de luz para su adquisición. Por lo tanto, se desactiva el parámetro de escaneo con color que ofrece el láser escáner (Tabla 3-1 Parámetros Faro **Focus**<sup>3D</sup> X330)

Una vez realizadas todas las preparaciones descritas, se procede a comenzar el escaneo, para ello, se sitúa el escáner en cada posición planeada y se selecciona dentro del menú principal (Figura 3-8A) “Start Scan”. A continuación, se muestran diferentes imágenes del proceso de toma de datos en el interior del túnel.



Figura 3-10 Imágenes de la toma de datos en el interior del túnel

### **3.4 Preparación de los archivos para el registro**

#### *3.4.1 Descripción*

En el presente apartado se definen los pasos previos a realizar para proceder al registro de las nubes de puntos después de haber realizado el trabajo de toma de datos. El objetivo es disponer de un archivo por cada escaneo en un formato que el software elegido para el registro y procesado de las nubes, RiSCAN Pro, pueda comprender.

#### *3.4.2 Importación de los datos al software SCENE®*

Una vez realizados los escaneos, los datos quedan guardados en la tarjeta de memoria que incorpora el láser escáner. Esta tarjeta, del tipo SD, es extraíble y se conecta directamente al puerto de entrada de tarjetas de memoria del ordenador. Cada escaneo se materializa en un archivo con un formato propio de la casa comercial FARO®, con la extensión “.fls”. Debido a esto, es necesario que los archivos de los escaneos sean inicialmente importados al software específico de FARO®.

En primer lugar, se crea un nuevo proyecto dentro del programa que hace de directorio de trabajo. A continuación se selecciona la opción “Importar” y se arrastran todos los archivos en formato “.fls”. Se selecciona la opción “Crear nube de puntos” y los parámetros en la pestaña que se presenta. Una vez realizado este proceso, el programa permite la visualización en 3D de la nube de puntos.

#### *3.4.3 Exportación de los datos a formato ASCII (.xyz)*

Debido a que el programa seleccionado para realizar el registro y procesado de las nubes de puntos es el software de RIEGL®, RiSCAN Pro, es necesario una exportación de los archivos de la nube de puntos puesto que, como se ha mencionado en el apartado anterior, el formato “.fls” es exclusivo de la empresa FARO®.

El formato elegido para exportar los archivos es “ASCII” debido a la buena compatibilidad que presenta con la mayoría de softwares comerciales de tratamiento de nubes de puntos, entre ellos el RiSCAN Pro.

Para realizar la exportación de los archivos se debe acceder a la pestaña “Exportar” y una vez ahí, seleccionar cada archivo. En la pestaña que se presenta se selecciona XYZ ASCII Files (.xyz) y se guarda cada archivo en la ubicación especificada.

### **3.5 Trabajo con RiSCAN Pro: registrado, procesado y segmentación**

#### *3.5.1 Descripción*

Una vez que se dispone de los archivos en el formato ASCII se procede a realizar el trabajo con el software RiSCAN Pro. Este trabajo tiene como objetivo final conseguir alinear y unir todas las nubes de puntos en una única nube resultante, que represente todo el túnel, como si éste hubiera sido caracterizado mediante un único escaneo. Para ello es necesario realizar el registro de cada una de las nubes de puntos obtenidas.

El registro de las distintas nubes de puntos es el proceso por el cual se buscan las transformaciones espaciales para cada conjunto de datos con el fin de fusionar éstos en un modelo final globalmente consistente. El procesado de las nubes consiste en las tareas de filtrado y exportación. En los siguientes apartados, se explica de manera detallada cómo se realizan estas dos tareas sobre las nubes de puntos del túnel.

La estructura del túnel, con giros y numerosas galerías, y su gran tamaño hacen que la caracterización mediante el algoritmo creado en Matlab sea compleja y requiera un elevado coste computacional del que no se dispone. La solución para este problema pasa por segmentar las diferentes

partes del túnel con el objetivo de aplicar el algoritmo a cada segmentación por separado. Cómo se ha realizado esta segmentación, se explica en el último apartado de este punto.

### 3.5.2 Creación de un nuevo proyecto

La primera tarea que se debe realizar una vez se abre el programa es crear un proyecto sobre el que trabajar, para ello se selecciona la pestaña de la barra de tareas principal “Project” y una vez ahí, se selecciona “New Project”. A continuación se guarda el proyecto con el nombre de “TÚNELES” y el programa automáticamente crea un carpeta con dicho nombre bajo la extensión “.rsp”.

En la parte izquierda de la pantalla, se puede apreciar el proyecto creado, de ahí cuelgan con estructura de árbol diversas ramas que proporcionan diferentes opciones (Figura 3-11A).

### 3.5.3 Importación de escaneos

Para proceder a importar los archivos en formato ASCII que previamente fueron exportados desde el software SCENE, se debe hacer clic con el botón derecho del ratón en la pestaña “SCANS” y a continuación, “New scan position”. Se deben crear tantas scan positions como escaneos se hayan realizado, esto es, 24 en el caso de este trabajo (Figura 2-9B). Para una mayor facilidad a la hora del manejo del programa se decide nombrar a cada scanposition con el mismo número que se otorgó a cada nube de puntos durante la toma de datos (Figura 3-2).

A continuación, para importar cada archivo ASCII dentro de su scan position correspondiente, se despliega el árbol “ScanPosXXX” y se hace clic con el botón derecho encima de la carpeta “POLYDATA”. Se selecciona la opción “Import” y el archivo concreto a importar. Una vez seleccionado, en el programa se abre una ventana que presenta diferentes opciones para la importación de los archivos (Figura 3-11C). Se selecciona el formato de importación de los archivos, esto significa decirle al programa qué variable supone cada una de las columnas del archivo ASCII. En el caso del presente trabajo, se crea un formato de importación llamado “TÚNELES” que asocia automáticamente las variables que se desean a las columnas del archivo tal y como se muestra en la (Figura 3-11C). Estas columnas están separadas por espacios y representan las coordenadas cartesianas X, Y y Z y el valor de intensidad almacenado en 8 bits. En la parte inferior derecha, se muestra el progreso del proceso de importación.

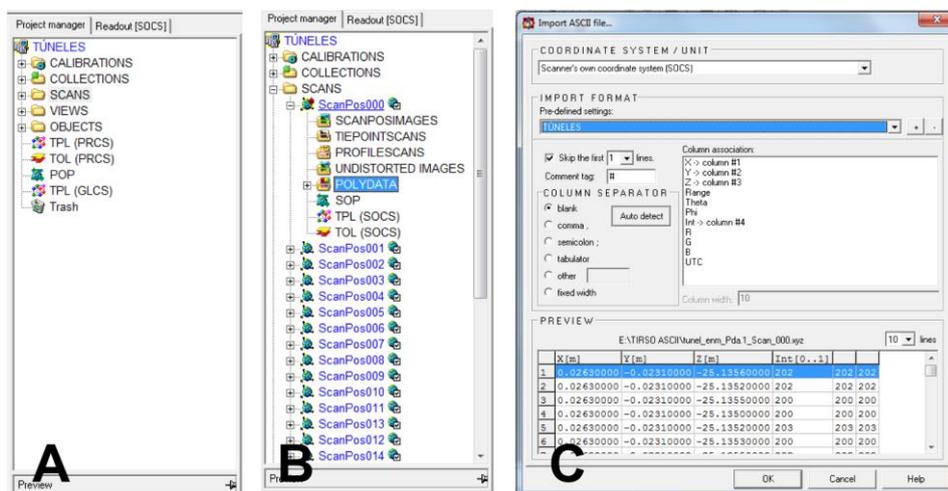


Figura 3-11 RiSCAN Pro. (A) Proyecto; (B) Escaneos; (C) Importar ASCII file

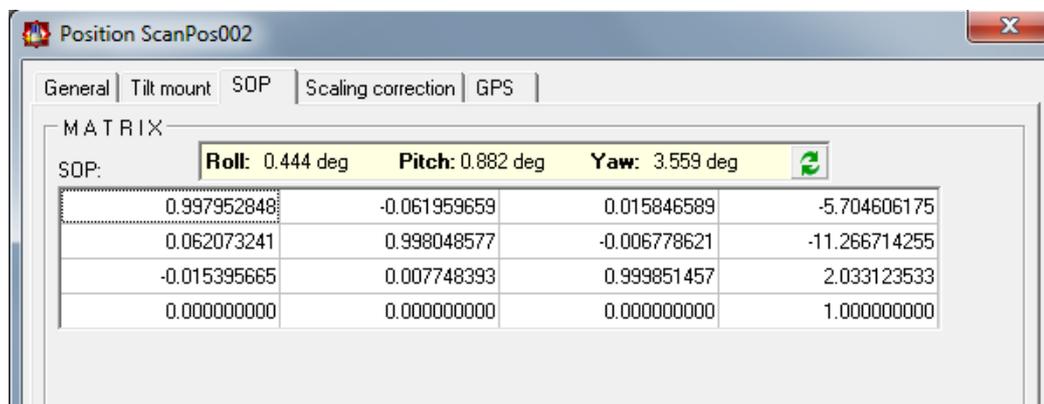
### 3.5.4 Registro de las nubes de puntos

Una vez importados los archivos en cada scan position se procede al registro de las nubes de puntos. Para explicar cómo se ha realizado el proceso de registro es importante conocer una serie de conceptos previos acerca del programa y el modo de trabajar con las nubes de puntos.

El registro de las nubes de puntos se realiza de manera individual para cada nube de puntos, es decir, una nube de puntos se une a otra. Es posible unir varias nubes a una que sirva como referencia o también es posible unir una nube a otra que, aunque no sea la de referencia, ya se encuentre unida con la nube de puntos de referencia en el proyecto. Esto se traduce en que para cada proyecto es necesario fijar una nube de puntos como referencia. Esta nube fijada supone el centro sobre el cual se rotan y trasladan el resto de nubes una vez realizado el registro. El programa crea automáticamente una matriz de rotación y traslación para cada nube registrada denominada “SOP” y multiplica esta matriz por las coordenadas de cada punto de la nube.

En la (Figura 3-12) se pueden apreciar los ángulos de giro “Roll, Pitch y Yaw” así como la matriz “SOP” de la “ScanPos002”. Esta matriz consta de 4 filas y 4 columnas formadas por los siguientes elementos:

- Matriz de rotación: dígitos de la matriz de 3x3.
- Vector de traslación: situado en la cuarta columna.
- Factor de escala: localizado en la posición (4,4) y cuyo valor es la unidad.



**Figura 3-12 RiSCAN Pro. Matriz "SOP" para la ScanPos002**

Para el caso concreto del trabajo, se decide fijar como referencia la nube de puntos número 0, correspondiente a la sección central del túnel. Para fijar esta nube se debe desplegar el árbol de “ScanPos000”, dentro hacer clic con el botón derecho en “SOP” y seleccionar “Freeze”. La confirmación de que se ha fijado correctamente es una estrella azul que aparece a la derecha de “SOP”

A continuación, se procede a realizar el registro de las nubes y para ello se arrastran los dos POLYDATA de las nubes de puntos que se van a registrar sobre la venta principal del programa. En una pestaña que aparece, el programa ofrece la posibilidad de seleccionar diferentes modos para visualización en color de cada punto de la nube. Estos modos permiten representar los puntos con las siguientes opciones de color:

- Color verdadero.
- Escala de grises en función de la intensidad.
- Falso color en función de diferentes parámetros como altura, distancia entre puntos, distancia al origen de coordenadas o a un plano definido por el usuario.

Sin embargo, ya que el túnel no fue escaneado con color y no interesa representar cada punto con un color falso se opta por utilizar el color verde para visualizar toda la nube.

Una vez se tienen los dos escaneos en la pantalla, para mayor comodidad se divide esta en dos mitades para poder trabajar sobre las dos nubes a la vez. A continuación, en el menú principal se selecciona “Registration > Coarse registration > Manual”. Se abre la pestaña correspondiente al registro en la que se puede observar que en primer lugar se deben seleccionar las dos vistas a registrar.

Después de seleccionar las dos vistas que tenemos en pantalla se procede a inspeccionar ambas nubes en busca de pares de puntos en común. En la Figura 3-13 se muestra la interfaz del programa para el registro manual de ambas nubes, asimismo se muestra también la misma parte del túnel representada en ambas secciones pero desde una Scan position distinta. A continuación, se buscan pares de puntos y se seleccionan, siendo necesarios como mínimo 4 pares para poder registrar la nube y recomendable entre 8 y 12. La tarea de búsqueda de pares de puntos en ambas nubes es una tarea costosa y complicada, se deben buscar puntos muy característicos como objetos en el suelo, esquinas, incrementos notables de alturas, grietas en la pared o en el techo, en resumen, puntos notables. Esta tarea se facilita si se utilizan dianas de control, que son elementos reflectantes preparados específicamente para encontrar puntos en común a la hora de registrar las nubes. En el caso del presente trabajo se opta por no utilizarlas, procediendo a la búsqueda de puntos de manera manual. Cabe destacar que a la hora de seleccionar los diferentes pares de puntos en las nubes, conviene que estos se encuentren separados entre ellos lo máximo posible a lo largo de la nube, es decir, repartir todos los pares de puntos.

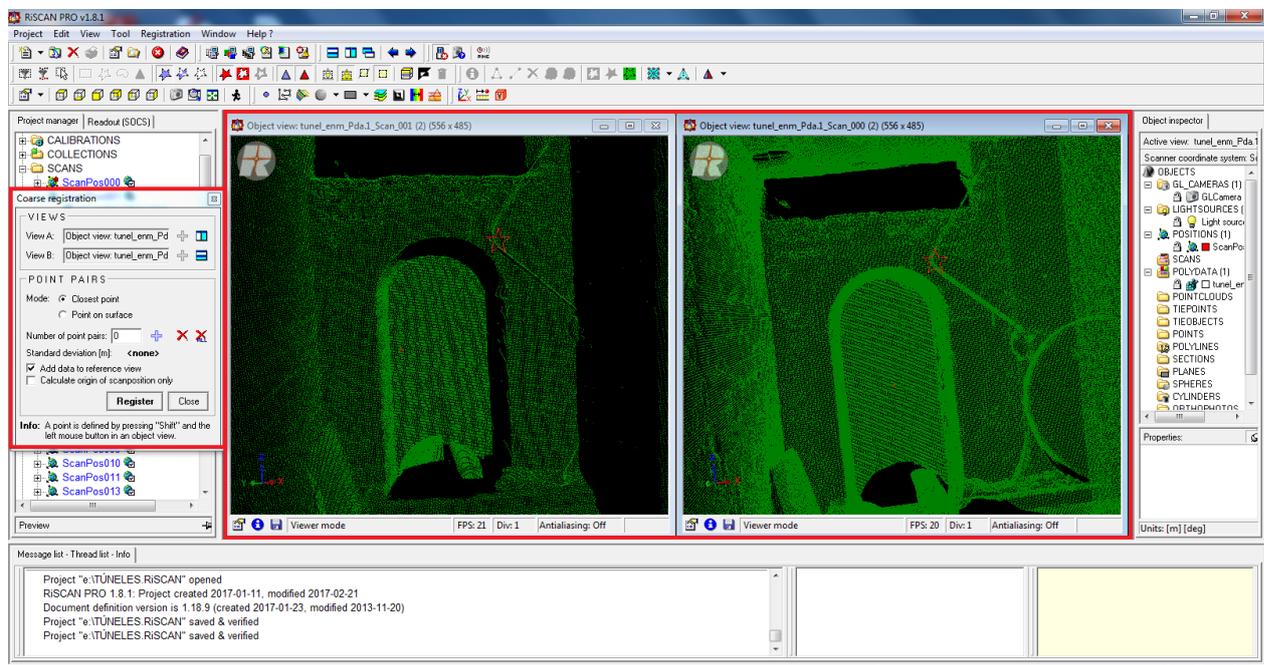


Figura 3-13 RiSCAN Pro. Búsqueda de pares de puntos

Una vez guardados los pares de puntos, se procede a registrar la nube pulsando el botón “Register” y el programa automáticamente calcula la desviación estándar entre los puntos. Esta desviación estándar es un indicador de la calidad del registro realizado devolviendo al usuario un valor en metros. En el caso del presente trabajo, se realizan 23 registros de nubes obteniendo para cada uno de ellos un valor de la desviación estándar que, como objetivo de calidad a la hora de la realización del trabajo, se establece que no puede ser superior a 5 centímetros. La tabla de desviaciones estándar para los 23 registros realizados se adjunta en el apartado 4.2.2.

### 3.5.5 Procesado de las nubes de puntos

Una vez realizado el registro de todos los escaneos, el proyecto se encuentra en un punto en el que todas las nubes están alineadas en un sistema de coordenadas común, y por consiguiente el túnel ya está completo. Sin embargo, el proyecto no dispone de un archivo común formado por todos los puntos del túnel, lo que marca el objetivo del procesado después del registro. Es necesario conseguir dicho archivo para ser introducido posteriormente en el algoritmo que creará las secciones en el túnel y caracterizará altura y anchura en cada punto. Para conseguir este archivo se deben seguir tres pasos:

creación de una vista general, filtrado de la nube y exportación de los datos. En los siguientes apartados, se explican con mayor detalle estos pasos a seguir.

### 3.5.5.1 Creación de la vista general

Para conseguir este archivo único de todo el túnel, en primer lugar se debe generar una vista en la que se encuentren representadas todas las nubes de puntos de cada escaneo. Gracias a que estas nubes ya se encuentran registradas, tan solo se debe arrastrar a la pantalla central la nube que se utiliza como referencia, en este caso, la nube perteneciente a la ScanPos000, y a continuación ir arrastrando cada nube de cada ScanPos sobre la misma vista. De esta manera, se genera una vista global de todas las nubes individuales juntas, representando, en el caso del proyecto, el túnel en su totalidad. Cabe destacar que en esta vista, cada nube de puntos individual aparece representada dentro del conjunto total con un color distinto (Figura 3-14), lo que hace que de una manera visual, se muestre la complejidad que supone trabajar con 24 escaneos distintos. Esta vista completa se guarda en la carpeta “VIEWS” en el árbol principal del proyecto (Figura 3-11A).

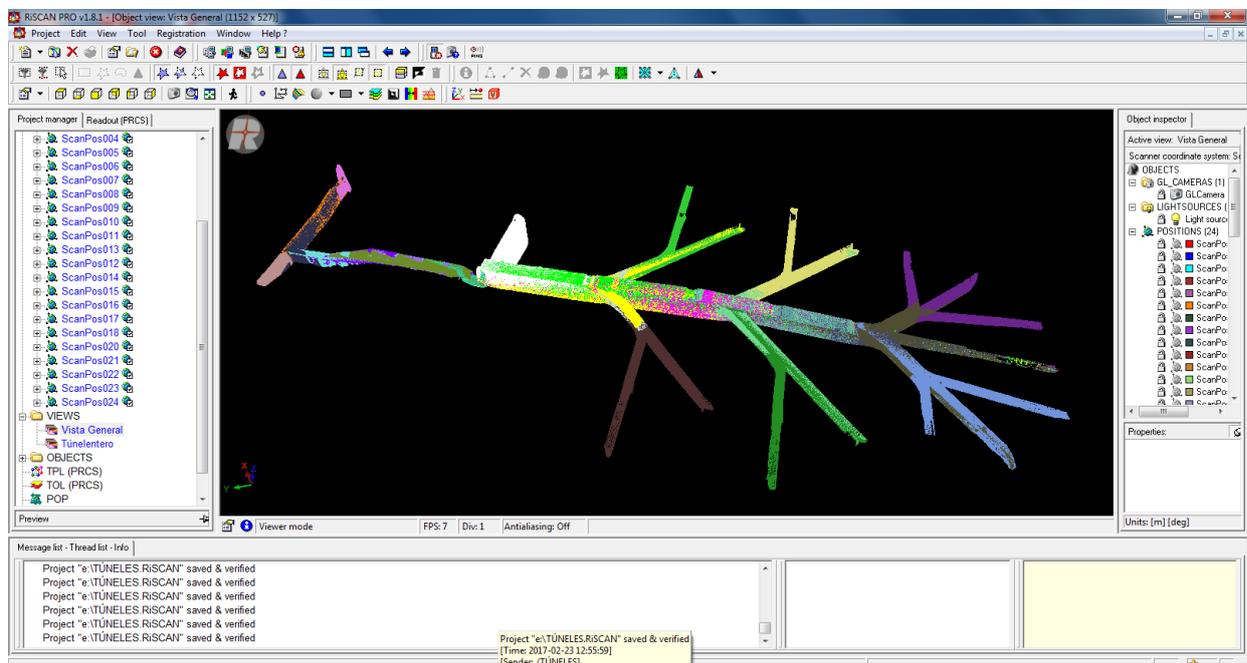


Figura 3-14 RiSCAN Pro. Vista general

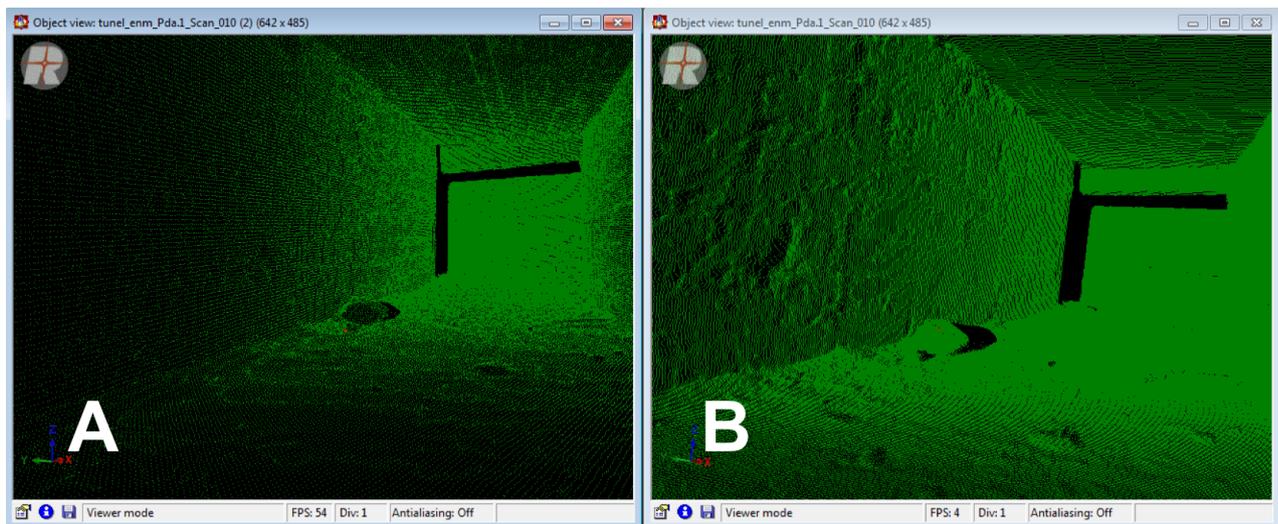
El programa permite ejecutar diferentes herramientas sobre la vista de la nube de puntos tales como la creación de puntos, polilíneas, objetos, planos, secciones en altura o la medición de coordenadas en un punto, distancias entre puntos, áreas o incluso volúmenes.

La vista general del túnel que se ha creado nos presenta determinados puntos que son errores derivados, bien de la toma de datos o bien, como consecuencia de ligeros errores cometidos durante el proceso de registro. Es por eso que gracias a la herramienta de selección y eliminado de puntos, se puede realizar un primer paso de filtrado de dichos puntos que, aunque no supone el filtrado final, que se describe en el apartado “Filtrado de la nube”, ayuda a evitar posibles errores de cálculo para la caracterización del túnel. Esto supone una tarea tediosa puesto que hay que inspeccionar la nube buscando, seleccionando y eliminando dichos puntos de manera manual. Sin embargo, se convierte en un elemento imprescindible ya que, existen determinados puntos muy alejados del túnel que es necesario eliminar.

### 3.5.5.2 Filtrado de la nube

La necesidad de obtener puntos en común para registrar una nube de puntos con respecto a otra provoca que en la vista general existan duplicidades de puntos representando una misma zona u objeto concreto dentro del túnel. Estas duplicidades, que son deseadas a la hora del registro, se convierten en un elemento en contra a la hora de obtener una nube en conjunto de todo el túnel, pues añaden más puntos innecesarios al archivo, lo que provoca que el archivo pese más, e incluso pueden provocar ciertos errores de cálculo al procesar la nube en el algoritmo. Estas redundancias se multiplican teniendo en cuenta que se han realizado 24 escaneos y 23 registros. Por todo esto se vuelve necesario realizar un filtrado de algún tipo sobre la nube general.

Para realizar este filtrado previo a la exportación del archivo, lo primero que se hace es crear un “polydata” de la vista general. Para ello, se seleccionan en la vista todos los puntos que comprenden el túnel y se hace clic en la opción “Create new polydata object”. Este POLYDATA se renombra como “Túnelentero” dentro y se guarda dentro de la carpeta “OBJECTS>POLYDATA” del árbol principal del proyecto (Figura 3-11A). Si se hace clic sobre “Túnelentero” en la parte inferior derecha de la pantalla se puede observar que se compone de más de 21 millones de puntos. Esto supone un número elevadísimo de puntos que como se ha mencionado anteriormente, muchos de ellos representan lo mismo dentro del túnel.



**Figura 3-15 RiSCAN Pro. (A) Nube filtrada; (B) Nube original**

Para realizar el filtrado deseado sobre el “POLYDATA Túnelentero” se debe hacer clic con el botón derecho sobre el mismo y a continuación seleccionar “filter data”. En ese momento se abre una pestaña en la que se indica al programa qué tipo de filtrado se quiere aplicar sobre la nube. El filtrado ideal para el caso de la eliminación de duplicidades en la nube es el “Octree” (Figura 3-16A). Este filtrado consiste en mallar toda la nube con una cuadrícula tridimensional de lados X, Y y Z con una longitud definida por el usuario, en donde posteriormente, el programa evalúa el número de puntos existente dentro de cada cubo de la malla y elimina todos excepto 1, que será el que define el cubo. De esta manera, se consigue reducir el número de puntos que conforman la nube dependiendo del nivel de detalle con el que se espera trabajar (Figura 3-15). Puesto que se desea trabajar con las tres dimensiones de la nube por igual, se toma el mismo valor para la longitud de los tres lados del cubo con el que se malla. Con el objetivo de disponer de diferentes archivos de la nube, cada uno con diferentes calidades, se filtra la nube principal un total de 4 veces, incrementando la longitud de X, Y y Z en 0.02 metros en cada uno. Aumentar el mallado implica menos puntos en total, por lo tanto menor nivel de detalle en la nube y menor tiempo de procesamiento durante el filtrado para el ordenador.

### 3.5.5.3 Exportación

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo del procesado de las diferentes nubes de puntos es obtener un único archivo, en formato ASCII, que contenga las coordenadas de los puntos de toda la nube. Gracias a la unificación de las vistas en el “POLYDATA Túnelentero” necesario para realizar el paso de filtrado, ya se dispone de un único elemento que constituye la nube completa. Sin embargo, este elemento no es un archivo en formato ASCII, necesario para trabajar con el software Matlab y aplicar el algoritmo de caracterización. Para obtener el archivo con este formato, es necesario exportar el archivo desde el programa RiSCAN Pro.

Para exportar el archivo se hace clic con el botón derecho sobre “POLYDATA Túnelentero” y se selecciona “Export...”. A continuación, se indica dónde se quiere guardar el archivo y en qué formato. El programa abre automáticamente una pestaña en la que se deben ajustar los siguientes parámetros de la exportación:

- **General Settings:** Se selecciona entre sistema de coordenadas global o sistema de coordenadas propio del proyecto.
- **Export parameter:** Se seleccionan aquellas variables que se desea exportar, cada una de estas variables se corresponderá a una columna en el archivo.
- **Unit:** Se indica la unidad métrica en la que se desea exportar las coordenadas de cada punto.
- **Separator:** Se indica de qué manera se separarán las columnas de las variables en el archivo exportado.

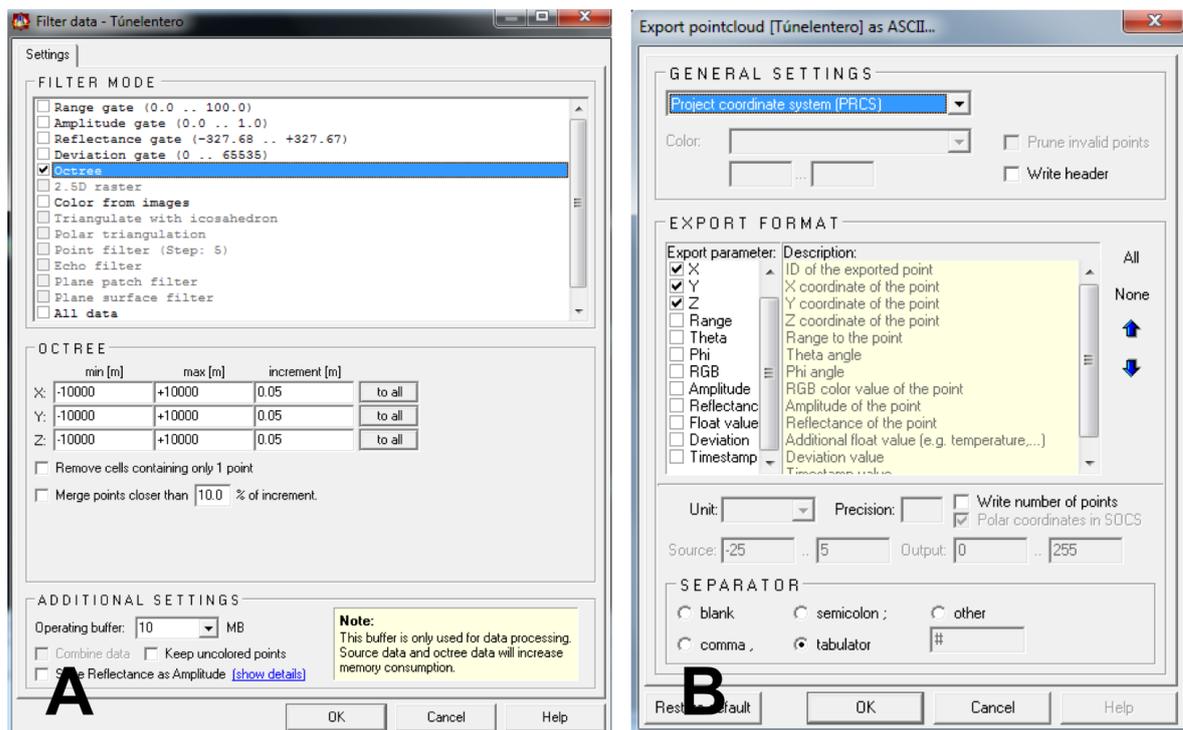


Figura 3-16 RiSCAN Pro. (A) Filter data; (B) Export Pointcloud

Para el “Túnel entero” se seleccionan los parámetros: sistema de coordenadas del proyecto; variables a exportar X, Y, Z e Intensidad; unidades en metros y tabulador como separador entre variables (Figura 3-16B). Una vez realizados estos ajustes, se pulsa el botón “Ok” y después del tiempo de procesado del ordenador, se crea un archivo “.txt” en la ubicación seleccionada.

### 3.5.6 Segmentación de la nube de puntos

Para simplificar el procesamiento del algoritmo en Matlab, se decide segmentar el túnel en diferentes secciones (Figura 3-1) y crear un archivo ASCII para cada una de ellas. Gracias a este sistema, se consigue obtener la caracterización completa del túnel en un menor período de tiempo y de una manera más gráfica e intuitiva para el usuario que desee consultarlo. La creación del algoritmo en Matlab se explica en el siguiente apartado, en el que se verán, de una manera más concreta, las ventajas que supone la segmentación del túnel.

Partiendo de la vista general del túnel y en lugar de seleccionarlo al completo, se delimita la parte concreta que se desea segmentar, por ejemplo, la galería 1B recto. A continuación se crea un "POLYDATA" para dicha sección y se procede del mismo modo que se ha explicado anteriormente. En algunas ocasiones, las galerías son tan pequeñas que no es necesario aplicar el filtrado sobre las nubes. Sí es necesario la exportación de todos los archivos. El número de segmentos realizados corresponde con lo representado en la Figura 3-1.

En la siguiente tabla se presentan los distintos segmentos del túnel, con el nombre asignado en el archivo de exportación y el tamaño de cada segmento.

<b>Sección del túnel</b>	<b>Nombre archivo</b>	<b>Tamaño (nº puntos)</b>
Túnel entero	Tunelentero	21567983
Túnel con filtro	Tunelenterofiltrado	2749080
Pasillo Central Sección 1	Pasillocentralseccion1	2216322
Pasillo Central Sección 2	Pasillocentralseccion2	2853020
Galería 1A	Galeria1Arecto	597836
	Galeria1Aizquierda	129778
Galería 2A	Galeria2Arecto	638673
	Galeria2Aizquierda	133743
Galería 3A	Galeria3Arecto	802796
	Galeria3Aizquierda	162586
	Galeria3Aderecha	119473
Galería 1B	Galeria1Brecto	759073
	Galeria1Bderecha	148009
Galería 2B	Galeria2Brecto	654770
	Galeria2Bderecha	114684
Galería 3B	Galeria3Brecto	743889
	Galeria3Bderecha	85582
	Galeria3Bizquierda	105566
Galería 4A	Galeria4A	1426781
Galería 4B	Galeria4B	304060

**Tabla 3-2 Segmentación del túnel**

## 3.6 Creación del algoritmo en Matlab

### 3.6.1 Introducción

La automatización del procedimiento para caracterizar determinadas zonas o superficies supone una gran ventaja, especialmente para obtener los datos de aquellas zonas que no tienen ningún tipo de plano o estudio previo acerca de su construcción o características. Este caso se da en construcciones antiguas que fueron construidas en su momento y de las que, por algún motivo, no se conservan datos. Gracias a la adquisición de datos mediante técnicas no destructivas, como la tecnología LiDAR, se pueden obtener nubes de puntos completas de dichas zonas o elementos. Estas nubes de puntos, después de ser registradas y procesadas se convierten en una única nube sobre la que se pueden obtener diversos datos de tipo geométrico y radiométrico. Estos datos, no se refieren solamente a las dimensiones generales de la infraestructura analizada sino que gracias a la enorme precisión del láser escáner, se pueden obtener también datos acerca de posibles grietas, surcos, objetos en el suelo o calcular incluso la cantidad de material necesario para reparar, por ejemplo, un hueco en la pared.

Los software de tratamiento de nubes de puntos como el RiSCAN Pro, permiten medir distancias, áreas o calcular volúmenes de una zona determinada de la nube. Sin embargo, este proceso se considera demasiado manual puesto que el usuario tiene en primer lugar, que estar familiarizado con el programa en cuestión y en segundo lugar, tiene que seleccionar manualmente la zona concreta de la que desea obtener dichos datos. Además, estos datos no quedan guardados, sino que únicamente se muestran en pantalla.

Por lo tanto, se puede afirmar que, con la nube de puntos obtenida con el láser escáner, el túnel de la Escuela Naval Militar queda completamente caracterizado. Sin embargo, se decide crear un algoritmo de implementación genérica que de manera automática genere una trayectoria a lo largo del túnel y vaya cortando secciones, de las cuales el usuario obtenga los datos de altura y anchura.

Para la creación del algoritmo se toman como referencia los estudios y artículos en [17], [18], [28] y [29].

### 3.6.2 Descripción del algoritmo

En el presente apartado se presenta una descripción general del funcionamiento del algoritmo creado. Se acompaña de un diagrama de flujo en el que se representan las entradas, las salidas y los pasos seguidos en el algoritmo (Figura 3-17). Cómo funciona cada paso, además del relato de cómo se desarrolló se explica con mayor detalle en los siguientes subapartados.

El algoritmo desarrollado persigue analizar y caracterizar las diferentes secciones y galerías que componen el túnel de la ENM mediante la aplicación de los 5 pasos que lo constituyen. Para iniciar el algoritmo, es necesario cargar el archivo previamente segmentado del segmento concreto del túnel que se desea caracterizar. La manera en la que se ha decidido segmentar el túnel completo viene detallada en el apartado 3.5.6 Segmentación de la nube de puntos.

No existe una trayectoria por el interior que permita definir el eje sobre el cual se van a analizar los cortes. Es por esto que el algoritmo debe ser capaz de generar una trayectoria de manera automática a lo largo del segmento que ha cargado. Por este motivo, resulta imprescindible la rotación de la nube de puntos de cada segmento con el objetivo de alinear los ejes principales de la siguiente manera:

- Eje X: Avance en el sentido longitudinal del túnel. Sobre este eje se genera la trayectoria que posteriormente se utilizará para crear las secciones.
- Eje Y: Sentido trasversal del túnel. Dentro de un pasillo o galería representa la distancia entre las paredes.
- Eje Z: Altura del túnel. Representa la distancia entre el suelo y el techo.

Una vez se dispone de la trayectoria, se procede a crear un plano mediante un vector normal y un punto de la trayectoria. Estos planos creados están separados entre sí un valor  $x$  definido por el usuario previamente, en el paso de generación de la trayectoria. A continuación, se analiza el corte de cada uno de los planos creados con la nube de puntos, devolviendo la sección del túnel para dicho punto. Es importante saber que, cuanto menor sea la distancia que el usuario selecciona para crear las secciones, mayor número de ellas habrá, y por consiguiente, un mayor coste computacional para el ordenador y mayor tiempo de cálculo.

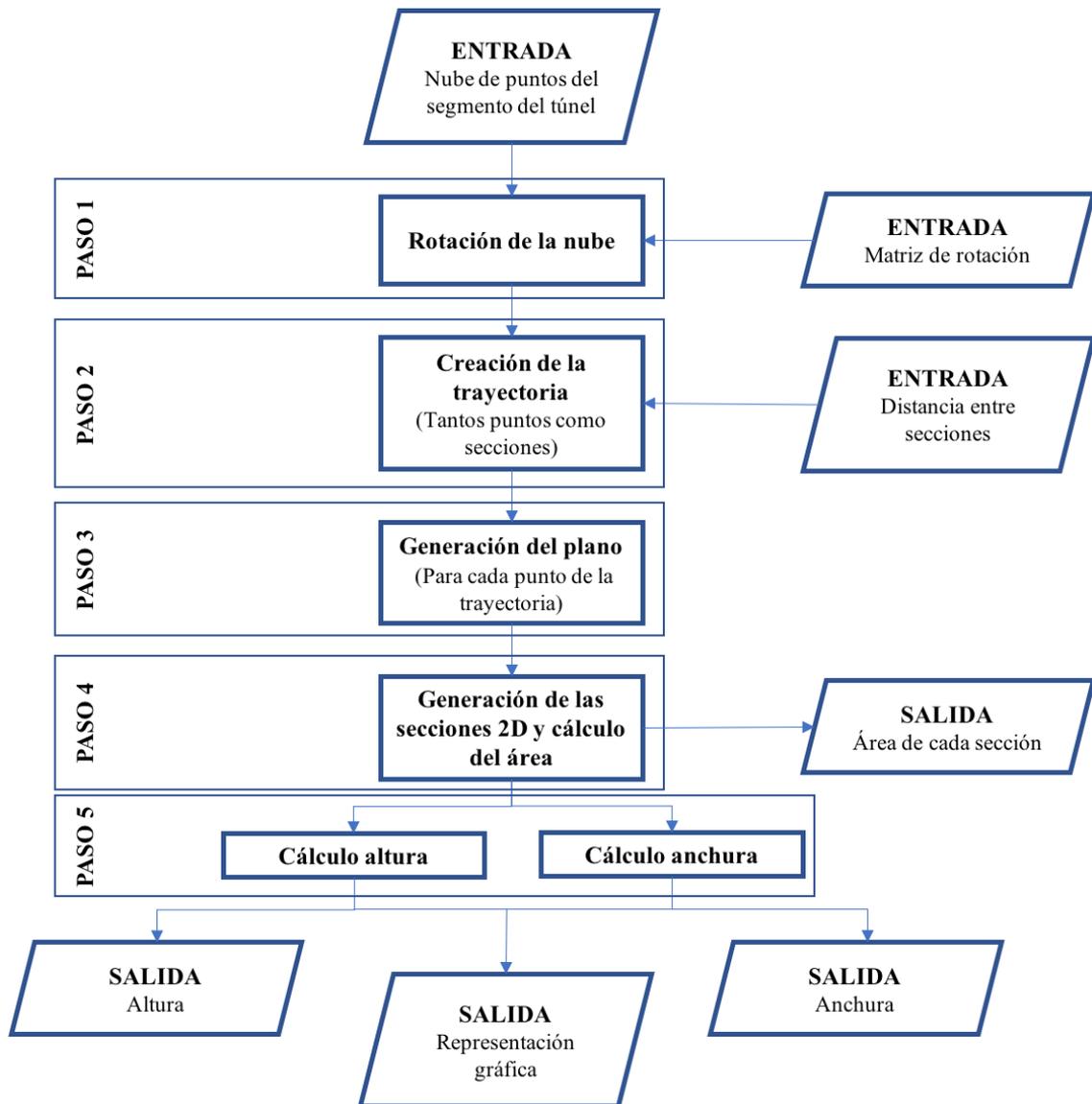


Figura 3-17 Flujo de trabajo del algoritmo en Matlab®

A la hora de realizar los cálculos y obtener los resultados, el algoritmo funciona de diferentes maneras para el cálculo del área de la sección y para el cálculo de las dimensiones altura y anchura. En primer lugar, el cálculo del área se basa en analizar mediante la herramienta de Matlab “convhull”, la proyección en 2D de cada sección. En segundo lugar, el cálculo de la altura y la anchura del túnel se realiza mediante cortes de planos perpendiculares al plano generador de la sección, basándose en que el túnel tiene una sección transversal rectangular en todos sus puntos. El algoritmo devuelve la altura para cada punto concreto de la trayectoria y la anchura para el punto situado a mitad de la altura de cada sección.

Por último, se representa el corte de cada sección sobre la nube de puntos del segmento correspondiente para que, de una manera visual, se pueda identificar en qué punto concreto de cada segmento se localiza cada uno de los cortes.

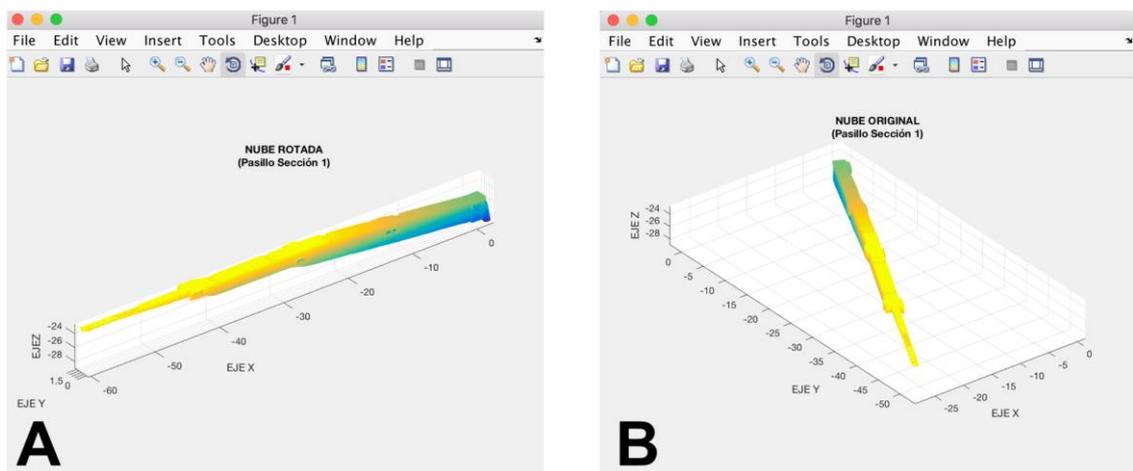
La última fase del trabajo en Matlab® consiste en crear una interfaz gráfica a través de la herramienta “Guide” que está integrada en el propio programa de manera que cualquier usuario no familiarizado con el software pueda, con el simple hecho de pulsar un botón, obtener los datos que desee.

Para explicar el algoritmo, se toma como ejemplo uno de los segmentos en los que se ha dividido el túnel, el pasillo central de la sección1 (Tabla 3-2) (Figura 3-1).

### 3.6.2.1 Paso 1. Rotación de la nube

La nube de puntos que representa el conjunto total del túnel, de la cual se han obtenido los distintos segmentos (Tabla 3-2) a analizar, se encuentra referenciada mediante un sistema de coordenadas local, para el proyecto del túnel en concreto. En este sistema de coordenadas el eje Z sí que representa la altura del túnel por lo que se debe girar la nube en torno a este eje. Sin embargo, los ejes X e Y están aleatoriamente establecidos representando la planta del túnel. El hecho de que el túnel presente numerosas direcciones para sus pasillos y galerías supuso un problema a la hora de la creación de este paso en el algoritmo puesto que, para cada una de estas direcciones, se necesita una matriz de rotación distinta. La solución a este problema fue la creación de una función que, de manera automática, genera la matriz de rotación en torno al eje Z a partir de la selección de 3 puntos, dos de ellos sobre la nube y otro en la dirección deseada. Esta función genera dos vectores y construye la matriz conforme al ángulo que forman entre ellos.

A continuación, se carga en una variable la nube de puntos del segmento del túnel (Figura 3-18B) y se multiplica por la matriz de rotación. De esta manera se obtiene una matriz de “n puntos x 3” en la que cada fila representa un punto de la nube y cada columna, sus nuevas coordenadas XYZ (Figura 3-18A).



**Figura 3-18 MATLAB® (A)Nube de puntos rotada; (B)Nube de puntos sin rotar**

En resumen, en este paso se realizan las siguientes tareas:

- Creación de la matriz de rotación.
- Carga del fichero .txt en una variable Matlab.
- Multiplicación de la matriz de rotación por la nube original.
- Extracción de la nube rotada, lista para generar la trayectoria sobre ella en el siguiente paso.

### 3.6.2.2 Paso 2. Creación de la trayectoria

Para generar la trayectoria de manera automática, el algoritmo calcula en primer lugar una trayectoria que se compone tan sólo de puntos con coordenadas X e Y, es decir, en el plano de la planta del túnel. Posteriormente, busca la coordenada Z perteneciente al suelo correspondiente con cada punto en 2D ya calculado. El algoritmo generará tantos puntos para la trayectoria como secciones se vayan a cortar, debido a que, a cada punto le corresponderá una sección.

La nube de puntos ya rotada, queda posicionada a lo largo del eje X tal y como se muestra en la (Figura 3-18A), de tal manera que, sabiendo cuáles son los puntos máximo y mínimo sobre el eje X, se conoce también el principio y final de la nube. Gracias a esto, se consigue obtener la coordenada X de los puntos de inicio y final de la trayectoria ( $P_i$  y  $P_f$ ). En cuanto a la coordenada Y, al ser rotada la matriz, el eje longitudinal del túnel queda alineado con el eje X según se ha explicado anteriormente de tal manera que, el eje Y representa la dimensión sobre la que se mide la anchura del túnel. Se calcula la media de todas las coordenadas Y de la nube de puntos y así, se obtiene la coordenada  $Y_{media}$  para todos los puntos de la trayectoria.

Hasta este punto el algoritmo dispone de:  $(X_i, Y_i)$  e  $(X_f, Y_f)$  y además, puesto que es la misma, la coordenada Y de todos los puntos que van a conformar la trayectoria ( $Y_{media}=Y_i=Y_f=Y_n$ ).

Es en este momento cuando el algoritmo lee la variable introducida por el usuario “Distancia entre secciones” y calcula conforme a dicho parámetro el número de puntos necesario en la trayectoria ( $P_n$ ). Una vez que tiene el número de puntos necesario, divide la diferencia  $(X_f - X_i)$  entre  $P_n$  y calcula la distancia entre ellos (variable “d”). A continuación, asigna  $X_n$  realizando la operación  $(X_n = X_i + d * n)$ . Posteriormente asigna  $Y_n$  y se obtiene toda la trayectoria en dos dimensiones.

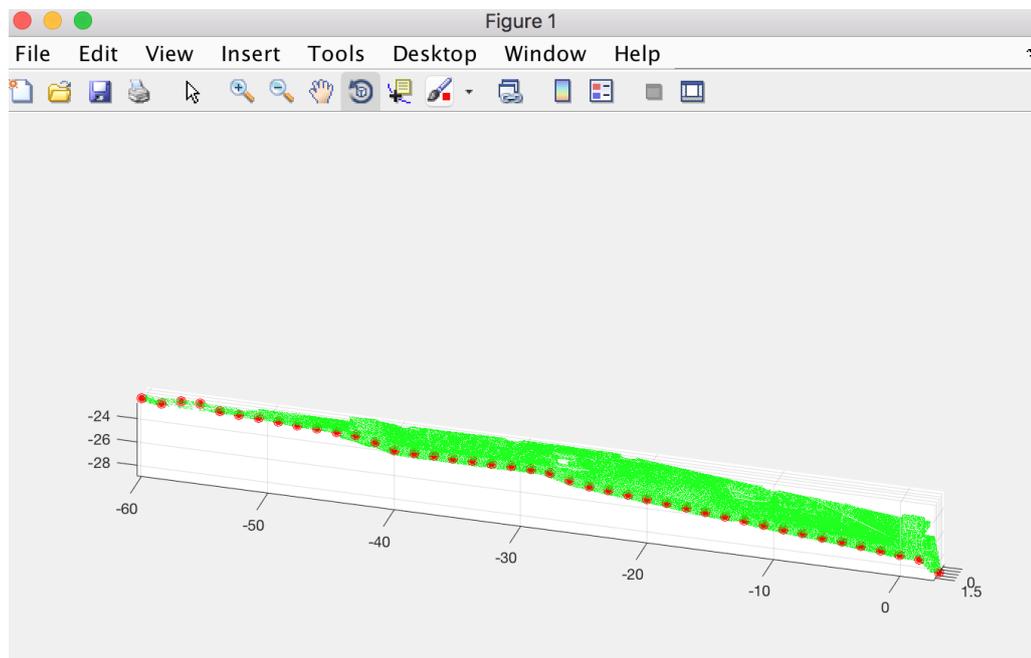


Figura 3-19 Matlab®. Representación de los puntos de la trayectoria sobre la nube

Para obtener la coordenada Z, el algoritmo busca todos aquellos puntos con valores X e Y iguales a cada punto de la trayectoria y los almacena. Al menos va a encontrar dos puntos, uno en el suelo y otro en el techo. Posteriormente selecciona la menor coordenada Z de las almacenadas, y de esta manera se obtiene para cada punto, las tres coordenadas que lo componen en las tres dimensiones. Además, almacenar distintos valores de Z para cada punto de la trayectoria ofrece otra ventaja importante y es que, en el caso de que entre dos secciones exista una pendiente, el algoritmo calculará la altura del túnel de manera perpendicular a esta pendiente, es decir, siempre en el punto donde se

encuentra la mínima altura. Este concepto se explica con más detalle en el Paso 3, generación del plano y cálculo de las secciones en 3D.

Con este último paso, se obtiene la trayectoria final que recorre el segmento del túnel desde el principio hasta el final, por el punto medio entre paredes y por el suelo. De manera resumida, en este paso se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Cálculo puntos inicial y final de la trayectoria (2D).
- Cálculo de todos los puntos de la trayectoria en función de la distancia escogida por el usuario (2D).
- Asociación de la coordenada Z del suelo correspondiente a cada punto de la trayectoria (3D).

En el caso del ejemplo para la explicación (Figura 3-19) se toma como distancia entre secciones 1.5 metros, y por lo tanto se genera una trayectoria de 42 puntos.

### *3.6.2.3 Paso 3. Generación del plano y cálculo de las secciones en 3D*

Para realizar el “corte” de la nube en cada punto de la trayectoria es necesario generar unos planos que, de manera perpendicular al suelo, intersequen con la nube de puntos pasando por dichos puntos de la trayectoria. El algoritmo crea dichos planos a través de la ecuación general del plano, siendo necesarios un punto y un vector normal al plano. Una vez se obtienen los planos, se analiza el corte de estos con la nube de puntos, obteniéndose así las secciones en 3D.

En primer lugar, se genera el vector normal ( $\vec{n}$ ) necesario para construir el plano en cada punto de la trayectoria. Este vector  $\vec{n}$  se construye restando el punto de la trayectoria siguiente menos el actual. De esta manera, se genera un vector cuyo módulo no interesa y cuya dirección está contenida entre ambos puntos del suelo. Esto quiere decir que, si el suelo se encuentra inclinado entre un punto de la trayectoria y el siguiente, la coordenada Z de este vector representará dicha inclinación, generando así un plano perpendicular al suelo entre ambas secciones. Gracias a esto, se consigue que la altura que se calcula sobre la sección, represente la altura verdadera o normal al suelo.

Una vez que el algoritmo ha calculado el vector normal para cada punto de la trayectoria se procede a calcular el plano formado por dicho punto y su vector normal. El algoritmo se basa en la ecuación general del plano. Si un punto pertenece al plano se cumple que:

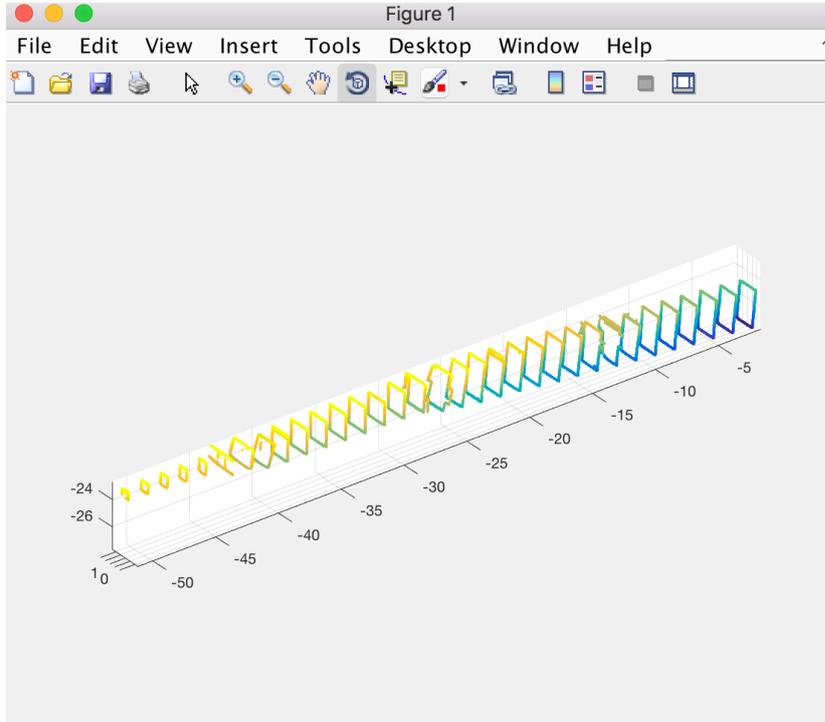
$$Ax + By + Cz - Ax_0 - By_0 - Cz_0 = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

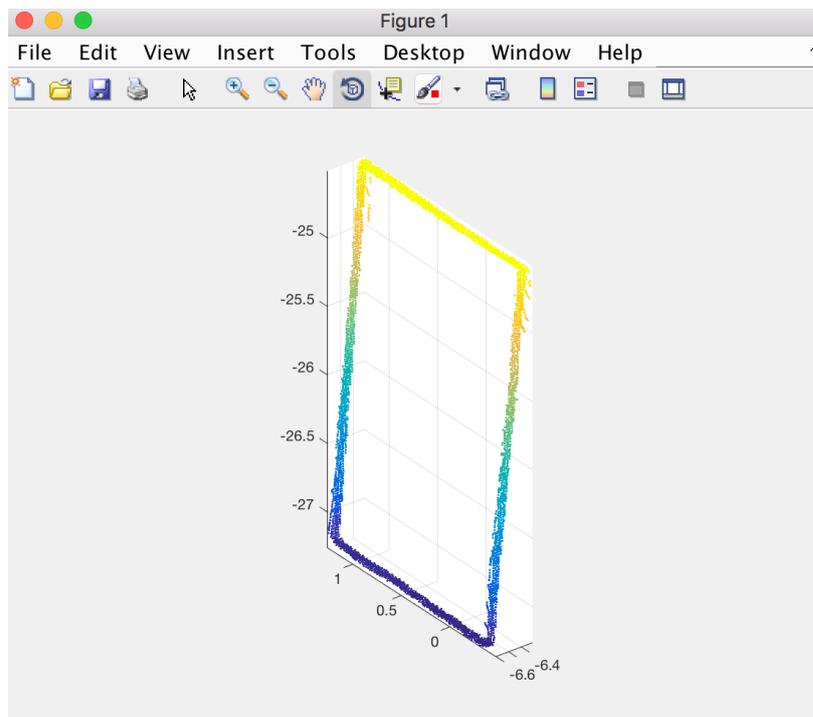
- Vector normal:  $\vec{n} = (A, B, C)$
- Punto de la trayectoria:  $P_n = (x_0, y_0, z_0)$
- Punto a evaluar de la nube:  $p_j = (x, y, z)$

El algoritmo, a través de un bucle “for” crea el plano para cada punto y evalúa la intersección de dicho plano sobre la nube de puntos obteniendo una matriz que comprende todos aquellos puntos que pertenecen a cada sección. Esta matriz se almacena en la primera fila de un array denominado “Cortes{ }” (Figura 3-22A) que será utilizado durante todo el algoritmo para almacenar diversos datos. En este array, las filas representan estos datos guardados y existirán tantas columnas como secciones sobre la nube, y en particular para el ejemplo que se presenta, 42.

En la Figura 3-20 se representan todas las secciones generadas sobre el segmento “Pasillo Central Sección 1” que, con una distancia entre ellas de 1.5 metros, forman un total de 42. En la Figura 3-21 se representa un ejemplo de la octava sección. Se puede observar que la nube no está perfectamente alineada con el eje Z, sino que se encuentra ligeramente inclinada, esto es debido a que en ese punto concreto del túnel existe una pendiente ascendente y por lo tanto el plano representado es normal al suelo.



**Figura 3-20 Matlab®. Secciones a lo largo del túnel**



**Figura 3-21 Matlab®. Ejemplo sección 8**

En resumen, en este paso se realizan las siguientes tareas:

- Creación del vector normal para cada punto.
- Creación del plano normal al suelo.
- Evaluación del corte de cada plano sobre la nube de puntos.
- Generación de las secciones en 3D.

### 3.6.2.4 Paso 4. Proyección de las secciones en 2D y cálculo del área

Una vez se dispone de cada sección en 3D el algoritmo crea la proyección en 2D de la misma, sobre el vector normal al plano de manera que no se ven alteradas las medidas. El motivo por el que se realiza la proyección en 2D de las secciones es poder utilizar la función que viene implementada en Matlab® “convhull”.

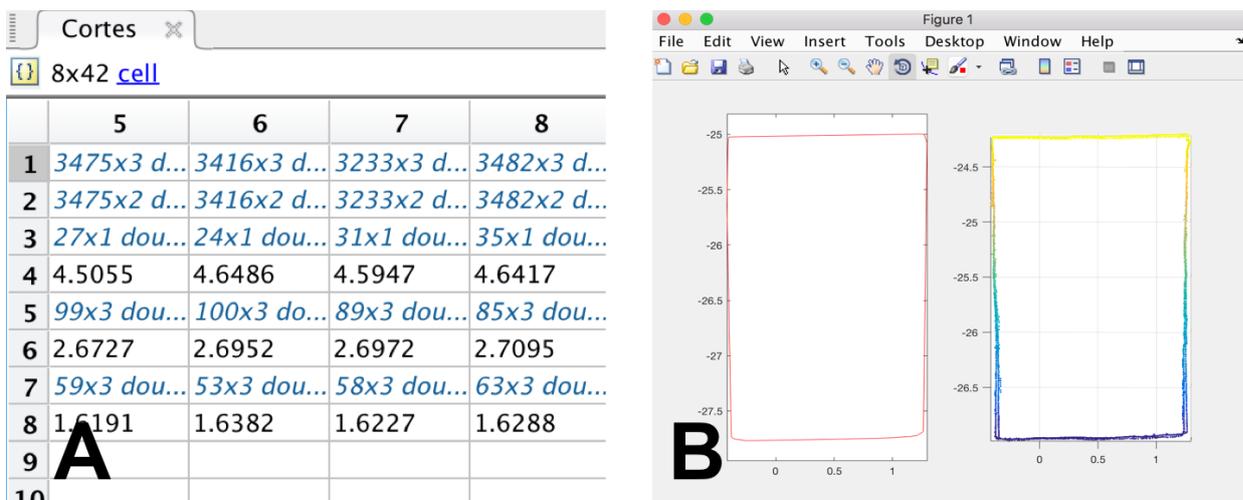
Esta función calcula sobre una serie de puntos en dos dimensiones, el polígono que une sus puntos más internos. Además, también devuelve como una variable el área que contiene, representada en metros cuadrados.

La proyección generada en 2D de cada sección se almacena en el array “Cortes” en su fila segunda. El indexado de puntos de cada sección, resultado de la aplicación de la función “convhull”, se guarda en la fila 3 del array “Cortes” mientras que en la fila 4 se guarda el resultado del cálculo del área (Figura 3-22A).

En la Figura 3-22B se puede observar un ejemplo de la aplicación de la función “convhull” sobre la novena sección del túnel.

En resumen, en este paso se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Proyección de cada sección en 2D.
- Aplicación función “convhull” sobre la proyección en 2D.
- Cálculo del área de cada sección.

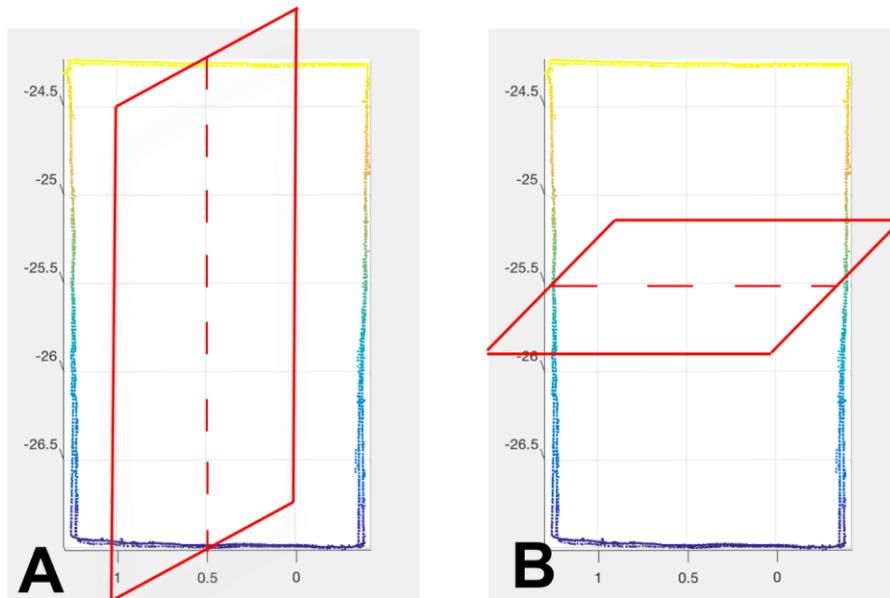


**Figura 3-22 Matlab®. (A) Array “Cortes”; (B) Representación del "convhull" frente a la sección real**

### 3.6.2.5 Paso 5. Cálculo de la altura y la anchura

Para calcular tanto la altura como la anchura de cada sección generada en el túnel se trabaja sobre el elemento del array “Cortes” correspondiente a la primera fila, que es la matriz que contiene la sección ya cortada. De esta manera el algoritmo trabaja con un número menor de puntos por lo que es más rápido y eficiente.

Para calcular la altura y la anchura de cada sección generada en el túnel, el algoritmo sigue el mismo procedimiento que realiza para calcular el corte de las secciones, es decir, trabaja con cortes de planos sobre la nube de puntos. Con la diferencia de que, como se ha explicado en el apartado anterior, evalúa dichos cortes de los planos con la sección ya cortada.



**Figura 3-23 Matlab® (A) Plano deseado para calcular la altura (B) Plano deseado para calcular la anchura**

En el caso de la altura, el objetivo es construir un plano que forme noventa grados con el plano de la sección y que la corte desde el punto de la trayectoria en el suelo hasta el techo (Figura 3-23A). El algoritmo aplica la ecuación general del plano con el punto de la trayectoria y un vector normal al plano. Para conseguir este nuevo vector normal al plano deseado, se multiplica el vector normal del plano de la sección por una matriz de rotación de noventa grados en torno al eje Z.

Una vez conseguido el vector normal al plano deseado para la altura se genera dicho plano con este vector y con el punto de la trayectoria. Una vez generado se evalúa el corte del plano sobre la nube de puntos de la sección. Este proceso devuelve una serie de puntos pertenecientes al plano, tanto en el techo como en el suelo, estos puntos se guardan en la quinta fila del array “Cortes”. Para obtener el dato de la altura, se hace la media de los puntos en el techo y en el suelo y se crea un vector que une ambos. El módulo de dicho vector se corresponde con la altura de la sección, este valor de la altura queda almacenado en la fila sexta del array “Cortes” (Figura 3-22A).

En el caso de la anchura, el procedimiento que sigue el algoritmo para el cálculo es ligeramente distinto. Como se puede observar en la Figura 3-23B, el plano deseado en este caso pasa por la altura media del túnel, es decir, no contiene a ningún punto de la trayectoria. Para solucionar este problema, se crea un punto artificial a la mitad de la altura del túnel sumándole el valor de la altura dividido entre dos a la coordenada Z del punto de la trayectoria.

Un plano puede ser definido también por dos vectores de distinta dirección y un punto. En el caso del cálculo de la anchura se sigue este método para generar el plano y evaluar su corte con la sección.

Un punto  $p = (x, y, z)$  de la sección pertenece al plano si:

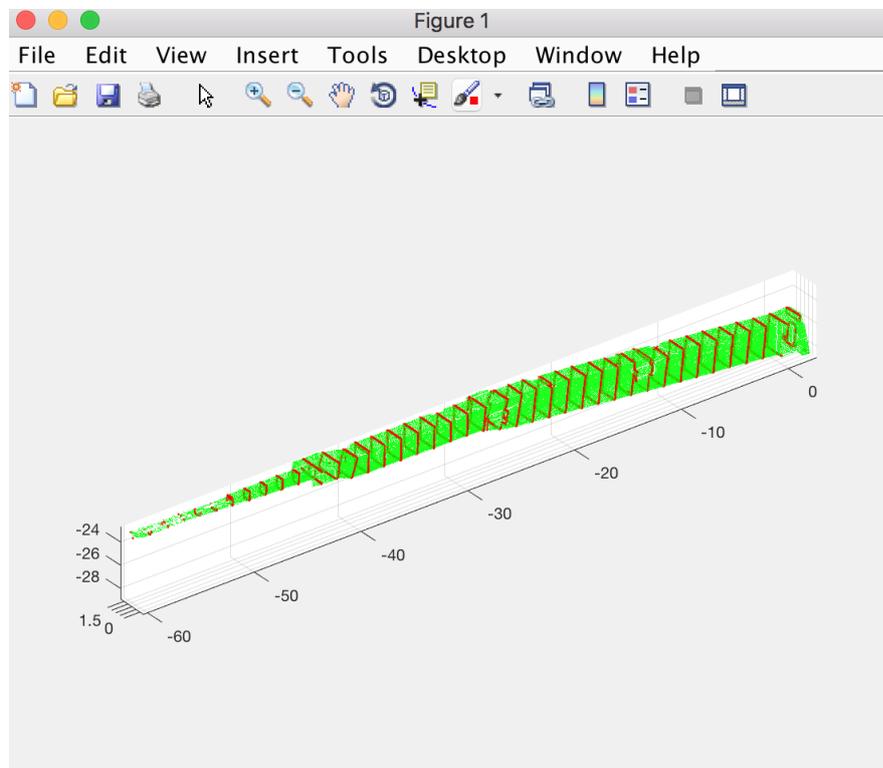
$$\begin{vmatrix} x - x_0 & u_1 & v_1 \\ y - y_0 & u_2 & v_2 \\ z - z_0 & u_3 & v_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- Vector 1:  $\vec{n1} = (u_1, u_2, u_3)$
- Vector 2:  $\vec{n2} = (v_1, v_2, v_3)$
- Punto de la trayectoria:  $P_n = (x_0, y_0, z_0)$
- Punto a evaluar de la nube:  $p_j = (x, y, z)$

Una vez se obtienen aquellos puntos de la sección que pertenecen al plano, unos en el lado derecho y otros en el lado izquierdo, se almacenan en la fila séptima del array “Cortes” (Figura 3-22A) y, a continuación, se realiza el mismo procedimiento llevado a cabo para calcular la anchura. El dato de la anchura del túnel en cada sección, se queda guardado en la fila octava del array “Cortes” (Figura 3-22A).

El último paso del algoritmo consiste en la representación gráfica de los cortes de las secciones sobre la nube de puntos, tal y como se muestra en la Figura 3-24.



**Figura 3-24 Representación de las secciones sobre la nube**

### 3.6.3 Interfaz de usuario “Guide”

Con el objetivo de proporcionar al usuario que no esté familiarizado con el uso del software una herramienta sencilla, fácil e intuitiva para obtener los datos del túnel que desee, se crea una interfaz gráfica con la herramienta “Guide” de Matlab®.

La interfaz aplica el algoritmo creado para cada uno de los segmentos del túnel y presenta los datos obtenidos (área, altura y anchura) en una tabla. Para mayor claridad, se incorpora además una imagen en la que se representa el segmento evaluado sobre el túnel completo y otra imagen en la que se muestra el corte de las secciones creadas sobre el segmento estudiado.

#### 3.6.3.1 Creación de la interfaz en Matlab®

Para crear una nueva guide (del Inglés: Graphical User Interface Development Enviroment) en primer lugar se introduce en el “Command Window” la palabra *guide*, a continuación se abre una pestaña en la que se debe seleccionar “Crear nueva guide”. A continuación se abre la herramienta de creación de GUIs. La forma de implementar las GUI con Matlab es crear objetos y definir las acciones que cada uno va a realizar. Al abrir guide se obtienen dos archivos:

- Un archivo .fig: Contiene la descripción de los componentes de la interfaz.
- Una archivo .m: Contiene el código con las funciones y controles del GUI, así como el “callback” (Figura 3-25).

Un “callback” se define como la acción que llevará a cabo un objeto de la GUI cuando el usuario lo active. Por ejemplo, un botón que al ser pulsado muestra una imagen. Esa función en donde se implementa el código para mostrar la imagen, es el “callback”.

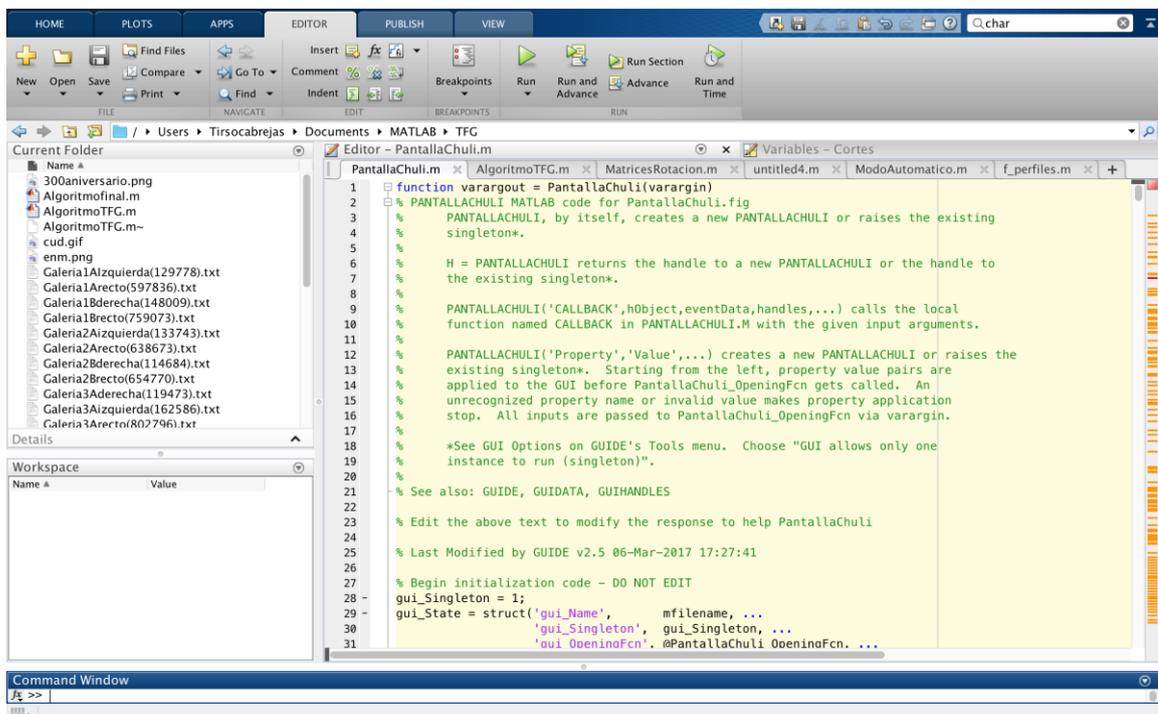


Figura 3-25 Matlab®. Script creado

Una vez iniciada la “guide” Matlab abre una pestaña nueva que es el área de diseño correspondiente a el archivo .fig (Figura 3-26). En la parte superior se encuentran los menús y opciones de guide, en la parte izquierda se aprecian los controles y en la parte central el área de diseño donde se implementan esos controles a utilizar.

Para cada control existe un menú denominado “control de propiedades” en el cual se pueden visualizar y modificar los distintos parámetros que definen el control insertado. Cada tipo de control tiene unas propiedades diferentes y sirve para unos usos distintos.

Los controles utilizados para la creación de la guide de caracterización del túnel de la ENM han sido los siguientes:

- Push Button: Crea un botón que realiza una acción cuando se hace clic en él. Se ha utilizado para ejecutar el algoritmo creado sobre cada una de los segmentos del túnel.
- Text Edit: Campo para insertar texto. Ha sido utilizado para adquirir los valores de las variables introducidas por el usuario “distancia entre secciones” y “sección que desea visualizar”.
- Static Text: Creación de letreros fijos. Se ha usado para implementar el texto fijo.
- Axes: Crea un área para gráficas y/o imágenes. Ha sido utilizado para incorporar las imágenes y los gráficos de las nubes.
- List Box: Crea una tabla a la que se le pueden otorgar valores de entrada o de salida. Utilizado para representar los datos de las secciones del segmento del túnel seleccionado.

Una vez se hayan introducido los controles necesarios en el área de diseño, se procede a implementar el código necesario para cada uno de ellos. Para realizar esto, se debe hacer clic con el botón derecho sobre el control que se desee configurar y a continuación se selecciona “View Callbacks > Callback”. El programa automáticamente abre el script donde está el archivo .m que contiene todas las funciones de la guide.

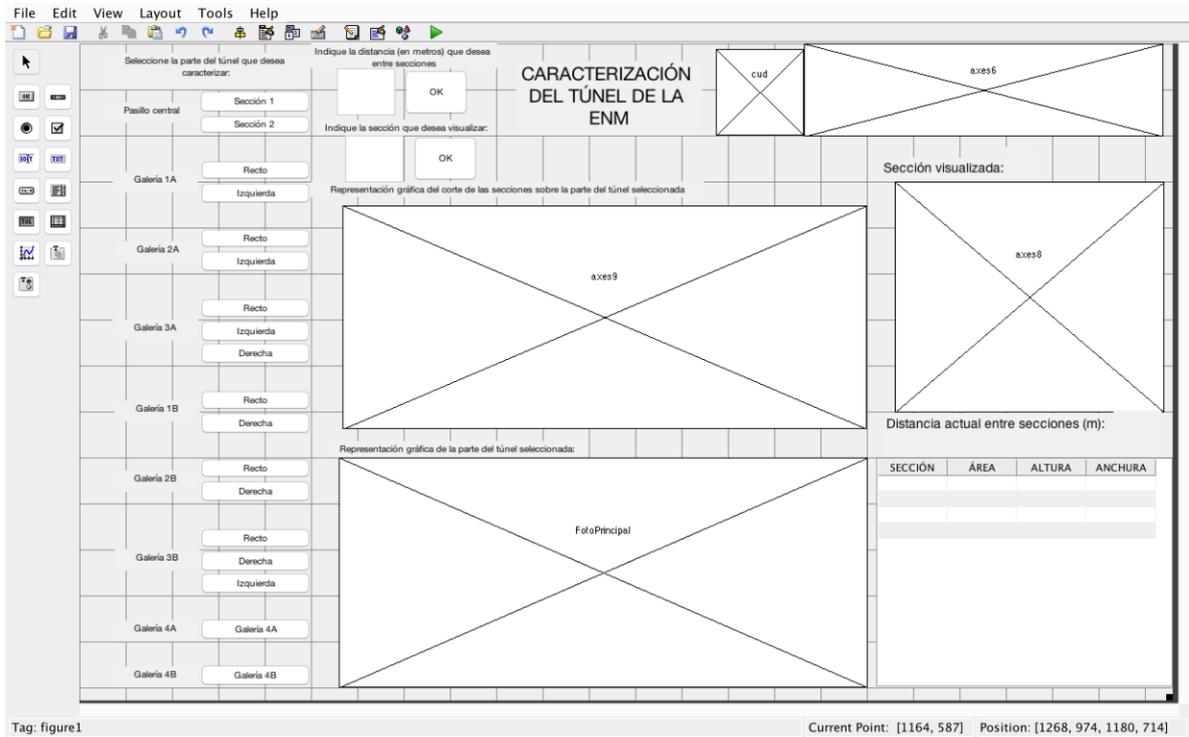
Por ejemplo, en el caso de querer mostrar una imagen denominada “pasillocentralseccion1.png” en el axes llamado “FotoPrincipal” después de pulsar un botón denominado “pasillocentralsecc1”, se debe introducir el siguiente código:

```
% --- Executes on button press in PasilloCentralSeccl.  
function PasilloCentralSeccl_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to PasilloCentralSeccl (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
imshow('pasillocentralseccion1.png', 'parent', handles.FotoPrincipal);
```

Donde:

- Las líneas que comienzan por “%” son autogeneradas por el programa y no se ejecutan, es decir, son explicativas.
- La función “PasilloCentralSeccl\_Callback” es el “callback” del botón que ejecuta el algoritmo sobre el pasillo central de la sección 1 del túnel.
- La última línea es código introducido y se corresponde con la visualización de la imagen.

A continuación se debe copiar el código del algoritmo correspondiente para cada segmento en su “callback” correspondiente. Por último, se añade el código necesario para que, una vez el programa haya realizado los cálculos de las secciones, muestre estas en pantalla sobre el segmento estudiado.



**Figura 3-26 Matlab®. Interfaz de diseño**

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Descripción general

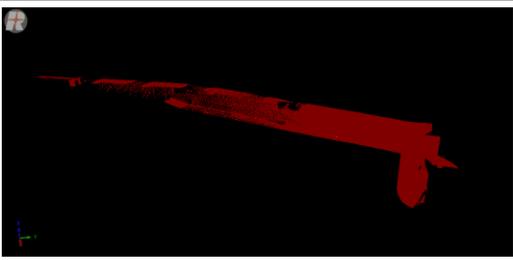
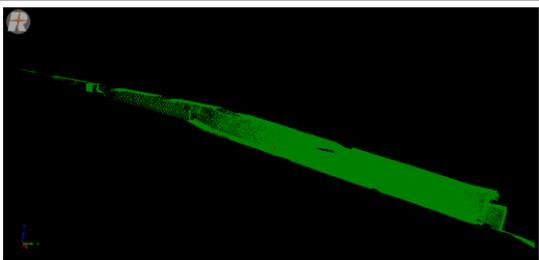
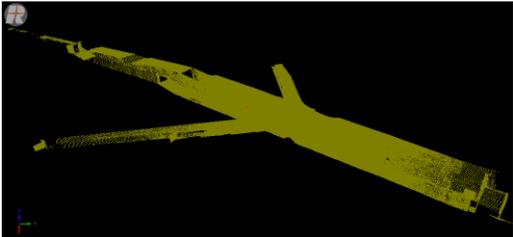
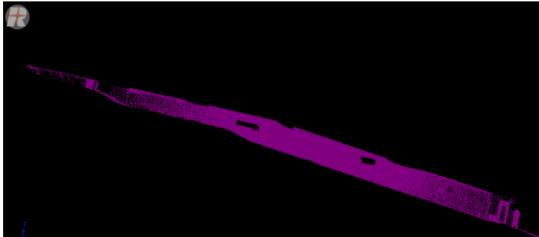
A lo largo del presente apartado se expone de manera detallada los resultados obtenidos en los dos grandes bloques del proyecto. En primer lugar se muestran las diferentes nubes de puntos, tablas e imágenes derivadas del uso de la tecnología LiDAR y en segundo lugar, se explican los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo sobre los segmentos del túnel.

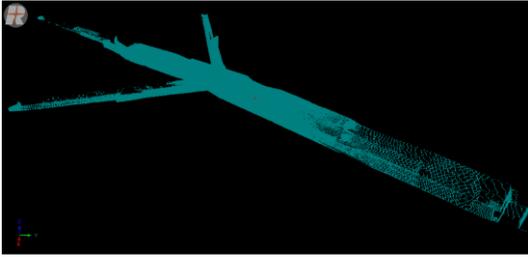
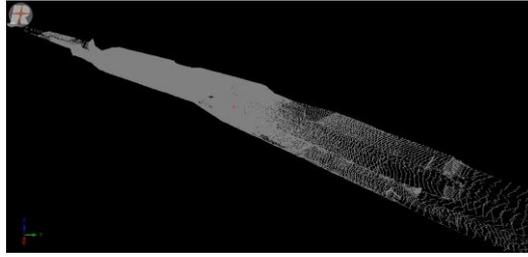
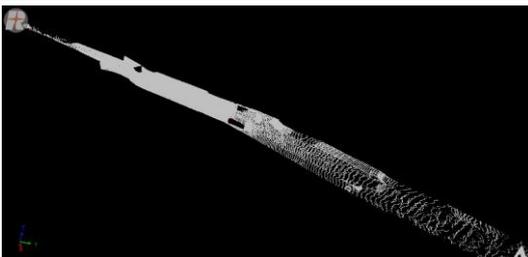
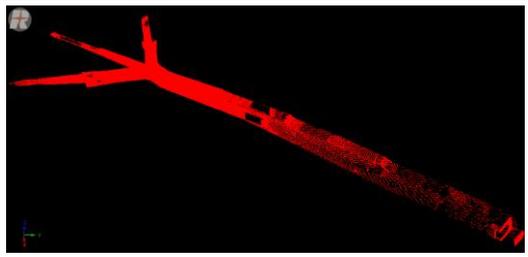
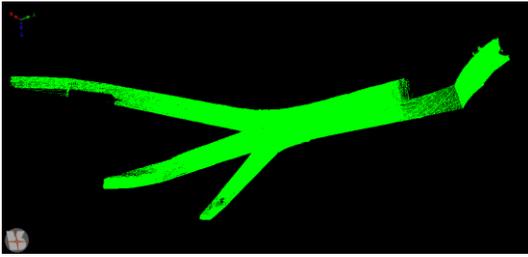
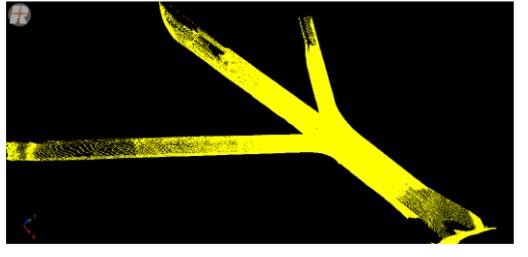
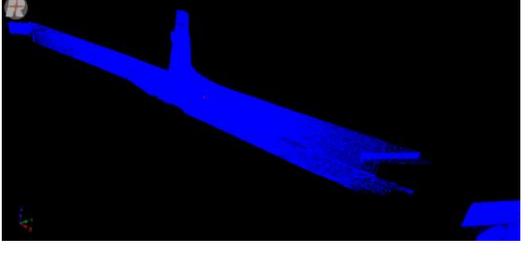
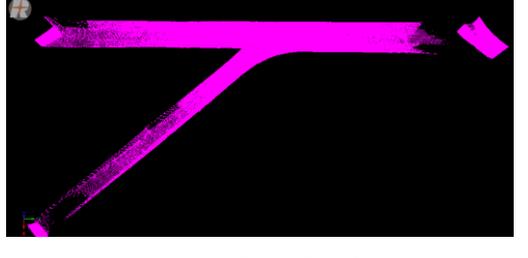
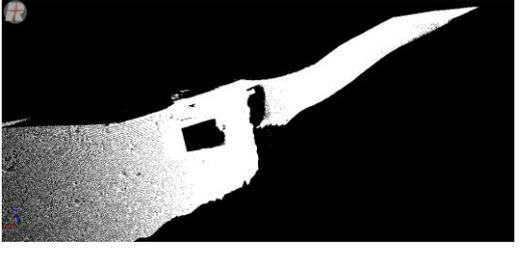
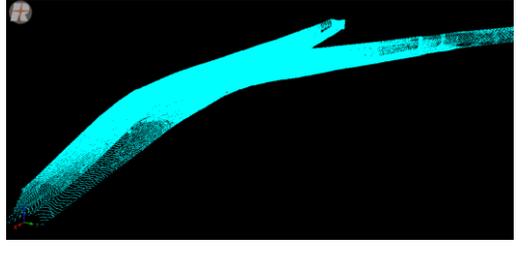
### 4.2 Trabajo con RiSCAN Pro. Resultados obtenidos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos trabajando con el software RiSCAN Pro.

#### 4.2.1 Visualización de la nube de cada escaneo

En la siguiente Tabla 4-1, se puede apreciar una imagen de la nube de puntos obtenida para cada posición de escaneo tomada. Además, en la tabla se representa, a la derecha de la imagen, los datos obtenidos al registrar las nubes de puntos, y a partir de estos datos el programa crea la matriz de rotación. La ScanPos000 tiene sus valores a 0 puesto que es la nube de referencia del proyecto.

	<p><b>Roll:</b> <b>0</b></p> <p><b>Pitch:</b> <b>0</b></p> <p><b>Yaw:</b> <b>0</b></p>		<p><b>Roll:</b> <b>0.147</b></p> <p><b>Pitch:</b> <b>0.243</b></p> <p><b>Yaw:</b> <b>13.464</b></p>
	<p><b>Roll:</b> <b>0.444</b></p> <p><b>Pitch:</b> <b>0.882</b></p> <p><b>Yaw:</b> <b>3.559</b></p>		<p><b>Roll:</b> <b>0.380</b></p> <p><b>Pitch:</b> <b>0.741</b></p> <p><b>Yaw:</b> <b>6.036</b></p>

 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos004</b></p>	<p><b>Roll:</b> 0.392</p> <p><b>Pitch:</b> 0.911</p> <p><b>Yaw:</b> 2.175</p>	 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos005</b></p>	<p><b>Roll:</b> 0.496</p> <p><b>Pitch:</b> 0.948</p> <p><b>Yaw:</b> 7.347</p>
 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos006</b></p>	<p><b>Roll:</b> 0.539</p> <p><b>Pitch:</b> 1.041</p> <p><b>Yaw:</b> 2.045</p>	 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos007</b></p>	<p><b>Roll:</b> 0.138</p> <p><b>Pitch:</b> 0.544</p> <p><b>Yaw:</b> 2.712</p>
 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos008</b></p>	<p><b>Roll:</b> 0.233</p> <p><b>Pitch:</b> 0.685</p> <p><b>Yaw:</b> 8.626</p>	 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos009</b></p>	<p><b>Roll:</b> 0.858</p> <p><b>Pitch:</b> 0.826</p> <p><b>Yaw:</b> 4.169</p>
 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos010</b></p>	<p><b>Roll:</b> 2.209</p> <p><b>Pitch:</b> 1.326</p> <p><b>Yaw:</b> 4.011</p>	 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos011</b></p>	<p><b>Roll:</b> 0.691</p> <p><b>Pitch:</b> 1.417</p> <p><b>Yaw:</b> 19.235</p>
 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos012</b></p>	<p><b>Roll:</b> -0.26</p> <p><b>Pitch:</b> 0.591</p> <p><b>Yaw:</b> 6.435</p>	 <p style="text-align: center;"><b>ScanPos013</b></p>	<p><b>Roll:</b> -0.47</p> <p><b>Pitch:</b> 0.359</p> <p><b>Yaw:</b> 13.13</p>

	<b>Roll:</b> 1.701 <b>Pitch:</b> -1.52 <b>Yaw:</b> -15.3		<b>Roll:</b> -0.16 <b>Pitch:</b> -0.26 <b>Yaw:</b> 15.93
	<b>Roll:</b> -0.65 <b>Pitch:</b> -0.74 <b>Yaw:</b> 10.78		<b>Roll:</b> -1.94 <b>Pitch:</b> -2.01 <b>Yaw:</b> 13.71
	<b>Roll:</b> -0.87 <b>Pitch:</b> -1.37 <b>Yaw:</b> 8.243		<b>Roll:</b> -1.65 <b>Pitch:</b> -1.80 <b>Yaw:</b> 16.63
	<b>Roll:</b> -0.27 <b>Pitch:</b> -1.27 <b>Yaw:</b> -8.93		<b>Roll:</b> -1.158 <b>Pitch:</b> -0.64 <b>Yaw:</b> 14.92
	<b>Roll:</b> -0.36 <b>Pitch:</b> -1.24 <b>Yaw:</b> -13.1		<b>Roll:</b> -0.35 <b>Pitch:</b> -1.17 <b>Yaw:</b> 13.23

Tabla 4-1 Resultados de los escaneos

### 4.2.2 Tabla de desviaciones

A continuación, se muestra en la Tabla 4-2 la representación de los 23 registros de las nubes realizados. Para cada registro, viene definido las nubes que han sido registradas, la cantidad de pares de puntos que han sido tomados y la desviación típica resultante.

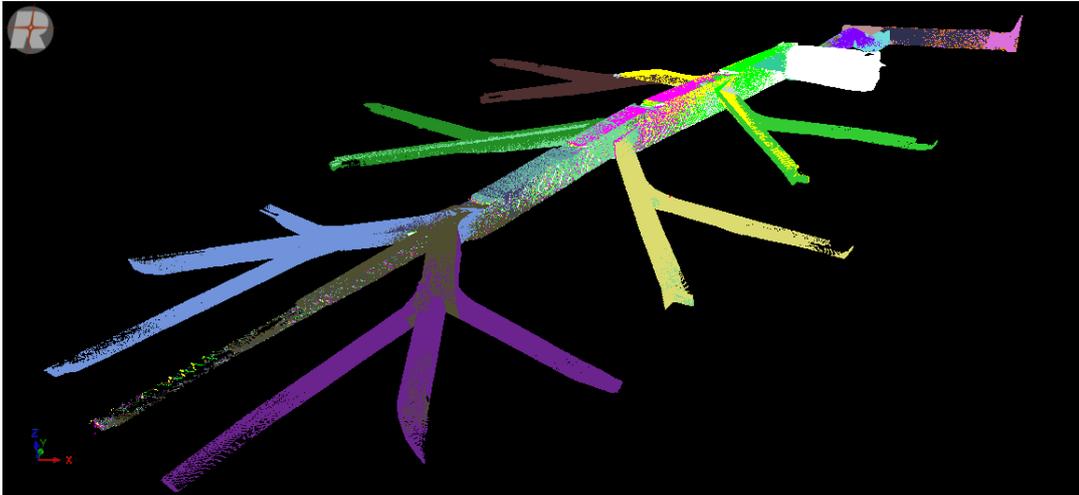
Número de registro	ScanPos de referencia	ScanPos registrada	Pares de puntos utilizados	Desviación típica ( $\sigma$ )(metros)
1	0	1	5	0,025678
2	1	2	5	0,024211
3	2	3	6	0,020881
4	3	4	5	0,014043
5	4	5	6	0,007791
6	5	6	6	0,012754
7	6	7	6	0,048121
8	7	8	4	0,006055
9	7	9	4	0,034502
10	4	10	5	0,019671
11	4	11	5	0,011161
12	2	12	4	0,015591
13	12	13	6	0,013049
14	2	14	4	0,029483
15	0	15	5	0,016132
16	15	16	6	0,005672
17	16	17	5	0,017706
18	17	18	5	0,018026
19	18	20	4	0,018501
20	20	21	4	0,033328
21	21	22	5	0,024657
22	22	23	5	0,011437
23	21	24	4	0,003137
Media:			4,96	0,018765

Tabla 4-2 Registro de las nubes de puntos

### 4.2.3 Registro de las nubes de puntos

En las siguientes figuras se muestran algunos ejemplos del registro completo de las nubes de puntos. Cabe destacar que cada pseudocolor representa un escaneo distinto de manera que se puede apreciar en la Figura 4-1 cómo en las zonas centrales del túnel existe una mezcla de colores debido al gran número de puntos en común de diferentes escaneos mientras que, en los extremos de las galerías, tan solo

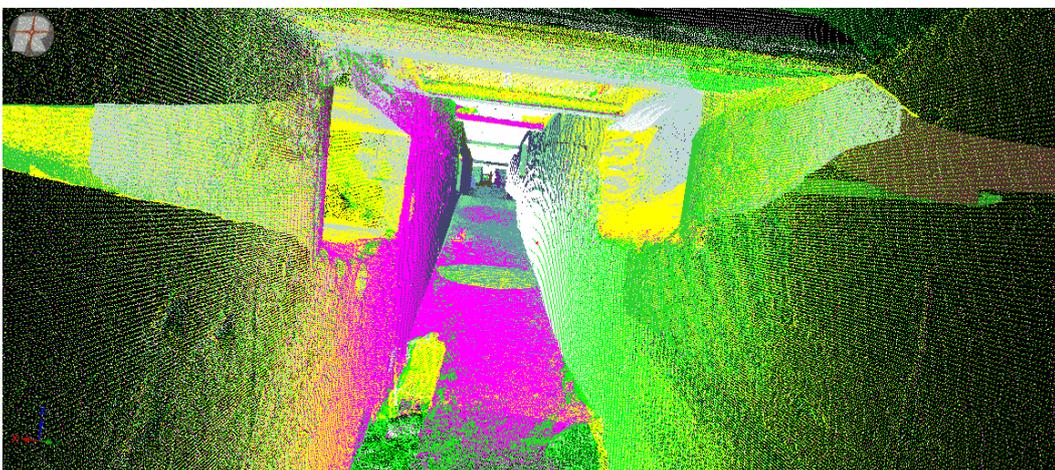
existe un color porque solo un escaneo ha conseguido llegar hasta ese punto. Además, el alto número de colores muestra la complejidad de la nube conjunta.



**Figura 4-1** Representación tridimensional del registro completo del túnel. Los escaneos individuales se visualizan en distintos pseudocolores.



**Figura 4-2** Vista de la nube registrada y representada con atributos de intensidad



**Figura 4-3** Detalle del interior del pasillo central con galerías a los lados y visualización en pseudocolor

### 4.3 Trabajo con Matlab®. Resultados obtenidos

A continuación, se presentan los diferentes resultados obtenidos en la aplicación del algoritmo sobre los diferentes segmentos del túnel. Para cada segmento del túnel se muestra como resultado: una imagen que representa las secciones en las que ha sido cortado, otra imagen en la que se representa su posición con respecto al túnel y una tabla en la que se aprecian los datos de área, altura y anchura para cada sección. Al final del apartado, se muestra el resultado de la aplicación de la interfaz de usuario creada en el túnel de la ENM.

Sin embargo, conviene previamente dar un repaso a algunas dificultades encontradas a la hora de la obtención de resultados. El algoritmo está preparado para que, en caso de existir algún tipo de error en los cálculos, se represente en la tabla el elemento “-”.

A lo largo del proceso de creación del algoritmo se han observado algunas fuentes de error que imposibilitan el cálculo de alguno de los parámetros (área, altura y anchura) de cada sección. Estos errores provocan que el algoritmo se interrumpa y no pueda finalizar así que se decide implementar una solución condicional en cada caso para que el algoritmo pueda finalizar. Esto quiere decir que, en caso de que una función necesite determinados datos para iniciarse y no los tenga, el algoritmo los supone automáticamente 0. Si bien el resultado de la función será erróneo, al menos el algoritmo finaliza y calcula los datos para aquellas secciones en las que sí funciona correctamente. Posteriormente, se evaluará el dato erróneo como un error por algún motivo y se representa, como ya se ha mencionado, con el símbolo “-”.

A continuación, se muestra una lista con los motivos que provocan los errores en los cálculos de los parámetros para cada sección.

- **Escasez de puntos en la nube.** En el caso de que exista una sección que no dispone, por ejemplo, de puntos en uno de sus laterales, a la hora de evaluar el corte del plano de la anchura con los puntos de las paredes solo obtiene los de un lado por lo que le resulta imposible calcular la distancia. El mismo comentario se puede aplicar al cómputo de la altura, en el caso de que falten puntos en el techo o suelo. Los motivos por los cuales pueden faltar puntos en la nube pueden ser de diversa índole, pero principalmente porque aparece una galería nueva desde ese punto o porque, por ejemplo, el techo no es visible en ese punto para el láser escáner (especialmente al final de las galerías debido a los cambios de rasante).

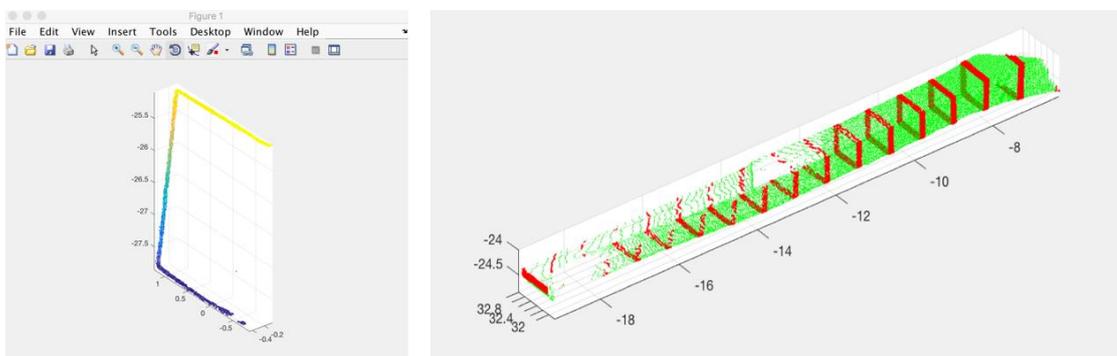


Figura 4-4 Ejemplo de escasez de puntos en la nube

- **Puntos máximo y mínimo solitarios.** El algoritmo genera automáticamente la trayectoria en base a dos puntos, el de máxima coordenada X y el de mínima coordenada X, es decir, se encuentran en los extremos de la nube. Es por ello que, en algunos casos, el plano generado en ese punto no corta ningún otro punto más de la nube y por lo tanto no existe sección para dicho punto. En estos casos, la primera sección válida para el análisis será la creada en el segundo punto de la trayectoria.

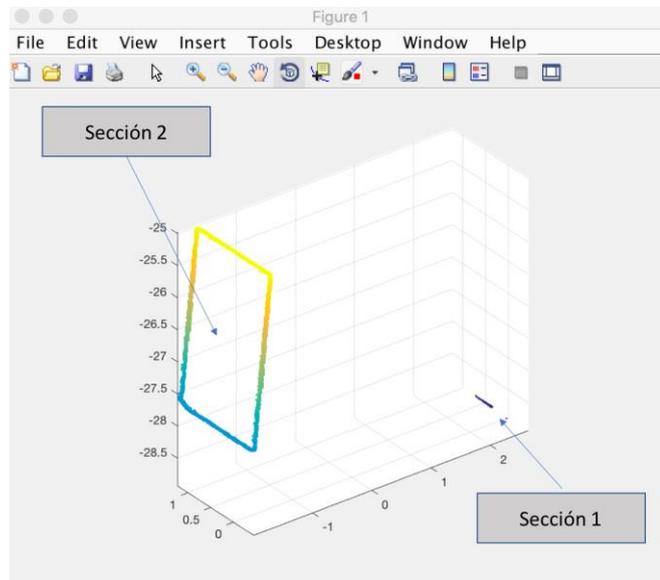


Figura 4-5 Ejemplo punto máximo/mínimo solitario

- **Error en la creación del vector normal de cada punto de la trayectoria.** Se supone que, existe un punto de la trayectoria al cual se le ha asignado una coordenada Z errónea, es decir, que por ejemplo, no corresponde exactamente al suelo por la ausencia de puntos en éste. En ese caso el vector normal generado para el punto de la trayectoria anterior no corresponderá con la inclinación real del suelo, puesto que va desde un punto en el suelo hasta otro en el techo. Por lo tanto, el plano generado para el punto no es perpendicular al suelo y, por lo tanto, la medida no es real. Para solucionar esto se establecen unos filtros de realidad, de manera que, en caso de que la altura o anchura dé un valor mayor o menor de lo esperado, se toma como error en los cálculos.

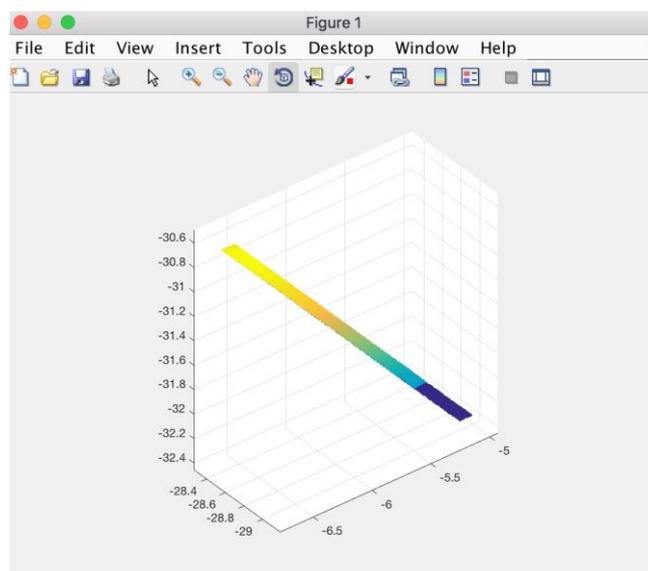


Figura 4-6 Ejemplo error en la creación del vector normal

Debido a la enorme cantidad de pasillos y galerías que tiene el túnel ha sido necesario fragmentar la nube de puntos para su procesamiento en 18 segmentos distintos (Figura 3-1). Por este motivo, se obtiene un gran volumen de datos que se adjuntan en el Anexo 1. Sin embargo, se decide añadir en el presente apartado tres galerías con distintas características a modo de ejemplo. Estas galerías representadas son las marcadas en la Figura 4-7 y su caracterización se explica en el siguiente apartado.

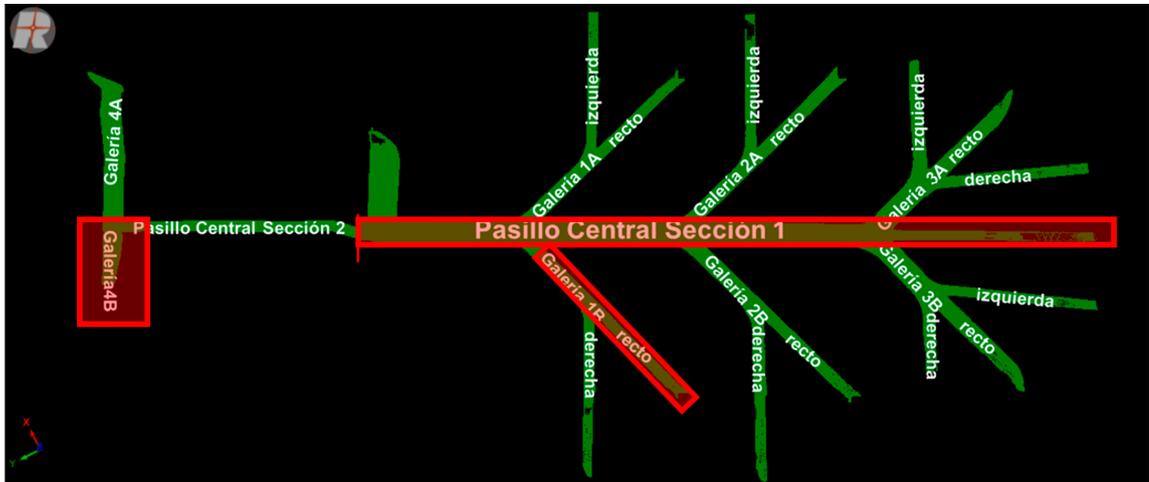


Figura 4-7 Galerías seleccionadas para ejemplificar

### 4.3.1 Pasillo central sección 1

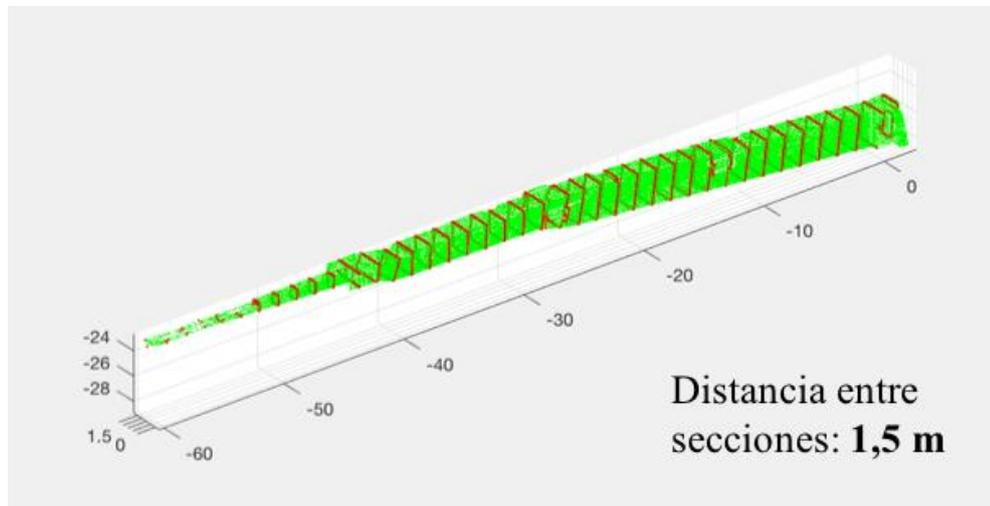


Figura 4-8 Pasillo central sección 1

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,006	-	-	22	3,217	1,893	1,661
2	4,614	2,282	0,896	23	2,897	1,672	1,677
3	5,536	2,744	0,000	24	3,279	1,884	1,670
4	4,460	2,693	1,622	25	3,206	1,873	1,649
5	4,505	2,673	1,619	26	3,129	1,862	1,632

6	4,649	2,695	1,638	27	3,130	1,849	1,624
7	4,595	2,697	1,623	28	3,111	1,776	1,622
8	4,642	2,709	1,629	29	2,847	1,734	1,577
9	4,610	2,727	1,632	30	3,008	1,336	2,171
10	4,580	2,521	1,616	31	2,440	0,991	0,777
11	5,927	2,539	1,636	32	0,655	0,918	0,705
12	6,060	2,752	1,632	33	0,644	0,882	0,716
13	4,631	2,746	1,634	34	0,582	0,803	0,718
14	4,692	2,779	1,640	35	0,517	0,692	0,719
15	4,701	2,775	1,631	36	0,396	0,104	0,282
16	4,643	2,768	1,638	37	0,164	-	0,283
17	4,619	2,580	1,628	38	0,192	-	0,146
18	4,740	2,784	1,639	39	0,050	-	-
19	4,604	2,726	1,653	40	0,208	-	-
20	5,484	2,556	2,516	41	0,139	-	-
21	4,727	1,965	2,009	42	0,006	-	-

Tabla 4-3 Datos sección 1 del pasillo central

#### 4.3.2 Galería 1B recto

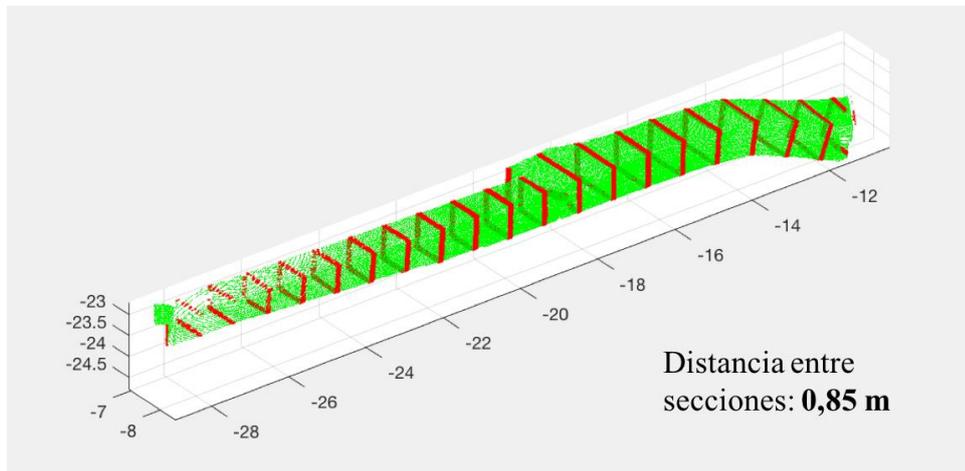


Figura 4-9 Galería 1B recto

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,005	-	-	12	0,666	0,795	0,808
2	0,609	0,343	0,641	13	0,652	0,802	0,797
3	0,929	0,811	1,158	14	0,631	0,773	0,800
4	0,910	0,815	1,136	15	0,610	0,745	0,808

5	0,929	-	0,755	16	0,571	0,696	0,804
6	0,933	0,793	1,108	17	0,527	0,639	0,804
7	0,941	0,809	1,107	18	0,504	0,611	0,816
8	0,919	0,806	1,071	19	0,463	0,566	0,815
9	1,013	0,782	1,227	20	0,433	0,528	0,210
10	1,119	0,674	0,513	21	0,405	0,504	-
11	1,049	0,791	1,053	22	0,022	-	-

Tabla 4-4 Datos galería 1B recto

### 4.3.3 Galería 4B

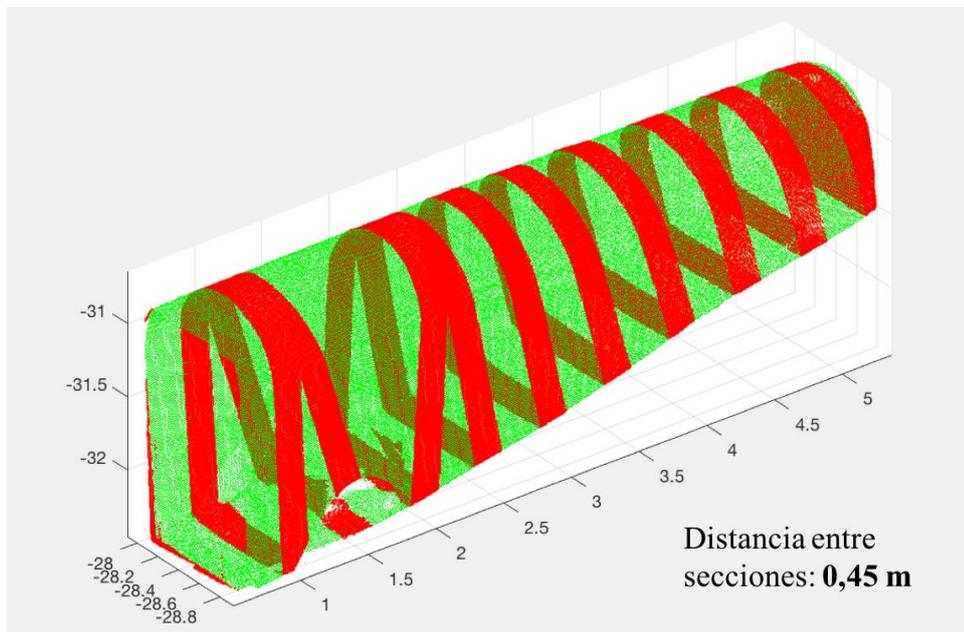


Figura 4-10 Galería 4B

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,642	0,450	0,511	7	1,315	1,440	0,904
2	0,748	0,891	0,755	8	1,375	1,498	0,888
3	0,839	0,981	0,849	9	1,517	1,166	0,916
4	0,975	1,102	0,903	10	1,506	1,699	0,887
5	1,100	1,222	0,904	11	0,732	1,663	0,241
6	1,221	1,348	0,904				

Tabla 4-5 Datos galería 4B

#### 4.3.4 Aplicación de la interfaz de usuario creada

En la parte izquierda de la pantalla se encuentran los botones para ejecutar el algoritmo sobre cada uno de los segmentos del túnel y el cuadro donde el usuario debe introducir la distancia entre secciones. Estos parámetros conforman las entradas del programa. En la parte central se muestran ambas imágenes, en la parte inferior el túnel completo y en la parte superior, el segmento evaluado. A la derecha de la “guide” se muestra en la parte de arriba, la sección que desee el usuario visualizar y en la parte de abajo, la tabla de datos en la que cada fila se corresponde con cada sección creada y las columnas representan los datos de número de sección, área, altura y anchura.

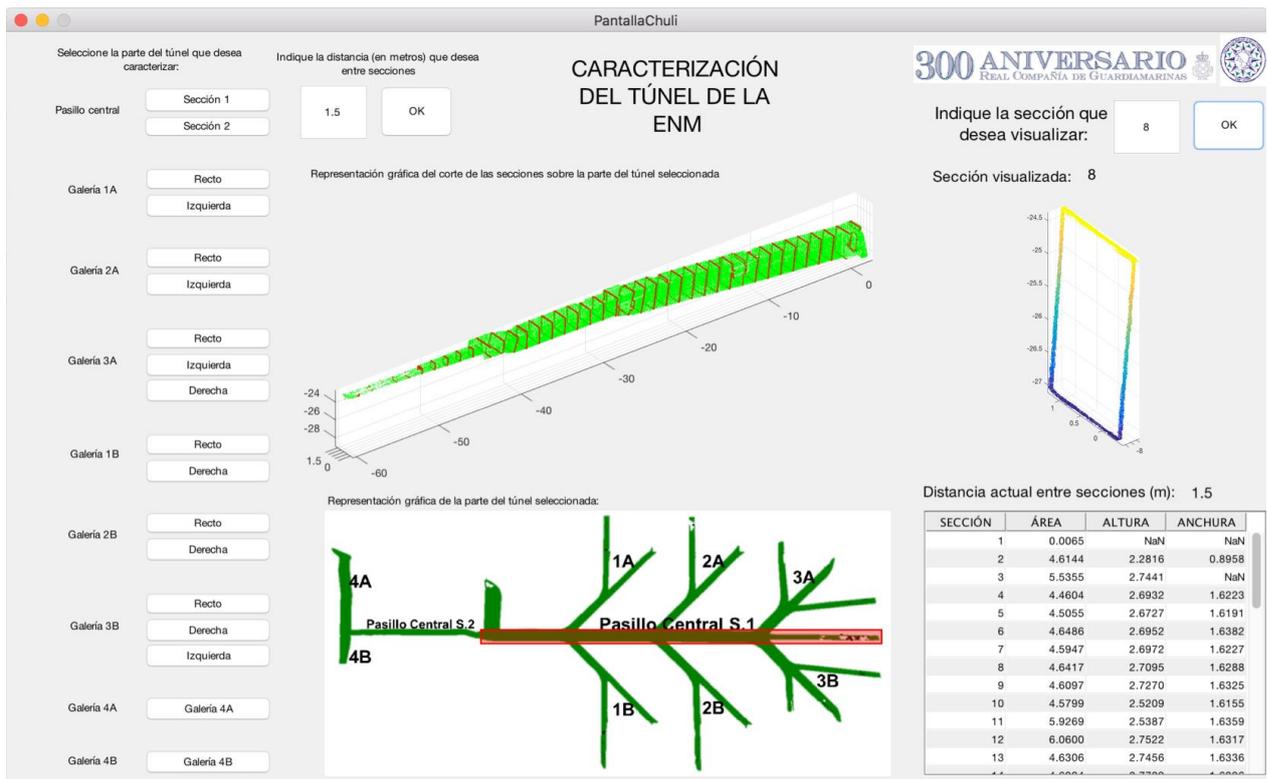


Figura 4-11 Interfaz de usuario creada en "Guide"

El uso del programa creado es muy fácil y visual, tan sólo hay que seguir tres sencillos pasos que se presentan a continuación:

1. Indicar la distancia (en metros) que se desea entre cada sección escribiendo el número y pulsando el botón “OK”.
2. Pulsar el botón correspondiente con el segmento del túnel que se desea evaluar.
3. Esperar mientras se ejecuta el algoritmo y se muestran los resultados en pantalla. Este tiempo de espera es variable y depende de dos factores: la distancia entre secciones introducida por el usuario y el segmento a evaluar, ya que no todos son iguales y por lo tanto se crearán más o menos secciones.
4. Si se desea, indicar qué sección concreta se quiere visualizar y pulsar “OK” a continuación, se mostrará en pantalla.



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

#### 5.1.1 Introducción

La importancia del conocimiento del espacio subterráneo en el ámbito militar queda contrastada con el amplio uso que los túneles y galerías han tenido a lo largo de la historia, convirtiéndose en un elemento de gran relevancia para el combate o para la instrucción de las tropas. La mayoría de las bases militares disponen de algún tipo de entramado de galerías subterráneas que en algunos casos son utilizadas para realizar ejercicios de adiestramiento. La realización de este tipo de actividades conlleva ciertos riesgos para el personal que se ve involucrado debido a las características intrínsecas de un túnel, y por lo tanto, frente a la ausencia de planos de la construcción original, el conocimiento de las medidas exactas que tiene el túnel supone un factor imprescindible a tener en cuenta a la hora de realizar la preparación de los ejercicios.

El túnel de la Escuela Naval se encuentra actualmente en desuso y en estado de abandono, sin embargo, gracias a la caracterización realizada en este trabajo, se prevé que puedan realizarse numerosas actividades o ejercicios en su interior.

La metodología creada en el trabajo parte de la obtención de los datos y finaliza con la caracterización completa del túnel de la ENM. A través de una interfaz gráfica de usuario creada en el software Matlab®, cualquier persona puede conocer las características del túnel en una zona concreta. Como se ha podido observar a lo largo del trabajo, esta metodología se basa en la combinación de dos grandes bloques, la tecnología LiDAR y la creación del algoritmo. A continuación, se exponen las conclusiones previas de cada uno de los dos bloques y posteriormente se explica la conclusión general obtenida de la aplicación de la metodología creada en el túnel de la ENM.

#### 5.1.2 Conclusiones previas

##### 5.1.2.1 Primer bloque. Trabajo con nubes de puntos

La primera fase que tiene lugar en la realización del trabajo es la toma de datos del interior del túnel utilizando el láser escáner. A este respecto, se puede concluir que es importantísimo realizar una primera inspección de la zona que va a ser escaneada con el objetivo de elaborar un buen planeamiento de las posiciones de escaneo necesarias, con el objetivo de minimizar el número de ellas pero sin perder calidad en las mediciones. Una mala planificación del número de escaneos necesarios o de la colocación de los mismos puede suponer errores importantes a la hora de registrar las nubes de puntos.

Durante el proceso de toma de datos en el interior del túnel se comprende la importancia que tiene la preparación exhaustiva del trabajo de campo para, una vez allí, aprovechar al máximo el tiempo disponible. Un ejemplo de esto puede ser la configuración del láser escáner, es importante saber de antemano que parámetros son aquellos que se deben establecer para realizar cada escaneo. El equipo permite multitud de configuraciones para diferentes ámbitos de trabajo pero la manera de encontrar la más adecuada no es realizar una prueba con cada una, sino haber estudiado con antelación cuál es la óptima.

Tras la toma de datos llega el momento de procesar la información obtenida. Cabe destacar que los alumnos de la ENM no reciben una formación específica en el ámbito de la ingeniería inversa, ni más concretamente en la tecnología LiDAR, más allá que algunos breves conceptos estudiados en diferentes asignaturas a lo largo de la carrera. En vista a lo anterior, el hecho de trabajar con una tecnología prácticamente desconocida hasta el momento y a través de un software (RiSCAN Pro) con el que jamás se había tenido contacto, ha supuesto un reto importante y una gran inversión de tiempo. Una vez adquirida cierta soltura en el manejo del programa, el proceso de registro de las nubes de puntos se vuelve sistemático e incluso entretenido puesto que en la interfaz visual que presenta el software se visualizan las nubes de puntos en tres dimensiones y se puede interactuar con ellas.

En relación al proceso de registro de las nubes de puntos se concluyen varios puntos específicos. Debido a la gran calidad con la que han sido tomados los escaneos del túnel, es complicado para el ordenador trabajar con ese volumen de datos y por lo tanto, es necesario aplicar un filtrado sobre ellos. Para obtener los parámetros de filtrado que marquen el equilibrio entre el decremento en la calidad de la nube y el tiempo de procesado del ordenador no queda más remedio que ir probando con diferentes valores. Por otro lado, una vez realizado el proceso de registro se concluye que una buena planificación de los escaneos realizados es de vital importancia para encontrar puntos en común entre las diferentes nubes registradas. Sin embargo, se aprende que el hecho de no haber utilizado dianas de control durante la toma de datos supuso un error importante, especialmente porque el registro de las nubes se ha realizado de manera manual, buscando referencias en común, no siempre fáciles de encontrar. La presencia de estas dianas reflectantes en las nubes, a pesar de aumentar el tiempo en campo para su colocación, hubiera supuesto sin duda una ayuda que se habría visto materializada en un importante ahorro de tiempo en el postproceso.

El último punto del primer bloque consiste en la segmentación de la nube y exportación de los datos. En un principio, se planteó crear un algoritmo con el objetivo de que éste fuese capaz de generar una trayectoria automatizada a lo largo del túnel que fuera recorriendo los pasillos centrales y todo el entramado de galerías. Sin embargo, no fue posible conseguir que el algoritmo la generara debido a las diferentes direcciones que presentan las galerías laterales por lo que se decidió solucionar el problema segmentando la nube de puntos general en otras más pequeñas que tuvieran un único eje central en las que, ahora sí, el algoritmo permitiese la creación de una trayectoria de manera automática sobre la que generar las secciones. Gracias al conocimiento adquirido durante el manejo del programa RiSCAN Pro debido al trabajo previo, este punto no supone mayor complicación.

Los objetivos que inicialmente se establecieron y que han sido alcanzados en el primer bloque del trabajo son los siguientes:

- Obtención de las nubes de puntos de los diferentes pasillos y galerías del túnel de la ENM mediante el uso de la tecnología LiDAR.
- Creación de un modelo 3D formado por una única nube de puntos del túnel completo a través del registro de las diferentes nubes obtenidas en cada escaneo con el láser escáner terrestre.

Como conclusión general de la realización del primer bloque se extrae que la tecnología LiDAR ofrece grandes ventajas para la obtención de datos muy precisos y que el software RiSCAN Pro es una herramienta muy útil e intuitiva para el tratamiento de las nubes de puntos obtenidas con dicha tecnología.

### 5.1.2.2 Segundo bloque. Creación y aplicación del algoritmo

El primer reto que se presenta a la hora de iniciar la creación del algoritmo en el software de Matlab® es precisamente el propio software. En este caso, los alumnos de la ENM sí que reciben una amplia formación en el uso de este programa a lo largo de la carrera, sin embargo, el objetivo de caracterizar el túnel al completo es ambicioso y para lograrlo es necesario tener dominio sobre las posibilidades que ofrece el programa. Además, se pretende crear un algoritmo de aplicación general y exportable a cualquier caso y no que solo funcione de manera específica para el túnel de la ENM.

En primer lugar se planifica cómo debe actuar el algoritmo, dividiendo el problema general en problemas más pequeños y aportando poco a poco soluciones a cada uno de ellos. Se divide el algoritmo en diferentes pasos y para cada uno de ellos se planifican las matemáticas a aplicar. La complejidad del proceso de creación del algoritmo radica en traspasar lo que se desea que haga a lenguaje “M”, que es el lenguaje que utiliza Matlab® y es parecido a otros lenguajes de programación.

Del trabajo con el software Matlab® se concluye que cualquier conocimiento previo que se tenga del programa es sin duda bienvenido; en el caso de no tenerlo, es necesario aprender unos conocimientos básicos previos. Por este motivo, conviene invertir cierto tiempo al principio en familiarizarse con el programa para poder explotar todas las funcionalidades que proporciona. Durante la creación del algoritmo, también se ha aprendido que es fundamental realizar un breve esquema de lo que se quiere que el algoritmo realice antes de ponerse a escribir el código.

En cuanto a la creación del algoritmo es importante destacar que, se deben corregir los errores que van apareciendo según se van produciendo y que cuando se va desarrollando el código, es importante mantener siempre una perspectiva general, es decir, conseguir en todo momento que el algoritmo sea aplicable a cualquier segmento de cualquier túnel y no hacerlo de manera particular para uno en concreto.

La creación del algoritmo ha supuesto un trabajo más largo y tedioso de lo esperado en un inicio, superando multitud de dificultades principalmente a la hora de desarrollar el código en el programa. Han sido muchas las veces que se ha decidido parar, descartar el código escrito hasta el momento y volver a plantearlo todo desde el inicio.

En cuanto a los resultados obtenidos en la aplicación del algoritmo en el caso concreto del túnel de la ENM se extraen diversas conclusiones. En primer lugar, que el túnel de la ENM básicamente consta de un pasillo central dividido en dos partes y unas galerías ambos lados. En el pasillo central tiene una altura superior a la de una persona por lo que se pueden llevar a cabo aquellas actividades que se planeen, sin embargo, en las galerías no ocurre lo mismo. Son pequeñas y el acceso no es fácil, en todas ellas es necesario entrar practicando reptando y aparentemente, no llegan a ningún lugar de interés.

Los objetivos alcanzados en el desarrollo de este segundo bloque con el software Matlab® han sido los siguientes:

- Diseño y aplicación de un algoritmo genérico que, de una manera rápida y eficiente, divida la nube de puntos del túnel entero en diferentes segmentos y calcule secciones sobre estos segmentos para, posteriormente, caracterizar cada una de ellas.
- Creación de una herramienta visual que permita al usuario interactuar con el algoritmo de manera que pueda decidir en qué punto del túnel desea conocer el área, altura y anchura del mismo.

A modo de conclusión general del segundo bloque se puede extraer que, gracias a que el software Matlab® es una herramienta muy potente de cálculo, se ha podido desarrollar con éxito el algoritmo previsto pero que sin embargo, ha llevado más tiempo de lo esperado y no ha permitido llevar a cabo el último de los objetivos propuestos, la geolocalización del túnel mediante un estudio SIG.

### 5.1.3 Conclusión general

La metodología desarrollada a lo largo del trabajo permite combinar dos tecnologías distintas como son la tecnología LiDAR y el cálculo asistido por ordenador. El algoritmo desarrollado permite caracterizar al completo cualquier túnel que haya sido escaneado mediante un láser escáner terrestre. La aplicación de la metodología creada sobre el túnel de la ENM, desde la toma de datos hasta la interfaz gráfica desarrollada, permite obtener datos del mismo que eran completamente desconocidos hasta la fecha, proporcionando una importante herramienta de decisión para la programación de distintas actividades en su interior.

## 5.2 Líneas futuras

A raíz del desarrollo del trabajo y en vista de los resultados obtenidos se exponen a continuación diferentes líneas de acción sobre las que se considera conveniente trabajar en un futuro. Algunas de ellas son una continuación del presente trabajo y otras se basan en la aplicación de la metodología en otros posibles casos.

- **Continuación y mejora del algoritmo creado.** El algoritmo desarrollado a lo largo del trabajo nace de cero, es decir, se crea a partir de referencias pero no de otro algoritmo. Una posible manera de continuar el trabajo sería mejorar el algoritmo en diferentes aspectos: reducción de tiempos de procesamiento, mejoras en la presentación visual, eliminación de la necesidad de segmentar el túnel y corrección de los posibles errores.
- **Geolocalización del túnel y creación de planos.** A partir de todos los datos obtenidos tanto en el registro de las nubes como en la aplicación del algoritmo se puede continuar el trabajo extrayendo planos del túnel y georreferenciándolo a través de herramientas SIG.
- **Continuar la exploración del túnel de la ENM.** En las nubes de puntos obtenidas en los escaneos realizados en las galerías de ambos lados del pasillo central de la sección 1, se puede observar que el láser escáner no ha alcanzado el final del túnel. Esto es porque existen curvas al final de las galerías, cuyas dimensiones son demasiado pequeñas e imposibilitan el acceso, incluso para que el propio personal camine agachado o reptando. Como solución a esto y con el objetivo de caracterizar el túnel en sus puntos más inaccesibles, se propone montar el láser escáner sobre un pequeño coche teledirigido de manera que se pueda obtener los escaneos de las mismas.
- **Aplicación de la metodología en otros casos de estudio.** En la ENM existen otras construcciones, túneles y galerías subterráneas que no disponen de planos o datos sobre su construcción sobre los cuales se podría aplicar la metodología creada con el mismo objetivo que con el túnel estudiado en este trabajo.
- **Detección de patologías.** El láser escáner proporciona además valores de intensidad que no han sido utilizados en este trabajo. Con el objetivo de exprimir al máximo las funcionalidades de la tecnología LiDAR y continuar con la caracterización completa del túnel, se propone la creación de una metodología que de manera automática detecte diferentes tipos de patologías como humedades o grietas, utilizando el valor de la intensidad.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Claudio, «Historia de los primeros tuneles bajo las montañas, perforaciones,» 2015. [En línea]. Available: <http://ww2.historiasybiografias.com>.
- [2] J. A. Juncà Ubierna, Historia de los túneles y su evolución tecnológica. “Manual de Túneles y Obras Subterráneas”, 1ª Edición ed., C. L. Jimeno, Ed., Madrid: Gráficas Arias Montano, 1997, p. 1082.
- [3] J. M. García Martínez, «Evolución histórica de los túneles,» 2007.
- [4] «Inside Greece,» [En línea]. Available: <http://www.inseln-greece.de>. [Último acceso: 17 Febrero 2017].
- [5] «Construcción Civil,» [En línea]. Available: <https://historiacivil.wordpress.com>. [Último acceso: 22 Enero 2017].
- [6] ADIF España, Construcción del túnel de Pajares, 1ª Edición ed., 2016.
- [7] «El Cajón de Grisom,» [En línea]. Available: <http://www.elcajondegrisom.com>. [Último acceso: 15 Enero 2017].
- [8] P. Hiriart, «Vietcong gestó en túneles la derrota del ejército de EU,» *La razón de México*, 7 Enero 2014.
- [9] «Tunnels, The Warfare Underground — A Brief History of Siege,» 11 Junio 2012. [En línea]. Available: <http://militaryhistorynow.com/2012/06/11/the-warfare-underground-a-brief-history-of-siege-tunnels/>. [Último acceso: 21 Diciembre 2017].
- [10] X. Núñez-Nieto, M. Solla, A. Novo y H. Lorenzo, «Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling,» *Construction and building materials*, nº 71, pp. 551-560, 2014.
- [11] C. F. Caramés, «Técnicas de navegación para un robot móvil utilizando sistemas de razonamiento espacial,» 2012.

- [12] D. Fuá y D. Cacciani, «Giorgino Fiocco. Un ingegnere dedicato alla fisica applicata,» *Accastampato*, 2014.
- [13] NASA - Ciencia Beta , «Lo más importante que Neil y Buzz dejaron en la Luna,» 20 Julio 2004. [En línea]. Available: [https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2004/21jul\\_llr](https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2004/21jul_llr). [Último acceso: 30 Diciembre 2016].
- [14] Colegio Nacional de Ingenieros Industriales, «Radar, Tecnologia LIDAR Láser –,» [En línea]. Available: <http://conaii.org/es-ES/articulos/ingenieria/7-tecnologia-lidar>. [Último acceso: 15 Enero 2017].
- [15] M. A. Conejo-Martín, T. R. Herrero-Tejedor, J. Lapazaran, E. Perez-Martin, J. Otero, J. F. Prieto y J. Velasco, «Characterization of Cavities Using the GPR, LIDAR and GNSS Techniques,» de *Pure and Applied Geophysics*, vol. 11, 2015, pp. 3123-3137.
- [16] Ingeniatic, «LIDAR (Light Detection and Ranging),» [En línea]. Available: <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/496-lidar-light-detection-and-ranging>.
- [17] R. Argüelles-Fraga, C. Ordóñez, S. García-Cortés y J. Roca-Pardiñas, «Measurement planning for circular cross-section tunnels using terrestrial laser scanning,» *Automation in construction* , n° 31, pp. 1-9, 2013.
- [18] Y. Jong-Suk, S. Myung, L. J.S. y L. Kyu-sung, «Feature extraction of a concrete tunnel liner from 3D laser scanning data,» *NDT&E International*, n° 42, pp. 97-105, 2009.
- [19] P. Mañana Borrazás, A. Rodríguez Paz y R. Blanco-Rotea, «Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela),» *Arqueología de la Arquitectura*, pp. 15-32, 2008.
- [20] M. Pejic, «Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, n° 37, pp. 199-206, 2013.
- [21] B. Riveiro, H. González-Jorge, B. Conde y I. Puente, «Laser Scanning Technology: Fundamentals, Principles and Applications in Infrastructure,» 2016.
- [22] FARO®, «Página oficial de la empresa FARO,» [En línea]. Available: <http://www.faro.com/es-es/productos/topografia-3d/laser-scanner-faro-focus-3d/caracteristicas#main>.
- [23] «Direct Industry,» [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es>. [Último acceso: 26 Enero 2017].
- [24] FARO, Redefining productivity for laser scanning workflows, FARO, 2016.
- [25] RIEGL, *Data Sheet. RiSCAN Pro*, 2010.
- [26] MathWorks, *Matlab® Primer*, 27 ed., 2016.
- [27] G. A. Vargas Hákim, *Diario de cálculo vectorial*, Master Education, 2008.
- [28] S. Han, H. Cho, S. Kim y J. Heo, «A fast and automated method for extracting tunnel cross-sections using terrestrial laser scanned data».
- [29] J. Boavida, A. Oliveira y B. Santos, «Precise long tunnel survey using the Riegl VMX-250 mobile laser scanning system».

- [30] J. Rodríguez y V. Fernández, *Cómo redactar el estado del arte de un trabajo*, Editorial Genios, 2010.
- [31] A. Pérez, *Cómo escribir una bibliografía*, Nuevas publicaciones.
- [32] P. Martínez y A. García, *Cómo escribir una buena memoria de TFG*, Publicaciones del 2000, 2013.
- [33] U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, *Technical Manual for Design and construction for Road Tunnels - Civil Elements*, 2009.
- [34] G. Gigli y N. Casagli, «Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR pointclouds,» *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, nº 48, pp. 187-198, 2011.



## ANEXO I: RESULTADOS OBTENIDOS EN MATLAB®. CARACTERIZACIÓN COMPLETA DEL TÚNEL DE LA ENM

### Descripción del anexo

En el presente apartado se muestran los resultados de la aplicación del algoritmo sobre cada uno de los 18 segmentos en los que se ha dividido el túnel.

### Resultados de cada segmento

#### *Pasillo central*

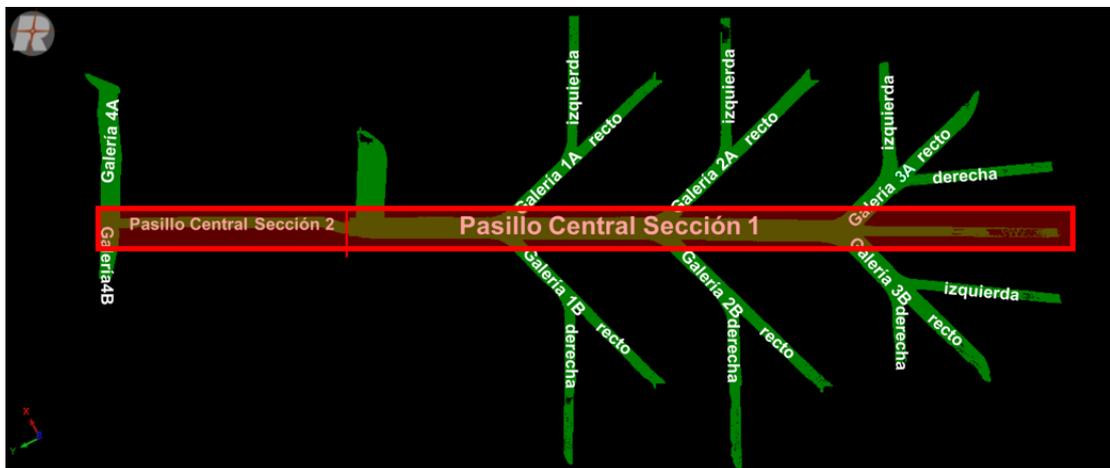


Figura A1-0-1 Pasillo central marcado sobre el túnel completo

#### *Pasillo central sección 1*

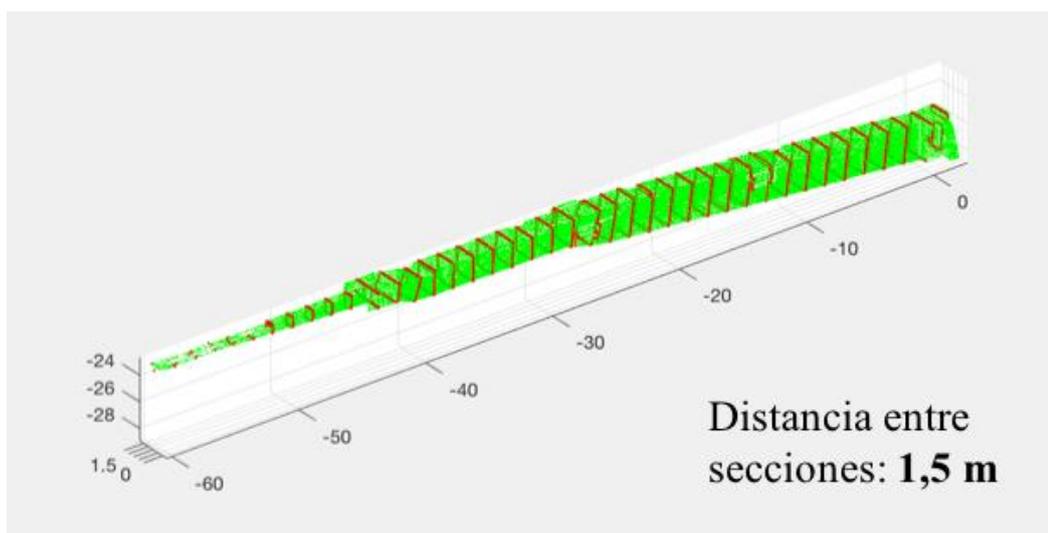


Figura A1-0-2 Pasillo central sección 1

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,006	-	-	22	3,217	1,893	1,661
2	4,614	2,282	0,896	23	2,897	1,672	1,677
3	5,536	2,744	0,000	24	3,279	1,884	1,670
4	4,460	2,693	1,622	25	3,206	1,873	1,649
5	4,505	2,673	1,619	26	3,129	1,862	1,632
6	4,649	2,695	1,638	27	3,130	1,849	1,624
7	4,595	2,697	1,623	28	3,111	1,776	1,622
8	4,642	2,709	1,629	29	2,847	1,734	1,577
9	4,610	2,727	1,632	30	3,008	1,336	2,171
10	4,580	2,521	1,616	31	2,440	0,991	0,777
11	5,927	2,539	1,636	32	0,655	0,918	0,705
12	6,060	2,752	1,632	33	0,644	0,882	0,716
13	4,631	2,746	1,634	34	0,582	0,803	0,718
14	4,692	2,779	1,640	35	0,517	0,692	0,719
15	4,701	2,775	1,631	36	0,396	0,104	0,282
16	4,643	2,768	1,638	37	0,164	-	0,283
17	4,619	2,580	1,628	38	0,192	-	0,146
18	4,740	2,784	1,639	39	0,050	-	-
19	4,604	2,726	1,653	40	0,208	-	-
20	5,484	2,556	2,516	41	0,139	-	-
21	4,727	1,965	2,009	42	0,006	-	-

Tabla A1-0-1 Datos sección 1 del pasillo central

*Pasillo central sección 2*

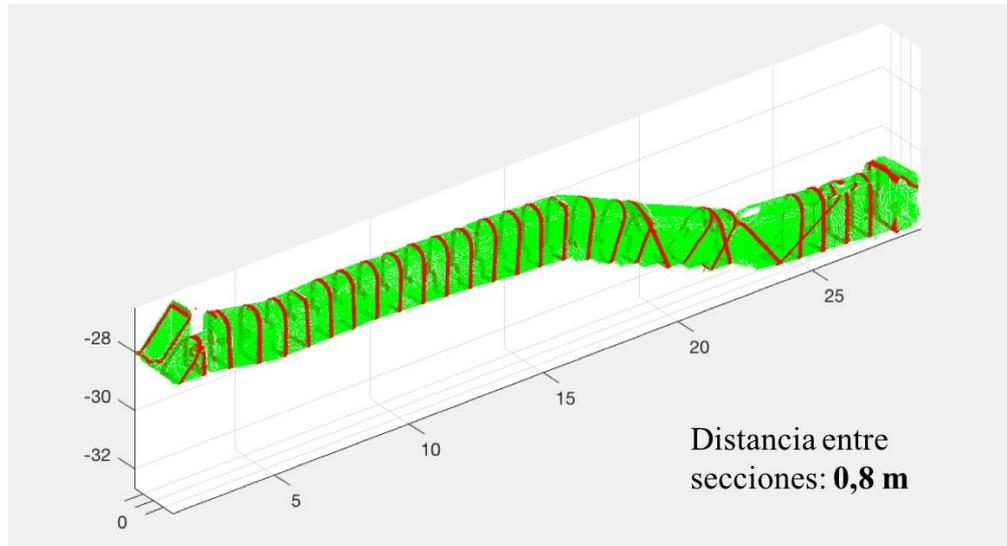


Figura A1-0-3 Pasillo central sección 2

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	1,476	0,641	0,196	18	1,618	1,680	0,894
2	2,691	1,023	0,285	19	1,558	1,590	0,896
3	1,663	1,827	0,885	20	1,498	1,434	0,894
4	1,556	1,546	0,876	21	1,486	1,461	0,905
5	1,394	0,613	0,566	22	1,502	1,428	0,897
6	1,583	1,830	0,866	23	1,441	1,388	0,833
7	2,724	1,087	0,548	24	1,442	1,366	0,773
8	2,283	0,890	0,502	25	1,459	1,232	0,768
9	1,571	0,951	0,542	26	1,459	1,207	0,755
10	1,544	1,080	0,149	27	1,436	1,038	0,758
11	1,531	1,131	0,669	28	1,427	0,909	0,789
12	2,091	1,198	0,916	29	1,620	1,188	0,839
13	1,275	1,151	0,750	30	1,599	1,140	0,820
14	1,516	1,345	0,955	31	0,918	0,556	0,777
15	1,549	1,564	0,903	32	1,832	0,236	1,002
16	1,596	1,583	0,882	33	1,990	-	0,691
17	1,617	1,689	0,892				

Tabla A1-0-2 Datos sección 2 del pasillo central

### Galería 1A

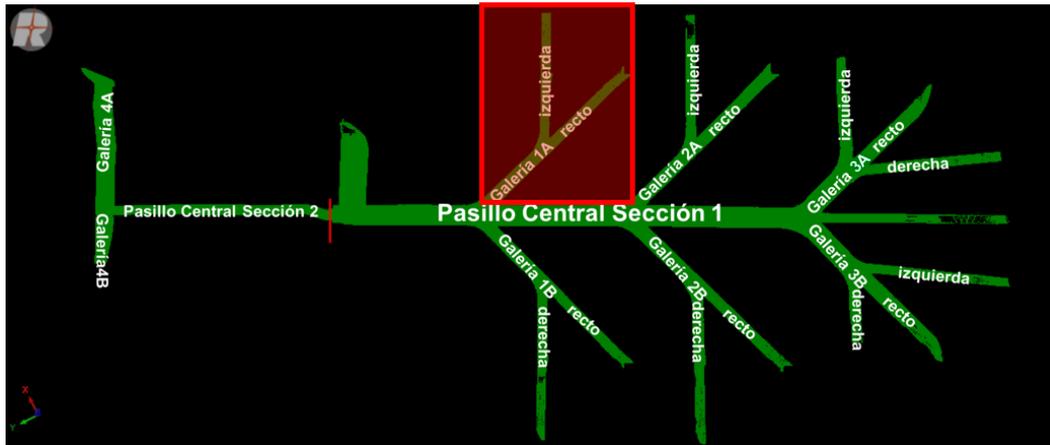


Figura A1-0-4 Galería 1A marcada sobre el túnel completo

### Galería 1A recto

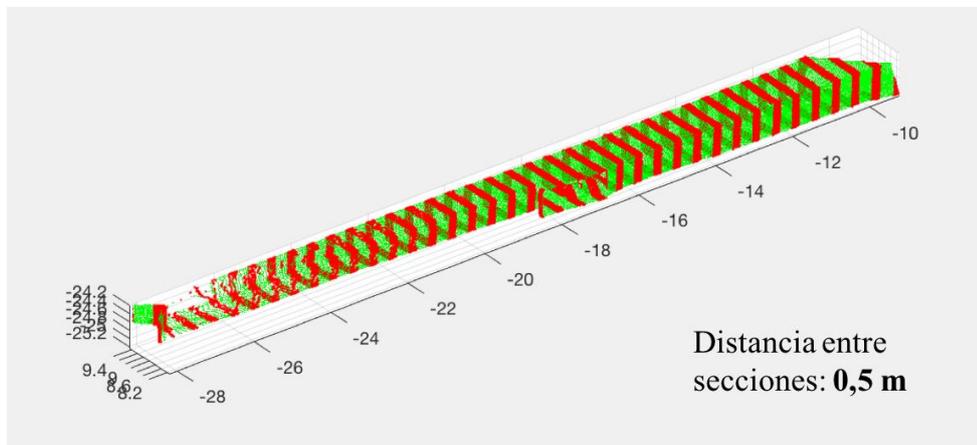


Figura A1-0-5 Galería 1A recto

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,023	-	-	20	0,527	0,594	0,605
2	0,366	0,801	0,295	21	0,505	0,579	0,601
3	0,763	0,794	0,478	22	0,492	0,572	0,601
4	0,982	0,776	0,942	23	0,481	0,559	0,576
5	0,924	0,764	0,878	24	0,468	0,546	0,599
6	0,918	0,755	0,909	25	0,459	0,537	0,569
7	0,906	0,746	0,918	26	0,458	0,533	0,556
8	0,870	0,729	0,815	27	0,449	0,521	0,589
9	0,861	0,715	0,823	28	0,438	0,513	0,561
10	0,835	0,698	0,795	29	0,430	0,510	0,620
11	0,816	0,689	0,810	30	0,427	0,504	0,617
12	0,799	0,684	0,794	31	0,424	0,507	0,598

13	0,791	0,679	0,787	32	0,422	0,508	0,590
14	0,787	0,675	0,792	33	0,422	0,503	0,585
15	0,817	0,652	0,792	34	0,415	0,488	0,535
16	0,857	0,348	0,646	35	0,398	0,473	0,388
17	0,810	0,531	0,629	36	0,245	0,171	0,398
18	0,788	0,618	0,707	37	0,298	0,246	0,176
19	0,741	0,606	0,722	38	0,374	-	0,142

Tabla A1-0-3 Datos galería 1A recto

*Galería 1A izquierda*

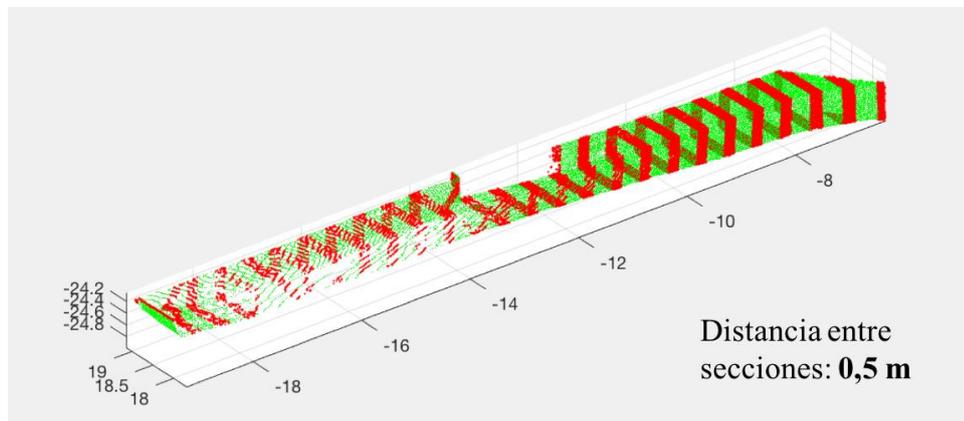


Figura A1-0-6 Galería 1A izquierda

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,049	-	-	14	0,268	0,345	0,611
2	0,319	0,607	0,243	15	0,630	0,345	0,297
3	0,572	0,615	0,614	16	0,390	0,186	0,546
4	0,510	0,609	0,590	17	0,385	0,198	0,495
5	0,494	0,596	0,583	18	0,385	0,194	0,567
6	0,480	0,585	0,585	19	0,351	0,197	0,539
7	0,468	0,566	0,568	20	0,352	0,164	0,518
8	0,448	0,544	0,571	21	0,337	0,115	0,550
9	0,433	0,520	0,586	22	0,519	0,459	0,471
10	0,422	0,540	0,611	23	0,375	0,450	0,542
11	0,409	0,532	0,556	24	0,198	0,141	0,511
12	0,272	0,102	0,520	25	0,250	-	0,371
13	0,234	0,243	0,572	26	0,036	-	0,410

Tabla A1-0-4 Datos galería 1A izquierda

### Galería 2A

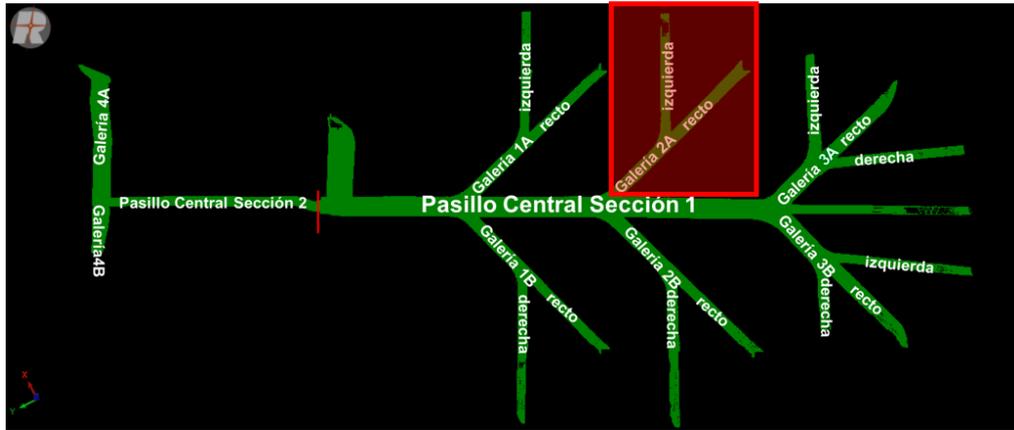


Figura A1-0-7 Galería 2A marcada sobre el túnel completo

### Galería 2A recto

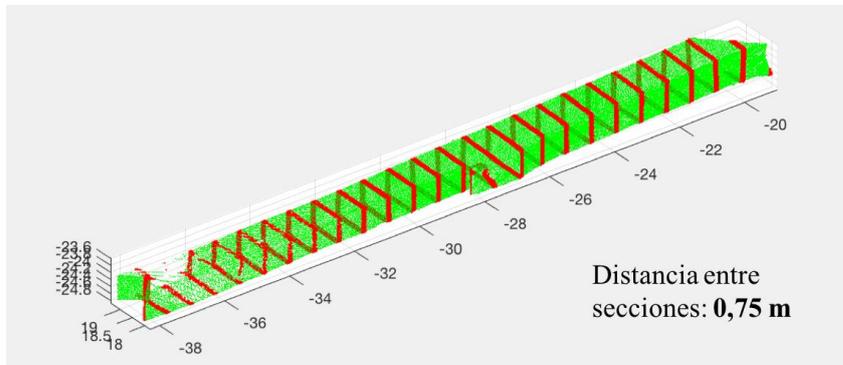


Figura A1-0-8 Galería 2A recto

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,007	-	-	14	0,801	0,745	1,037
2	0,604	0,968	-	15	0,792	0,733	1,049
3	1,100	0,934	1,108	16	0,752	0,709	1,042
4	1,076	0,934	1,109	17	0,753	0,715	1,040
5	1,062	0,921	1,118	18	0,747	0,712	1,039
6	1,030	0,898	1,121	19	0,749	0,711	1,046
7	1,009	0,874	1,134	20	0,765	0,723	1,051
8	1,013	0,864	1,139	21	0,774	0,729	1,047
9	1,007	0,857	1,141	22	0,778	0,727	1,054
10	1,039	0,848	1,167	23	0,772	0,722	0,168
11	1,174	0,823	1,356	24	0,794	0,726	-
12	1,148	0,524	0,636	25	0,857	0,708	-
13	1,075	0,767	1,211	26	0,038	-	-

Tabla A1-0-5 Datos galería 2A recto

*Galería 2 A izquierda*

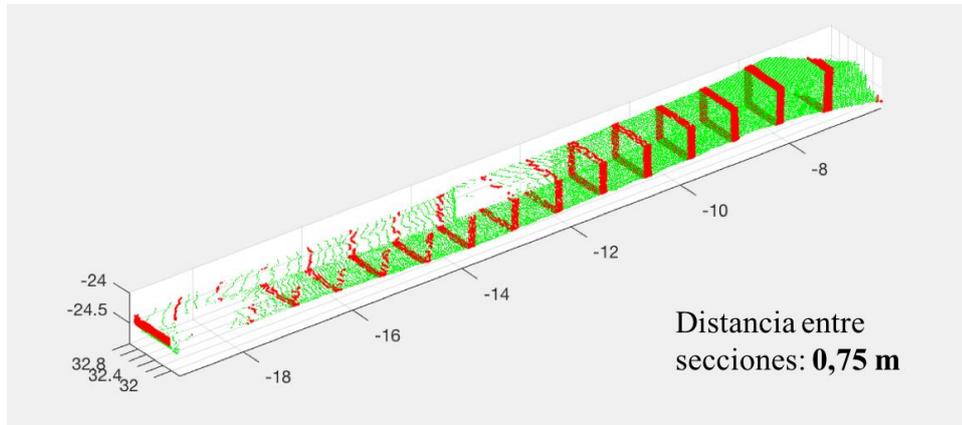


Figura A1-0-9 Galería 2A izquierda

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,004	-	-	10	0,418	-	0,481
2	0,435	0,729	-	11	0,387	-	0,452
3	0,485	0,614	0,758	12	0,352	-	0,487
4	0,420	0,539	0,751	13	0,297	0,116	0,461
5	0,423	0,551	0,755	14	0,242	-	0,447
6	0,431	0,554	0,765	15	0,240	-	0,749
7	0,424	0,547	0,759	16	0,080	3,622	-
8	0,430	0,546	0,156	17	0,116	-	0,400
9	0,451	0,558	0,152				

Tabla A1-0-6 Datos galería 2A izquierda

### Galería 3 A

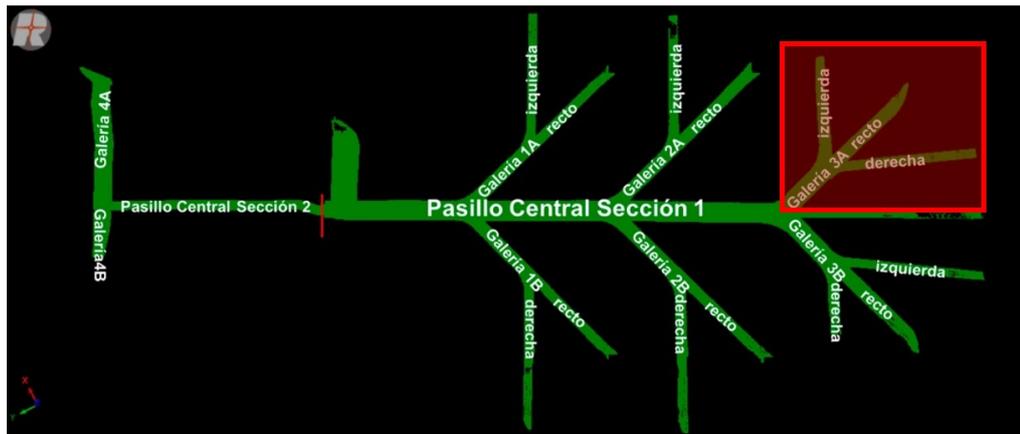


Figura A1-0-10 Galería 3A marcada sobre el túnel completo

### Galería 3 A recto

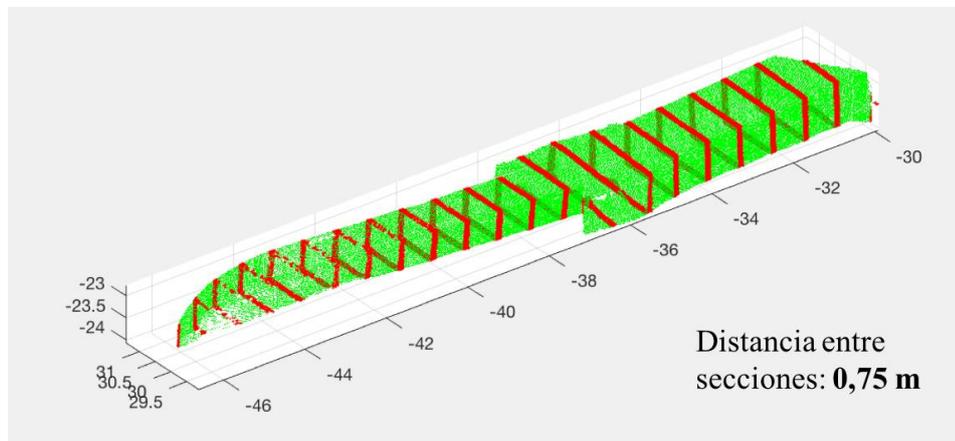
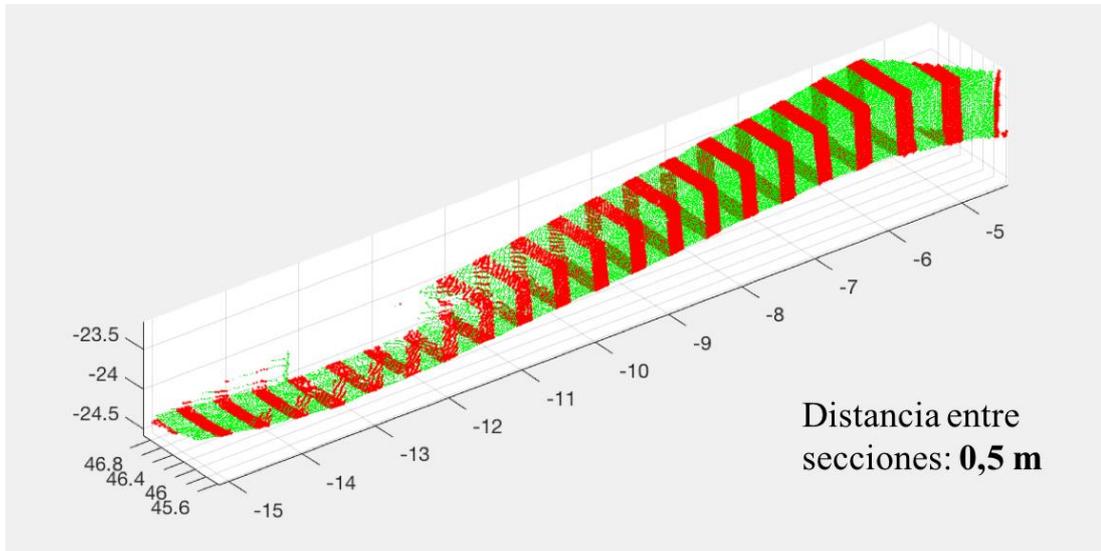


Figura A1-0-11 Galería 3A recto

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,060	-	-	12	0,708	0,646	1,080
2	1,093	1,011	-	13	0,709	0,644	1,069
3	1,570	0,989	1,530	14	0,701	0,648	1,070
4	1,541	0,978	1,535	15	0,692	0,642	1,070
5	1,500	0,955	1,534	16	0,689	0,642	1,071
6	1,489	0,936	1,546	17	0,688	0,644	1,067
7	1,513	0,915	1,567	18	0,699	0,642	0,155
8	1,733	0,760	1,796	19	0,645	0,624	-
9	1,762	0,740	-	20	0,463	0,638	-
10	1,319	0,704	0,515	21	0,272	0,335	-
11	0,731	0,659	1,086	22	0,017	-	-

Tabla A1-0-7 Datos galería 3A recto

*Galería 3 A izquierda*



**Figura A1-0-12 Galería 3A izquierda**

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,069	-	0,114	12	0,403	0,386	0,509
2	0,502	0,825	0,161	13	0,394	0,370	0,500
3	0,733	0,783	0,760	14	0,376	0,373	0,499
4	0,611	0,522	0,641	15	0,341	0,322	0,470
5	0,539	0,495	0,604	16	0,177	0,308	0,496
6	0,536	0,486	0,608	17	0,159	0,268	0,473
7	0,505	0,466	0,596	18	0,170	0,265	0,460
8	0,488	0,456	0,588	19	0,214	0,223	0,424
9	0,468	0,434	0,607	20	0,171	0,183	0,419
10	0,454	0,408	0,588	21	0,071	0,134	0,390
11	0,424	0,401	0,530	22	0,005	-	0,218

**Tabla A1-0-8 Datos galería 3A izquierda**

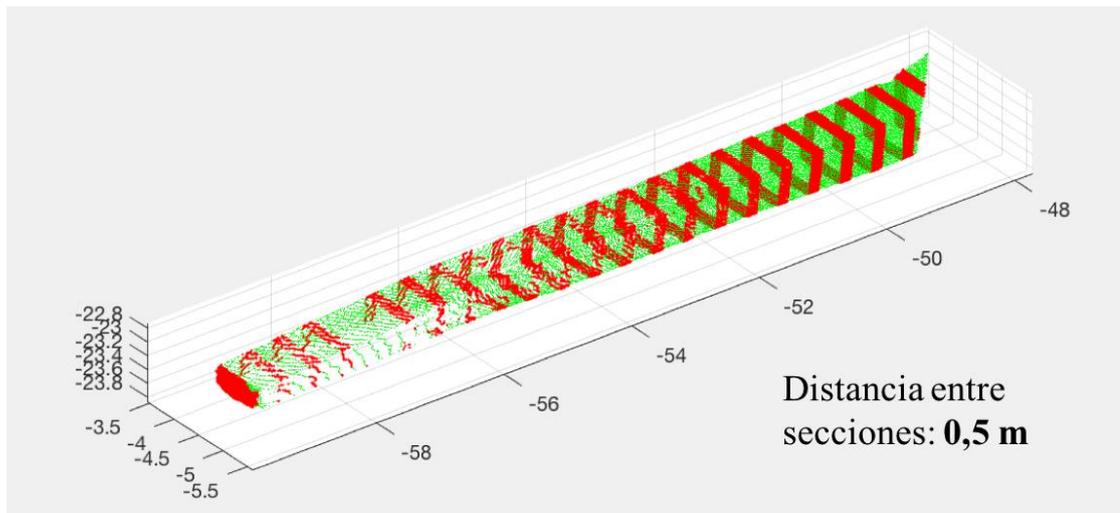
*Galería 3 A derecha*

Figura A1-0-13 Galería 3A derecha

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	-	-	-	13	0,428	0,524	0,556
2	0,390	-	0,285	14	0,417	0,509	0,566
3	0,544	0,362	0,648	15	0,411	0,497	0,532
4	0,526	0,401	0,628	16	0,378	0,316	0,533
5	0,507	0,409	0,623	17	0,364	0,320	0,627
6	0,487	0,418	0,615	18	0,351	0,259	0,563
7	0,477	0,428	0,588	19	0,321	0,241	0,502
8	0,456	0,444	0,561	20	4,660	-	-
9	0,446	0,547	0,574	21	0,290	0,205	-
10	0,440	0,538	0,580	22	0,276	0,220	-
11	0,445	0,537	0,579	23	0,252	-	-
12	0,439	0,537	0,577	24	0,233	-	-

Tabla A1-0-9 Datos galería 3A derecha

*Galería 1B*

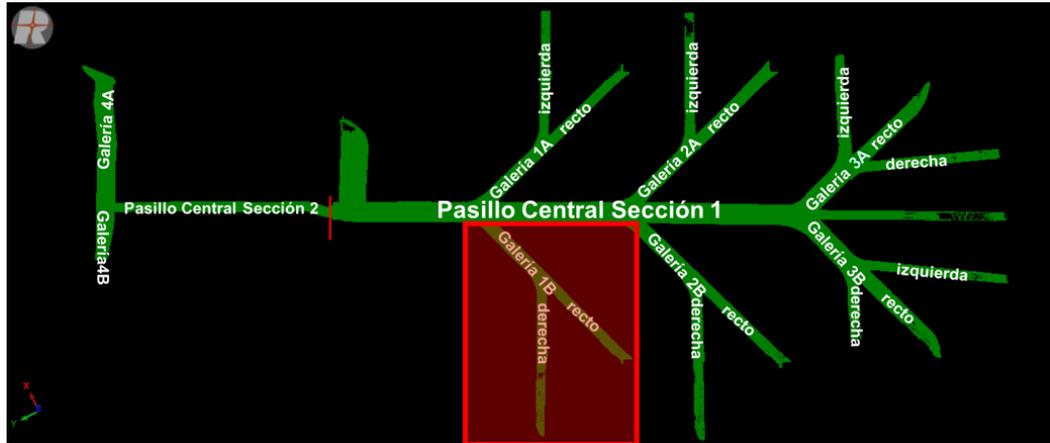


Figura A1-0-14 Galería 1B marcada sobre el túnel completo

*Galería 1B recto*

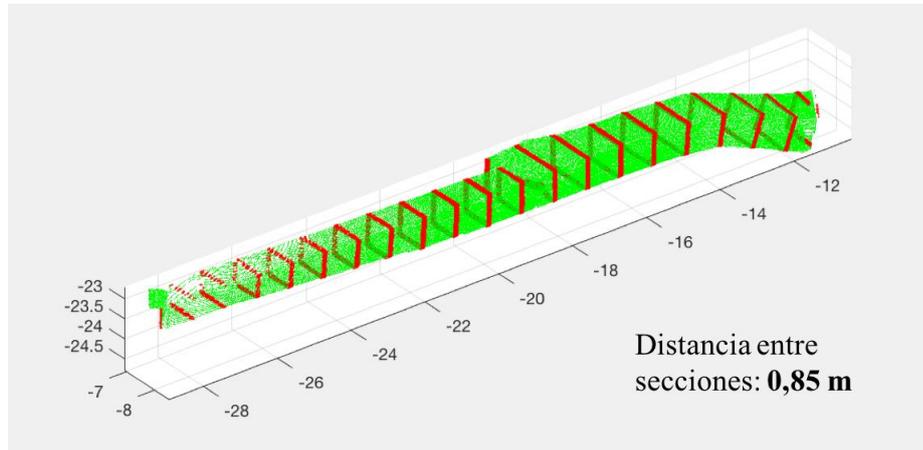


Figura A1-0-15 Galería 1B recto

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,005	-	-	12	0,666	0,795	0,808
2	0,609	0,343	0,641	13	0,652	0,802	0,797
3	0,929	0,811	1,158	14	0,631	0,773	0,800
4	0,910	0,815	1,136	15	0,610	0,745	0,808
5	0,929	-	0,755	16	0,571	0,696	0,804
6	0,933	0,793	1,108	17	0,527	0,639	0,804
7	0,941	0,809	1,107	18	0,504	0,611	0,816
8	0,919	0,806	1,071	19	0,463	0,566	0,815
9	1,013	0,782	1,227	20	0,433	0,528	0,210
10	1,119	0,674	0,513	21	0,405	0,504	-
11	1,049	0,791	1,053	22	0,022	-	-

Tabla A1-0-10 Datos galería 1B recto

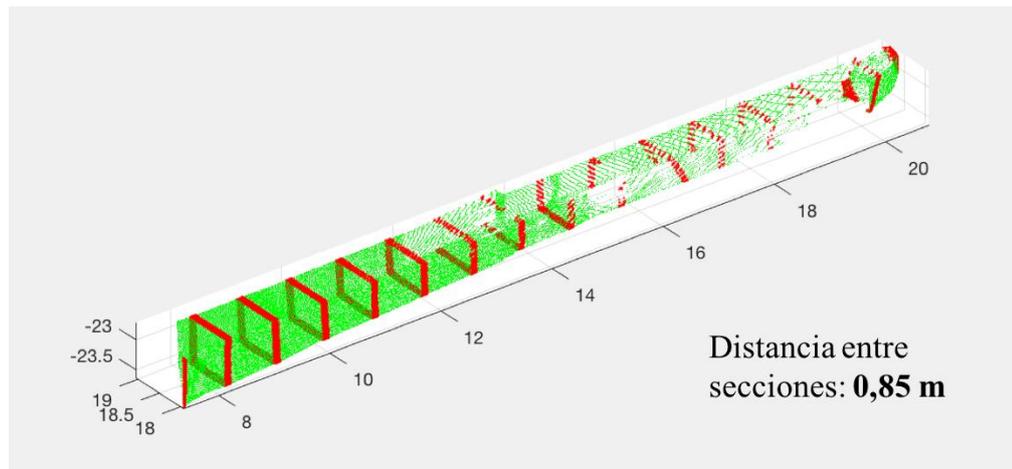
*Galería 1B derecha*

Figura A1-0-16 Galería 1B derecha

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,062	0,138	NaN	9	0,451	0,496	0,115
2	0,367	0,510	0,557	10	0,459	0,529	0,117
3	0,200	0,101	0,390	11	0,476	0,568	0,833
4	0,315	-	0,385	12	0,511	0,612	0,821
5	0,324	0,130	0,412	13	0,546	0,658	0,817
6	0,410	0,617	-	14	0,615	0,727	0,826
7	0,317	-	0,674	15	0,659	0,778	0,820
8	0,350	-	0,440	16	0,045	-	-

Tabla A1-0-11 Datos galería 1B derecha

## Galería 2B

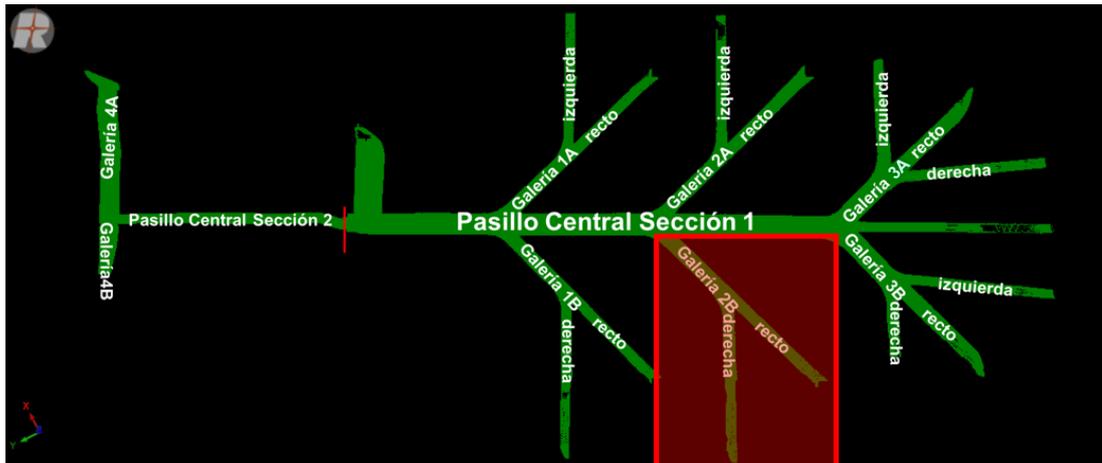


Figura A1-0-17 Galería 2B marcada sobre el túnel completo

## Galería 2B recto

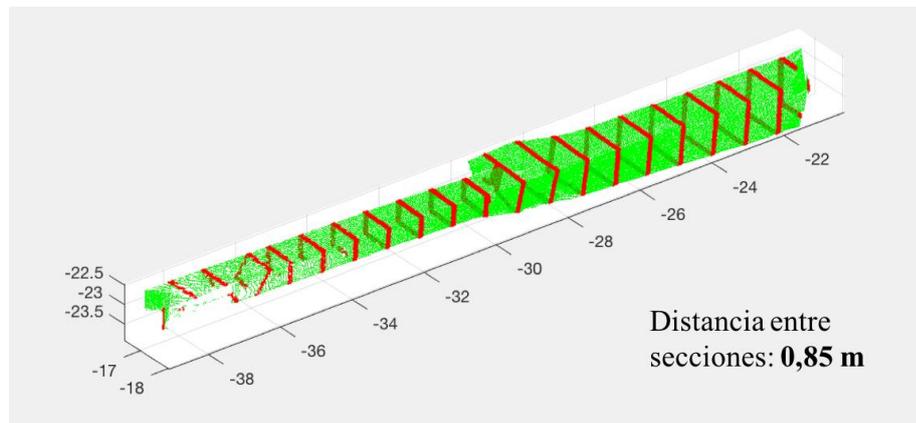


Figura A1-0-18 Galería 2B recto

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,012	-	-	12	0,474	0,515	0,822
2	0,838	1,129	-	13	0,454	0,528	0,814
3	1,295	1,131	1,101	14	0,454	0,526	0,818
4	1,276	1,108	1,109	15	0,449	0,526	0,816
5	1,217	1,058	1,105	16	0,454	0,533	0,815
6	1,161	1,009	1,097	17	0,457	0,543	0,814
7	1,122	0,972	1,105	18	0,451	0,544	0,808
8	1,084	0,937	1,108	19	0,550	0,689	0,868
9	1,187	0,899	1,219	20	0,552	0,112	0,235
10	1,231	0,837	-	21	0,275	0,542	-
11	0,948	0,662	0,934	22	0,022	-	-

Tabla A1-0-12 Datos galería 2B recto

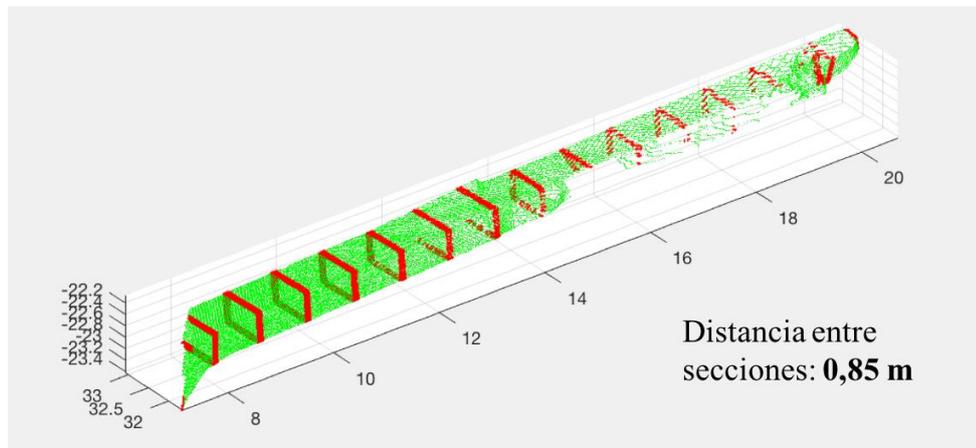
*Galería 2B derecha*

Figura A1-0-19 Galería 2B derecha

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,029	-	-	9	0,420	0,511	0,110
2	0,286	0,223	0,291	10	0,430	0,510	0,118
3	0,192	-	0,371	11	0,415	0,513	0,799
4	0,323	0,109	0,414	12	0,424	0,514	0,805
5	0,263	-	0,424	13	0,427	0,518	0,810
6	0,273	-	0,501	14	0,421	0,515	0,803
7	0,210	-	0,451	15	0,428	0,513	-
8	0,369	0,490	0,741	16	0,008	-	-

Tabla A1-0-13 Datos galería 2B derecha

### Galería 3B



Figura A1-0-20 Galería 3B marcada sobre el túnel completo

### Galería 3B recto

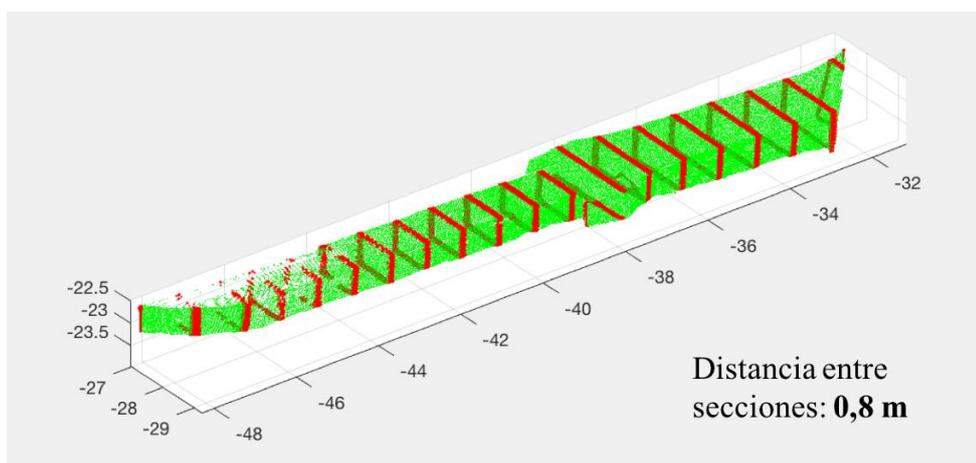


Figura A1-0-21 Galería 3B recto

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,009	-	-	12	0,729	0,653	1,014
2	0,682	-	0,421	13	0,727	0,656	0,994
3	1,387	0,808	1,513	14	0,726	0,659	0,996
4	1,225	0,777	1,501	15	0,745	0,660	0,998
5	1,209	0,755	1,510	16	0,723	0,644	1,002
6	1,176	0,730	1,511	17	0,643	0,666	0,989
7	1,148	0,716	1,501	18	0,674	0,659	0,985
8	1,221	0,506	0,995	19	0,639	0,653	-
9	1,460	0,661	-	20	0,414	0,307	-
10	0,978	0,641	1,127	21	0,021	-	-
11	0,719	0,634	1,029				

Tabla A1-0-14 Datos galería 3B recto

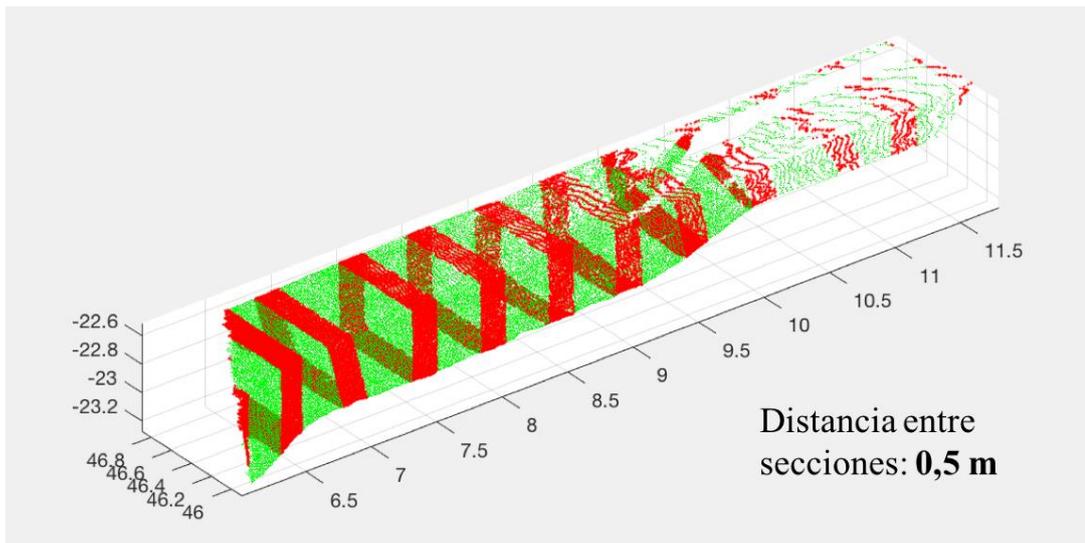
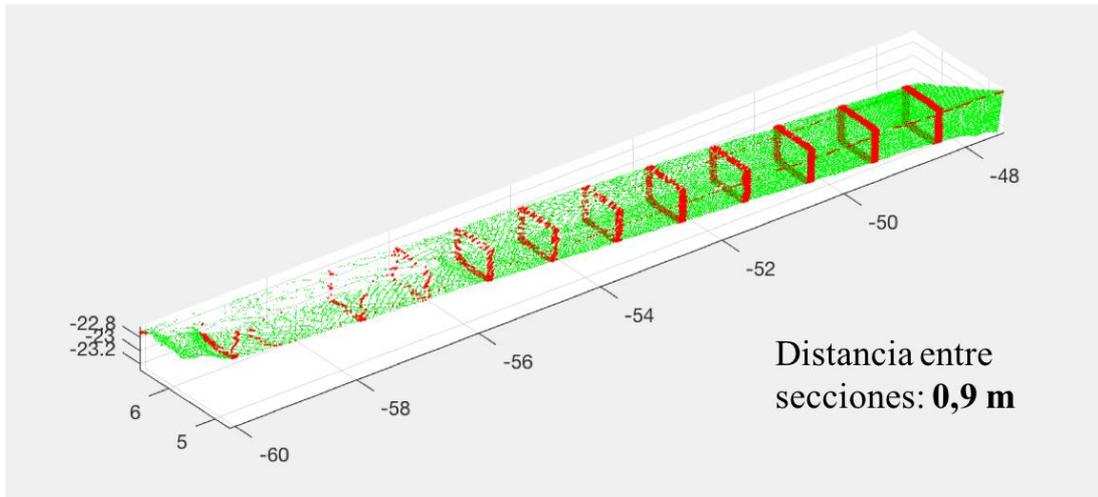
*Galería 3B derecha*

Figura A1-0-22 Galería 3B derecha

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,046	0,116	0,322	7	0,382	0,510	0,541
2	0,117	0,157	0,408	8	0,386	0,513	0,540
3	0,176	0,324	0,444	9	0,386	0,520	0,538
4	0,160	0,193	0,414	10	0,415	0,537	0,525
5	0,301	0,379	0,470	11	0,464	0,560	0,367
6	0,372	0,493	0,511	12	0,051	-	0,101

Tabla A1-0-15 Datos galería 3B derecha

*Galería 3B izquierda*



**Figura A1-0-23 Galería 3B izquierda**

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	-	-	-	8	0,355	0,492	0,712
2	0,394	-	0,433	9	0,331	0,464	0,706
3	0,386	0,315	0,721	10	0,324	0,256	0,693
4	0,386	0,402	0,726	11	0,293	0,273	0,702
5	0,372	0,502	0,716	12	7,892	0,416	-
6	0,367	0,503	0,722	13	0,215	-	-
7	0,366	0,500	0,724	14	0,002	-	-

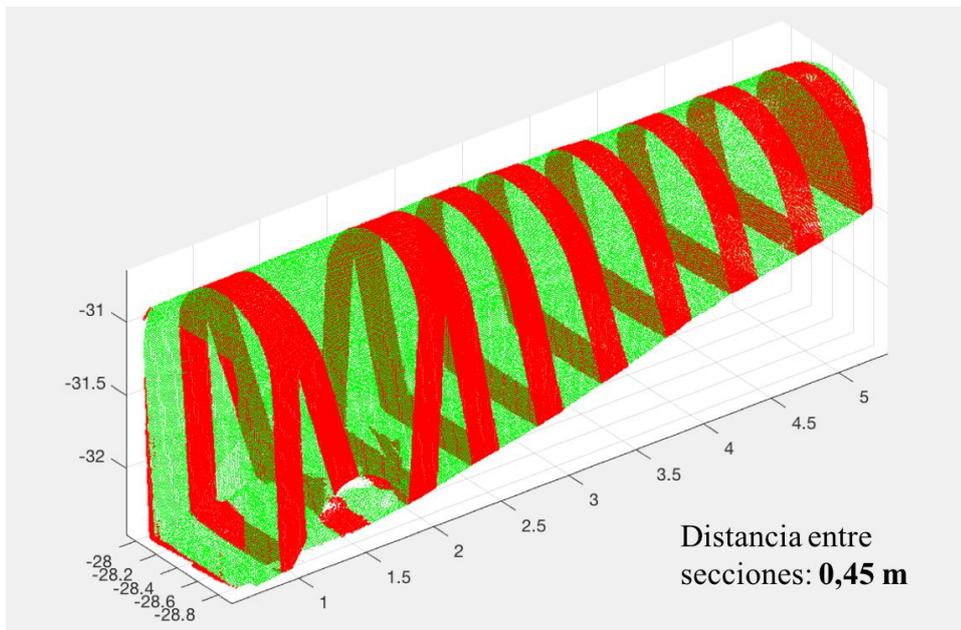
**Tabla A1-0-16 Datos galería 3B izquierda**

**Galerías 4 (A y B)**



**Figura A1-0-24 Galerías 4 marcadas sobre el túnel completo**

**Galería 4B**

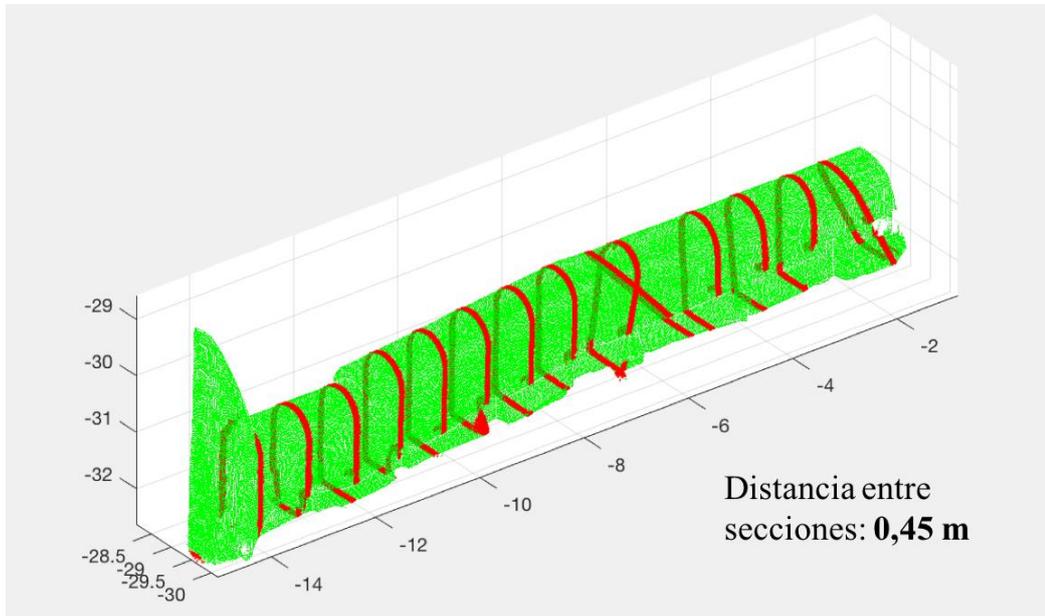


**Figura A1-0-25 Galería 4B**

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,642	0,450	0,511	7	1,315	1,440	0,904
2	0,748	0,891	0,755	8	1,375	1,498	0,888
3	0,839	0,981	0,849	9	1,517	1,166	0,916
4	0,975	1,102	0,903	10	1,506	1,699	0,887
5	1,100	1,222	0,904	11	0,732	1,663	0,241
6	1,221	1,348	0,904				

**Tabla A1-0-17 Datos galería 4B**

*Galería 4A*



**Figura A1-0-26 Galería 4 A**

Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)	Sección	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Anchura (m)
1	0,056	-	-	9	1,767	1,584	0,884
2	1,869	0,343	0,964	10	1,779	1,843	0,886
3	1,542	0,391	0,875	11	1,748	2,026	0,881
4	1,608	0,518	0,891	12	1,768	1,987	0,880
5	1,592	0,569	0,881	13	1,588	1,544	0,909
6	2,197	1,425	1,050	14	1,546	0,939	0,750
7	1,790	0,122	0,464	15	1,754	0,935	0,940
8	1,711	0,764	0,150				

**Figura A1-0-27 Datos galería 4A**