



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Caracterización y evaluación interna de diques de abrigo en la ENM mediante interpretación conjunta de imágenes GPR y LiDAR

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: José Sanromán Areal

DIRECTORES: Mercedes Solla Carracelas
Iván Puente Luna

CURSO ACADÉMICO: 2016-2017

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Caracterización y evaluación interna de diques de abrigo en la ENM mediante interpretación conjunta de imágenes GPR y LiDAR

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

El análisis estructural, tanto en superficie como en profundidad, del estado actual de los diques de abrigo de la ENM, en base a la evaluación de una zona de estudio situada en el dique Oeste de dicha institución, se hace posible mediante el empleo conjunto de un radar de subsuelo junto con un escáner láser terrestre. Se trata de técnicas de evaluación no destructiva que no requieren contacto directo con la zona de estudio para su inspección. Particularmente, el georradar permite mapear las capas de material que componen las estructuras de pavimentos, así como patologías o defectos estructurales tales como faltas de materiales u oquedades internas. Por otra parte, el láser escáner terrestre estará orientado a la documentación y evaluación del estado superficial del dique, siendo una técnica de medición que permite reproducir modelos 3D de la realidad física de la zona de estudio, ortoimágenes y geometría de precisión. En base a esta información se pueden detectar defectos superficiales tales como grietas, abombamientos, falta y/o desplazamiento de adoquinado, falta de juntas y diferenciación de otros materiales de construcción utilizados en tareas de conservación y mantenimiento. La interpretación conjunta de ambos métodos permitirá hacer un análisis, tanto interno como externo, del dique. Asimismo, se buscarán relaciones entre las distintas anomalías encontradas, tratando de identificar el origen de los fallos observados en superficie, con el láser escáner, en los datos georradar a profundidad. De este modo, se localizan zonas críticas en cuanto a la estabilidad del pavimento, lo que ayuda a la planificación de posteriores actuaciones de intervención.

PALABRAS CLAVE

Georradar, láser escáner terrestre, subsuelo, modelos 3D, falta de relleno, grietas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los profesores Mercedes Solla Carracellas e Iván Puente Luna su asesoramiento constante, como guía durante la realización del presente Trabajo, infundiendo en mí el entusiasmo necesario para ello, animándome siempre a su mejor consecución.

Le dedico este Trabajo a Ana, por su apoyo sin límites, generoso y por seguir enseñándome a alcanzar juntos nuevos logros.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y Objetivos	7
1.1 Justificación del trabajo	7
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivos generales	9
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
1.3 Organización de la memoria	9
2 Estado del arte	11
2.1 El georradar o radar de subsuelo.....	11
2.1.1 Definición y evolución histórica	11
2.1.2 Ámbitos de aplicación.....	16
2.1.3 Ventajas e inconvenientes del método	16
2.1.4 Componentes de un georradar	17
2.1.5 Fundamentos teóricos.....	18
2.1.5.1 Ecuaciones de Maxwell	18
2.1.5.2 Parámetros electromagnéticos de los medios	19
2.1.5.3 Principios básicos de funcionamiento	20
2.2 El Láser Escáner Terrestre (LiDAR)	24
2.2.1 Definición y evolución histórica	24
2.2.2 Ámbitos de aplicación.....	28
2.2.3 Ventajas e inconvenientes del método	29
2.2.4 Componentes de un láser escáner.....	30
2.2.5 Fundamentos teóricos.....	32
2.2.5.1 La telemetría láser	32
2.2.5.2 Clasificación de peligro del láser	33
2.2.5.3 Características prácticas del escáner láser	34
3 Desarrollo del TFG.....	35
3.1 Introducción	35
3.1.1 Área de estudio	35
3.2 El Georradar o Radar de Subsuelo (GPR)	36
3.2.1 Configuración del equipo y toma de datos	36

3.2.2	Procesado de datos 2D para la antena de 500 MHz	37
3.2.2.1	<i>Ajuste del tiempo cero</i>	38
3.2.2.2	<i>Filtro 1D (filtro vertical/temporal)</i>	39
3.2.2.3	<i>Ganancia</i>	40
3.2.2.4	<i>Filtro 2D (filtro horizontal/espacial)</i>	41
3.2.2.5	<i>Div. (divergence) compensation</i>	41
3.2.2.6	<i>Tiempo de corte de la señal</i>	42
3.2.2.7	<i>Processing flow y procesado 2D para la antena de 800 MHz</i>	42
3.2.3	Procesado de datos 3D	43
3.3	El Láser Escáner.....	44
3.3.1	Configuración del equipo y toma de datos.....	44
3.3.1.1	<i>Resolución de la captura</i>	45
3.3.1.2	<i>Planificación de los estacionamientos</i>	45
3.3.1.3	<i>Captura de las nubes de puntos</i>	45
3.3.2	Procesado de la nube de puntos.....	47
3.3.2.1	<i>Importación de los datos</i>	48
3.3.2.2	<i>Creación de un nuevo proyecto mediante RiSCAN Pro</i>	49
3.3.2.3	<i>Registro de las nubes de puntos</i>	51
3.3.2.4	<i>Filtrado de escaneos</i>	53
3.3.3	Obtención de la ortoimagen	54
4	Resultados e interpretación	57
5	Conclusiones y líneas futuras	63
5.1	Conclusiones	63
5.2	Líneas futuras	63
6	Bibliografía.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Deterioro de la zona de estudio presentando diversas patologías.....	7
Figura 2-1 Diagrama de flujo de un sistema típico GPR (izquierda [10]) y esquema de la realización de un perfil radar (derecha)	11
Figura 2-2 Vista representativa de la exploración con georradar (derecha), imagen de un radargrama obtenido con dicho dispositivo (centro) y estado del P-38 antes de ser desmontado para su recuperación (derecha) [13]	13
Figura 2-3 Radargrama procedente de Georradar GSSI, con una antena biestática de 400 MHz [17]	14
Figura 2-4 Radargrama procedente de Georradar Noggin, con una antena biestática de 250 MHz [18]	14
Figura 2-5 Radargrama obtenido con una antena de 1600 MHz [19]	15
Figura 2-6 Radargrama obtenido a partir de una antena con frecuencia de trabajo de 400 MHz [20]	15
Figura 2-7 Componentes de un georradar	17
Figura 2-8 Toma de perfiles con antenas monoestáticas (izquierda [32]) y biestáticas (derecha y centro [33]).....	18
Figura 2-9 Forma de la señal (izquierda arriba) y espectro del impulso generado (izquierda abajo) por una antena georradar de 900 MHz de frecuencia central y presentación de radargrama (derecha) [7]	21
Figura 2-10 Asignación de una paleta de color, en escala de grises, a los valores de amplitud de reflexión registrados [12]	22
Figura 2-11 Esquema de un láser [39].....	25
Figura 2-12 Ejemplos de dispositivos LiDAR. Láser escáner terrestre Marca Riegl, modelo LMS Z-390-i (izquierda) y láser escáner móvil montado sobre vehículo para mapeado de carreteras de marca Lynx [8].....	25
Figura 2-13 Imagen de la nube de puntos resultante (derecha) y vista de la localización (derecha) de un tramo de Camino de Santiago en Lalín, Pontevedra [48]	26
Figura 2-14 Vista la superficie viaria junto con sus márgenes y áreas adyacentes a partir de imágenes obtenidas mediante láser escáner estático en color verdadero (izquierda) y telemétrica (derecha) [49]	27
Figura 2-15 Vista tridimensional del puente romano de Lugo tras procesado de escaneos obtenidos a partir de tecnología LiDAR [50]	27
Figura 2-16 Vistas de dos escaneos obtenidos mediante Láser Escáner Terrestre de un puente localizado a 25 km al Oeste de Tallin, Estonia [51]	28
Figura 2-17 Escaneos procedentes de láser escáner terrestre de un túnel de metro en construcción [68] y de un túnel para la medición de gálibos de la vía [69]	29
Figura 2-18 Componentes y principios de medición a partir de láser escáner TOF de láser pulsado (izquierda) y de diferencia de fase (derecha)	31
Figura 3-1 Vista aérea de localización de la ciudad de Marín (señalada con el círculo rojo) (vista izquierda [76], vista derecha [77])	35

Figura 3-2 Vista aérea de localización de la Escuela Naval Militar, señalando la zona de estudio (señalada con recuadro rojo) (vista izquierda [77], vista derecha [76]).....	36
Figura 3-3 Equipo GPR empleado para la toma de datos	37
Figura 3-4 ReflexW. Interfaz inicial del programa, que posibilita la elección entre los módulos 2D y 3D.....	38
Figura 3-5 Vista del radargrama de 500 MHz en bruto.....	38
Figura 3-6 Corrección del tiempo cero de inicio de profundidades: antes (arriba) y después (abajo) de la corrección	39
Figura 3-7 Aplicación del filtro vertical (dewow): antes (arriba) y después (abajo) del filtrado....	40
Figura 3-8 Radargrama de 500 MHz tras aplicar la ganancia	40
Figura 3-9 Radargrama de 500 MHz antes (arriba) y después (abajo) de aplicar el filtro “ <i>subtracting average</i> ”	41
Figura 3-10 Radargrama de 500 MHz tras aplicar el filtro de compensación de divergencia geométrica.....	41
Figura 3-11 Radargrama de 500 MHz tras aplicar el recorte de la ventana de tiempos a 50 ns	42
Figura 3-12 Radargramas procesados mediante la secuencia de filtrado 2D utilizada para antenas de 500 MHz (arriba) y 800 MHz (abajo)	43
Figura 3-13 Vista del cubo 3D generado a partir de los datos de 500 MHz	43
Figura 3-14 Vista del equipo durante la toma de datos y display de la pantalla táctil que incorpora (imágenes centro y derecha [73]).....	44
Figura 3-15 Pantalla principal del software Scene. Pestaña “ <i>Processing</i> ” [84].....	46
Figura 3-16 Pantalla principal del software Scene. Pestaña “ <i>Import</i> ” [84].....	47
Figura 3-17 Pantalla principal del software Riegl RiScan Pro, en su versión 1.8.1.....	48
Figura 3-18 Project Manager permite la importación de escaneos a partir de “ <i>New scanposition</i> ”	49
Figura 3-19 Selección del tipo de vista de los escaneos previamente al registro mediante “ <i>Select view type</i> ”	50
Figura 3-20 Registro de dos vistas para crear una nube de puntos usando la herramienta “ <i>Coarse registration</i> ”, mostrando su vista inicial (izquierda) y cuando proporciona la desviación estándar final obtenida (derecha)......	51
Figura 3-21 Selección de puntos homólogos mediante la herramienta “ <i>Coarse registration</i> ”	52
Figura 3-22 Vista de la interfaz tras finalizar el tercer registro de nubes de puntos	53
Figura 3-23 Vista de la interfaz durante el proceso de filtrado “ <i>Octree</i> ”, con un incremento de 0,01 m.....	54
Figura 3-24 Vista de la ventana principal del software CloudCompare, representando una vista 3D [87]	54
Figura 3-25 Ortofoto en color verdadero (superior) y falso color con representación de altura (DEM) (inferior)	55

Figura 4-1 Comparación de radargramas 2D finales procedentes de antenas de 800 MHz (superior) y de 500 MHz, (inferior), para diferenciar la resolución y la capacidad de penetración de ambas frecuencias	57
Figura 4-2 Vista del lateral del dique desde su cada Este	58
Figura 4-3 Vista del radargrama 3D final para la antena 800 MHz, con una profundidad de 20 cm (superior) y de 40 cm (inferior).....	58
Figura 4-4 Vista del radargrama 3D final para la antena 500 MHz, con profundidad de 20 cm (superior) y de 60 cm (inferior).....	59
Figura 4-5 Ortoimagenes con vista de la planta del área de estudio, en color verdadero (superior) y modelo digital en elevación en falso color (inferior)	59
Figura 4-6 Interpretación de la ortoimagen digital en elevación (superior), corte horizontal 3D correspondiente a la antena de 800 MHz, a una profundidad de 40 cm (centro) y fotografía de la superficie de rodadura del pavimentado de la zona de estudio (inferior)	60
Figura 4-7 Interpretación de la ortoimagen digital en elevación (superior), corte horizontal 3D correspondiente a la antena de 500 MHz, a una profundidad de 60 cm (centro) y tres fotografías de la superficie de rodadura del pavimentado de la zona de estudio (inferior)	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Frecuencia central de trabajo de diferentes antenas, con referencia a sus principales aplicaciones.....	18
Tabla 2-2 Parámetros electromagnéticos y velocidad de propagación las ondas electromagnéticas para diferentes medios	20
Tabla 2-3 Ejemplos de resolución obtenidas, según las condiciones del medio, en base a las frecuencia de trabajo utilizadas para el estudio	24
Tabla 2-4 Clasificación de los sistemas láser	33
Tabla 3-1 Filtros y parámetros utilizados para el procesado 2D de datos de 500 y 800 MHz.....	42

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación del trabajo

Durante este año la Escuela Naval Militar (en adelante ENM) celebra el 300 aniversario de la creación de esta institución como primer centro de formación de la Armada Española. Fiel a sus principios, en tierra o a flote, por ella han pasado los alumnos que posteriormente han formado el cuadro de oficiales de los distintos Cuerpos de la Armada. Nos tenemos que remontar hasta el año 1943, momento en el que se constituyó, en la ciudad de Marín (Pontevedra), las actuales instalaciones de la ENM. Desde su construcción, el trasiego diario de dotación y alumnos con fines de instrucción, así como de vehículos ligeros y pesados con tareas principalmente logísticas ha sido continuo tanto por la explanada principal de la Escuela como por el espigón y los diques de abrigo que alberga. A este uso diario y prolongado de las instalaciones, y en concreto, de la infraestructura viaria, se le suma la acción de las mareas sobre los diques de la ENM y los daños asociados como posible lavado de material en el relleno de la explanada colindante al mar.



Figura 1-1 Deterioro de la zona de estudio presentando diversas patologías

El presente Trabajo Fin de Grado (en adelante TFG) está enmarcado dentro de la Asignatura de Topografía y Construcción, perteneciente a los alumnos del Cuerpo de Infantería de Marina de Cuarto Curso del Grado de Ingeniería Mecánica que se imparte en el Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar. En concreto, se dirige al análisis de una zona perteneciente al dique de abrigo Oeste de la ENM situado entre el edificio Isaac Peral y el Patrullero Tabarca (P-28), de la Clase Anaga, con base en la misma institución. Dicha zona presenta en superficie diferentes anomalías estructurales que podrían llegar a ser zonas críticas para la estabilidad del conjunto del pavimentado, como muestra la Figura 1-1 y, por tanto, su evaluación puede caracterizar el estado del conjunto de diques de abrigo de la ENM. La explanada anexa al cantil del área de evaluación se ejecutó a partir de

relleno portuario heterogéneo, ganado al mar durante la construcción de la ENM, desde el 26 de Marzo de 1939 hasta su finalización dos años después de su inauguración el 15 de Agosto de 1943. El proyecto, de gran impacto tanto económico como laboral, con un coste total de cincuenta y cuatro millones de pesetas, se realizó a partir de los terrenos de la antigua Base Naval de Marín, la cual albergaba el Centro de Tiro y Calibración Naval inaugurado en 1916 [1]. En aquellos años, los materiales de relleno procedían principalmente de labores de construcción vecinas necesarias para la conformación de los 204.900 m³ de superficie ganada al mar y destinada tanto a diques como a instalaciones deportivas, siendo la ampliación del Puerto de Marín una ejecución contemporánea a la de la ENM [2]. Estos materiales fueron compactados mediante medios mecánicos, según las técnicas apropiadas de la época. En su superficie, se ejecutó un adoquinado tradicional que unía sus elementos con morteros y lechadas al uso. Con el paso de los años, el paso de vehículos y cargas provocó la degradación de su superficie original, siendo estas patologías (hundimientos parciales, cuarteados y fracturas) corregidas mediante la adición de capas de material diverso, llegando en algunas zonas incluso a cubrir el adoquinado original (ver Figura 1-1). Es de reseñar que no se efectuaron obras dirigidas a la reparación del dique durante las posteriores ejecuciones tras la inauguración de la ENM, destinadas a la construcción del Polideportivo y la piscina (durante los años finales de la década de los cuarenta), del cuartel de alumnos “Francisco Moreno” y del Edificio de aulas “Isaac Peral” (en 1975) así como del Edificio Príncipe de Asturias (en 1990), llevándose a cabo solo obras menores de adecuación de la superficie del pavimentado de la zona de estudio [3]. Actualmente, su superficie exterior es irregular y presenta, a la vista, continuos desniveles en el adoquinado que se acentúan con huecos localizados en algunas zonas aisladas. Su existencia reduce la eficiencia para el tránsito de vehículos, a la vez que aumenta el riesgo de deslizamiento de los mismos. El deterioro de esta capa de rodadura también supone una amenaza física al personal de la ENM que hace uso de esta zona de paso.

Por todo lo anteriormente expuesto, el análisis que se lleva a cabo en este trabajo pretende singularizar las causas del deterioro en la capa de rodadura de dicha superficie, así como la valoración de estas centrándonos en el estudio interno de la estructura del dique y el estado de sus materiales de relleno con la ayuda de métodos de inspección no destructiva. Las técnicas no destructivas o NDT (*Non Destructive Testing* [4]) se refieren a “examen, test o evaluación llevada a cabo sobre cualquier objeto sin cambiar o alterar sus propiedades, para determinar la presencia o ausencia de ciertas condiciones o discontinuidades que puedan alterar su utilidad o servicio” [5]. Estos procedimientos se usan para la configuración y evaluación de estructuras tanto externas como internas, abordando el estudio sin necesidad de mantener un contacto directo con la construcción (pues no exige la realización de perforaciones o excavaciones, por ejemplo). Asimismo, estas técnicas también ofrecen una cuantificación del alcance del daño, puesto que permiten la medición de otras características geométricas como su dimensión o tamaño, disposición, etc.

En un primer lugar se empleará un georradar o radar de subsuelo, con la denominación en inglés de Ground Penetrating Radar (GPR). Se trata de una técnica geofísica no destructiva, portátil y de prospección, basada en la emisión de pulsos electromagnéticos y en la recogida de sus reflexiones. La presencia e intensidad de estas últimas se producen por los cambios del valor de la constante dieléctrica del terreno asociada directamente a los distintos materiales que este contenga. Mediante este método se consiguen imágenes del subsuelo de alta resolución [6]. El estudio práctico contempla la aplicación del radar de subsuelo con antenas de alta y media frecuencia [7], lo que permitirá estudiar el interior de la explanada a diferentes profundidades y así hacer un diagnóstico más severo del estado de conservación de los materiales de relleno, incluyendo: falta de material, homogeneidad, compactación, etc.

El segundo método aplicado es el láser escáner terrestre o TLS (del inglés *Terrestrial Laser Scanner*). Permite la obtención de la superficie de los objetos de una forma automática mediante el uso de la tecnología LiDAR, esto es, detección y medición de distancias por luz (del inglés *Light Detection and Ranging*). Su principio básico consiste en el uso de un haz láser que mide la distancia entre el instrumento y el objeto. Dependiendo del instrumento (estático o móvil), 1 ó 2 ángulos de desviación

pueden medirse para proporcionar las coordenadas de los puntos requeridos en un sistema de coordenadas esféricas o cilíndricas, respectivamente. Cuando esta operación se repite a lo largo de una zona de observación completa y a una alta velocidad, el instrumento puede calcular la posición relativa de los puntos medidos desde sus puntos circundantes, proporcionando entonces un modelo tridimensional de nube de puntos [8].

En este TFG, y al igual que se mostrará con el georradar, se presentarán los fundamentos del método, precedentes, ventajas e inconvenientes, mostrándose los datos adquiridos, desarrollando su procesado y presentando los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los mismos, desde la obtención del modelo tridimensional de la zona a analizar hasta su explotación de cara a la realización del estudio dimensional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

El objetivo general está dirigido al estudio de la zona de estudio, situada en el dique de abrigo Oeste de la ENM, adyacente al edificio Isaac Peral de dicha institución a partir de la obtención de datos mediante tecnologías 3D GPR y LiDAR, y posterior procesado de los mismos, singularizando tanto en superficie como en profundidad el estado de los materiales de relleno que lo componen. Con ello, una vez determinadas las zonas más afectadas, se determinará la naturaleza de su situación, señalando las actuaciones de conservación a realizar en caso de ser necesarias. Se pretende por tanto mantener la conservación de los materiales de la construcción al mismo tiempo que se ofrece la seguridad tanto por parte del personal como de los vehículos que transitan la zona en el funcionamiento diario de las instalaciones y su uso.

1.2.2 Objetivos específicos

El presente trabajo incluye los siguientes objetivos específicos a alcanzar:

- Establecer el Estado del Arte de los medios de Evaluación No Destructiva GPR y LiDAR.
- Procesamiento de los datos 2D y 3D, obtenidos estos mediante GPR con anterioridad del presente estudio y, en base a ellos, análisis de la señal obtenida e identificación de zonas dañadas por lavado del material de relleno a diferentes profundidades de la estructura.
- Levantamiento LiDAR de la zona a partir de datos obtenidos mediante láser escáner terrestre ya existentes, desde el pre-procesado de estos hasta la obtención de la nube de puntos resultante de la zona de estudio del dique y su entorno más cercano.
- Procesado de la nube de puntos para la obtención de una ortoimagen RGB final.
- Integración de los datos finales producidos procedentes de GPR y LiDAR, e interpretación conjunta. El objetivo de esta integración es vincular las fallas internas de material deducidas mediante GPR con las deficiencias externas, abombamientos, huecos o falta de juntas en el adoquinado que constituye el pavimento de rodadura del dique advertidas tras el análisis de la imagen RGB y de intensidad obtenidas mediante láser escáner.

1.3 Organización de la memoria

En el Capítulo 1 se presenta tanto la justificación o motivación del presente trabajo fin de grado, como los objetivos que se pretenden para su realización.

En el Capítulo 2, y para cada uno de los métodos aplicados en el presente TFG, se desarrollará el Estado del Arte. En él se presentarán, en primer lugar, los fundamentos y principios básicos de las técnicas, desarrollando posteriormente la evolución histórica y estado actual de las mismas en el

ámbito del TFG. A continuación se enunciarán, en base a la información disponible, las ventajas e inconvenientes de los métodos, así como los componentes principales de ambas técnicas.

En el Capítulo 3, se describe el desarrollo del estudio en campo. Se incluye la descripción del área de estudio, así como las metodologías de adquisición y procesado de datos GPR y TLS.

En el Capítulo 4, se muestran los resultados obtenidos de forma individual por cada técnica, así como una interpretación conjunta de los mismos y detección de las zonas afectadas por falta de relleno, agrietamiento, etc.

En el Capítulo 5, finalmente, se presentan las conclusiones extraídas del desarrollo del TFG, además de unas líneas futuras que podrían ser de interés para futuros trabajos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El georradar o radar de subsuelo

2.1.1 Definición y evolución histórica

El georradar es un radar aplicado al estudio del subsuelo u otro medio material [9]. Se trata de una técnica no destructiva o no invasiva que no necesita la realización de excavaciones u otro tipo de intervención destructiva.

El sistema consiste básicamente en una antena transmisora que emite ondas electromagnéticas a unas determinadas frecuencias y una antena receptora, que detecta las reflexiones que se producen en los objetos de interés, a las que se une un sistema de registro digital o unidad de control. Mientras la antena se desplaza sobre el terreno, esta va emitiendo ondas electromagnéticas pulsadas (con intervalos muy cortos entre pulsos, del orden de nanosegundos -ns-, que son equivalentes a la distancia constante de transmisión-recepción, como se muestra en la Figura 2-1, derecha) a una determinada frecuencia.

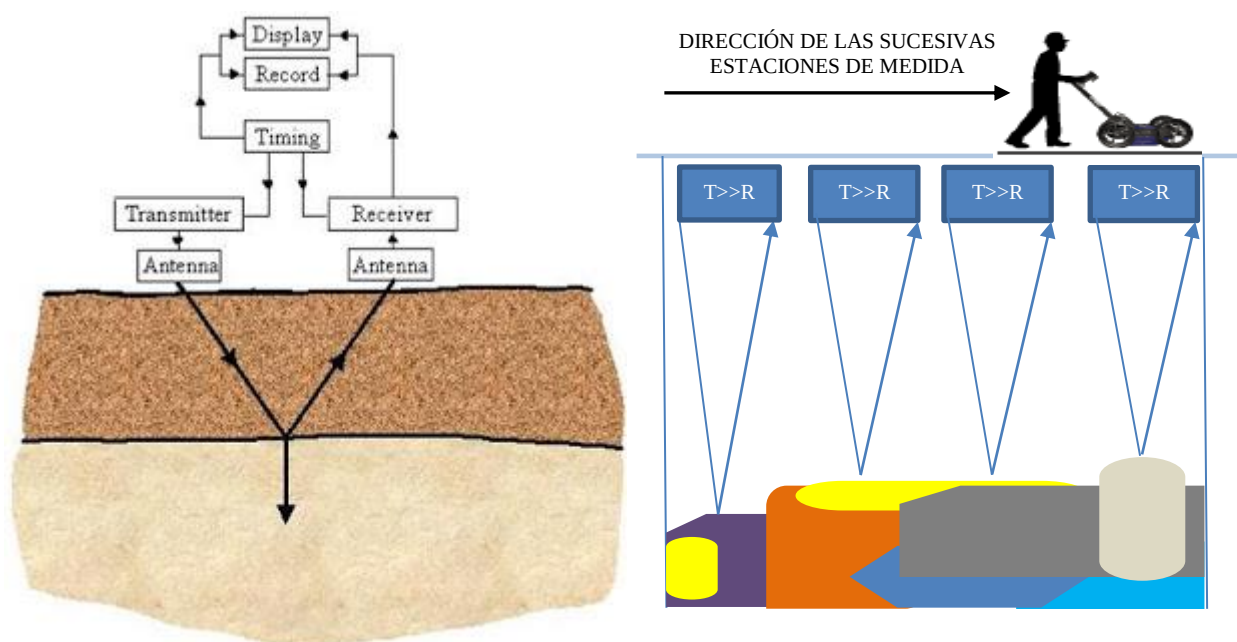


Figura 2-1 Diagrama de flujo de un sistema típico GPR (izquierda [10]) y esquema de la realización de un perfil radar (derecha)

Durante la propagación de la onda electromagnética, parte de esta señal es reflejada en la interfaz entre medios con distintas propiedades dieléctricas (permitividad, permeabilidad y conductividad) y registrada por la antena receptora en superficie. La otra parte de la señal continúa propagándose hasta que encuentra una nueva discontinuidad en profundidad. De este modo, cada pulsación genera una traza que básicamente se corresponde con el historial de reflexiones que se registran en profundidad. La profundidad de alcance es función de la frecuencia de operación, la cual es determinante para cada toma de datos, y varía desde los 25 MHz de la banda HF (*High Frequency*) hasta los 3 GHz, en la banda UHF (*Ultra High Frequency*).

El radar de subsuelo es una técnica cuyos orígenes datan de principios del siglo XX, concretamente en 1904, cuando Christian Hülsmeier inventó el “*Telemobiloscope*”, consiguiendo la primera patente de la denominada tecnología radar. Se trataba de un sistema transmisor-receptor que permitía la detección de objetos metálicos distantes mediante ondas electromagnéticas continuas [11]. Seis años después, en 1910, los geofísicos Gotthelf Leimbach y Heinrich Löwy consiguen aplicar este procedimiento para el estudio del subsuelo con el fin de conocer el emplazamiento de diferentes objetos enterrados bajo tierra. Hasta este momento, todavía se trata de tecnología basada en radar de onda continua. Posteriormente, en el año 1926 el Dr. Hülsenbeck introduce el radar de emisión de onda pulsada, mejorando además la resolución en profundidad. Este radar de onda pulsada, junto con el original de emisión continua, son técnicas radar que han perdurado hasta nuestros días. Es en esta misma década, cuando se encuentran las primeras mediciones a partir del uso de esta tecnología. En 1929, W. Stern consigue medir, a partir del cambio de frecuencia en recepción debido al rebote de la onda en el límite entre materiales de diferente constante dieléctrica, la profundidad de un glaciar situado en Austria [12]. A partir de los años 50, y concretamente en el campo de la geofísica, ha aumentado considerablemente su aplicación en el ámbito civil gracias a las posibilidades que ofrece el georadar en la investigación del subsuelo. Su desarrollo es continuo y, a partir de 1985, comienzan a venderse los primeros sistemas individuales. Es en los años 90 cuando comienzan a redactarse las primeras publicaciones y tratados de referencia de la técnica.

Este creciente interés por la tecnología radar se hace patente tras la recuperación de una aeronave perteneciente al Escuadrón perdido (“*Lost Squadron*”) [13]. En el mes de Junio de 1942, Estados Unidos inició la Operación Bolero, que consistía en el envío de tropas y aviones de combate hasta Gran Bretaña para formar parte de la fuerza estratégica que entraría en guerra para liberar Europa. El 7 de Julio de 1942, un escuadrón formado por seis aeronaves de combate P-38 y dos bombarderos B-17, al mando del Comandante Carl Rudder, se encontraba volando la ruta entre Isla Presque (Maine) y Escocia, con sendos repostajes en Labrador y Groenlandia. Tras repostar en Groenlandia, camino a Islandia se vieron sorprendidos por una tormenta, por lo que el personal al mando decidió regresar a Groenlandia de nuevo. La escasa visibilidad reinante y problemas en las comunicaciones obligaron a mantenerse en vuelo más del tiempo permitido, teniendo entonces que aterrizar sobre el hielo ante la imposibilidad de regresar a una pista segura. La comunicación previa al aterrizaje posibilitó el rescate de los veinticinco miembros de la tripulación, pero no así de las ocho aeronaves. Es en 1990 cuando Pat Epps, un mecánico de aviones, consiguió con la ayuda de un geofísico islandés y un radar de exploración terrestre ubicar inicialmente uno de los aviones (como ilustra la Figura 2-2, izquierda), un B-17 aplastado en su totalidad, para más tarde ser capaz de localizar las restantes siete enormes formas bajo el hielo. El avión al que se accedió se encontraba, tras 48 años, bajo una capa de hielo y nieve de casi 80 metros. Ya en 1992, con financiación privada, se logró acceder a un P-38 en muy buen estado, bautizado como la Chica del Hielo (*Glacier Girl*) como se muestra en la Figura 2-2 (derecha). Pudo ser recuperado tras acceder a su ubicación mediante un proceso de Cold mining, a partir de taladros térmicos (cilindro envuelto en espirales de cobre con agua caliente como agente descongelante) superiores a un metro de diámetro. La Figura 2-2 (centro) muestra un radargrama obtenido por el georadar, donde se pueden diferenciar superficie, capa de hielo y una aeronave en sí misma.

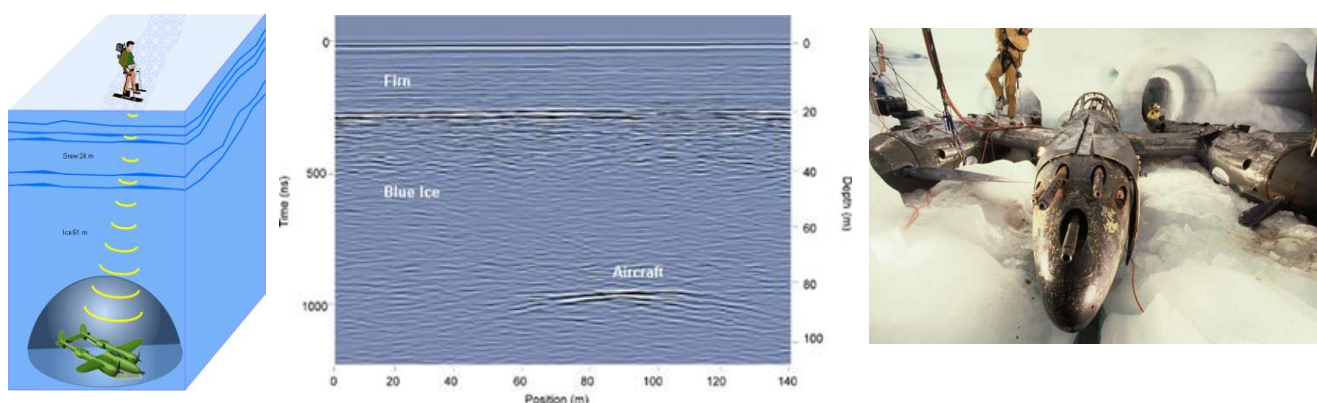


Figura 2-2 Vista representativa de la exploración con georradar (derecha), imagen de un radargrama obtenido con dicho dispositivo (centro) y estado del P-38 antes de ser desmontado para su recuperación (derecha) [13]

La utilización del georradar en el campo de la ingeniería civil tiene su origen a mediados de la década de los setenta, ampliándose durante los ochenta [14]. Se aplica principalmente a estudios de pavimentos, detección de cavidades, así como a localización de armaduras en elementos estructurales de refuerzo, ya sean tableros de puentes, muros de contención, etc.

Particularizando en el ámbito de aplicación al que se refiere el presente TFG, existen algunos trabajos previos que demuestran la efectividad del uso de esta técnica para la detección de daños en la estructura de pavimentos, falta de materiales de relleno, así como existencia de cavidades en zonas de tránsito tanto peatonal como de vehículos [15]. Esto se debe principalmente, a que los sistemas georradar permiten la ejecución de inspección del terreno sin alterar su estado ni afectar al flujo de tráfico habitual [16].

Desde finales de la década de los noventa se implementaron de manera significativa, en países como Estados Unidos, Canadá, Francia, Italia, Suiza y Gran Bretaña, las aplicaciones del georradar sobre carreteras y autopistas. Dentro del área de la evaluación del subsuelo, esta técnica hacía posible la medición del grosor de capas, detectaba defectos en la estructura del pavimento y podía analizar la capa base de dicho subsuelo. En lo referente a evaluaciones para control de calidad, el georradar permitía medidas de grosor y estimaba el contenido de cavidades de aire dentro de superficies de asfalto. La mayor parte de los trabajos realizados en autopistas para medición de espesores usaron antenas biestáticas de alta frecuencia (1 GHz) montadas sobre vehículo. Para estudios de detección de cavidades y localización de áreas deterioradas en carreteras se usaron antenas de baja frecuencia (de entre 100 y 500 MHz).

Las cavidades ocultas en el subsuelo de este tipo de estructuras representan un serio peligro para el usuario de tales vías, ya que puede evolucionar al derrumbe de la estructura, haciéndose entonces necesaria su localización temprana. Típicamente, estas cavidades son consecuencia del hundimiento de la capa base y de su cercanía a redes de agua. La tecnología GPR hace posible el análisis seguro desde la superficie de la carretera, identificando cambios en las propiedades físicas propios de la existencia de huecos en el subsuelo. Estos podrán estar rellenos de aire o de agua, poseyendo cada uno una firma radar diferente al de los materiales propios del subsuelo de una autovía o carretera; si está llena de aire un gran pico negativo aparecerá en la amplitud de la onda electromagnética y, por el contrario, un gran pico positivo será observado en la amplitud cuando la cavidad está llene de agua.

En la Figura 2-3 se muestra un ejemplo de radargrama obtenido con una antena de 400 MHz, en el que se aprecia una cavidad en el subsuelo desde los 300 hasta los 370 metros en superficie con una profundidad de 2 metros [17].

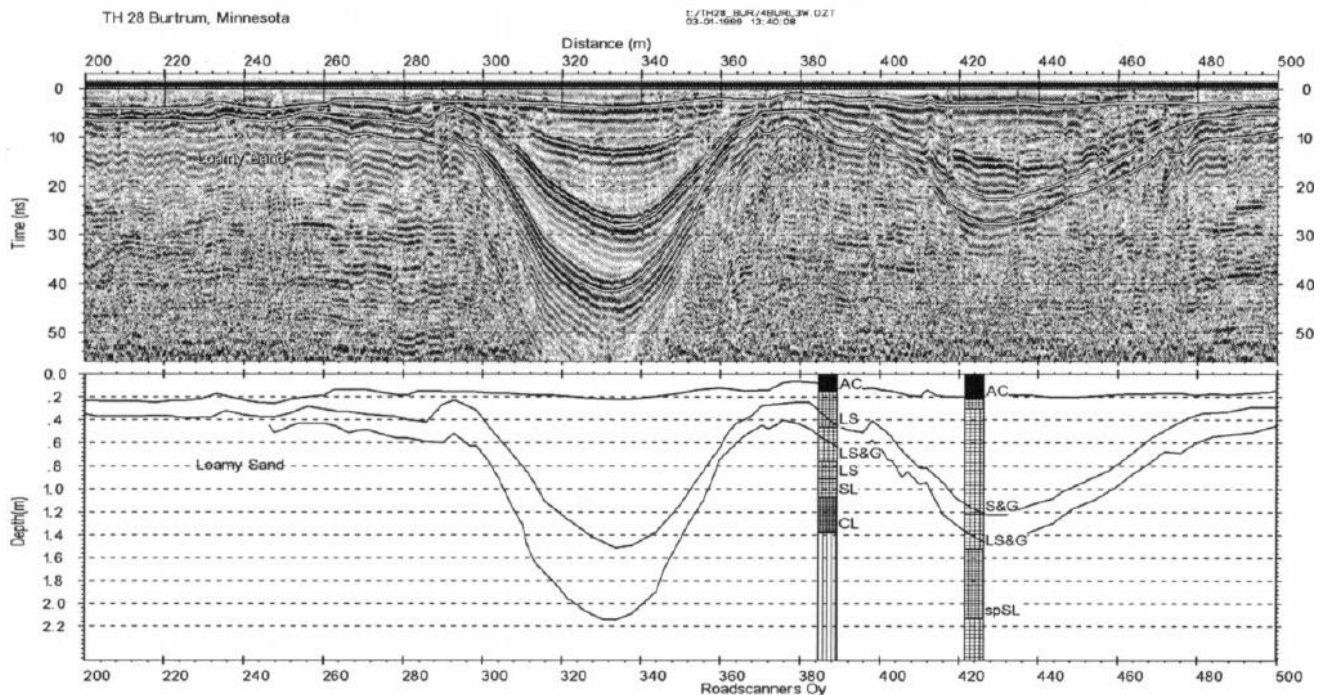


Figura 2-3 Radargrama procedente de Georradar GSSI, con una antena biestática de 400 MHz [17]

La Figura 2-4 muestra los radargramas obtenidos con una antena biestática apantallada de 250 MHz; en la vista superior “s” señala una zona con hundimiento del estrato, mientras que en la vista inferior se presenta la reflexión o firma de una tubería “p”, así como diferentes capas del subsuelo mostradas como a, b, c y d [18].

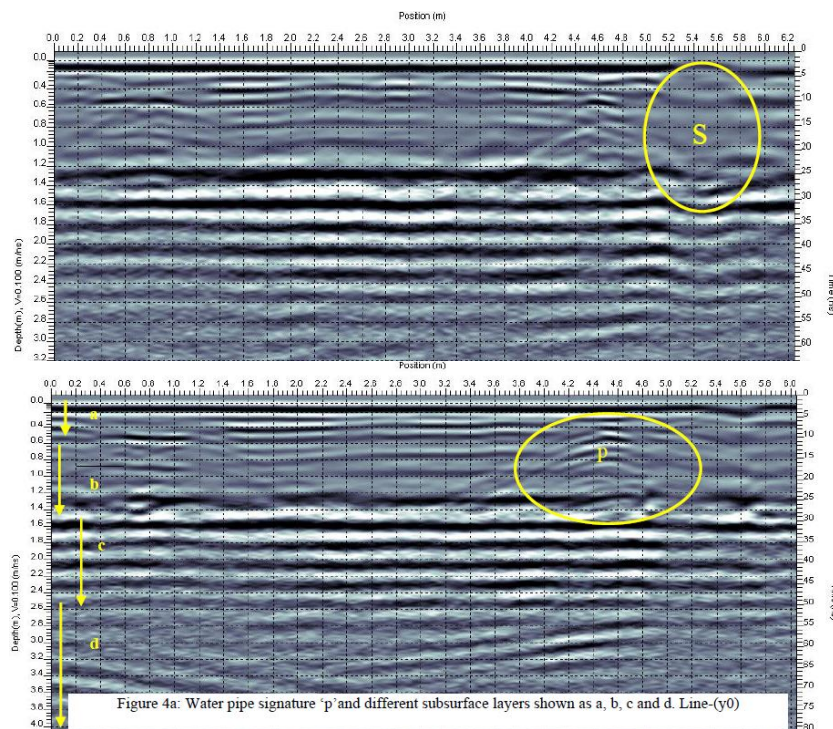


Figura 2-4 Radargrama procedente de Georradar Noggin, con una antena biestática de 250 MHz [18]

La Figura 2-5 muestra un radargrama obtenido con una antena de 1600 MHz (en su parte superior) y la ilustración de su interpretación (en su parte inferior) donde se señalan las diferentes capas de la estructura de pavimento, además de algunas fracturas identificadas [19].

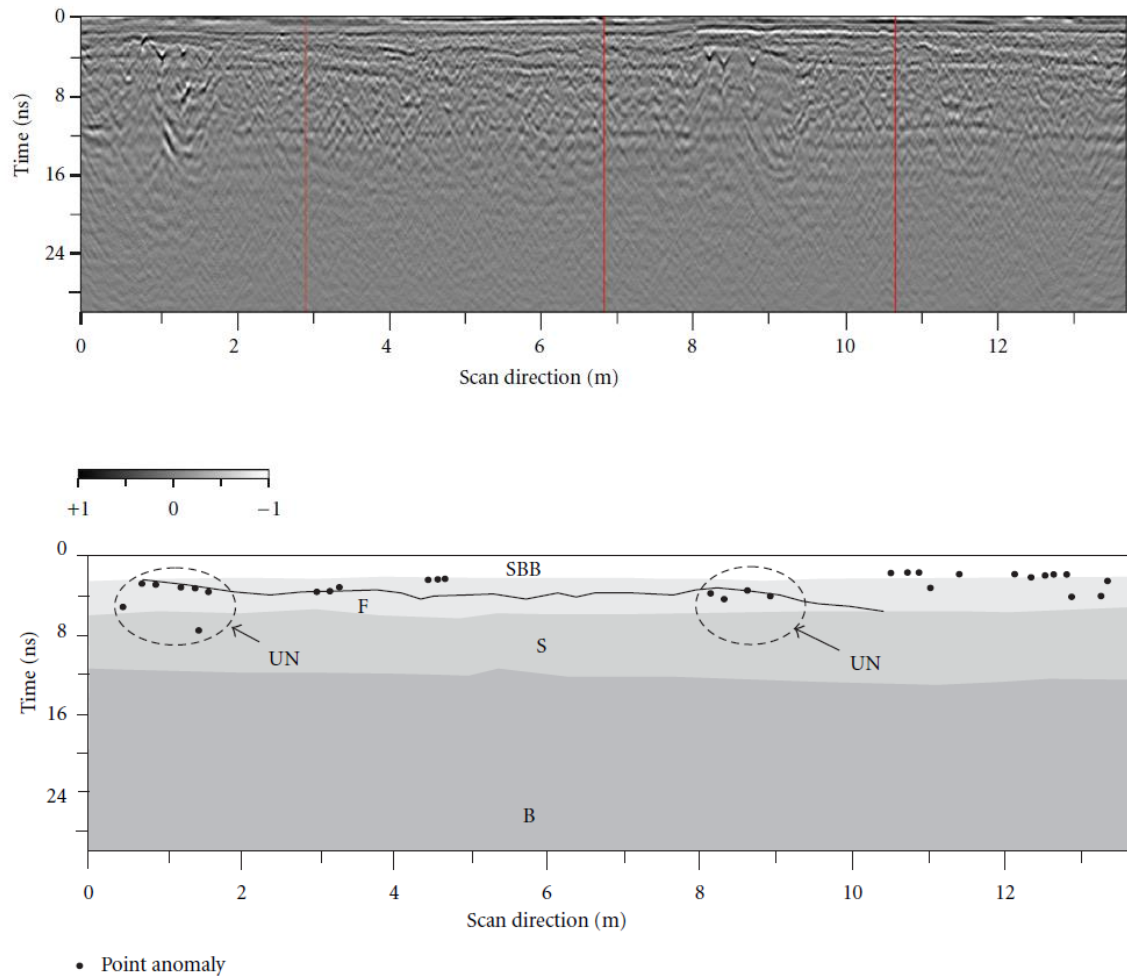


Figura 2-5 Radargrama obtenido con una antena de 1600 MHz [19]

En la Figura 2-6 se aprecia la superficie del pavimento, la estructura de acero corrugado y los límites superior e inferior de una cavidad en una zona de estudio en Texas [20]. Este caso de estudio demuestra la eficiencia del georradar para la localización de oquedades que, de no ser identificadas y reparadas a tiempo, representan una seria amenaza para los usuarios de la vía.

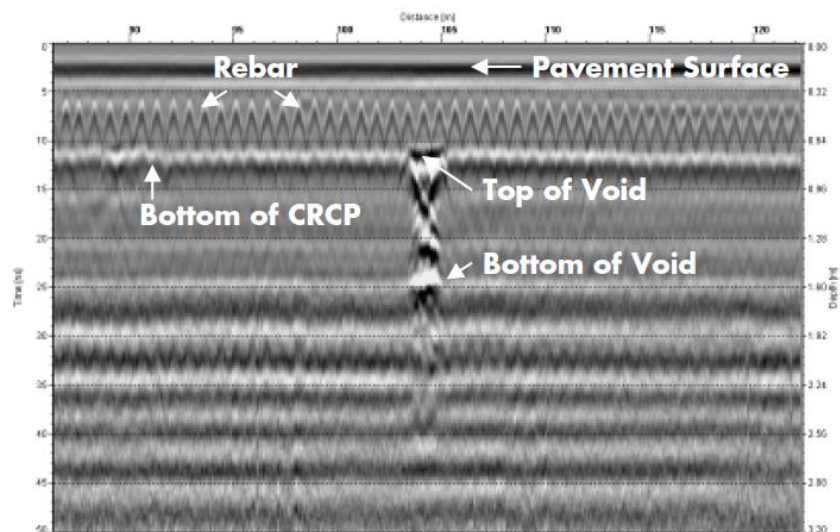


Figura 2-6 Radargrama obtenido a partir de una antena con frecuencia de trabajo de 400 MHz [20]

2.1.2 Ámbitos de aplicación

La tecnología del radar de subsuelo posee multitud de aplicaciones, entre las principales:

- En geofísica, para cartografía del subsuelo, localización de cavidades, hundimientos, grietas, fallas de material, presencia de material humedecido con agua salada, análisis de cimientos [5], etc.
- En geología, indicado para estudios del subsuelo terrestre, ya sea de terreno heterogéneo, de rocas o de hielo o nieve, medición de espesores de pavimento o glaciares, detección de nivel freático, profundidad de la roca madre, exploración de recursos naturales, exploración minera, geología ambiental (localización de depósitos y zonas de vertido de materiales contaminantes), geomorfología ambiental [21], geotecnia, hidrogeología [10], etc.
- En el ámbito militar, para detectar y posicionar minas terrestres de diferente entidad (antipersonal o contracarro) o artefactos no explosionados (unexploded ordnance) [22], conductos o túneles subterráneos destinados a diferentes fines [23], integridad de pistas de aterrizaje tras daños ocasionados por el combate, evaluación para mantenimiento de infraestructuras militares [24], etc.
- En ingeniería civil: para la detección de redes de servicio (búsqueda de tuberías) [21], inspección de armaduras, análisis de tableros de puentes, ubicación de cavidades rellenas de gas o agua [25], inspección de subsuelo tras desastres naturales, integridad de caminos y carreteras [26], planeamiento urbano [10], etc.
- En arqueología [21], en la localización y emplazamiento de edificaciones, excavaciones y yacimientos antiguos [27], paleosismología y neotecnia [21].
- En antropología forense, para el esclarecimiento de dilemas de carácter penal (enterramientos clandestinos, restos humanos o armas enterradas [26]), humanitario y de crímenes de guerra [28].

2.1.3 Ventajas e inconvenientes del método

Teniendo presente el análisis previo del sistema señalaremos las siguientes ventajas del mismo:

- Método no destructivo que posibilita la prospección del subsuelo sin necesidad de contacto.
- El sistema permite obtener una resolución superior a otros métodos de prospección con facilidad y con buena precisión [21].
- Es una técnica de rápida ejecución que no depende, para el trabajo de campo, de excesivo aparataje.
- Una vez tomados los datos, su posterior análisis mediante el procesado con software no exige un tiempo excesivo.
- Permite la exploración de áreas superiores a las que se deberían excavar para obtener el mismo resultado, disminuyendo los costes de inspección [29].

Asimismo, es necesario señalar las limitaciones del equipo en referencia a su ámbito de aplicación:

- La profundidad de investigación es función de la frecuencia de estudio. Las frecuencias altas no penetran tanto como las bajas, pero ofrecen una mejor resolución de imagen [30].
- La resolución y profundidad de penetración del georradar varía en función del tipo de material y su contenido en agua, siendo recomendable la adquisición de datos en épocas secas [21].
- La atenuación o pérdida de la señal en presencia de materiales arcillosos o salinos.
- La detección de capas reflectoras está condicionada por el contraste entre la constante dieléctrica del material que forma la estructura de estudio y la del medio circundante [29]. A mayor contraste dieléctrico, mayor facilidad de detección.

2.1.4 Componentes de un georradar

Un sistema georradar consiste básicamente en [31]:

- Una antena monoestática o biestática que contiene los elementos (dipolos) transmisor y receptor.
- Una unidad de control de registro digital que mide el tiempo entre la emisión y la recepción de la onda electromagnética, registra la información obtenida y la manda a la pantalla del ordenador para poder ser visualizada en tiempo real (ver Figura 2-7).
- Un ordenador portátil que disponga del software informático previamente instalado para el almacenamiento de las trazas obtenidas y su simultánea visualización a través de la pantalla del ordenador.
- Un odómetro, rueda taquimétrica o medidor de distancias, que conectado a la antena relaciona los recorridos de avance efectuados con los perfiles radar obtenidos.
- Cable de conexión entre el ordenador portátil y la unidad central y cable de conexión de la antena con la unidad central (normalmente de fibra óptica).



Figura 2-7 Componentes de un georradar

La profundidad de penetración y la resolución observada depende del tipo de antena que sea usada para un determinado estudio. Las antenas de baja frecuencia usadas para fines geológicos, de menor resolución, suelen ser no apantalladas o no blindadas, las cuales permiten la adquisición de datos hasta profundidades de 30 a 60 m. De igual forma, para el análisis de áreas urbanas, y con una mayor resolución de imagen, se usan antenas blindadas o apantalladas de alta frecuencia con alcances en profundidad de 5 a 10 metros. El apantallamiento de las antenas se usa principalmente para evitar ruidos en la señal por acoplamiento de señales radio, móviles, interferencias metálicas por vehículos, etc. En la Tabla 1 se muestran las principales frecuencias de trabajo usadas en la técnica de georradar así como sus principales aplicaciones.

Frecuencia central de trabajo	Profundidad de penetración (m)	Principales aplicaciones de referencia
2 GHz	0 - 0,6	Evaluación de hormigón y espesores de pavimentos
1 GHz	0 - 0,9	Carreteras y evaluación de puentes y hormigón
800 MHz	0 – 2	Arqueología (evaluación de hormigón, detección de huecos)
500 MHz	0 – 4	Ingeniería, arqueología y medio ambiente (huecos)
250 MHz	0 – 8	Ingeniería, geotecnia, medio ambiente
100 MHz	0 – 10	Geotecnia, ingeniería, minería (localización vetas)
50-25 MHz	0 - 50	Geotecnia (detección de yacimientos)

Tabla 2-1 Frecuencia central de trabajo de diferentes antenas, con referencia a sus principales aplicaciones

La Figura 2-8 muestra distintos tipos de antenas y configuración. En primer lugar, a la izquierda, se muestra un ejemplo de antena monoestática no apantallada. Las antenas monoestáticas disponen de un solo dipolo que opera simultáneamente de transmisor y receptor. A continuación, en el centro y a la derecha, se muestran ejemplos de una antena biestática apantallada y no apantallada, respectivamente. En este caso, ambos dipolos transmisor y receptor están separados a una distancia constante en función de la frecuencia de trabajo.



Figura 2-8 Toma de perfiles con antenas monoestáticas (izquierda [32]) y biestáticas (derecha y centro [33])

2.1.5 Fundamentos teóricos

2.1.5.1 Ecuaciones de Maxwell

A finales del siglo XIX, J.C. Maxwell establece los principios básicos del Electromagnetismo a partir de cuatro expresiones, descritas desde la Ecuación 1 a la 4. En lo concerniente a la técnica GPR, las ecuaciones relacionan los fenómenos electromagnéticos con la óptica ondulatoria. Para los métodos de prospección, en los que se basa el presente trabajo, se tendrán en cuenta por un lado los conceptos de la Óptica Geométrica y por otro la teoría de campos electromagnéticos fundamentada en las siguientes en su forma diferencial que, en esencia, relacionan los campos eléctrico y magnético [31].

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Ecuación 1 Ley de Ampere-Maxwell

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \rho$$

Ecuación 2 Ley del Campo Eléctrico de Gauss

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Ecuación 3 Ley de Faraday

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$$

Ecuación 4 Ley de Gauss para campos magnéticos

Donde,

H es la intensidad del campo magnético, que se mide en Amperios por metro (A/m); E es la intensidad del campo eléctrico, que se mide en Voltios por metro (V/m); B es el vector inducción magnética que se mide en Webers por metro cuadrado (Wb/m²); D es la densidad de flujo eléctrico que se mide en Culombios por metro cuadrado (C/m²); $\vec{j}$ es la densidad de corriente que se mide en Amperios por metro cuadrado (A/m²); ρ es la densidad de carga eléctrica que se mide en Culombios por metro cuadrado (C/m²) y c es la constante de proporcionalidad (la velocidad de la luz en el vacío).

Las ecuaciones de Maxwell se complementan con las denominadas relaciones constitutivas que definen el tipo de medio en el que se efectúa la propagación del campo electromagnético [31].

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$$

Ecuación 5

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

Ecuación 6

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Ecuación 7

Donde,

ϵ es la constante de permitividad dieléctrica, μ es la permeabilidad magnética y σ es la conductividad eléctrica.

De esta manera, en un medio dieléctrico homogéneo, isótropo y sin carga, $\rho = 0$, $\sigma = 0$ y tanto ϵ como μ son constantes.

2.1.5.2 Parámetros electromagnéticos de los medios

Según el apartado anterior las ecuaciones de Maxwell permiten enlazar los campos eléctrico y magnético con las fuentes productoras de tales campos, a partir de una serie de parámetros constantes para cada medio determinado. A continuación analizaremos cada uno de ellos [31]:

1. La conductividad eléctrica de un medio (σ) nos proporciona una muestra cuantificable de la respuesta de sus cargas libres cuando están en presencia de un campo eléctrico externo, siendo además el factor de proporcionalidad entre el campo libre externo aplicado y la densidad del volumen de corriente producido por el movimiento de dichas cargas libres (como se muestra en la Ecuación 7).

Las unidades de medida de la conductividad eléctrica en el sistema internacional, (S.I.), son Siemens por metro (S/m). La conductividad de un determinado medio es la inversa de su resistividad eléctrica medida en ohmios metro (Ωm).

Por su conductividad se pueden distinguir:

- Materiales conductores, con valores de conductividad $> 10^5$ S/m.
- Materiales semiconductores, con valores para la conductividad entre 8-10 y 10^5 S/m.
- Materiales aislantes, que dispone de valores de conductividad $< 8-10$ S/m.

Material	Permitividad dieléctrica (ϵ), cte.	Conductividad eléctrica (σ), en ms/m.	V_{prog} , en cm/ns
Hormigón	6-30	1-10	5,5-11,2
Asfalto	3-8	0,1-1	13,4-17,3
Cemento	16	10-100	7,5
Tubería metálica	1	100 000 000	-
Aire	1	0	30
Agua dulce	80-81	0,1-10	3,3
Agua salada	81-88	4 000	3,3
Hielo polar	3-3,15	0,02-0,003	16,8
Arenisca seca	6	0,00001-0,001	11,2
Arenisca húmeda	6-8	10	10,6-11,2
Granito seco	5-6	0,00001	12,3-13,4
Granito húmedo	7-15	1	10,6-11,3

Nota: a partir de la velocidad de la luz ($c=30$ cm/ns) hallamos la $v_{\text{prog}}=c/\sqrt{\epsilon}$

Tabla 2-2 Parámetros electromagnéticos y velocidad de propagación las ondas electromagnéticas para diferentes medios

Es de importancia el contenido de agua del que disponga un determinado material así como su composición química, pues ambas determinan la conductividad eléctrica del mismo. De igual manera, la temperatura influye en sus propiedades conductivas, afectando directamente a la movilidad de los iones del material, esto es, su conductividad electrolítica. Por consiguiente, la conductividad es un parámetro que puede variar dentro de un mismo medio que albergue diferentes materiales con heterogeneidad total o parcial, pues no depende solo de los diferentes materiales que contenga dicho medio.

2. La permitividad dieléctrica (ϵ) es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico (E) externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico (D) (según la Ecuación 5).

Este parámetro aporta una medida de la capacidad de polarización de un material cuando este está en presencia de un campo eléctrico externo, proporcionando el valor constante de su respuesta estática.

Para un sistema de georradar es de gran importancia la permitividad relativa de un subsuelo formado por diferentes materiales, pues depende de su porosidad, su saturación, el porcentaje de cada material sólido y la permitividad absoluta de cada uno de los que forman la mezcla [34].

3. La permeabilidad magnética (μ), por último, es un parámetro que relaciona la inducción magnética (B) con la intensidad de campo magnético (según la Ecuación 6). En la gran mayoría de los estudios con radares de subsuelo se cumple que la permeabilidad magnética se aproxima a 1 (excepto en aquellas investigaciones que contengan mayormente materiales ferromagnéticos), por lo que el parámetro no depende de la frecuencia usada en un campo magnético determinado.

2.1.5.3 Principios básicos de funcionamiento

Las antenas de un radar de subsuelo han sido diseñadas para emitir un pulso de muy corta duración con el fin de obtener una mejor resolución vertical del sistema. Este pulso (de entre 1,5 y 2 períodos de la frecuencia nominal o central) caracteriza a dicha antena. Su corta duración (Δt) lleva asociado implícitamente un aumento inversamente proporcional que aportan sus componentes frecuenciales (Δf), según la expresión: $\Delta t = 1 / \Delta f$. Por ello, el ancho de banda de operación es similar a su frecuencia central y esta es inversamente proporcional a su centro de frecuencias. En la Figura 2-9 se muestra tanto la forma de la señal como el espectro generado a partir de la primera de una antena de frecuencia central de 900 MHz.

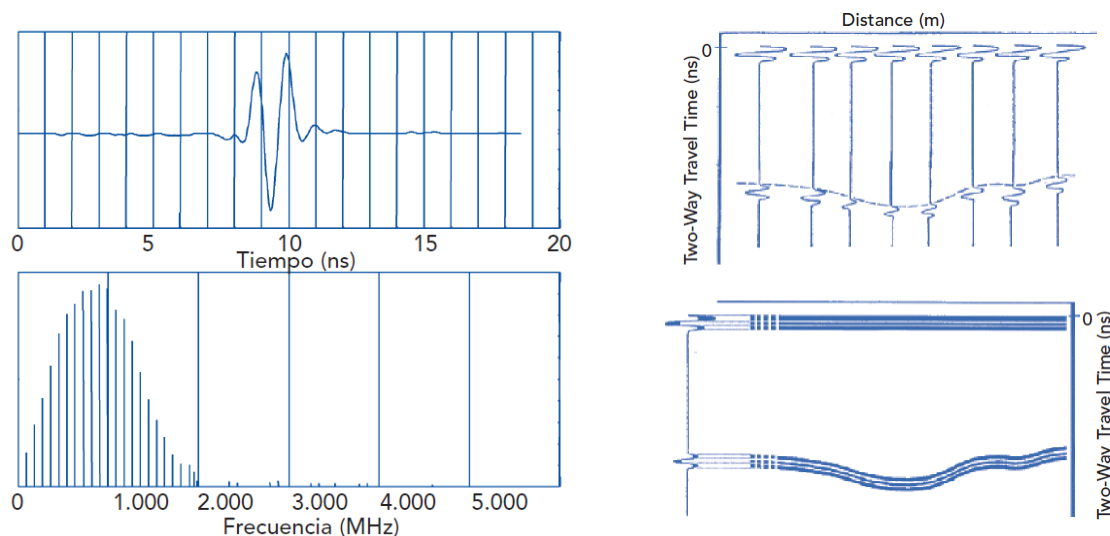


Figura 2-9 Forma de la señal (izquierda arriba) y espectro del impulso generado (izquierda abajo) por una antena georradar de 900 MHz de frecuencia central y presentación de radargrama (derecha) [7]

Cuando durante el trabajo de campo desplazamos, en la línea de obtención de datos, la antena, se detectan y registran las reflexiones detectadas, obteniéndose así una traza o A-Scan [12]. Por consiguiente el eje de abscisas de los radargramas o B-Scans, o registros del georradar en base a representaciones gráficas de las trazas entre los ejes XZ, representarán el desplazamiento de la antena en una determinada dirección (eje X), mientras que el eje de ordenadas muestra el tiempo de retardo (Δtwt , *two-way travel time*) entre la emisión de la onda electromagnética y la detección de las reflexiones en superficie de la antena receptora (eje Z); entonces se trata de un viaje de la pulsación de ida y vuelta, como se muestra en la Figura 2-9 (derecha).

Si se conoce la velocidad de propagación de las ondas de cada material en el medio, el eje temporal de ordenadas puede ser transformado a un eje de abscisas especial, de profundidades (eje Z), a través de la ecuación 8, convirtiendo los tiempos *twt* en profundidades. Asimismo, esta velocidad de propagación puede deducirse a partir de la ecuación 9 donde, para la mayoría de los medios susceptibles de estudio (medios poco conductivos), esta velocidad de propagación oscila entre 0,3 m/ns (la mayor, para el aire) y los 0,03 m/ns (la menor, para el agua dulce); la Tabla 2 muestra ejemplos de velocidades de propagación para diferentes materiales.

$$Z = \frac{V_{\text{prog}} \cdot \Delta twt}{2}$$

Ecuación 8

$$V_{\text{prog}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} \right)^2} + 1 \right)}}$$

Ecuación 9

Donde,

V_{prog} es la velocidad de propagación de la señal en el medio, Δtwt es el tiempo ida y vuelta de la reflexión, ω es la frecuencia angular central o nominal del impulso emitido, ε es la constante de permitividad dieléctrica, μ es la permeabilidad magnética y σ es la conductividad eléctrica.

Cuando un pulso detecta una interfaz entre diferentes materiales (material 1 y material 2) o un cambio de las propiedades de un mismo material, parte de la energía se refleja y el resto de esta continúa su camino a través del nuevo medio en una determinada dirección. Esta energía reflejada, a partir de un cambio entre dos medios, depende del contraste entre sus impedancias (η) y, a partir de las impedancias que caracterizan ambos medios, se puede definir el Coeficiente de Reflexión o de

Intensidad (r ó RC [7]), según la ecuación 10, siempre y cuando se acepte la incidencia de la onda como normal a la superficie de la interfaz, donde $-1 \leq r \leq 1$. Por ello, la reflexión podrá identificarse mejor cuando r tiene un valor relativamente alto y, por el contrario, la reflexión podría no obtenerse si r es demasiado bajo. Se tendrá en cuenta la aplicación del GPR para estructuras que incluyan materiales altamente conductivos (que puedan contener arcillas, limos o suelos salinos) pues su señal electromagnética en estos subsuelos se atenúa rápidamente, llegando a verse la penetración del sistema muy reducida o incluso perderse totalmente. Para medios poco conductivos (donde $\sigma \ll \omega \cdot \epsilon$), como ocurría en la ecuación 8, se admite además una expresión simplificada obteniendo r en función del contraste entre las constantes dieléctricas relativas de ambos materiales, descrita en la ecuación 11.

$$r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2}$$

Ecuación 10

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

Ecuación 11

Donde,

ϵ_1 es la constante de permitividad dieléctrica del medio superior y ϵ_2 es la constante de permitividad dieléctrica del medio inferior.

Para la obtención de buenos resultados, los medios a evaluar deberán ser poco conductivos, ofreciendo un suficiente contraste electromagnético y, sobre todo, que el medio de propagación del pulso sea suficientemente resistivo para no atenuar la señal emitida de manera dramática [35].

La intensidad de reflexión de la onda pulsada hacia el elemento receptor de la antena se identifica con el valor de su amplitud. Esta amplitud será mayor si cuanto más difiera la constante dieléctrica (ϵ) de ambos medios. Aunque cada traza se almacena de forma independiente, la unidad de control procesa todas las trazas individuales, *A-Scan*, para crear una única imagen 2D, radargrama o *B-Scan*. Este proceso se lleva a cabo con la aplicación de una paleta de color que diferencia los valores de amplitud registrados, como se muestra en la Figura 2-10; en este caso se asigna una paleta de color en escala de grises, que asigna el color negro a la mínima amplitud y el color blanco a la amplitud máxima. Los valores intermedios se convierten en colores grises de diferente tonalidad.

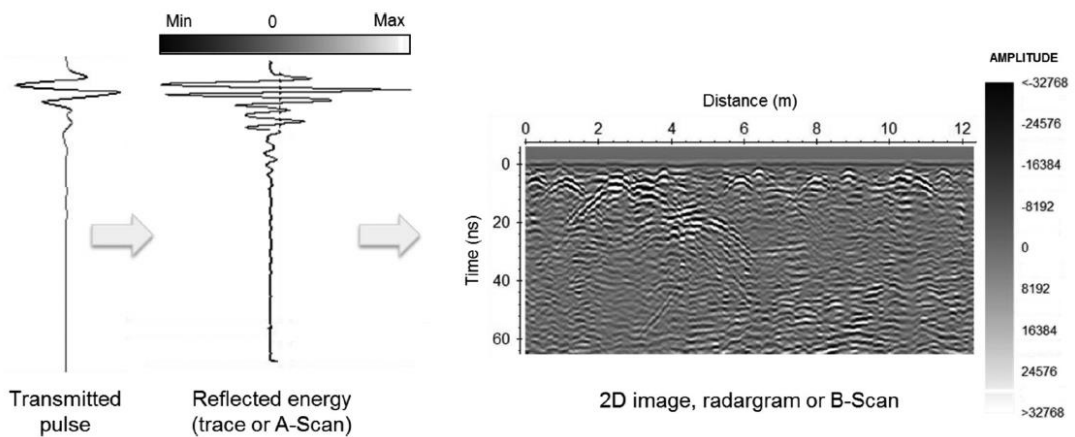


Figura 2-10 Asignación de una paleta de color, en escala de grises, a los valores de amplitud de reflexión registrados [12]

Por consiguiente, la amplitud de la señal recibida depende de tres factores diferentes:

- De la fuerza de la señal reflejada sobre la discontinuidad, que indica la cantidad de energía que viajará hasta la antena después de sufrir la reflexión.
- De la distancia entre el cuerpo reflector y la antena, que determina la atenuación de la onda pulsada como consecuencia de la dispersión geométrica.

- De las propiedades electromagnéticas tanto del medio como de la antena, dependientes tanto de la atenuación de la energía, mediante absorción o transformación de esta en calor, como de la frecuencia de la onda electromagnética.

Otro parámetro importante que controla la profundidad de penetración es la frecuencia de transmisión de la antena. Una antena de baja frecuencia proporciona señales de penetración más profundas pero con una menor resolución y, por el contrario, una antena que radia a mayores frecuencias permitirá la obtención de una mejor resolución con penetraciones más pobres.

Por ello, antenas con frecuencias centrales entre 500 MHz y 2 GHz son las indicadas para el análisis para inspección de infraestructuras (como se necesitan para nuestro estudio, en pos de la detección de grietas, estimación de grosores, contenidos de humedad, detección de barras de acero corrugado, etc), con limitada penetración pero con una muy alta resolución vertical del subsuelo. De la misma forma, las antenas con frecuencias centrales por debajo de 250 MHz otorgan una gran capacidad de penetración pero con una insuficiente resolución vertical.

La resolución y la zona de influencia de la propagación de una señal de georradar es un factor importante que influencia el éxito de la aplicación de la técnica, pues permite la obtención de la geometría apropiada para tal fin. La resolución se relaciona con sus resoluciones horizontal (o lateral) y vertical (o longitudinal o de campo).

La resolución vertical permite la diferenciación entre dos señales adyacentes, en el mismo eje Z de profundidad, como dos eventos separados. Este parámetro depende principalmente de la frecuencia central de emisión de la antena y de la velocidad de propagación de la señal en el medio [36]. La Ecuación 12 [37] determina la resolución vertical. La señal de retorno considerará la dispersión selectiva de la frecuencia tanto del propio sistema georradar como de la antena, así como el medio y el elemento reflector objeto del estudio.

Por su parte, la resolución horizontal indica la distancia mínima entre dos objetos adyacentes, a una misma profundidad o situados a lo largo del eje X, que posibilita que sean detectados como dos eventos separados. En este caso, el parámetro depende del número de trazas almacenadas, concepto que se introduce en el dispositivo previamente a la toma de datos, del ancho de haz y de la profundidad de los materiales que se desean analizar. La resolución horizontal se podrá estimar a partir de la Ecuación 13 [38], solo para una antena biestática, y para la primera zona de Fresnel.

$$R_v = 1,39 \cdot \frac{V_{\text{prog}} \cdot \Delta t}{2}$$

Ecuación 12

$$R_h = 2 \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4} + d \cdot \lambda \right)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 13

Donde,

V_{prog} es la velocidad de propagación de la señal en el medio, Δt es la duración efectiva del pulso (ns) que se corresponde con la inversa del ancho de banda de la frecuencia empleada (Hz), d es la distancia vertical entre la antena y la superficie reflectora y λ es la longitud de onda ($V_{\text{prog}} \cdot \Delta t$).

Con todo, el tamaño del objeto reflector y su forma son también factores importantes a tener en cuenta en presencia de energía dispersa. Es por ello que la cantidad de energía reflejada se incrementa cuando el tamaño del objetivo se corresponde con el mismo orden de magnitud de la longitud de onda, seleccionada previamente a la toma de datos del dispositivo georradar. Con menores valores de longitud de onda se obtendrán resultados dentro de la escala de dispersión de Rayleigh y, para valores mayores de longitud de onda, los resultados corresponderán a la escala de Dispersión Óptica.

Frecuencia central de trabajo (MHz)	Resolución vertical (m)	Penetración máxima (m)
10	2	60
25	1,0	50
50	0,5	40
100	0,25	25
200	0,125	12
500	0,05	6
800	0,03	2,5
1000	0,025	1,5

Tabla 2-3 Ejemplos de resolución obtenidas, según las condiciones del medio, en base a las frecuencia de trabajo utilizadas para el estudio

2.2 El Láser Escáner Terrestre (LiDAR)

2.2.1 Definición y evolución histórica

Una vez desarrollados los fundamentos y aplicaciones del georradar se describe en esta sección la segunda de nuestras técnicas aplicadas para el presente TFG: el láser escáner terrestre. A diferencia del radar de subsuelo, que utiliza las ondas electromagnéticas en el espectro de las microondas para caracterizar el subsuelo, el láser escáner se basa en la tecnología LiDAR o luz láser para sus fines de aplicación, en un espectro electromagnético que incluye longitudes de ondas infrarrojas, visibles o ultravioletas.

El láser, acrónimo que significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), es una fuente luminosa que genera un haz de luz de alta coherencia, esto es, que dicho haz de emisión es estrecho, poco divergente y con una longitud de onda bien definida, y casi en su totalidad monocromático, pues se debe a la emisión conjunta de una gran cantidad de átomos.

El nivel de estado fundamental o nivel fundamental del átomo es aquel nivel mínimo de energía que muestra el estado de energía interna mínima del que puede disponer el átomo. Todos los niveles mayores se denominan niveles excitados. Entonces, cuando un átomo tiene un nivel excitado, con una energía E por encima de su nivel fundamental, tiene la capacidad de absorber un fotón de frecuencia f , definida según $E=h \cdot f$. En este punto se producen los dos tipos de procesos de emisión de fotones.

La coherencia de la radiación, esto es, que la luz viaje aproximadamente en una misma dirección, se obtiene mediante la denominada cavidad resonante [39]. Este es un mecanismo formado por un espejo en cada uno de los extremos del medio amplificador, siendo uno totalmente reflector (obligando al haz de luz a pasar repetidas veces por el medio, amplificándolo) y el otro parcialmente reflector, permitiendo este último que parte de la luz reflejada en él salga al exterior, como se muestra en la Figura 2-11, después de varias veces reflejada dentro del medio amplificador. Estas reflexiones provocan tanto la disminución de divergencia del haz como que este sea cada vez más paralelo al eje mayor del medio amplificador.

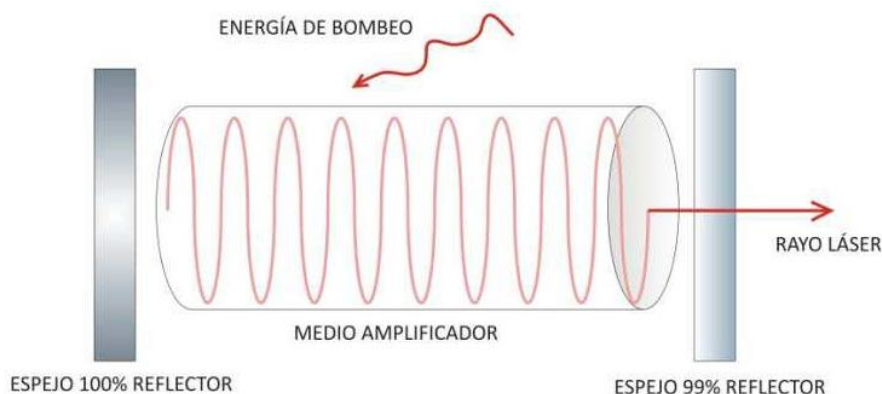


Figura 2-11 Esquema de un láser [39]

El láser escáner es una tecnología que permite la obtención de la superficie de objetos de geometría tridimensional en base a la tecnología LiDAR [8]. Este método es “probablemente la más importante tecnología de adquisición de datos geoespacial que ha sido introducida desde el último milenio” [40], aportando una enorme fuente de información tanto geométrica como radiométrica sobre el objeto de estudio.

Principalmente, existen dos tipos de láser escáner:

- El terrestre, pudiendo ser fijo (Figura 2-12, izquierda) o móvil (Figura 2-12, derecha). Los terrestres móviles son los iniciadores del uso del método y se disponen montados sobre plataformas móviles (vehículos, normalmente). En los últimos años se ha producido una utilización emergente de estos dentro del campo del mapeado móvil, para la obtención de imágenes tridimensionales de estructuras a gran escala tales como carreteras o el modelado de ciudades. Por su parte, los terrestres fijos se disponen sobre trípodes siendo necesario, para la ejecución del proyecto, un plan de obtención de datos en base a diferentes estaciones de adquisición dispuestas a lo largo del objeto de estudio. Este tipo de dispositivos serán los finalmente aplicados en el presente TFG.
- El aéreo, clasificado también como móvil, se dispone montado sobre aeronaves que toman medidas secuenciales en alcance en una determinada dirección de vuelo. Son capaces de generar un modelo digital de superficies y elevaciones del territorio, a partir de datos de altimetría real [41].



Figura 2-12 Ejemplos de dispositivos LiDAR. Láser escáner terrestre Marca Rieg, modelo LMS Z-390-i (izquierda) y láser escáner móvil montado sobre vehículo para mapeado de carreteras de marca Lynx [8]

Esta tecnología ha sido empleada de manera satisfactoria dentro del ámbito de las Ciencias de la Tierra desde los inicios de los sesenta [8]. Así, en 1965 se presenta un estudio sobre los resultados

obtenidos a partir de unos láseres de rubí aplicados a diferentes mediciones atmosféricas [42] o en 1969, donde empleos referidos a la batimetría fueron realizados a partir de la intensidad de retorno de un láser pulsado; esta intensidad permitía diferenciar distintos materiales según sus superficies, como agua y el fondo oceánico [43]. Su uso se intensificó desde el comienzo de la década de los ochenta hasta finales de los noventa, en aplicaciones como el estudio terrestre para la obtención de la altura de la cubierta de la vegetación existente mediante láser pulsado aéreo [44] o el mapeado, también mediante láser aéreo, para estudios topográficos sobre zonas despejadas y boscosas [45]. Pero no fue hasta finales de los noventa cuando se explotó de manera notoria el láser escáner dentro del ámbito de la ingeniería civil. Por consiguiente, en 1998 aparecen las primeras aplicaciones LiDAR, a partir de un láser escáner terrestre, el cual realiza una digitalización tridimensional de una determinada zona de evaluación [46], incrementándose el uso de este tipo de dispositivos en base a sus capacidades. El concepto de la extensión del uso del láser escáner terrestre queda patente en la visión general expuesta en el estado del Arte redactado por Barber en 2001 [47], detallando usos asignados tanto a trabajos de Ingeniería como de Arquitectura.

A lo largo de su desarrollo como método, el uso del láser escáner terrestre se hizo evidente para análisis de escaneos láser dirigidos a elementos arquitectónicos localizados, tanto de pequeña como de mediana escala, dirigiendo la atención hacia el uso de este en el presente TFG. A continuación citaremos varios estudios realizados en base a la tecnología basada en el láser escáner terrestre referida al estudio de la superficie de infraestructuras de tránsito.

En el estudio realizado en 2007 por el Laboratorio de Patrimonio Gallego [48] quedó constancia de las capacidades del láser escáner terrestre para la elaboración de documentaciones geométricas de superficies, con alta precisión, en base a la gran densidad de información obtenida así como a la agilidad en la toma de datos en lo que a trabajo de campo se refiere. En la Figura 2-13 se muestra la representación de la nube de puntos final (vista izquierda) obtenida desde una única posición (vista derecha), con un láser escáner terrestre Leica, modelo HDS 3000, de un tramo del Camino de Santiago de la Vía de la Plata, de origen romano.



Figura 2-13 Imagen de la nube de puntos resultante (derecha) y vista de la localización (derecha) de un tramo de Camino de Santiago en Lalín, Pontevedra [48]

Otra aplicación del láser escáner estático se desarrolla en la investigación de la Universidad Politécnica de Madrid en 2009 [49], donde se hizo posible el análisis en 3D de superficies viarias junto con sus zonas contiguas, como puede verse en la Figura 2-14. En él se evaluó la superficie de rodadura para la detección de zonas con peligro de “*aquaplaning*” además de obtener el modelado preciso del conjunto, identificando las marcas viales de la vía, el grado de reflectancia de las mismas, dimensiones de la calzada y arcén, distancias libres a obstáculos, etc.

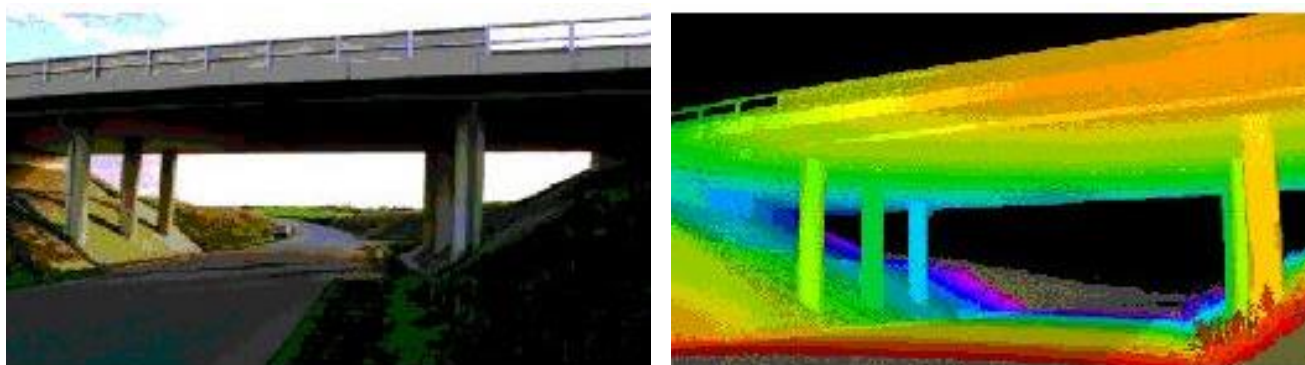


Figura 2-14 Vista la superficie viaria junto con sus márgenes y áreas adyacentes a partir de imágenes obtenidas mediante láser escáner estático en color verdadero (izquierda) y telemétrica (derecha) [49]

En la evaluación llevada a cabo en el puente romano de Lugo [50] aplicando el láser escáner, en sus variantes terrestre y móvil, en conjunción con un georradar se constató la eficiencia de ambas técnicas en la detección de anomalías en el pavimentado y en el subsuelo de determinadas estructuras históricas. El estudio analizó su estado tanto externo (la mampostería y el pavimentado) como interno (subsuelo). En la Figura 2-15 se aprecia una vista completa del modelo tridimensional y sus alrededores (vista izquierda) además de la vista detallada tanto del pavimento como de la estructura inferior del puente (vista derecha). Ambas imágenes corresponden a la estructura mencionada que aún hoy en día representa un acceso estratégico a la ciudad, sufriendo un tráfico de mayores cargas que aquellas para las que fue inicialmente diseñado; por todo esto, su condición de infraestructura histórica precisa preferentemente de este tipo de evaluaciones periódicas no destructivas.

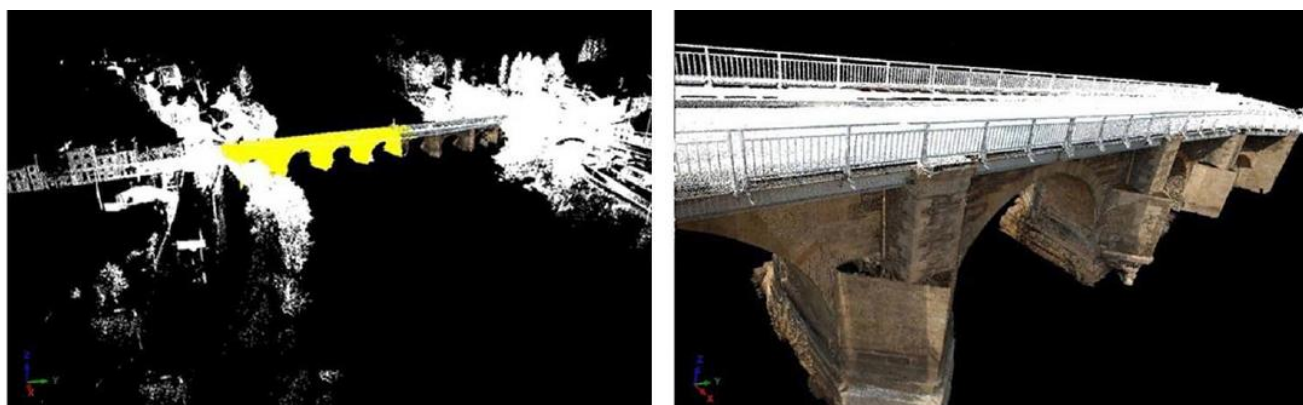


Figura 2-15 Vista tridimensional del puente romano de Lugo tras procesado de escaneos obtenidos a partir de tecnología LiDAR [50]

En un estudio llevado a cabo por la Universidad de Tallin (Estonia) [51], se compararon el perfil de evaluación del láser escáner terrestre y el análisis convencional de la estación total. Ambas técnicas analizaron una sección de carretera de 37 m de longitud localizada sobre un puente. La Figura 2-16 muestra los dos escaneos localizados al inicio de cada uno de los lados del puente, en el que se usaron puntos de control o dianas como referencias para coordinar las mismas mediciones con la estación total. Las localizaciones del láser escáner están marcadas con los ejes de coordenadas X, Y y Z. Dicho estudio ponía de manifiesto la ventaja del láser escáner con respecto a la estación total ante objetos de estudio tales como carreteras de doble o triple vía, autopistas y túneles; de igual manera, exponía el inconveniente del láser escáner terrestre frente a inclemencias meteorológicas tales como la nieve o la

lluvia, imposibilitando su uso debido a la dispersión de las reflexiones del haz láser al rebotar sobre los copos de nieve o las gotas de lluvia.

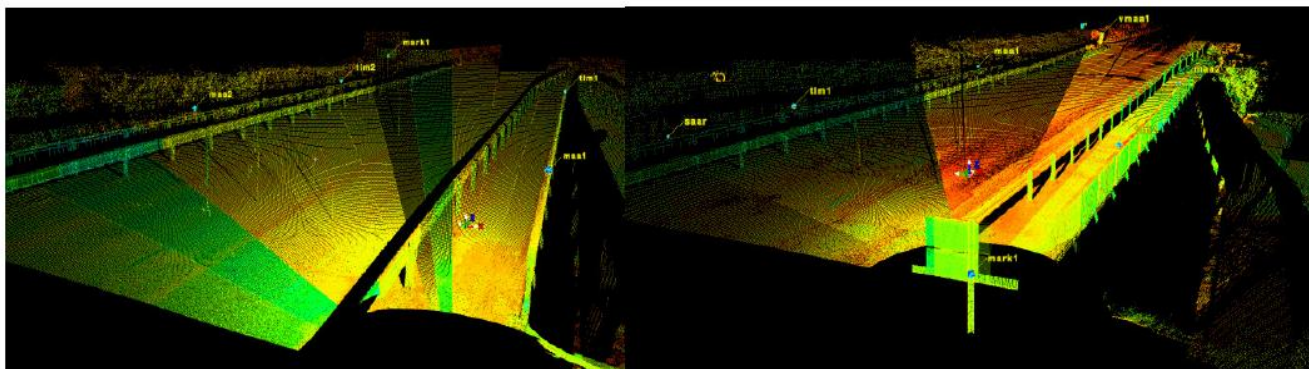


Figura 2-16 Vistas de dos escaneos obtenidos mediante Láser Escáner Terrestre de un puente localizado a 25 km al Oeste de Tallin, Estonia [51]

2.2.2 Ámbitos de aplicación

El método del láser escáner terrestre 3D posee multitud de aplicaciones:

- En topografía, para levantamientos de alta definición, realización de análisis espaciales [52] estudios de estructuras históricas y sus características topográficas [53 *Case study IV, VIII*], escaneo láser aéreo de un terreno [53 *Case study XI XIII*], modelo de ciudades y del terreno [54], obtención de modelos tridimensionales de fragmentos de material [55], mediciones geométricas de perfil láser para la evaluación de la rugosidad en la superficie de un pavimentado ([*International Roughness Index*, IRI [56]), análisis del grosor y volúmenes de la capa superficial de pavimentos de reciente construcción [57] (como se observa en la Figura 2-17, izquierda), levantamientos cartograficos de laderas o minas a cielo abierto, cálculos volumétricos de movimiento de tierras [58], etc.
- En geología, para estudios de evaluación de infraestructuras tras acción de temblores y terremotos [59], para el análisis del movimiento de una ladera [60], para la monitorización de procesos geomorfológicos dinámicos como la acumulación de nieve y la evolución de heleros en cordilleras [61], etc.
- En ingeniería forestal y agrícola, para la estimación del volumen de madera y del diámetro del tronco [54], para estudios de la morfología de las raíces arbóreas expuestas, evaluación de la tasa de erosión en dehesas y del registro del suelo [62], etc.
- En ingeniería civil, para la obtención de modelos urbanísticos tridimensionales [63], obtención de un modelado urbano para una ulterior construcción [64], para el mapeado de vías de comunicación [65], inspección de la señalización de carreteras y de señales de tráfico en base a reforzar la seguridad de estas, monitorización de deformaciones en infraestructuras, y la evaluación de su comportamiento durante su ciclo de vida, inspección geométrica de túneles y puentes [8] (como se muestra en la Figura 2-17, derecha), etc.
- En ingeniería industrial, para el modelado para la posterior construcción tanto de barcos como de vehículos [48].
- En arqueología, para el registro de zonas en peligro de desaparición como un yacimiento [39, 53 *Case study I, V, VII*] y la obtención de la planimetría de construcciones históricas [66].
- En arqueología industrial, para realizar una exploración de cuevas, de minas o de monumentos [53 *Case study I, V, VII*] y para el uso de escáneres láser de medio alcance en plantas y estructuras de industria petroquímica [39].

- En patrimonio cultural, para registros previos antes de restauraciones, servir de base para la monitorización de elementos dañados o que se prevea su deterioro por efecto de condiciones adversas [39], generación de modelos 3D para elaboración de réplicas, modelos virtuales o animaciones para museos o centros de interpretación, exploraciones métricas mediante ortofotografías [53 *Case study II*, VI, XIV], etc.
- En medicina, para la fabricación de prótesis personalizadas [67] y para el empleo en el ámbito del escaneo corporal [65].
- En criminología, para levantamientos de derrumbes y hundimientos, valoración de accidentes de avión o transbordadores espaciales, análisis de accidentes y acciones de seguridad operativa en ámbito industrial, escenas de crimen y accidentes de circulación [59].

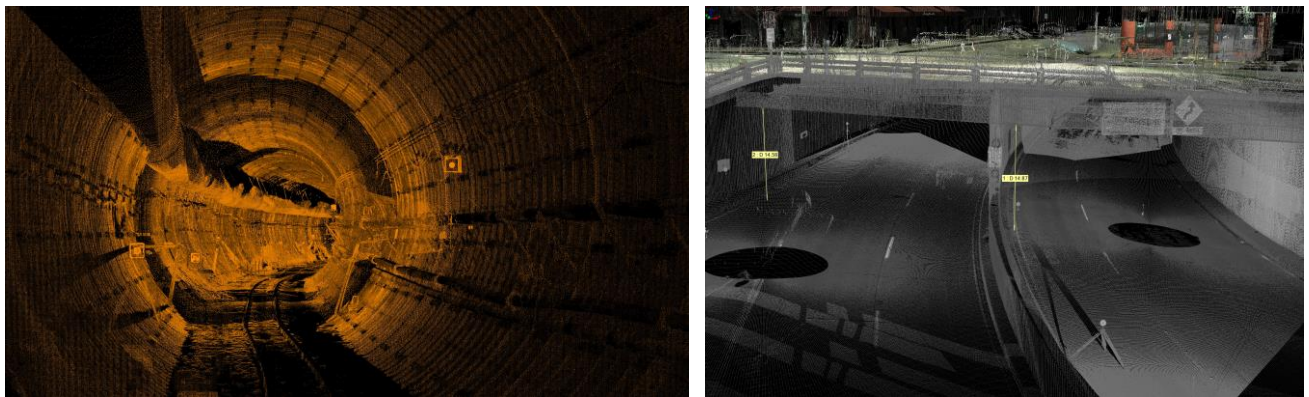


Figura 2-17 Escaneos procedentes de láser escáner terrestre de un túnel de metro en construcción [68] y de un túnel para la medición de gálibos de la vía [69]

2.2.3 Ventajas e inconvenientes del método

Teniendo en cuenta el análisis del sistema realizado señalaremos como ventajas del mismo:

- Hace posible la creación de una imagen a partir del mundo real poniendo de manifiesto, según la aplicación, deformaciones, desalineamientos o fallas en las superficies analizadas, señalando su preponderancia para la localización de posibles riesgos que afecten a la seguridad, como se persigue al usarse en el actual TFG [8].
- Permite la incorporación de instrumentos que comparte la misma tecnología para relacionar diferentes programas de ingeniería inversa [70].
- La técnica del láser escáner está llamada a complementar o sustituir a otras técnicas de capturas de datos, por su rapidez en la adquisición de datos (al reducir el uso de puntos de control), la precisión y calidad de estos además de necesitar tan solo un operario, el cual trabaja de manera segura [51].
- Hace posible la toma de gran cantidad de puntos en las mediciones de los objetos de estudio tridimensionalmente, tanto de datos planimétricos como altimétricos, en cualquier condición lumínica (con luz solar, en las horas de salida y puesta del sol o a oscuras) [71].
- Permite el procesado de los escaneos a diferentes escalas, así como comprobaciones de los datos realizados en el lugar a ser estudiado, con ayuda de la información que proporciona la pantalla del mismo dispositivo, permitiendo así el control de la efectividad de estos.
- Realiza el levantamiento de grandes áreas de estudio, al hacer posible la suma de diferentes escaneos parciales, a partir del registro de nubes de puntos por composición de dos o más escaneos individuales.

- Al convertir la realidad en coordenadas espaciales proporciona visualizaciones desde diferentes direcciones del modelo tridimensional (ortogonal, perspectiva, etc). Asimismo, el archivo digital de calidad permite la perpetuidad digital de la zona u objeto de estudio.

Con todo, como aspectos contrarios al equipo, dentro de su ámbito de aplicación, tenemos:

- Coste elevado, tanto del equipo como de los programas necesarios para el procesado de los datos iniciales obtenidos [72].
- La presencia de elementos indeseados (tránsito de personal y vehículos, pájaros) generan una gran cantidad de residuos que suponen un esfuerzo posterior para ser eliminados.
- Una vez obtenida la base de datos iniciales se precisa de programas adicionales para el procesado y visualización de los mismos.
- Las esquinas y las líneas de ruptura, dentro de las nubes de puntos, poseen una definición deficiente debido a que la malla que conforma dicha nube tiene unas características predeterminadas. Por ello, para el registro eficiente de las nubes es necesario reducir el ancho de malla, perdiendo entonces resolución [71].
- Las inclemencias meteorológicas, tales como la nieve o la lluvia, afectan directamente a la dispersión de las reflexiones de la luz láser, desaconsejando su uso en tales circunstancias [51], puesto que tanto las gotas de agua como los copos de nieve provocan la reflexión de parte del haz láser, generando entonces los correspondientes puntos falsos en las nubes.

2.2.4 Componentes de un láser escáner

Existen tres tipos de información proporcionada por el láser escáner [8]:

- Los valores de las distancias y los ángulos obtenidos,
- Los valores de la intensidad de la señal de luz láser recibida y
- Las propiedades obtenidas en recepción.

Habitualmente los láseres escáner son clasificados a partir de los diferentes principios usados para la medición de las distancias ($\mathcal{D}$, para las Ecuaciones 14 y 15).

$$2 \cdot \mathcal{D} = c \cdot \tau$$

Ecuación 14

$$2 \cdot \mathcal{D} = n \cdot \lambda + \Delta \lambda$$

Ecuaciones 15 y 16

$$\Delta \varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

Donde,

c es la velocidad de la luz, finita y constante, τ el tiempo de vuelo de ida y vuelta escáner-superficie-escáner, $\mathcal{D}$ la distancia entre escáner y superficie, $\Delta \varphi$ la diferencia de fase, n son números enteros y λ la longitud de onda,

A continuación explicaremos los tres métodos de medición existentes:

- Tiempo de vuelo mediante láser pulsado: dentro de la ingeniería civil, el método más generalizado es el basado en la estimación del retardo de tiempo necesario para el tránsito del haz de luz láser de ida y vuelta (τ , en la Ecuación 14) sobre la superficie a evaluar para un medio específico, esto es, su tiempo de vuelo (*time of flight*, TOF), mediante el empleo de cortos pulsos láser repetitivos, como se muestra en la Figura 2-18 (izquierda). Generalmente, los escáneres basados en TOF son de largo alcance (de unos pocos de kilómetros), donde son necesarios pulsos de alta potencia para poder alcanzar el objeto a ser estudiado. Con todo, es de reseñar que estos instrumentos poseen una menor precisión (con errores nominales de 3-4 mm) que los basados tanto en el principio de Triangulación como en la Diferencia de Fase entre la onda emitida y la recibida, ambos que serán desarrollados a continuación.

La mayoría de sistemas LiDAR aéreos se basan en TOF, los cuales se asignan a la evaluación de objetos de estudio relativamente grandes o construcciones tales como puentes, fachadas de edificios, presas, etc.

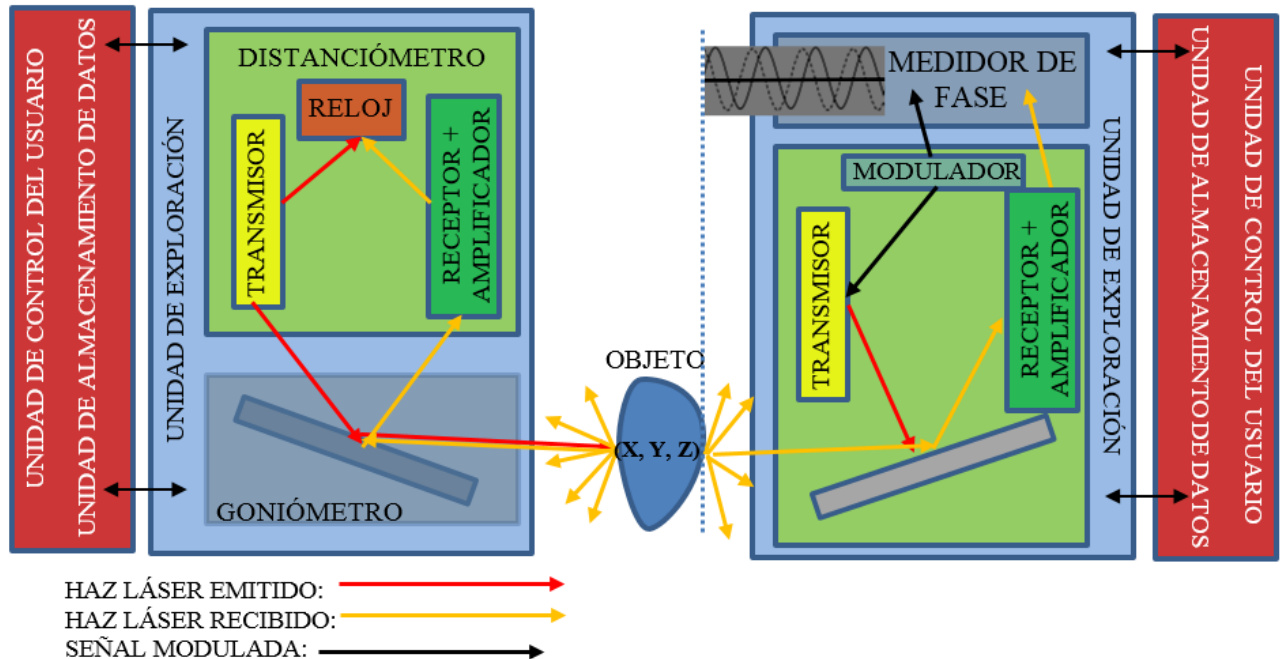


Figura 2-18 Componentes y principios de medición a partir de láser escáner TOF de láser pulsado (izquierda) y de diferencia de fase (derecha)

- Diferencia de Fase entre las ondas electromagnéticas emitida y recibida: TOF, además de basarse en el uso de pulsos láser cortos y repetitivo, esto es, la medición directa del TOF, podría llevarse a cabo mediante la modulación de la amplitud (AM) de la intensidad del haz láser, a partir de la diferencia de fase ($\Delta\phi$, ver las Ecuaciones 15 y 16), como medición indirecta del TOF. La modulación de onda continua evita la medición de pulsos cortos mediante la modulación de la energía de la propia longitud de onda perteneciente a un haz láser determinado.

Esta AM se hace especialmente conveniente para alta frecuencias, ya que las radiaciones a tales frecuencias (de la onda portadora) pueden ser transmitidas de una manera más eficiente a través de la atmósfera. Además, AM permite el uso de dispositivos más pequeños, haciéndolos portátiles. De la misma forma, cuando la radiación se modula con una señal de menor frecuencia (con una mayor longitud de onda, de entre 10 y 20 m) se obtienen igualmente medidas de alta precisión.

En este tipo de dispositivos, la distancia escáner-superficie del objeto a evaluar se calcula por comparación del haz láser emitido o proyectado con el obtenido en recepción. La diferencia de fase genera entonces el retardo de tiempo, posibilitando el cálculo de la distancia ($\mathcal{D}$). En esencia, este cálculo lo obtiene el escáner al contar números enteros de longitudes de onda (n) (como se observa en la Figura 2-18, derecha).

Actualmente, los láseres escáner que utilizan la diferencia de fase como medio de medición de distancias se agrupan en escáneres de medio alcance, sin llegar a las distancias propias de los escáneres TOF. Así, el láser usado en el presentado TFG, siendo de diferencia de fase,

alcanza los 330 m. de alcance de manera óptima. Pero la auténtica diferencia con aquellos es el menor error nominal en la estimación de distancia, siendo por ello más precisos (con errores nominales de 2-3 mm). Se usan generalmente para exploraciones en interiores, puesto que son más sensibles a reflexiones externas tales como la luz solar.

- Triangulación: representa un método dirigido a las aplicaciones que soliciten un alcance aún menor (de 5-10 m), proporcionando mediciones de alta precisión. En el método de triangulación la luz dispersa, una vez reflejada en la superficie del objeto de estudio, se recibe en un punto de recepción diferente al de emisión del haz láser. El conocimiento de los ángulos de emisión y de recepción posibilita la construcción de un triángulo (según la regla del coseno) y, por ello, las coordenadas (en los ejes X, Y y Z) del punto sobre la superficie de estudio.

Debido a sus limitaciones en distancia, no son usuales las aplicaciones de láseres escáner de triangulación dentro de la ingeniería civil, por lo que son usados principalmente en la digitalización de pequeños objetos que requieren una alta precisión en las medidas, por debajo del milímetro.

2.2.5 Fundamentos teóricos

El láser escáner es un instrumento de exploración que permite mediciones a partir de coordenadas de puntos en tres dimensiones, según los valores de distancia y del ángulo comprendido entre dichas coordenadas [8]. La tecnología se basa en la emisión de un haz de luz láser sobre un determinado sistema de desviación de dicho haz, ortomecánico o de espejo giratorio, hacia el área que se pretende escanear, donde el dispositivo distribuye el haz de luz láser en un rango vertical de aproximadamente 300° (dependiendo del fabricante) y un rango horizontal de 360°, a una alta velocidad de rotación. Este haz láser es reflejado de nuevo hacia la unidad desde los objetos que encuentra en su camino, posibilitando el cálculo de la distancia así como sus respectivos ángulos de desviación tanto vertical (o de elevación) como horizontal (o de azimuth), definiendo un área [73]. Beneficiándose de la gran cantidad de datos obtenidos, los escáneres estáticos fueron los primeros en ser utilizados en medios terrestres, siendo por ello conocidos como escáneres láser terrestre, *TLS*.

El cálculo de los ángulos de desviación de elevación y de azimuth permitirá la construcción de nubes de puntos, producto genuino del escáner láser, en dos y tres dimensiones, dentro de un sistema de coordenadas esféricas y cilíndricas, respectivamente, convirtiendo dichas coordenadas en coordenadas cartesianas para cada uno de los puntos que conforman la nube (en los ejes X, Y y Z). Con todo, debe explicarse que aunque componen un modelo tridimensional de la superficie de los objetos registrados, esta nube de puntos precisa de un procesamiento posterior, pues sin él sería un modelo demasiado simplificado que podría operar sólo visualmente, al estar conformado por muestras individuales de tipo punto. Asimismo contiene otras características como la amplitud del haz láser usado o los datos RGB (imágenes en color obtenidas a partir de la composición de la intensidad de los colores primarios de la luz, estos son, *red, green and blue* [74]) obtenidos.

2.2.5.1 La telemetría láser

Una de las principales características de la tecnología del láser escáner es la fuente de luz que lleva a cabo la medida; es por ello que, los sensores remotos pueden ser clasificados en dos categorías principales:

- Los sensores pasivos, componentes de tecnologías donde la cantidad de energía que reconoce el sensor es emitida o reflejada desde fuentes externas y

- Los sensores activos, donde el propio sensor contiene la fuente de energía emitida; los dispositivos con este tipo de sensores, el láser escáner por ejemplo, registran parte de la energía emitida una vez es reflejada por el objeto a ser analizado, basándose en este caso en la emisión de una luz láser.

Por consiguiente, el escáner láser genera inicialmente un pulso de luz óptica coherente que, dirigido hacia la zona de estudio, registra posteriormente la radiación del pulso de retorno por el sistema óptico en recepción. Este pulso de retorno es evaluado por el analizador de espectro (una vez lo recibe el fotodetector y lo traspasa a este), quien posteriormente lo digitaliza.

2.2.5.2 Clasificación de peligro del láser

Los tres factores principales que definen la clase de un láser son la Longitud de Onda (λ), el tiempo de exposición a este y la potencia o energía del haz [75]. En base a los acuerdos internacionales de estandarización vigentes, los láseres se clasifican según el peligro que presentan al ojo humano, como se describe en la Tabla 4.

Clase de láser	Indicador del grado de peligrosidad
CLASE 1	Seguro bajo cualquier condición de uso, incluyendo el uso de instrumentos ópticos en visión directa.
CLASE 1M	Láseres que emiten con $302,5 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$. Seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero pueden ser peligrosos si se emplean instrumentos ópticos en visión directa.
CLASE 2	Láseres que emiten radiación visible con $400 \text{ nm} \leq \lambda < 700 \text{ nm}$. La adecuada protección ocular se consigue por respuestas de aversión, incluido el parpadeo, aunque se usen instrumentos ópticos en visión directa.
CLASE 2M	Láseres que emiten radiación visible con $400 \text{ nm} \leq \lambda < 700 \text{ nm}$. La adecuada protección ocular se consigue por respuestas de aversión, incluido el parpadeo, pero la visión del haz puede ser peligrosa si se usen instrumentos ópticos en visión directa.
CLASE 3R	Láseres que emiten con $106 \text{ nm} \leq \lambda < 302,5 \text{ nm}$, donde la visión directa del haz es potencialmente peligrosa, siendo el riesgo menor que ante los láseres de Clase 3B.
CLASE 3B	Láseres cuya visión directa del haz es siempre peligrosa, siendo la visión de reflexiones difusas normalmente segura.
CLASE 4	Láseres que además pueden producir reflexiones difusas peligrosas, pudiendo además de causar daños sobre la piel constituir un peligro de incendio. Su empleo precisa de una precaución extrema.

Tabla 2-4 Clasificación de los sistemas láser

Para el uso práctico de escáneres láser la seguridad debe ser prioritaria. El usuario no solo deberá conocer el procedimiento de uso del dispositivo sino que pondrá especial atención en las precauciones a imponer mientras lo esté operando [8]. Aunque en el pasado algunos escáneres láser poseían clasificación 3R (Z+F Imager 5006, Leica Scanstation 2), actualmente los de Clase 4 generalmente se montan en escáneres láser aéreos, siendo generalizada la clasificación 1 para los escáneres láser terrestres, tanto estáticos como móviles.

2.2.5.3 Características prácticas del escáner láser

A continuación haremos referencia a características técnicas preeminentes durante la toma de datos, relacionadas con la tecnología LiDAR, que deberán ser consideradas.

- Precisión de las medidas: la más común de las medidas de precisión en los escáneres láser es la que se refiere a la precisión en alcance. La medición de distancia electromagnética (*Electromagnetic Distance Measurement (EDM)*) calcula el tiempo de vuelo del haz láser para obtener distancias, teniendo en cuenta las posibles variaciones de la velocidad de propagación de la luz debidas a las condiciones atmosféricas. Es por ello que todos los dispositivos escáner láser incorporan tanto higrómetros como termómetros para la estimación constante de estos parámetros cambiantes, puesto que las condiciones de niebla o lluvia son desaconsejables para el uso del dispositivo.
- Precisión de las medidas en alcance: parámetro relacionado con el error cuadrático medio (ECM) presente en una serie de medidas de un objeto de estudio determinado, representando la diferencia cuadrática entre los datos estimados y el valor real, definidas por la Ecuación 17.

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum (y_{estimado} - y_{real})^2}{N - 1}}$$

Ecuación 17

Donde,

$y_{estimado}$ son los datos que se pretenden obtener, y_{real} son los datos finalmente obtenidos y N el número de medidas realizadas.

- Resolución máxima angular: que aporta información sobre la mínima distancia entre dos puntos de medición consecutivos dentro de un mismo objeto o superficie de evaluación. Se determina en base al paso angular creado por la desviación del haz láser con respecto al campo de observación angular.
- Alcance de operación: expresado en la distancia dependiente de la capacidad reflectiva de la superficie del objeto, señala la mayor distancia que un determinado escáner láser puede alcanzar.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

3.1.1 Área de estudio

La zona de estudio en que se centra el presente trabajo se localiza en la ciudad de Marín, provincia de Pontevedra, centrando la atención en los terrenos pertenecientes a la Escuela Naval Militar (ENM), al Oeste de las instalaciones del Puerto de Marín, con salida a la Ría de Pontevedra (véase Figura 3-1).

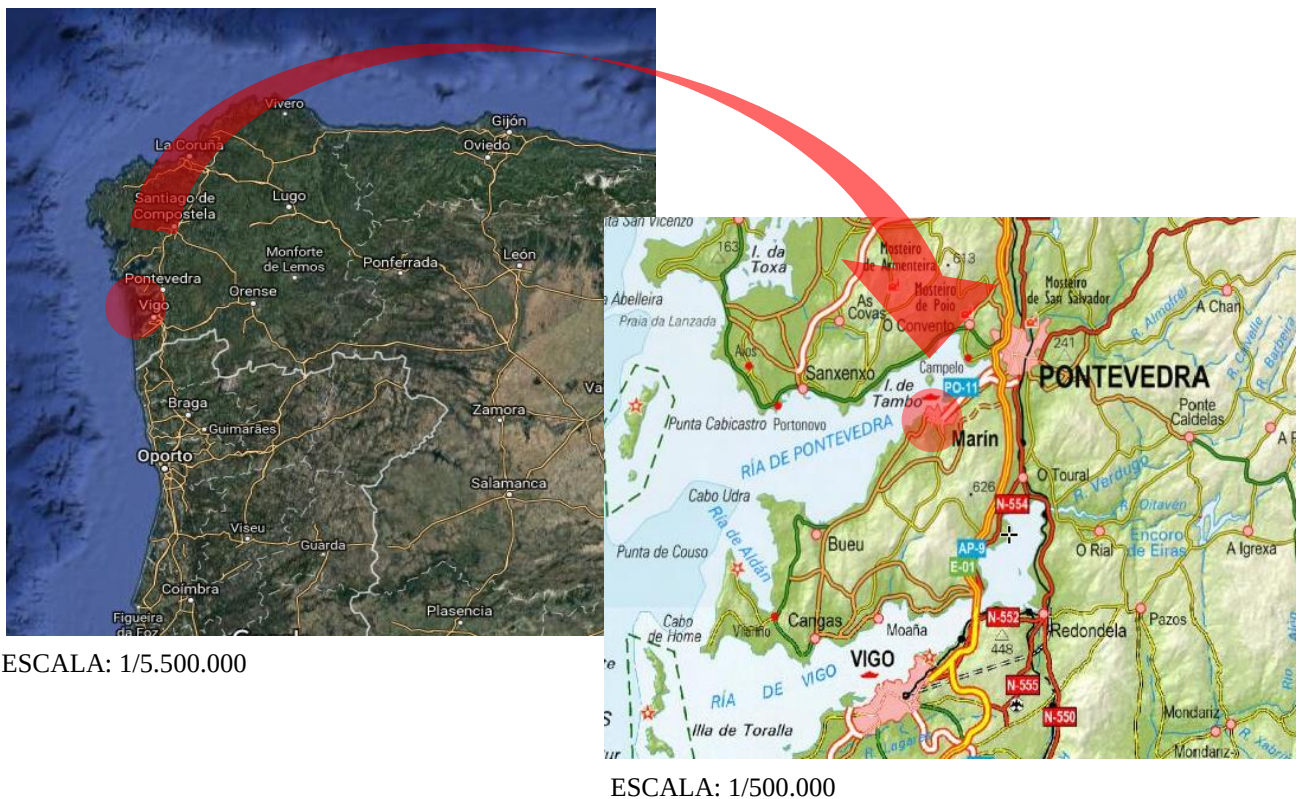


Figura 3-1 Vista aérea de localización de la ciudad de Marín (señalada con el círculo rojo) (vista izquierda [76], vista derecha [77])

En concreto, se trata del dique del Oeste situado junto al Edificio Isaac Peral, localizado en la ENM, con coordenadas: Latitud: 42°23'45,75''N, Longitud: 8°42'24,54''W y una Altitud de 3 m [77]. Respecto a la situación del área de estudio con el entorno al Norte se encuentra el mismo espigón de abrigo, al Este la dársena, al Sur la explanada y al Oeste el palo de señales, todos ellos pertenecientes a la misma ENM (véase Figura 3-2).



ESCALA: 1/12.000



ESCALA: 1/2.000

Figura 3-2 Vista aérea de localización de la Escuela Naval Militar, señalando la zona de estudio (señalada con recuadro rojo) (vista izquierda [77], vista derecha [76])

3.2 El Georradar o Radar de Subsuelo (GPR)

3.2.1 Configuración del equipo y toma de datos

Para la toma de datos con sistema GPR, y previamente al presente estudio, se utilizó un georradar de la compañía Malå Geoscience, con unidad central RAMAC CUII (como se muestra en la Figura 3-3). Se seleccionaron antenas con frecuencias de 800 y 500 MHz, puesto que la combinación de ambas ofrece una adecuada resolución vertical (800 MHz) para el análisis de los materiales más superficiales, a la vez que una suficiente penetración de la señal (500 MHz) en el interior de la estructura con el fin de analizar el material de relleno en las capas de mayor profundidad. Estos datos son calculados a partir de una velocidad de la onda electromagnética, previamente calibrada en base a los materiales existentes en la zona a evaluar, de 12,7 cm/ns. Así, a partir de la Ecuación 12, se obtuvo una resolución vertical de 17,65 cm para una frecuencia de 500 MHz ($\lambda = 25,4$ cm) y de 11,03 cm, de mejor resolución, para una frecuencia de 800 MHz ($\lambda = 15,88$ cm). En lo referente a la resolución horizontal, y a partir de la Ecuación 13, para la frecuencia de 500 MHz se obtuvieron 28,82 cm para una distancia (d) entre antena y superficie reflectora de 10 cm, 42,97 cm para una d de 30 cm y 53,5 cm para una d de 50 cm, todas ellas de menor resolución a las calculadas para la frecuencia de 800

MHz, donde se obtuvieron 21,06 cm para una d de 10 cm, 32,85 cm para d igual a 30 cm y 41,4 cm para una d de 50 cm.

Los parámetros de adquisición empleados fueron: 2 cm de distancia entre trazas y ventanas de tiempo totales de 60 ns (613 muestras) y 75 ns (512 muestras) para las frecuencias de 800 y 500 MHz, respectivamente. Para calcular la distancia entre trazas, y la longitud total de los perfiles, el equipo se desplazaba sobre un carrito de campo con una rueda taquimétrica o encoder.



Figura 3-3 Equipo GPR empleado para la toma de datos

Para una mejor interpretación y visualización del interior del dique, se han considerado metodologías de adquisición y procesamiento en tres dimensiones (3D). Se realizaron perfiles paralelos en dirección X en la malla objeto de estudio (mostrada en la Figura 3-2) con un espaciado entre perfiles de 10 cm, resultando en un total de 67 perfiles para cada frecuencia. La malla prospectada final correspondió a un rectángulo de 27,5x7 m (192,5 m²). Además de cortes horizontales a profundidad, la creación de un cubo 3D de datos permite la extracción de perfiles 2D en ambas direcciones longitudinal y transversal con el fin de mejorar las correlaciones espaciales entre las distintas capas de materiales a distintos niveles de profundidad.

3.2.2 Procesado de datos 2D para la antena de 500 MHz

Como parte del trabajo de gabinete, los datos obtenidos en zona de estudio mediante GPR fueron procesados usando el software ReflexW, en su versión 7.2.4. La Figura 3-4 muestra la interfaz inicial del software [78] de carácter modular, cuya estructura de pestañas y sus correspondientes comandos serán desarrollados a continuación.

Este programa permite la importación en diferentes de archivos en diferentes formatos, el procesamiento, tanto en 2D como en 3D y el análisis de las ondas electromagnéticas obtenidas, para su posterior interpretación, en base a la relación de estas con las características de las ondas inicialmente transmitidas con el dispositivo georradar. Cada uno de los archivos de datos registrado, una vez es importado al software, cambia su extensión desde un archivo binario *.rd3* (matriz de datos con valores de intensidad de reflexión o amplitudes) a un archivo *.dat*.

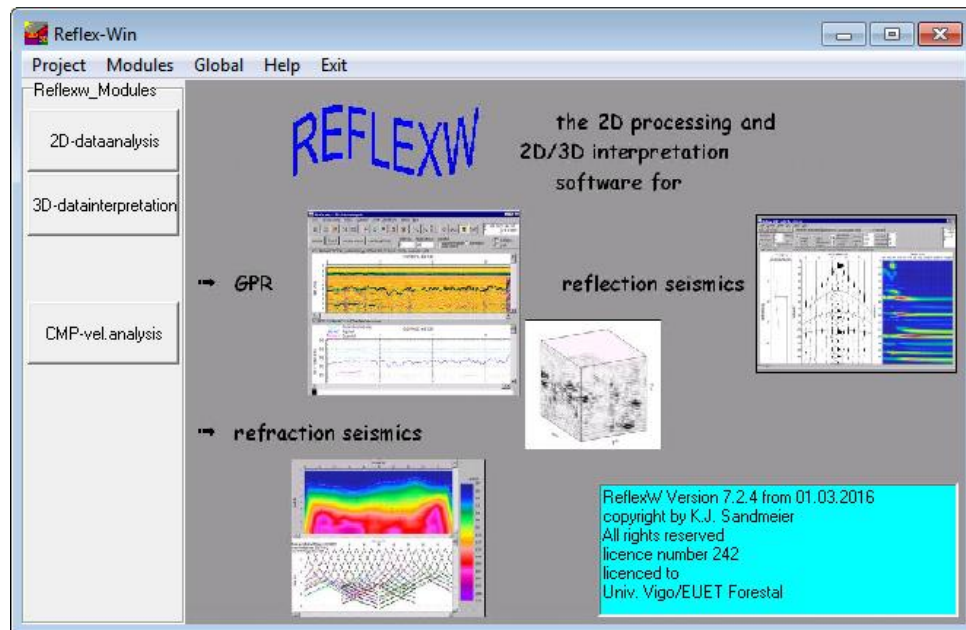


Figura 3-4 ReflexW. Interfaz inicial del programa, que posibilita la elección entre los módulos 2D y 3D

Una vez abiertos los datos brutos (radargrama o imagen GPR) en el programa (como se observa en la Figura 3-5), este permite la elección de distintos filtros para el procesamiento bidimensional (2D) de la señal. El posterior procesamiento 3D de los datos se llevará a cabo con el mismo software.

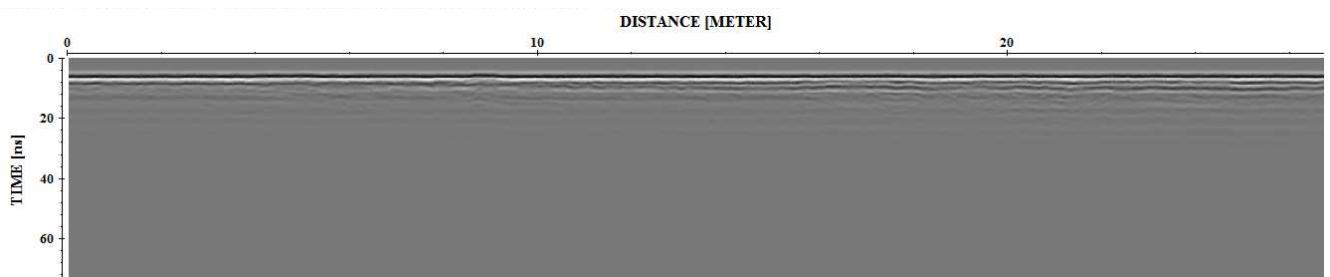


Figura 3-5 Vista del radargrama de 500 MHz en bruto

A continuación, se explicará paso a paso el procedimiento seguido para el procesamiento 2D de los datos obtenidos, indicando los filtros utilizados y los parámetros seleccionados para cada uno de ellos, con el fin de mejorar la señal recibida y llevar a cabo un correcto análisis de la misma. Comenzamos procesando los datos obtenidos con la antena de 500 MHz.

3.2.2.1 Ajuste del tiempo cero

Antes de comenzar con el filtrado propiamente dicho de la señal debemos ajustar la posición del “cero”, en el eje de ordenadas o eje temporal, a un nivel común para todas las trazas del radargrama [79]. Se trata de establecer ese cero al nivel de la superficie del pavimento (primera reflexión que se registra en las trazas), nivel a partir del cual comenzarán a contar las profundidades en términos de distancias dobles de propagación en nanosegundos (ns)). Esta discordancia puede deberse a diferencias térmicas, electrónicas o de inestabilidad del equipo, así como a “saltos” en el tiempo de llegada de la señal directa (o primera reflexión que se produce en el contacto de la señal electromagnética con el aire) debidos a desacoples entre los dipolos receptor y transmisor que componen una antena radar determinada. Es necesario mencionar en este punto que en el presente estudio se han utilizado antenas

biestáticas. Para ello comprobaremos dónde se encuentra la máxima amplitud de la señal (tal y como se ilustra con el recuadro rojo de la Figura 3-6), la cual corresponde al cambio de medio o interfaz aire-suelo.

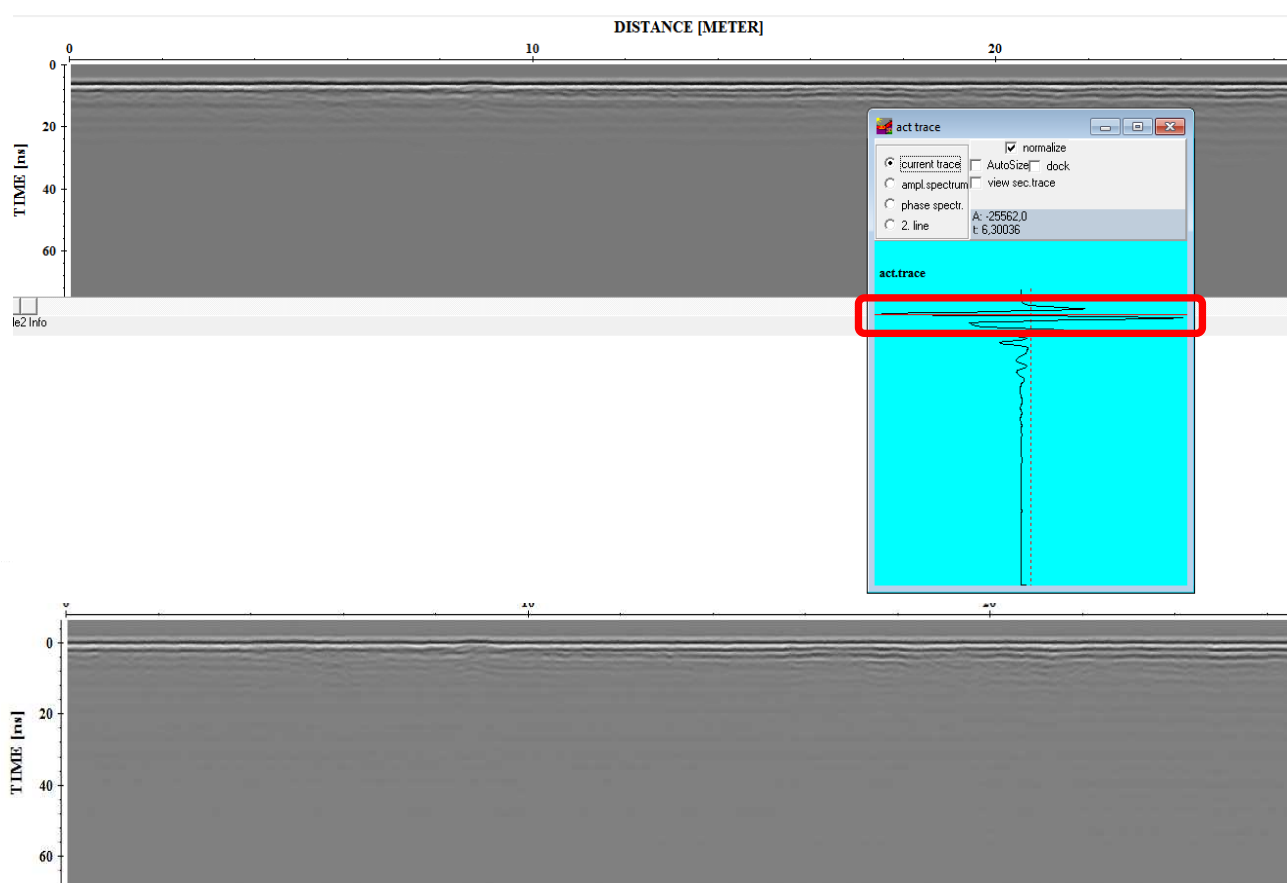


Figura 3-6 Corrección del tiempo cero de inicio de profundidades: antes (arriba) y después (abajo) de la corrección

3.2.2.2 Filtro 1D (filtro vertical/temporal)

Los actuales equipos de georradar presentan una característica común inherente. Se trata del acople de una componente constante de muy baja frecuencia (componente continua [80]), en todas las trazas obtenidas por el radar. El nivel promedio de la señal se traslada desde la amplitud cero a un valor distinto a este. La presencia de este componente normalmente se asocia a fenómenos de inducción o a posibles limitaciones en el rango dinámico de la instrumentación del equipo radar (ver la traza que se ilustra en el radargrama superior de la Figura 3-7).

Para eliminar esta componente, requisito necesario no solo visualmente sino para las subsiguientes aplicaciones de filtrado, hemos aplicado un filtro “dewow” que resta a la señal un valor promedio que coincide con la ventana temporal de baja energía correspondiente a la última parte (de valores 1/3-1/5 desde su alcance máximo) de la longitud de onda. De este modo, la amplitud de la traza se desplaza a su valor cero (ver la traza que se ilustra en el radargrama inferior de la Figura 3-7).

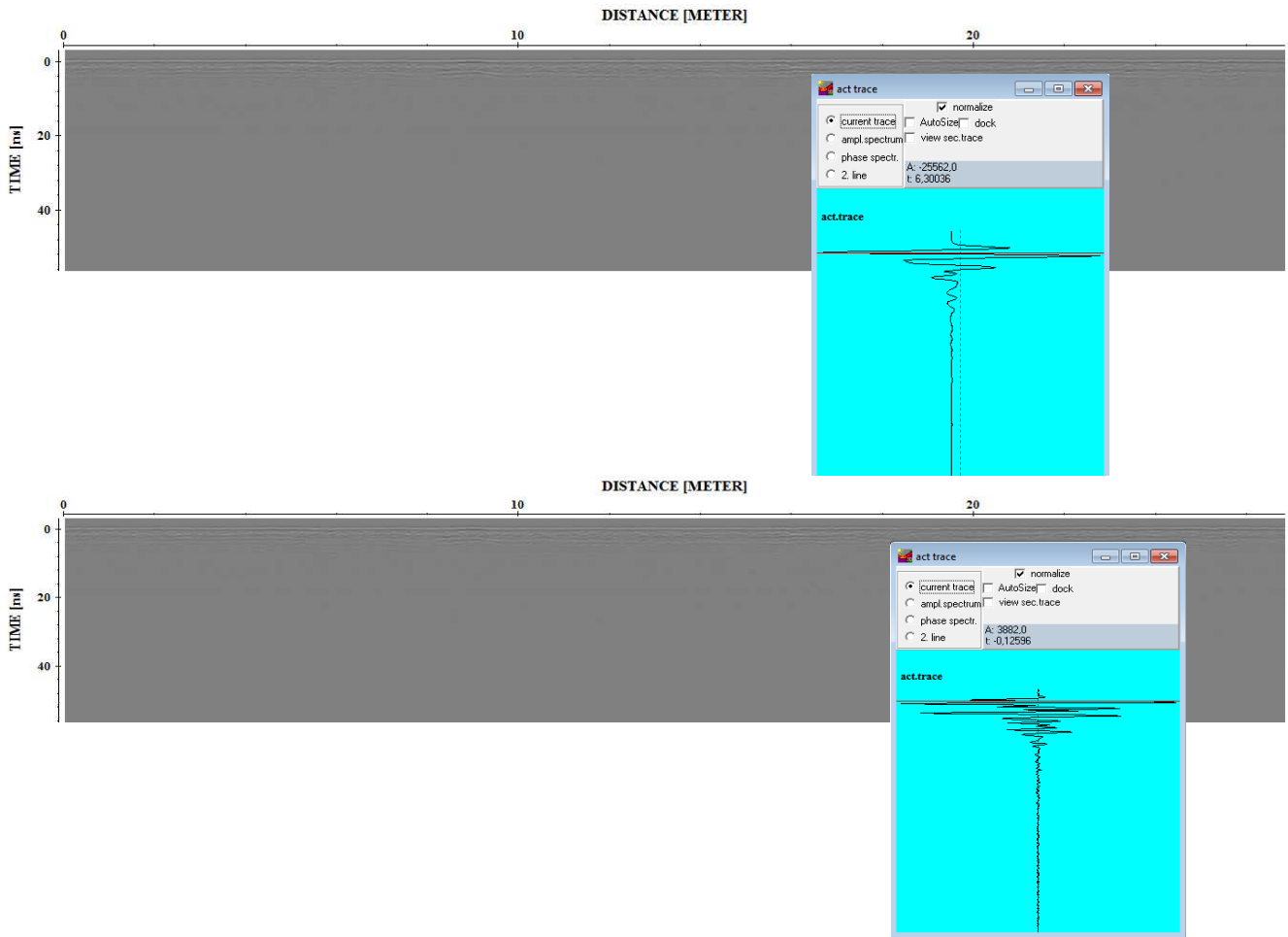


Figura 3-7 Aplicación del filtro vertical (dewow): antes (arriba) y después (abajo) del filtrado

3.2.2.3 Ganancia

Toda señal electromagnética, al propagarse en el subsuelo, pierde energía debido a la atenuación o a la propagación geométrica de dicha señal. La ganancia es una amplificación de la señal recibida, según una multiplicación de datos en base a una función matemática o según unos valores de ganancia introducidos manualmente. Utilizaremos la ganancia para contrarrestar la pérdida instantánea de señal cuando esta llega a mayores profundidades. Para ello, hemos seleccionado una “*gain function*” mediante aplicación de una función lineal-exponencial, asumiendo que la atenuación aumenta conforme aumenta la profundidad de propagación. La Figura 3-8 muestra el resultado de aplicar este filtro, donde se observa la aparición de zonas de mayor contraste en los primeros 20 ns del eje temporal.

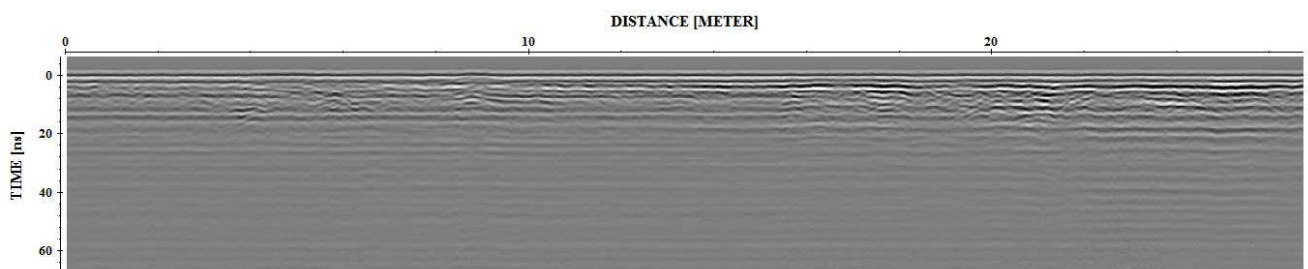


Figura 3-8 Radargrama de 500 MHz tras aplicar la ganancia

3.2.2.4 Filtro 2D (filtro horizontal/espacial)

Con la aplicación de este filtro espacial, se pretende suprimir el ruido de baja frecuencia, originado por un mal acoplamiento entre la antena y la superficie de rodadura, que aparece en forma de bandas horizontales continuas en la totalidad o parte de las trazas registradas (ver radargrama superior en la Figura 3-9). Con esto se pretende eliminar las reflexiones totalmente planas, haciendo destacar aquellas de menor tamaño y geometrías irregulares (ver radargrama inferior en la Figura 3-9), por medio de un valor promedio de trazas (normalmente el coincidente con el valor central del espectro de frecuencias de la antena utilizada). En este caso, se ha utilizado un filtro “*subtracting average*”.

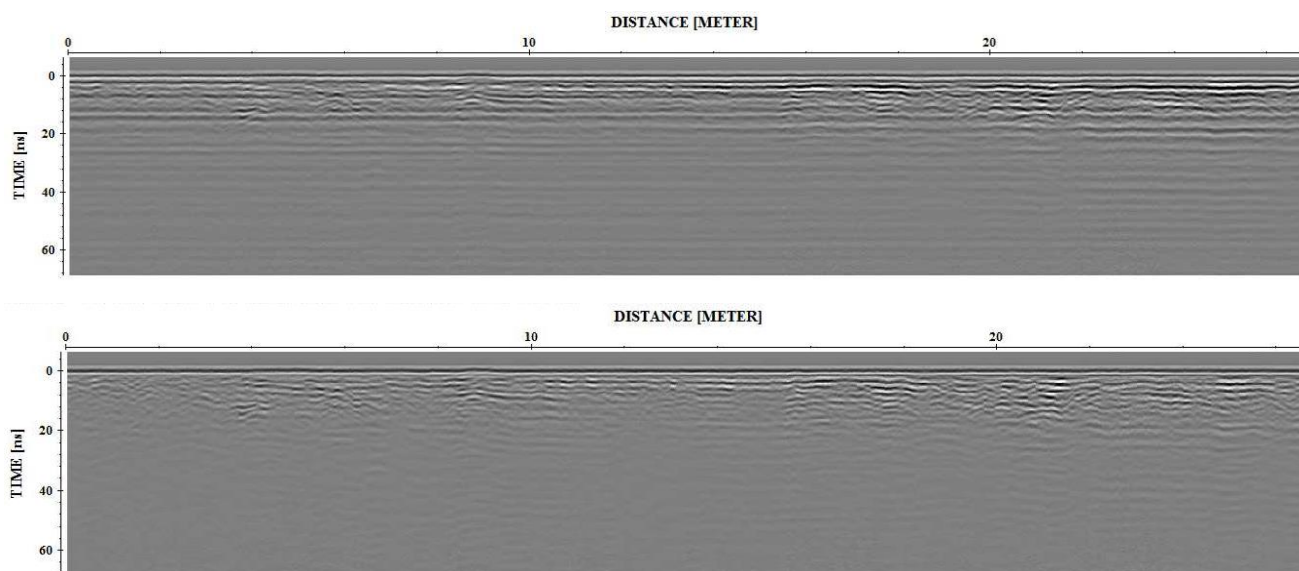


Figura 3-9 Radargrama de 500 MHz antes (arriba) y después (abajo) de aplicar el filtro “*subtracting average*”

3.2.2.5 Div. (divergence) compensation

La aplicación del filtro permite compensar las pérdidas de energía debidas a la divergencia geométrica [81], actuando sobre cada traza separadamente. Se corresponde con un tipo de ganancia que permite la elección manual de la compensación mediante (1) un parámetro proporcional (t), para pérdidas esféricas en fuentes de volúmenes, o (2) la raíz cuadrada de este mismo parámetro proporcional (t) en el caso de pérdidas sobre fuentes lineales o de superficie [78].

En este caso, como se trata de la interpretación de capas de materiales, fuentes lineales, hemos utilizado la raíz cuadrada del parámetro. En la Figura 3-10 se puede apreciar el resultado de aplicar dicho filtro.

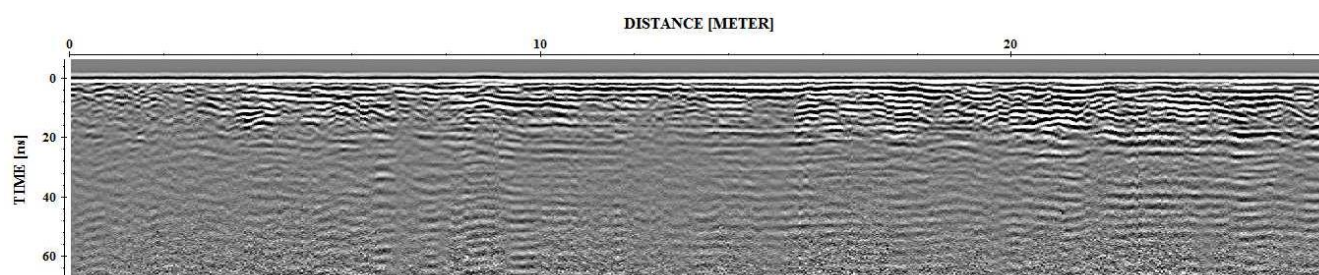


Figura 3-10 Radargrama de 500 MHz tras aplicar el filtro de compensación de divergencia geométrica

3.2.2.6 Tiempo de corte de la señal

Este filtro actúa independientemente en cada una de las trazas a estudiar. Se emplea cuando la ventana de tiempos, configurada durante la adquisición de datos para la propagación de la señal en el subsuelo, no presenta información a partir de una determinada profundidad. Así, mediante el tiempo de corte, eliminamos todas las muestras (*samples*) que no ofrecen información útil para el objeto de estudio (de los 64 ns de la Figura 3-10 pasamos a los 50 ns de la Figura 3-11).

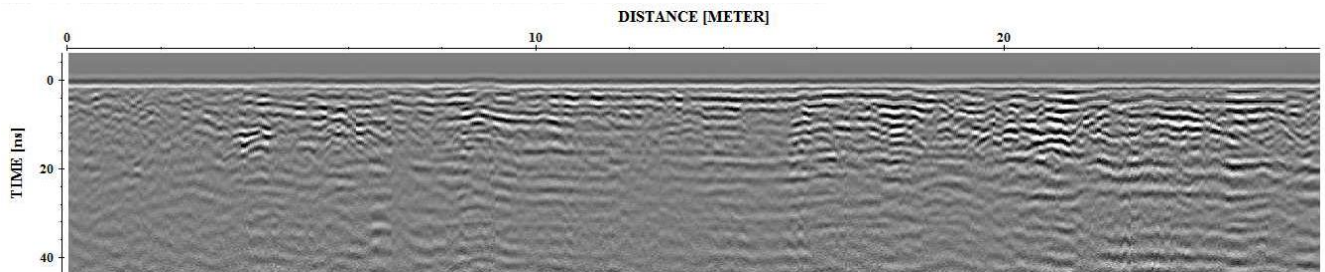


Figura 3-11 Radargrama de 500 MHz tras aplicar el recorte de la ventana de tiempos a 50 ns

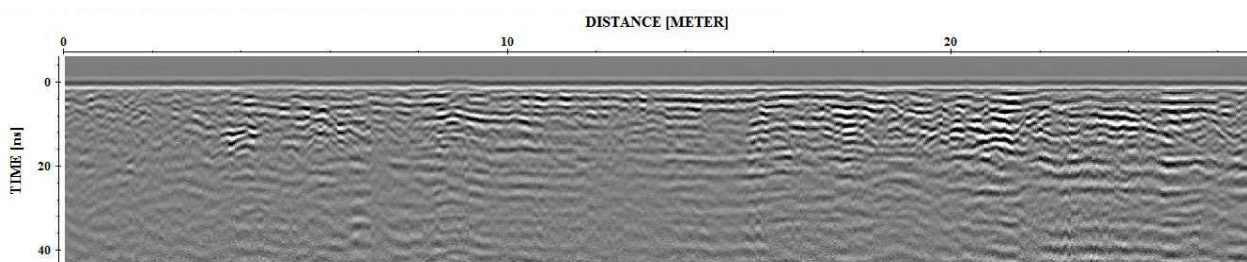
3.2.2.7 Processing flow y procesado 2D para la antena de 800 MHz

Para el procesado de los datos de 800 MHz, se utilizó la misma secuencia de filtrado empleada para los de datos de 500 MHz. La Tabla 5 describe los filtros utilizados y los parámetros de configuración seleccionados para cada caso.

Filtro	Frecuencia central de Trabajo	
	500 MHz	800 MHz
SUBTRACT-MEAN (DEWOW)	2 ns	1,25 ns
GAIN FUNCTION	Factor lineal: 2	Factor lineal: 3
	Factor exponencial: 2	Factor exponencial: 3
SUBTRACTING AVERAGE	250 trazas	400 trazas
DIV. COMPENSATION	0,11	0,11
TIME CUT	50 ns	25 ns

Tabla 3-1 Filtros y parámetros utilizados para el procesado 2D de datos de 500 y 800 MHz

Una vez aplicada la secuencia de filtrado al conjunto de los radargramas de 800 MHz obtendremos su radargrama final correspondiente; la Figura 3-12 muestra los radargramas finales de filtrado para cada una de las frecuencias utilizadas.



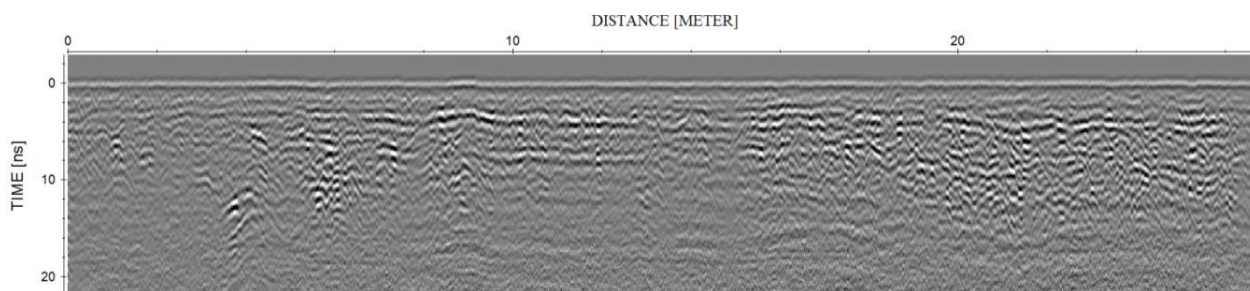


Figura 3-12 Radargramas procesados mediante la secuencia de filtrado 2D utilizada para antenas de 500 MHz (arriba) y 800 MHz (abajo)

3.2.3 Procesado de datos 3D

Una vez accedemos al módulo de procesamiento 3D (como muestra Figura 3-4) generamos un cubo de datos mediante la compilación e interpolación de todos los perfiles anteriormente procesados bidimensionalmente, para cada una de las antenas. En este paso, debemos especificar la distancia entre perfiles (10 cm) que fijamos durante la adquisición de datos para un correcto dimensionamiento del tamaño de malla prospectada. En la Figura 3-13 se puede observar un ejemplo del cubo 3D generado para la antena de 500 MHz, así como una time-slice (imagen XY o corte horizontal) y una imagen transversal (imagen YZ o corte transversal). Informando a la aplicación de la velocidad de propagación de la señal en el medio, podremos saber la profundidad en metros de los cortes horizontales para un mejor análisis del alcance de los daños en el interior de la estructura.

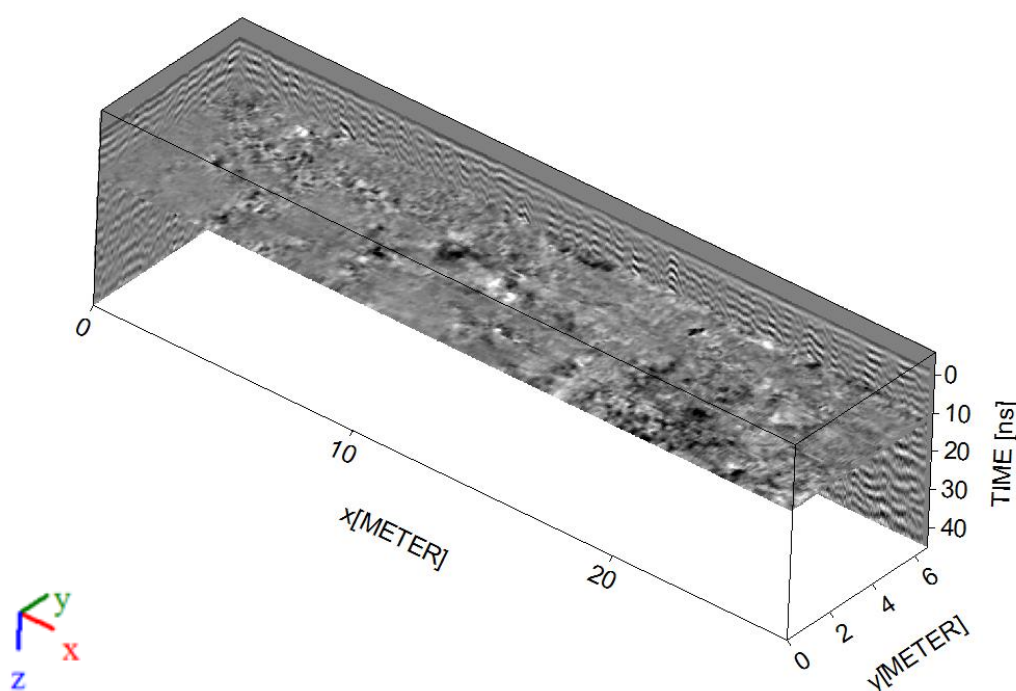


Figura 3-13 Vista del cubo 3D generado a partir de los datos de 500 MHz

3.3 El Láser Escáner

3.3.1 Configuración del equipo y toma de datos

A la hora de adquirir las mediciones de escaneo láser, datos estos ya existentes al comienzo del presente estudio, se tuvo presente la existencia de factores que afectaban negativamente a su exactitud con respecto a las geometrías reales [82]. Estos factores están provocados fundamentalmente por errores de tipo interno (específicos del hardware, como son aquellos debidos al diámetro del haz láser, cuya dispersión puede provocar retornos duplicados o a la reflexión de la señal), o externo (debidos a las diferentes propiedades reflectivas de los materiales, temperaturas superficiales, condiciones atmosféricas, ambientes de humedad o polvo, etc.) [83], pero también por la adecuada distribución de las tomas. El procedimiento de toma de datos, para cada uno de los emplazamientos, fue idéntico:

- Colocación del trípode y nivelación expedita del mismo, con ayuda de las patas telescópicas que incorpora.
- Ubicación del equipo láser escáner y nivelación del conjunto mediante el nivel de burbuja que incorpora el trípode.
- Encendido del equipo e introducción de los parámetros necesarios para la medición y ejecución del cálculo de medidas.



Figura 3-14 Vista del equipo durante la toma de datos y display de la pantalla táctil que incorpora (imágenes centro y derecha [73])

El escáner láser 3D usado pertenece a la casa comercial FARO, modelo FARO[®] FOCUS^{3D} X 330, que mide el tiempo de vuelo, TOF, entre el pulso emitido y el recibido [73]. En la Figura 3-14, se muestra el sistema, así como la pantalla de inicio del software operativo de que dispone. Con un campo de visión horizontal de 360° y vertical de 310°, dispone de un alcance mínimo de 0,6 m y máximo de 330 m y es capaz de obtener escaneos máximos de nubes de 976 000 puntos por segundo. En este trabajo, la resolución empleada fue 1/5 con calidad x3, lo que implica una separación cada dos puntos consecutivos de 6,136 mm a una distancia de escaneo de 10 m, y supone asimismo una duración de 08:48 [mm:ss] necesarios para cada escaneo.

Este escáner genera archivos de datos de escaneo con extensión *.fls*, que se almacenan dentro de la tarjeta de memoria del hardware. Finalizado el período de trabajo de campo, permite la descarga de los archivos a un ordenador para el procesamiento posterior.

El escáner modelo FOCUS^{3D} X 330 utiliza un láser con nivel de seguridad Clase I para el usuario, y puede escanear objetos incluso estando expuestos a la luz solar directa, sin ser necesario la existencia de luz, no siendo así para la cámara fotográfica que incorpora. Es pequeño y ligero, siendo por ello indicado para estudios en exteriores. Dispone de GPS integrado, posibilitando la correlación del conjunto de escaneos individuales obtenidos mediante un procesamiento posterior.

Este láser escáner es apto para el análisis e inspección en diferentes campos de aplicación como arquitectura, ingeniería civil, levantamiento del terreno y fabricación industrial, haciendo posible el dimensionamiento de distancias y los cálculos de volumen y área [73].

3.3.1.1 Resolución de la captura

Cuando se habla de resolución se hace referencia al nivel de detalle que se precisa para las capturas. Este se basa en la obtención de la resolución óptima que necesitaremos para poder representar de manera precisa el detalle de menor tamaño. La precisión máxima depende de cada dispositivo, siendo un parámetro que normalmente el usuario puede configurar en el instrumento. Por consiguiente, la resolución de la nube de puntos final es una característica que depende de la situación del instrumento respecto de la zona u objeto a escanear; así, la separación entre los puntos no será uniforme en toda la superficie escaneada, desde un punto de medición determinado, siendo esta menor a medida que nos alejamos del emplazamiento del láser escáner.

El hecho de escanear a la máxima resolución no siempre es la opción más deseada, puesto que a mayor número de escaneos, mayor será el tamaño de los archivos resultantes, aumentando por consiguiente el volumen de datos a manejar. En este caso, el TLS Faro Focus^{3D} X 330 nos ofrece una resolución máxima de 2 mm.

Otra característica clave a la hora de obtener un registro lo más fiable posible es la reflectividad de la superficie del objeto a evaluar. Cuanto mayor sea la intensidad de la señal de retorno más precisa será la distancia medida. Por consiguiente, si hablamos de reflectividad estamos hablando de calidad en la medición. Consideraremos que el pavimento a estudiar ofrece una reflectividad aceptable, pues sus condiciones geométricas no muestran distancias largas ni ángulos muy escorados que generen ruido en la señal obtenida. Cuanto más se aleje la dirección del haz láser de la perpendicular a la superficie a medir mayor será el ángulo de incidencia de este, reduciéndose la intensidad de la señal reflejada. Además, el pavimentado está formado por materiales claros que reflejan mejor la señal frente a los materiales oscuros.

3.3.1.2 Planificación de los estacionamientos

Para llevar a cabo el estudio y previamente a la toma de datos, se realizó un análisis del emplazamiento de la zona de estudio, de 27,5 x 7 m (192,5 m²), determinándose que el número de estacionamientos necesarios para el levantamiento planimétrico/topográfico sería de ocho, seis alrededor de dicha superficie y dos dentro de ella.

3.3.1.3 Captura de las nubes de puntos

El modelo de nube de puntos, producto de cada escaneo, no es sino una copia virtual de la zona u objeto de estudio, compuesta por un número determinado de puntos cuya captura se realiza de forma altamente automatizada. Se obtuvieron, desde cada estacionamiento del escáner, una serie de mediciones planeadas tanto monocromáticas como en color. Tras ello, comienza el trabajo de gabinete.

La extensión .fls es exclusiva del fabricante FARO®, con lo cual es obligatorio trabajar con el software propio y administrado por el escáner láser FARO FOCUS^{3D} X 330, esto es, el software

SCENE, con el fin de obtener dichos datos en formato *ASCII*, necesario para el posterior procesamiento con el software RIEGL RISCAN Pro.

SCENE, en su versión 6.0.2.23, es un software concebido para el tratamiento, gestión y procesamiento de los datos obtenidos con los escáneres láser terrestres anteriormente descritos así como con otros productos similares en el mercado, compatibles con él, con imágenes finales tanto en color como monocromáticas. De fácil manejo, posibilita desde sencillas mediciones hasta la visualización de escaneos procesados en 3D, estandarizados para la Industria, o la exportación de archivos en diversos formatos de nube de puntos (como se pretende para nuestro TFG) para posteriores empleos CAD (Diseño asistido por ordenador (*Computer Aided Design*)).

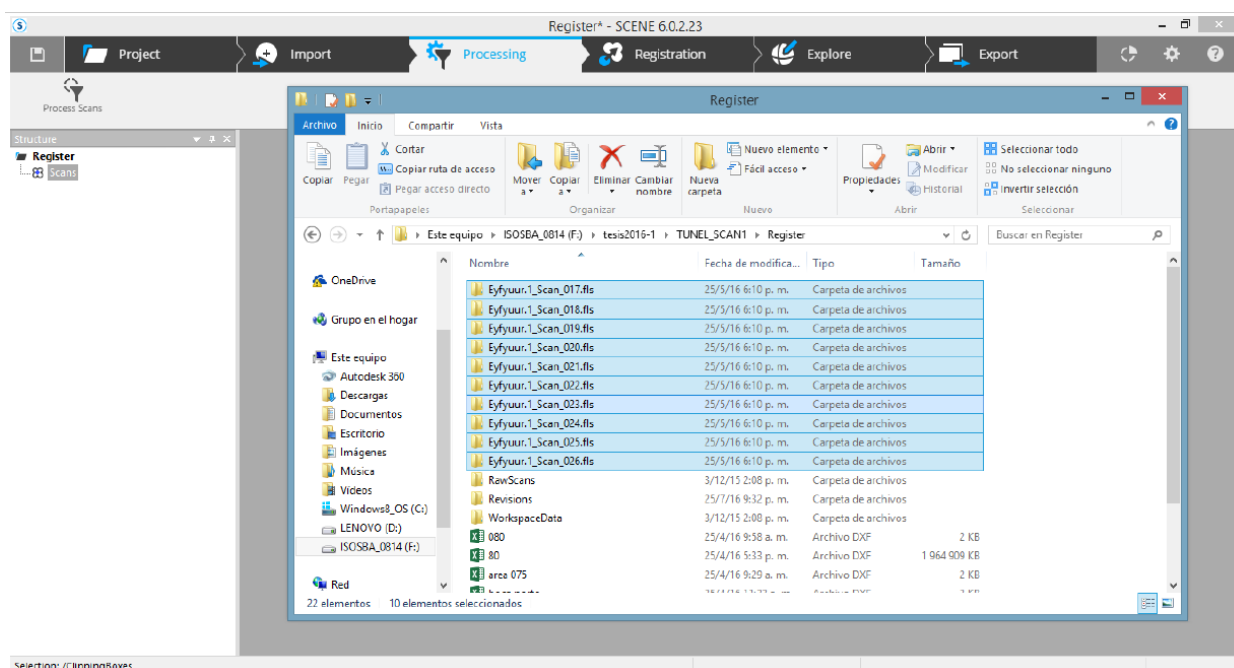


Figura 3-15 Pantalla principal del software Scene. Pestaña “Processing” [84]

La pantalla principal del software se divide en seis pestañas, de las cuales haremos uso de “Project”, “Import”, “Export” y de “Explore”, proceso que describiremos más adelante. Adicionalmente, dispone de la pestaña “Processing” (mostrada en la Figura 3-15), que gestiona la creación de nubes de puntos a partir de pares de escaneos seleccionados previamente. Este paso en el procesamiento puede ejecutarse manualmente, mediante la localización de dos puntos idénticos dentro de la malla de puntos, o con la ayuda de esferas o *targets* que previamente se hayan posicionado estratégicamente en la zona a ser evaluada, las cuales ayudan a que se lleve a cabo dicho proceso con mayor rapidez. La Pestaña “Registration” permite la creación de un archivo a partir de una composición de nubes creadas con anterioridad, permitiendo administrar las características presentes en las nubes resultantes como la cantidad de puntos por vista (ganando o perdiendo densidad y resolución finales del archivo resultante), el color, selección de zonas dentro del escaneo, etc.

A continuación se explica el proceso realizado mediante la aplicación SCENE para el cambio de extensión de nuestros escaneos con el fin de ser procesados posteriormente mediante el software RIEGL RISCAN Pro:

- Inicialmente usaremos la pestaña “Project” [73], que permite la creación de un nuevo proyecto, asignándole a esta carpeta una localización y un nombre. El formato de esta carpeta de proyecto poseerá la extensión *.lsproj*.

- Con el nuevo proyecto abierto, la pestaña “*Import*” (como se muestra en la Figura 3-16) permite la selección de todos los escaneos tomados durante el trabajo de campo, para posteriormente “copiarlos” dentro de la carpeta creada con *Project*. Con esta acción se precargan los escaneos seleccionados dentro del software SCENE. Para poder operar con cada una de las nubes de puntos, dentro de la pestaña “*Import*”, haremos clic derecho sobre “*Scans*”, seleccionando la nube de puntos correspondiente y haciendo nuevamente clic en “*Create point cloud*”, donde seleccionaremos los escaneos a color que usaremos para este fin. Este proceso recopila todas las propiedades contenidas en cada archivo (datos de color e intensidad, clinómetro, compensación angular, etc.).

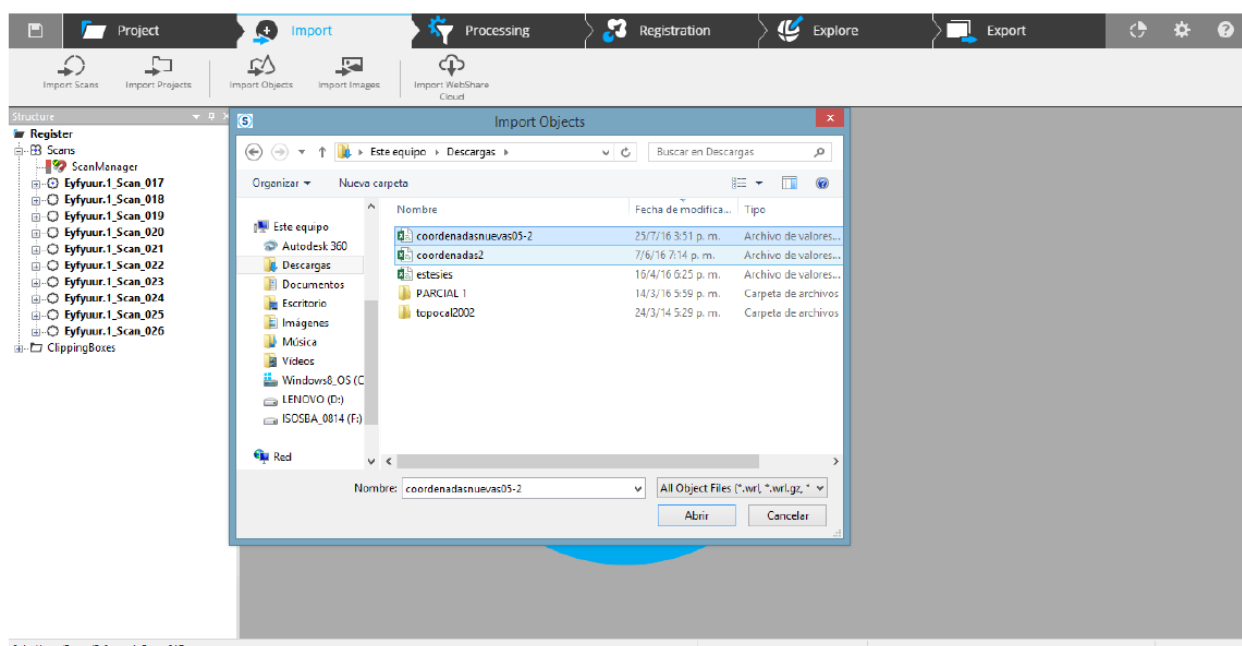


Figura 3-16 Pantalla principal del software Scene. Pestaña “*Import*” [84]

Al finalizar dicho proceso, se podrán visualizar en la columna “*Structure*”, situada a la izquierda de la zona central de la interfaz, cada una de las nubes haciendo clic en “*3D View*” dentro de la pestaña “*Explore*”. De igual manera se puede acceder a las diferentes imágenes procedentes de cada escaneo.

- La pestaña “*Export*” permite guardar los datos del procesado en otros formatos compatibles con los diferentes programas que están destinados a la adquisición y procesado de datos LiDAR [73]. En esta pestaña se cambian las nubes de puntos del formato *.fls* a archivos de extensión *ASCII*. Para ello, dentro de “*Export*” haremos clic derecho en “*Scans*”, seleccionaremos “*Export*”, “*Scans*” y “*Point clouds*”, eligiendo dicha extensión.

Una vez las nubes de puntos poseen el formato *ASCII*, disponemos de la condición necesaria para la presente fase, consistente en el registro de las nubes de puntos y su utilización para la obtención de las medidas necesarias para comenzar la reproducción de la superficie del dique, objeto del presente TFG. Para el registro de dichas nubes se utilizará el software RIEGL RiSCAN Pro.

3.3.2 Procesado de la nube de puntos

La obtención completa de los escaneos necesarios para una superficie o un edificio determinado no se consigue habitualmente solo desde una única posición [85]. Solo en este último caso la precisión del modelo equivalente correspondería con el error que cometa el escáner. Al tomarse varios escaneos

desde diferentes estacionamientos sumaremos el total de todos sus errores acumulados. El registro de nubes de puntos consiste en el cálculo de puntos comunes entre nubes, persiguiendo que no exista ningún hueco sin ser reproducido en el modelo; además, la disponibilidad de una mayor densidad de puntos permitirá obtener unos mejores resultados. En el presente apartado se detallará el procedimiento seguido para el registro parcial de los datos con ayuda del software mencionado.

3.3.2.1 Importación de los datos

RIEGL RiSCAN Pro, en su versión 1.8.1, es un programa diseñado para la captura de datos y el posterior tratamiento de los mismos, permitiendo al usuario un amplio número de tareas, tanto de toma de datos como de trabajo de gabinete [86]. Orientado a la ejecución de proyectos, incluye desde la configuración del sensor hasta la adquisición, visualización y el guardado de dichos datos una vez tratados en un directorio de estructura simple que contiene los datos del escaneo, las fotografías calibradas, la información del registro y el producto final del procesado.

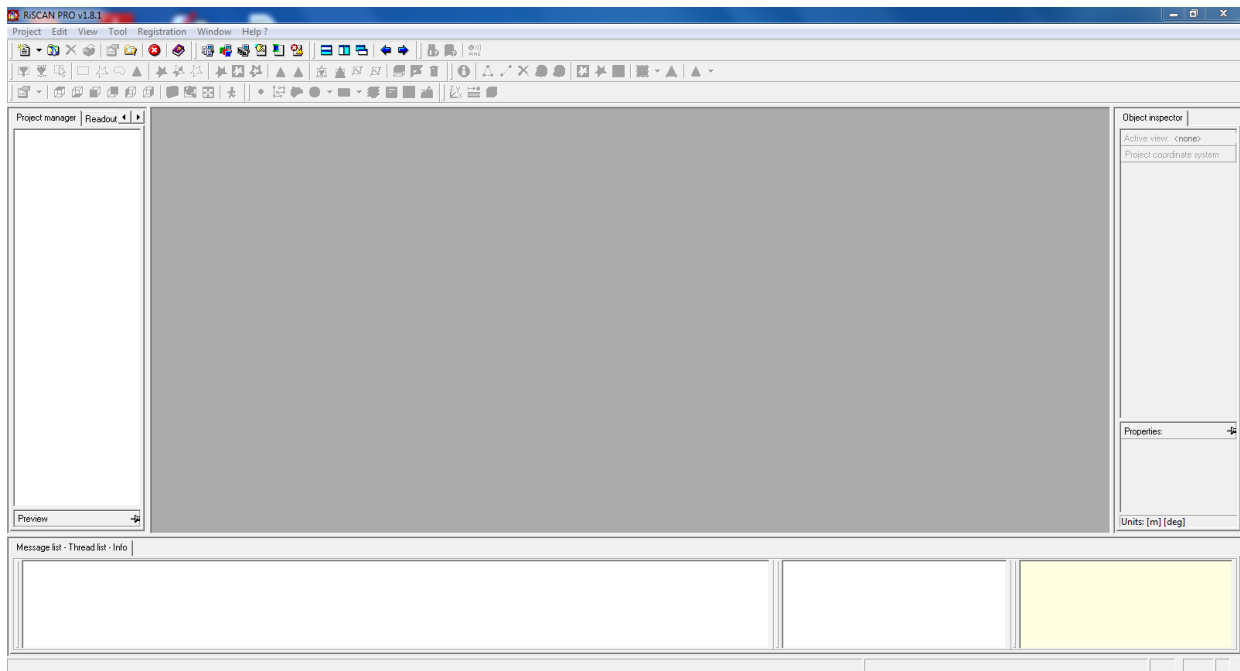


Figura 3-17 Pantalla principal del software Riegl RiScan Pro, en su versión 1.8.1

En la pantalla principal, como se muestra en la Figura 3-17, se encontrarán las siguientes ventanas:

1. El menú principal: con un menú de estructura de barra de herramientas situado en la parte superior del interfaz, que dispone de comandos de gestión de proyectos y tratamiento de datos, selección y eliminación de daños, creación de objetos, etc.
2. *Project manager*, situada a la izquierda con un menú de estructura de árbol, que permite almacenar la información relativa al proyecto activo (a partir de sus datos de escaneo en crudo, matrices de unión, datos de filtrado, etc.), las imágenes complementarias, las dianas de puntería registradas (que en este caso no se han utilizado), los puntos de referencia y los puntos GPS.
3. *Message list window*: situado en la parte inferior, es el registro de mensajes creados por cada una de las funciones de RiSCAN utilizadas.

4. *Threat control window*: situada a la derecha de la anterior, representa la secuencia de acciones de tratamiento de los procesos tanto en curso como ya finalizados, diferenciándolos por colores. Este apartado posibilita:
 - la visualización 2D y 3D de las nubes de puntos,
 - la eliminación de ruido,
 - la fusión entre nubes (registro),
 - los filtros que permiten suavizar las nubes de puntos,
 - la georreferenciación y la texturización de dichas nubes, entre otras acciones.
5. *Mean working area*: es el área central y principal de trabajo, donde se controlan y visualizan el procesamiento de datos para componer las nubes de puntos.
6. *Object inspector*: situada a la derecha, dispone de un menú con estructura de árbol y permite al usuario la gestión de los archivos visualizados en la interfaz.

3.3.2.2 Creación de un nuevo proyecto mediante RiSCAN Pro

Previamente al tratamiento de los datos se debe realizar una copia de seguridad de los mismos, con el fin de evitar tener que repetir la toma de datos ante cualquier eventualidad inesperada. Tras ello, desde el “Menú principal” se selecciona la opción “*Create new project*”, donde se escogerá la localización y el nombre del proyecto guardado previamente para obtener un formato final de extensión *.rsp*.

Tras ello, en la ventana “*Project manager*” aparecerá el proyecto recién creado, desglosado este en varias carpetas, una por cada escaneo importado. Dentro de esta ventana, en su subapartado “*Scans*”, una vez se haga clic derecho y se seleccione “*New scanposition*” como se muestra en la Figura 3-18, se pueden importar los archivos *ASCII* que han sido previamente exportados a formatos de extensión *.xyz*, creando tras ello tantas posiciones de escaneo como archivos se tuvieran. Dentro de cada escaneo se dispondrá de un menú para acceso a los distintos datos asociados que posea.

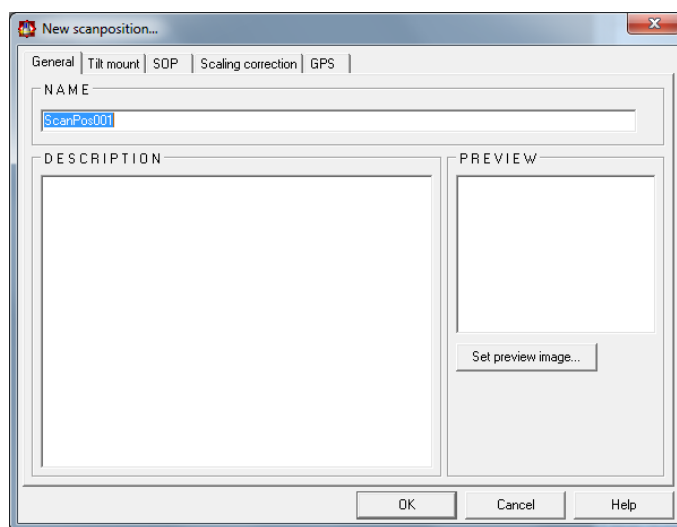


Figura 3-18 Project Manager permite la importación de escaneos a partir de “*New scanposition*”

Dado que los datos a importar no son propios de la interfaz de adquisición de RIEGL RiSCAN Pro, se deberán cargar desde la sección “*POLYDATA*” dentro de la pestaña “*Project manager*”. Tras ello, se podrán visualizar los datos recogidos por el láser escáner, guardados en una tabla con valores numéricos. El siguiente paso es asignar a cada una de las columnas de la tabla una de las coordenadas disponibles. En este caso, debido a que se han realizado escaneos con color, la tabla presentada contará

con siete columnas que corresponden, en este orden, a las coordenadas X, Y y Z, a los colores RGB (Rojo, Verde, Azul) y a los valores de intensidad.

Una vez asignados los datos a dichas columnas, el software permite su visualización en forma de nube de puntos, como se muestra en la Figura 3-19, en base a las siguientes posibilidades:

- La amplitud: permitiendo al usuario escalar el color de cada uno de los puntos, entre dos colores que delimitan su máximo y mínimo de intensidad, de acuerdo con la amplitud de los puntos.
- El falso color, según:
 - La distancia: el color de cada uno de los puntos viene determinado por la distancia entre cada uno de los puntos y el origen de coordenada.
 - La altura: el color de cada punto se determina en base a la altura del punto con respecto al plano X-Y del sistema de coordenadas seleccionado.
 - Y el plano: el color de cada punto se basa en la distancia entre la proyección normal del punto con el plano definido.
- El color verdadero, pudiendo diferir entre:
 - El escalado lineal: donde el color de cada punto se coge de los datos de color verdadero de los archivos importados.
 - El escalado logarítmico: siendo un escalado lineal, pero aplicando una escala de colores logarítmica.
- Otras posibilidades, pudiendo ser:
 - De un único color, donde todos los puntos tienen el mismo color.
 - Mediante desviación de colores, donde para cada uno de los puntos el color se escala entre dos colores definidos por el usuario del software, en base a la desviación entre ambos.

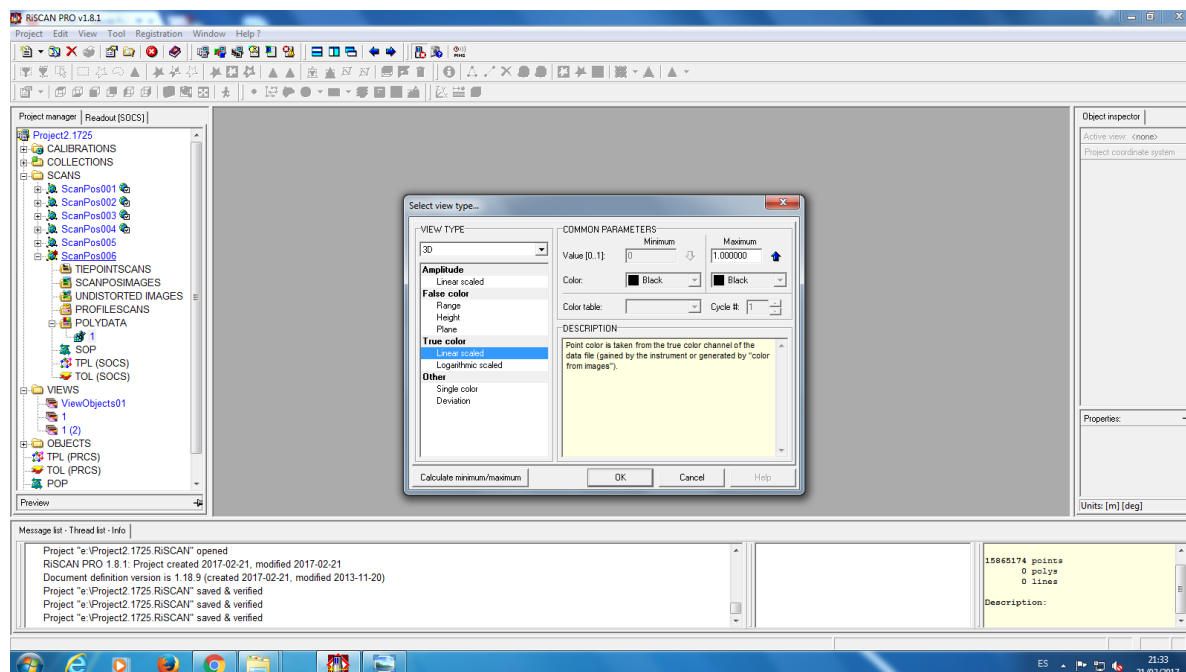


Figura 3-19 Selección del tipo de vista de los escaneos previamente al registro mediante “Select view type”

Finalmente, y de cara al registro de los datos para el presente trabajo, escogeremos tanto la Amplitud como el Color Verdadero con escalado lineal. Estas nos permiten trabajar con todas las variables presentes en los datos obtenidos inicialmente.

3.3.2.3 Registro de las nubes de puntos

Una vez que se han importado cada uno de los archivos individualmente comienza la fase de registro, donde se procederá a unir las nubes de puntos que estos representan, con el fin de reducir los huecos y las zonas ciegas de análisis dentro de cada escaneo obteniendo, al fin, una mayor densidad de puntos y por ello unos resultados mejorados.

Inicialmente cada uno de los escaneos está referido a un sistema de coordenadas diferente, el del escáner (de origen en su emplazamiento y orientación aleatoria). En esta fase, donde los puntos están afectados por el error que proporcione el equipo, es necesario el alineamiento de todos ellos para que compartan un mismo sistema de referencia local.

El registro se llevará a cabo por pares de nubes, con el fin de obtener las medidas necesarias para iniciar el modelado de la superficie del dique, de manera indirecta. Este se inicia fijando una de las posiciones del escaneo, que en nuestro caso será la cero. Para ello, en la ventana “*Project Manager*” se hace clic derecho sobre 0, seleccionando la opción “*Registered*” y “*Activated*”, confirmando ambas mediante el “*check*” azul. Entonces, para poder trasladar y rotar nuevas nubes de puntos sobre esta primera se deberá primero fijar la matriz de rotación y posición (*SOP*), haciendo clic derecho sobre *SOP*₀, para seleccionar la opción “*Freeze*”, que se confirmará con un “*check*” azul en forma de estrella.

A continuación, desde el menú principal seleccionaremos la herramienta “*Coarse registration*”, como se muestra en la Figura 3-20 (izquierda), que crea una ventana con dos apartados diferenciados:

- Vistas (*Views*).
- Pares de puntos (*Point pairs*).

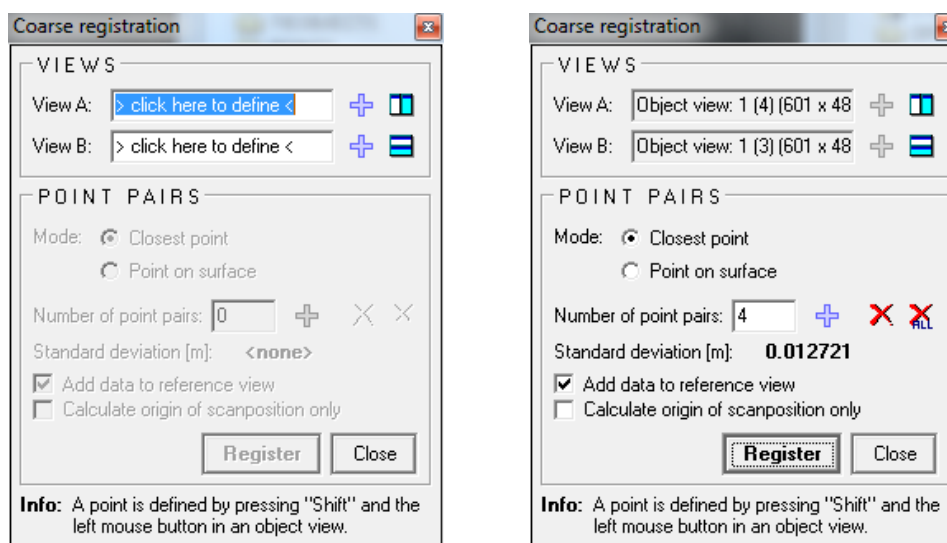


Figura 3-20 Registro de dos vistas para crear una nube de puntos usando la herramienta “*Coarse registration*”, mostrando su vista inicial (izquierda) y cuando proporciona la desviación estándar final obtenida (derecha).

En el primero de ellos, “*Views*”, existen dos recuadros: Vista A y Vista B. Estas dos representaciones corresponden a las dos nubes de puntos que se desean unir. La primera de las vistas que seleccionemos corresponderá con la nube fija, simplemente haciendo clic sobre la opción View A, la cual no se moverá ni rotará quedando como referencia; seleccionaremos luego la nube de puntos que se “adaptará” a la fija siguiendo el mismo procedimiento pero esta vez sobre la opción View B.

Una vez seleccionadas las dos nubes de puntos a unir se activa automáticamente el apartado “*Point pairs*”. En él, existen dos modos de selección de puntos homólogos:

- Punto más cercano (*Closest point*).
- Punto en superficie (*Point on surface*).

Dentro de este apartado, la opción “*Closest point*” selecciona el punto, dentro de una nube específica, que se encuentra más cercano a la posición señalada por el cursor del ratón, mientras que la opción “*Point on surface*” seleccionará el punto más cercano a la posición señalada por el cursor del ratón pero dentro de la superficie presentada, hecho que presenta la ventaja de no seleccionar un punto que se encuentre detrás de la superficie que se desea seleccionar. Para nuestro trabajo tomaremos puntos homólogos con el modo “*Closest point*”.

Cuando, en este estadio, queremos obtener puntos homólogos en diferentes nubes, se buscarán elementos característicos dentro de cada nube (como bordes, inicios de sombras identificativas, ventanas, esquinas, etc.), definiendo así puntos homólogos para diferentes alturas y marcaciones, acción que resulta difícil si no se cuenta con elementos de precisión que la facilitan, como las dianas reflectantes. Una vez señalados dos puntos homólogos se añaden al apartado Pares de puntos, haciendo clic en el “*check*” azul en forma de cruz situado junto a “*Number of point pairs*”. Cada registro deberá incluir, como mínimo, cuatro puntos homólogos.

En la Figura 3-21 se detalla una vista previa al Registro de dos nubes de puntos. La imagen muestra la situación donde, tras haber designado manualmente dos puntos homólogos, estos quedan registrados como un nuevo par de puntos.

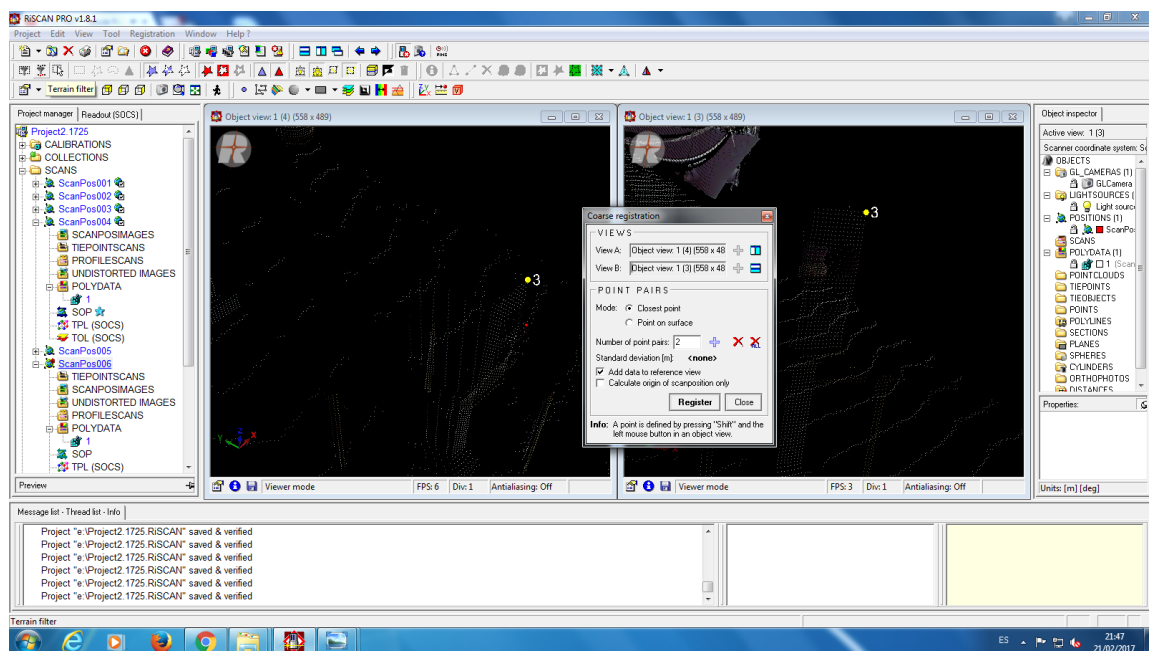


Figura 3-21 Selección de puntos homólogos mediante la herramienta “*Coarse registration*”

Al finalizar cada registro, se obtiene directamente la desviación estándar (*standard deviation*) del mismo. Este parámetro es un indicador de la dispersión de sus componentes, según la Ecuación 18, al medir el alejamiento entre el conjunto de los puntos y el promedio de dicho conjunto; en nuestro trabajo aceptaremos una desviación estándar de 2 cm o menor, como muestra en la Figura 3-20 (derecha).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 18

Donde,

x_i es el dato comprendido entre 0 y n , $\bar{x}$ es el promedio de los datos y N el número de datos totales.

En la Figura 3-22 se muestra la interfaz del software una vez se ha registrado una nueva nube de puntos. En esta situación, el menú “*Object inspector*” hace posible la superposición y visualización de las nubes de puntos que se encuentren registradas. En él se muestra, dentro de la carpeta “*Polydata*” (ver recuadro rojo de misma Figura) las cuatro nubes de puntos que previamente han debido ser arrastradas a esa carpeta desde cada uno de los escaneos iniciales importados al software y visibles en el menú de la derecha “*Project Manager*”.

Con todo, la Figura muestra la visualización compuesta de las cuatro nubes, diferenciadas en base a los cuatro colores que el software les ha asignado para tal fin.

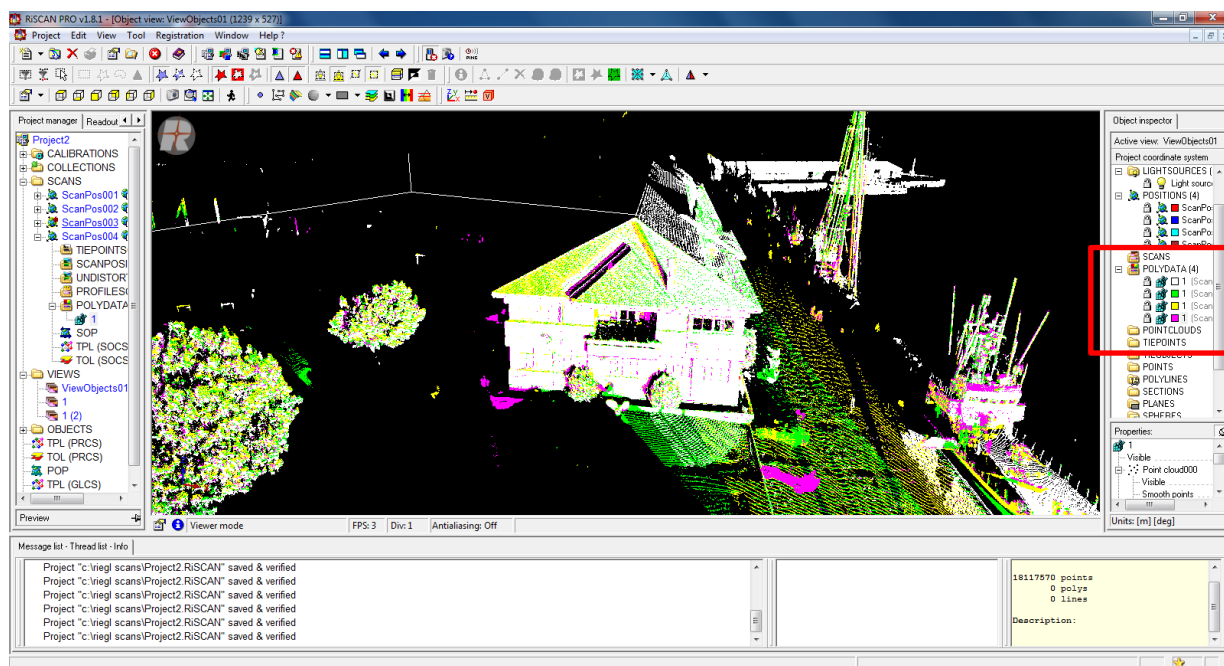


Figura 3-22 Vista de la interfaz tras finalizar el tercer registro de nubes de puntos

La totalidad de las nubes ya registradas se mostrarán en adelante como “*Registered Scans*”, pudiendo ser guardadas en el apartado “*Views/Registered scans*”, dentro de la ventana “*Project Manager*”. Este mismo proceso se ha llevado a cabo para cada una de las 8 nubes de puntos iniciales obtenidas con el escáner, formando un total de 7 pares de nubes de puntos.

3.3.2.4 Filtrado de escaneos

Debido al consumo de memoria que significa la composición de todas las nubes obtenidas se debe realizar un depurado de cada una de estas, con el fin de obtener un archivo único que contenga toda la información recogida, con la menor pérdida posible de calidad de imagen.

Así, abriendo en cada nube de puntos obtenida, con el botón derecho, “*Filter data*”, aplicamos el filtrado “*Octree*”, que nos permite elegir un cubo tridimensional con un volumen determinado (en nuestro TFG probamos cubos de 0,02, 0,015 y 0,01 m, eligiendo finalmente el último de estos), como se puede observar en la Figura 3-23. Este cubo almacenará solamente las coordenadas cartesianas del punto central de dicho cubo, con el consiguiente ahorro de memoria. Como ejemplo, en nuestro estudio de una nube original con 23 729 103 puntos se pasa a una nube con 18 117 570 puntos (tras el filtrado de tipo Octree con 0.01 m de lado del cubo).

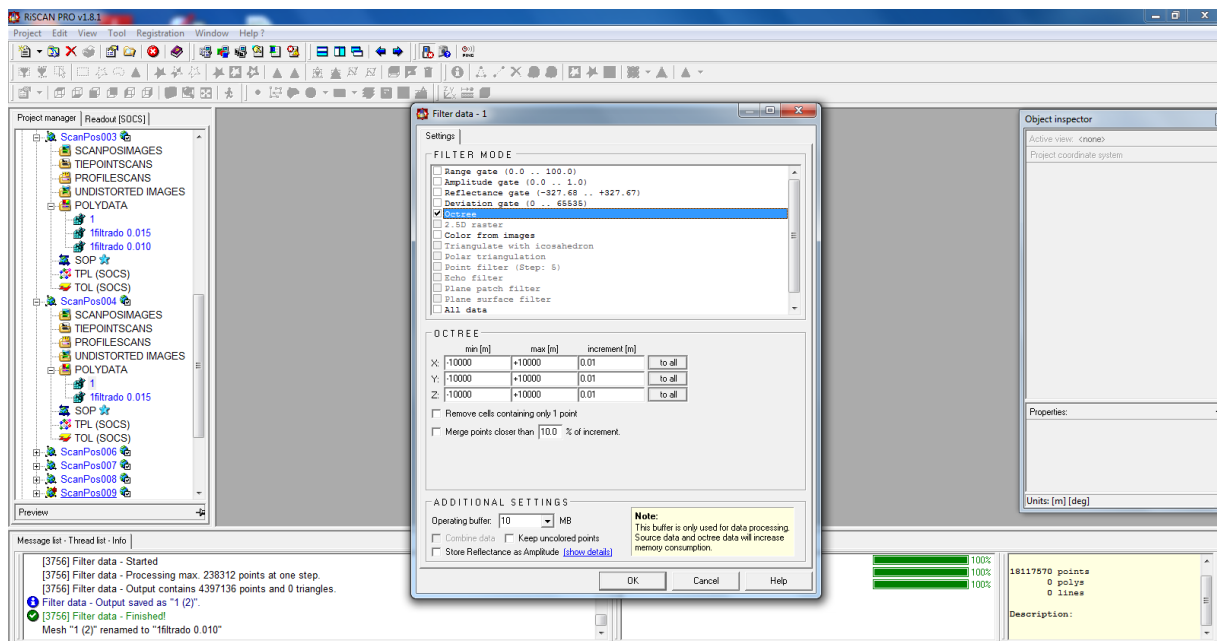


Figura 3-23 Vista de la interfaz durante el proceso de filtrado “Octree”, con un incremento de 0,01 m

3.3.3 Obtención de la ortoimagen

Para obtener el espacio tridimensional que muestre específicamente la zona de estudio, se necesita utilizar la herramienta de segmentación del Riscan Pro, con la cual, y de modo manual, el usuario puede delimitar el área de interés. Una vez la nube final registrada es seleccionada y segmentada, se exportará en formato *ASCII* para su posterior importación en el software Cloud Compare, responsable de la generación de las ortoimágenes.

Cloud Compare es un software libre de gestión de nubes de puntos en 3D [87], cuya ventana principal se muestra en la Figura 3-24. Originariamente fue ideado para la representación gráfica de centrales eléctricas así como para el mapeado a partir de exploraciones llevadas a cabo con escáneres láser. Principalmente, permite el cálculo de distancias entre nubes de puntos, el filtrado de escaneos y la identificación de objetos diferenciables dentro de una nube de puntos.

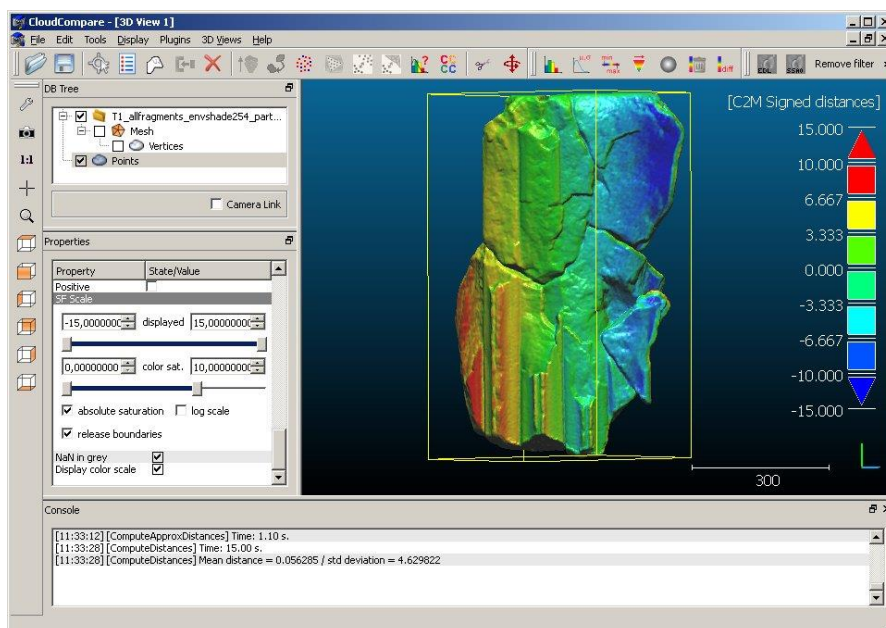


Figura 3-24 Vista de la ventana principal del software CloudCompare, representando una vista 3D [87]

Para la obtención de las ortofotos, tanto la de color verdadero como la de falso color, la nube de puntos final será proyectada perpendicularmente al eje Z, esto es, en planta. Para ello, seleccionaremos dentro de la pestaña “Tools” sus subapartados “Projection” y “Height grid generation”. Estos comandos nos llevan a una *interfaz* que permite la elección de varios parámetros, como son el paso de cuadrícula (o resolución de la malla), el tamaño de la malla, el tipo de proyección y la forma de relleno de los huecos entre celdas una vez proyectada la nube (altura media, altura mínima, máxima, etc.).

Tras la configuración de los parámetros necesarios, el software genera las ortoimágenes finales, como se muestran en la Figura 3-25 con la posibilidad de poder extraerse como un archivo con diferentes extensiones (.tiff, .txt, .png, etc.). Las dimensiones finales del mallado para ambas ortoimágenes son 1 200 x 3 000 píxeles, siendo la resolución (o *Ground Sample Distance, GSD*) de 1 cm. En el caso de la ortoimagen inferior, se utiliza el valor de las cotas de cada celda de la malla para su visualización, siendo dicha altura computada como la altura media de todos los puntos LiDAR representados en cada celda. Se ha empleado una escala de colores del tipo *Blue < Green*, siendo los valores azules los de menor cota y los verdes los de mayor cota.

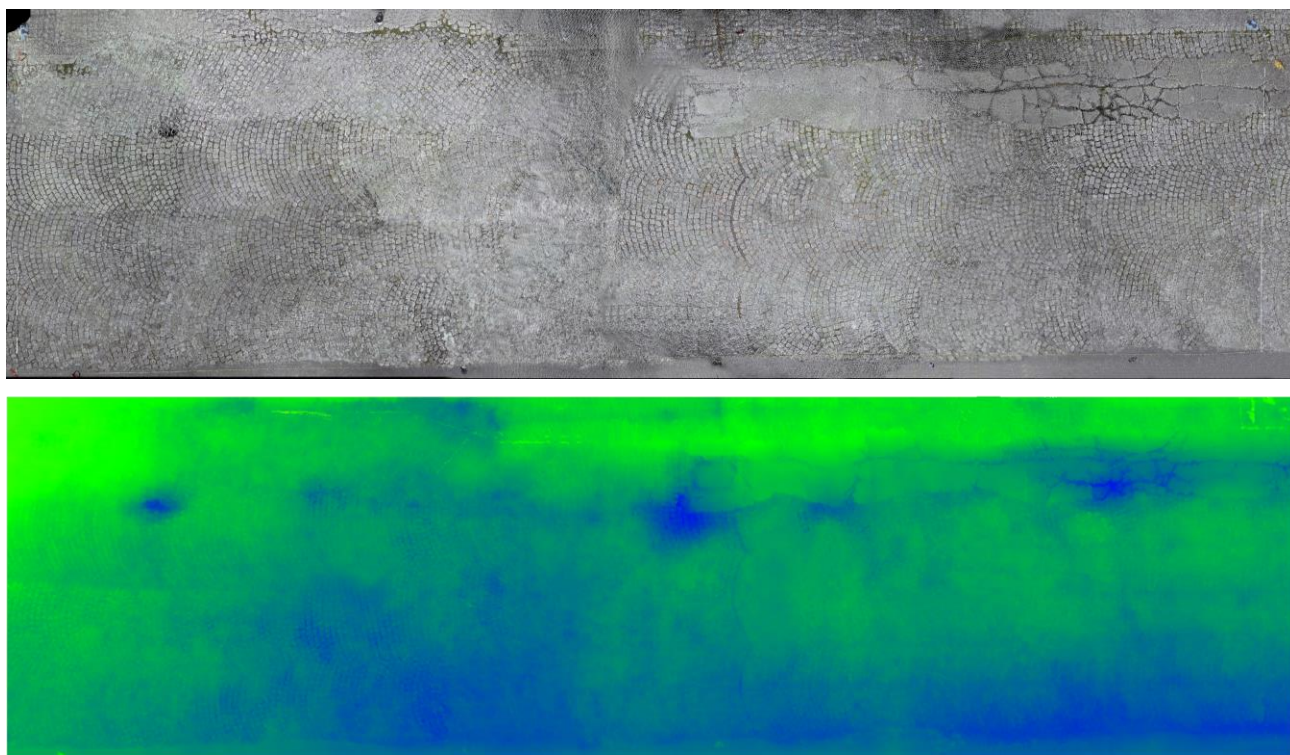


Figura 3-25 Ortofoto en color verdadero (superior) y falso color con representación de altura (DEM) (inferior)

4 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

La Figura 4-1 muestra, a modo de ejemplo, dos radargramas procesados correspondientes a las dos antenas utilizadas en este TFG, de 800 MHz (imagen superior), y de 500 MHz (imagen inferior). Ambas demostrarán la importancia que subyace en la correcta selección de la frecuencia de trabajo de la antena que elijamos para la exploración, mediante GPR, a una determinada profundidad. Según dichas imágenes, la antena de 800 MHz tiene una mayor resolución, limitando su rango de trabajo a los primeros 20 ns de profundidad; por su parte, la antena de 500 MHz ofrece una menor resolución, pero permitiendo la evaluación del subsuelo hasta profundidades de 40 ns. Teniendo en cuenta la velocidad del medio previamente calibrada de 12,7 cm/ns, estos tiempos de propagación se corresponden con 1,27 y 2,54 m para las antenas de 800 y 500 MHz, respectivamente.

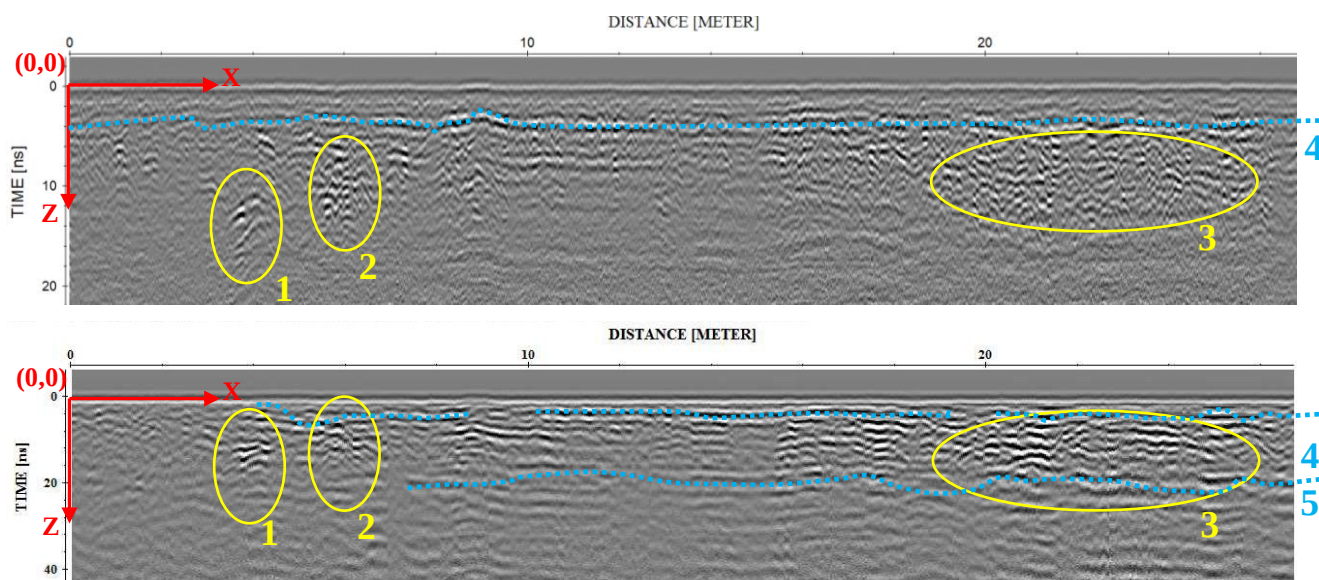


Figura 4-1 Comparación de radargramas 2D finales procedentes de antenas de 800 MHz (superior) y de 500 MHz, (inferior), para diferenciar la resolución y la capacidad de penetración de ambas frecuencias

Las zonas marcadas con óvalos amarillos (números 1, 2 y 3) corresponden a zonas singulares que provocan reflexiones anómalas de las señales recibidas por el georradar (difracción de la señal o *scattering*). Dichas anomalías se deben a cambios en las propiedades dieléctricas en la interfaz entre materiales diferentes; en este caso de estudio, muy probablemente debidas a fracturas o pérdidas de

material de relleno (oquedades), por falta de compactación de este, a esa profundidad (Figura 4-1). Así, el contraste que presentan los tres óvalos en el radargrama de 800 MHz (superior) permite una interpretación más eficiente, ya que todos ellos se encuentran en zonas más superficiales. Aunque las reflexiones 1 y 2 podrían corresponderse con cuerpos de sección circular (tuberías, tubos de gas, etc.), no se observa la existencia de ningún servicio enterrado en dirección aproximada Este-Oeste en la zona de estudio, tal y como muestra la vista lateral del dique mostrada en la Figura 4-2. En lo referente a la identificación de las capas de la estructura interna del pavimento, dispuestas horizontalmente (líneas punteadas números 4 y 5), se observa que a mayor frecuencia (con mayor resolución a menor profundidad) se distingue mejor la capa número 4 que marca la frontera entre el adoquinado y el material de relleno (Figura 4-1, superior), ofreciendo más detalle en las reflexiones que se producen en el estrato del material de relleno. Por lo contrario, con la antena de menor frecuencia (500 MHz), con una resolución mayor a mayor profundidad, no ha sido posible distinguir tan fácilmente, y de manera continua, la capa número 4. Sin embargo, con esta frecuencia ha sido posible la localización de una capa número 5 más profunda (Figura 4-1, inferior).



Figura 4-2 Vista del lateral del dique desde su cada Este

La Figura 4-3 muestra, para la frecuencia de 800 MHz, las imágenes XY, o *time-slices* obtenidas del cubo 3D, a profundidades de 20 cm (superior) y 40 cm (inferior).

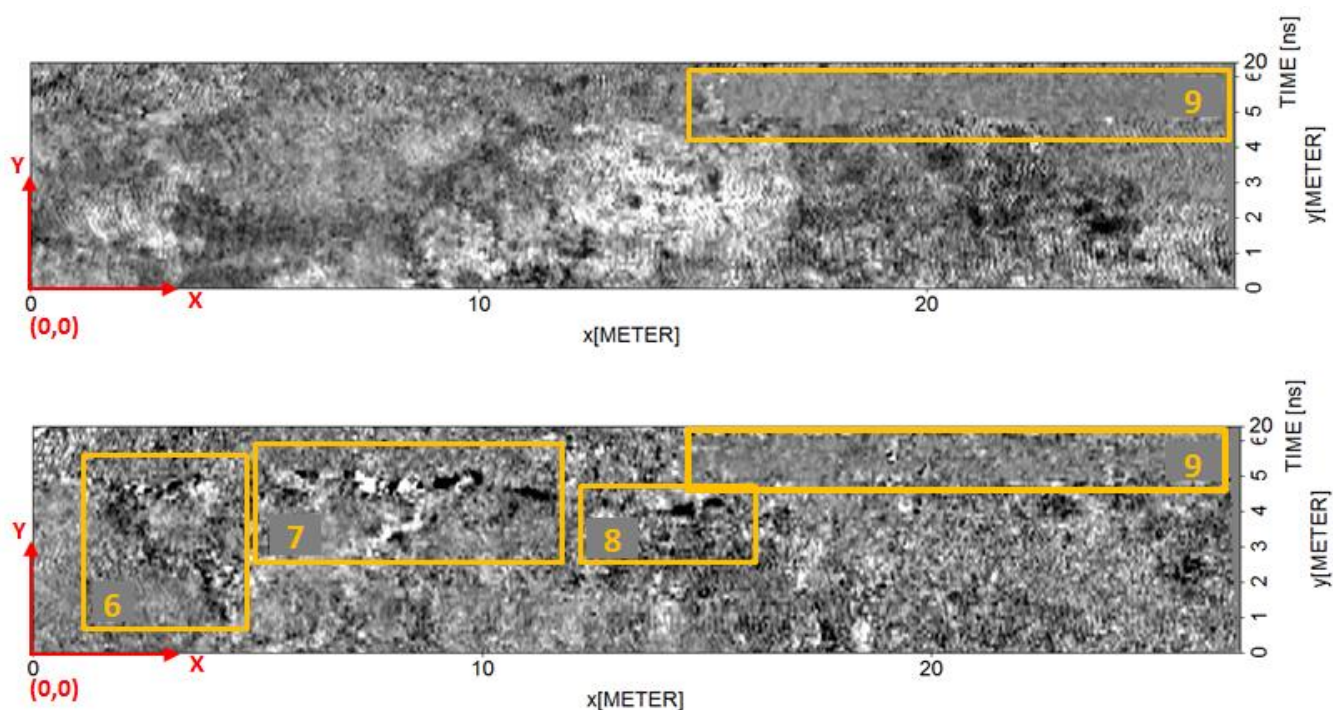


Figura 4-3 Vista del radargrama 3D final para la antena 800 MHz, con una profundidad de 20 cm (superior) y de 40 cm (inferior)

En ellas se identifican cuatro zonas anómalas (números 6, 7, 8 y 9). Las tres primeras corresponden con zonas con oquedades o que presentan faltas de material de relleno, visibles a partir de 40 cm de profundidad, sabiendo que las zonas que la paleta de color muestra como negras corresponden con huecos rellenos de aire; por su parte, la zona número 9 presenta la atenuación de la señal recibida por el georradar, visible tanto a 20 como a 40 cm de profundidad. La misma interpretación se observa para los datos correspondientes a la de 500 MHz (Figura 4-4). Estas corresponden con *time-slices* a una profundidad de 20 y 60 cm.

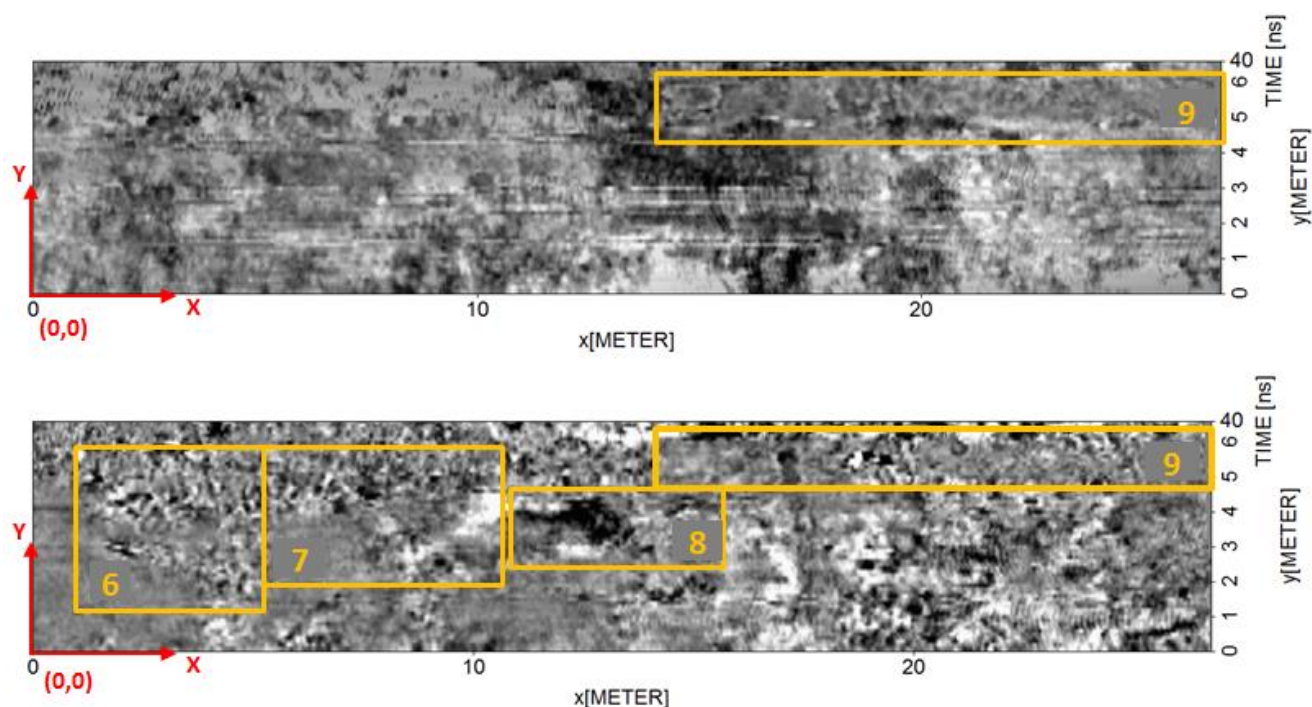


Figura 4-4 Vista del radargrama 3D final para la antena 500 MHz, con profundidad de 20 cm (superior) y de 60 cm (inferior)

La Figura 4-5 presenta las ortoimágenes TLS de la superficie de rodadura, tanto en color verdadero (superior), como el correspondiente al modelo en elevación (*DEM*) en falso color (inferior).

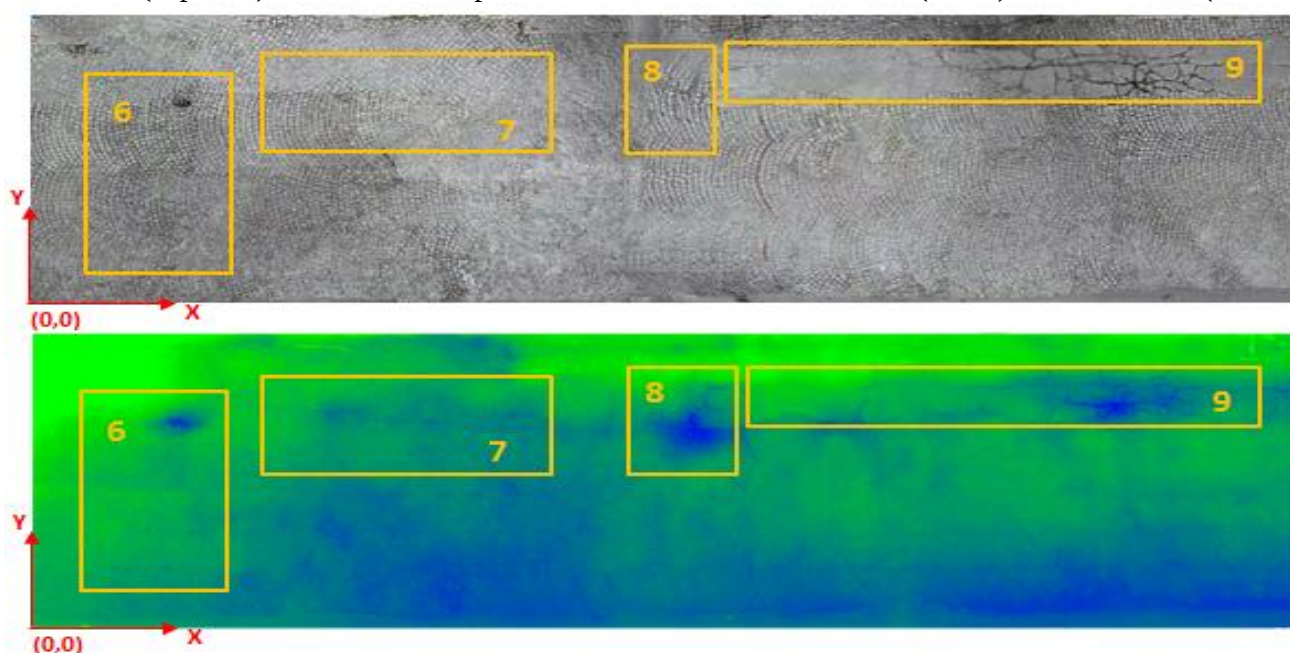


Figura 4-5 Ortoimágenes con vista de la planta del área de estudio, en color verdadero (superior) y modelo digital en elevación en falso color (inferior)

En ambas, y marcadas con los números 6, 7, 8 y 9, aparecen las zonas presentes en los radargramas 3D de las figuras 4-3 y 4-4. La subsidencia o hundimiento parcial sufrido por estas zonas queda patente en la ortofoto de falso color de la Figura 4-5 (inferior), cuyo color azul muestra las áreas de menor cota. Además, la ortoimagen inferior permite apreciar que el hundimiento existente en las zonas referidas es longitudinal, en dirección Norte-Sur.

En la primera interpretación conjunta de los resultados obtenidos a partir de los datos de GPR y TLS (como muestra la Figura 4-6) se observa que la zona número 9, referida a la atenuación de la señal en recepción del georradar presente a una profundidad de 40 cm, corresponde con una zona de hundimiento longitudinal y parcial de la superficie adoquinado sobre la que se ha añadido una capa de material que cubre el adoquinado original. Concretamente, se trata de hormigón de baja calidad que presenta incluso restos de conchas marinas. La salinidad de dichas conchas es la responsable de la atenuación de la señal en recepción la cual, como se señaló a lo largo del trabajo, está limitada por las propiedades dieléctricas que presentan los materiales existentes en la zona prospectada.

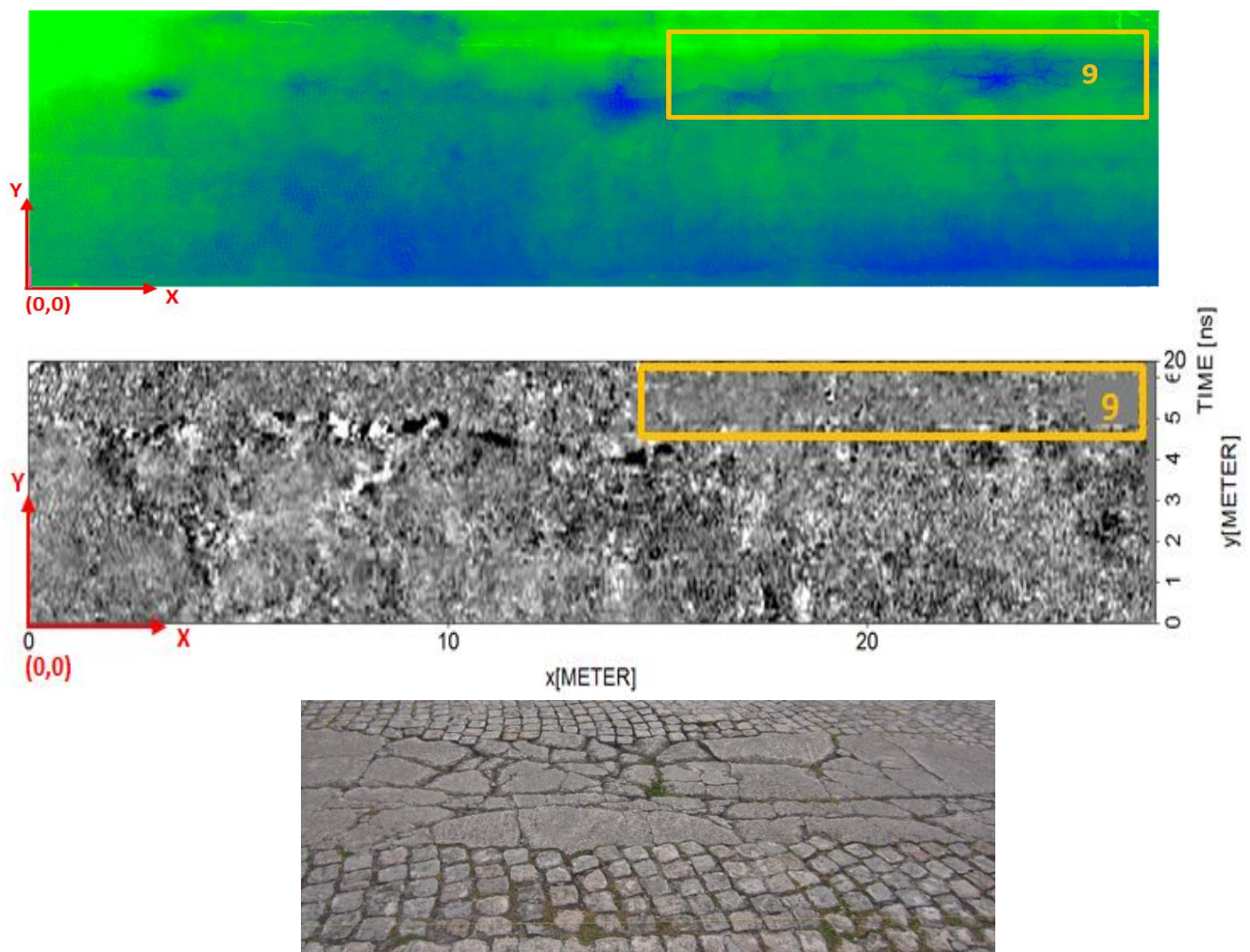


Figura 4-6 Interpretación de la ortoimagen digital en elevación (superior), corte horizontal 3D correspondiente a la antena de 800 MHz, a una profundidad de 40 cm (centro) y fotografía de la superficie de rodadura del pavimentado de la zona de estudio (inferior)

Por su parte, la Figura 4-7 muestra la interpretación conjunta de las zonas número 6, 7 y 8, que en superficie se corresponden con áreas con distancias anómalas entre las piezas de adoquinado, falta de mortero de unión entre estas además de la ausencia de dichas piezas de adoquinado (como describe la fotografía inferior izquierda de la citada Figura). Asimismo, a una profundidad de 60 cm persiste la

presencia de oquedades debidas a la falta de compactación del material de relleno existente, debido a las causas ya presentadas en anteriores secciones. Con todo, se observa que los diferentes hundimientos parciales se propagan en toda la zona de estudio longitudinalmente en dirección Norte-Sur, llegándose a fracturar la superficie de rodadura del pavimentado en dicha dirección, debido al asentamiento de los materiales superficiales en profundidad debido a la falta de compactación de estos últimos, como muestra la fotografía central de la Figura 4-7. Esta es la causa de la distancia irregular entre las piezas de adoquinado en superficie. Por todo ello, el asentamiento de los materiales en las zonas críticas descritas puede provocar el colapso de la estabilidad del pavimentado y el hundimiento de su superficie sobre las zonas más profundas, con el consiguiente peligro para el personal y los vehículos que transitan sobre la zona evaluada así como su posterior repercusión.

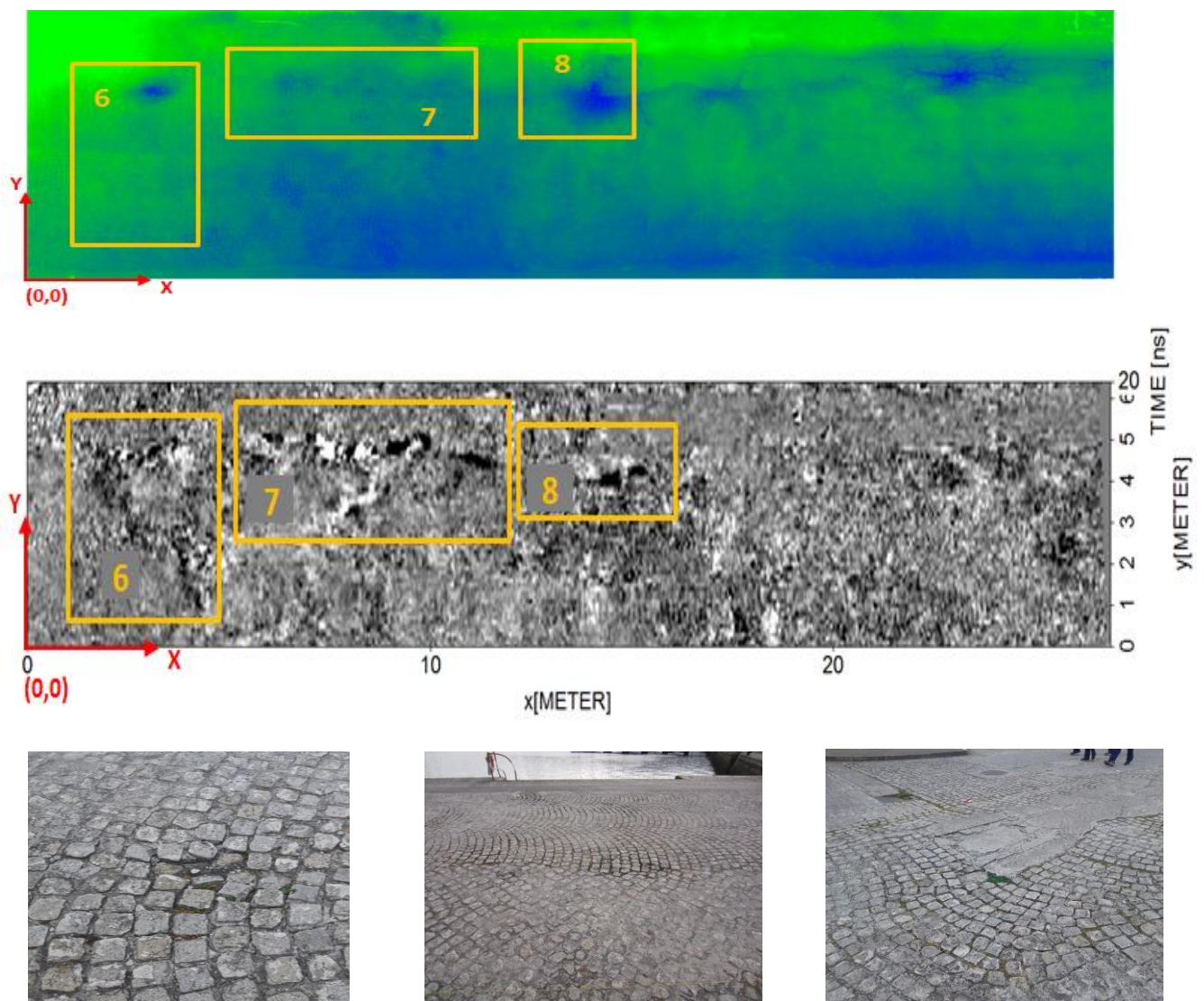


Figura 4-7 Interpretación de la ortoimagen digital en elevación (superior), corte horizontal 3D correspondiente a la antena de 500 MHz, a una profundidad de 60 cm (centro) y tres fotografías de la superficie de rodadura del pavimentado de la zona de estudio (inferior)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Con el fin de realizar la evaluación tanto de la superficie pavimentada como del subsuelo del Dique Oeste de la ENM, principalmente por el efecto de las cargas puntuales originadas por el tráfico diario, se han definido y expuesto las técnicas no destructivas del georradar y del escáner láser terrestre. Se han desarrollado las capacidades referidas a cada técnica, en base del beneficio del uso conjunto de ambas para ejecutar un análisis de las anomalías presentes tanto en superficie como en profundidad.

De manera conjunta, la combinación de ambos métodos ha corroborado la identificación de anomalías estructurales. Gracias al GPR se han detectado daños y fracturas hasta 2 metros de profundidad, siendo contrastadas estas anomalías por los defectos superficiales detectados a partir de análisis TLS. De esta manera, se ha podido relacionar los daños observados en superficie con su origen en el interior de la estructura, en la mayoría de los casos debidos a falta de material de relleno que provocan subsidencias o desplazamientos en el adoquinado superficial. A partir del análisis realizado sí se considera necesaria la ejecución de actuaciones de conservación en la zona objetivo de estudio del presente trabajo, en base a mantener las condiciones de seguridad apropiadas para el personal y vehículos que transitan dicha zona de paso. Así, una posible actuación podría ser la de relleno de material y compactación de este en todas las zonas, pertenecientes a los diques de abrigo, cuyo pavimento se disponga según la estructura evaluada en el presente estudio.

5.2 Líneas futuras

Actualmente, ambas técnicas poseen un margen de crecimiento a corto plazo, siendo el escáner láser el que está experimentando una evolución más significativa. Por ello, atendiendo a los resultados del presente TFG, su uso combinado seguirá siendo eficiente.

Atendiendo a posteriores usos, debe tenerse en cuenta la utilización de un escáner láser basado en triangulación, con mejor resolución de hasta 10 m, en el caso de realizar un estudio de características similares. De igual manera, se prestará atención a sus habilidades en el campo del diseño (CAD) o el de evaluación (*Finite element method, FEM*) en conjunción con las capacidades del georradar en casos como los de análisis previo a una ejecución de reconstrucción, o monitorización de una infraestructura en uso. Como uso conjunto con otra técnica, que aporte información adicional y complementaria para un análisis más eficiente, se podría optar por la tecnología basada en la termografía infrarroja, con reconocidos usos aplicados en el campo de la ingeniería civil.

Finalmente y no menos importante son las cualidades de ambas técnicas como no agresivas para el entorno de estudio, siendo rápidas, de costes relativamente eficientes y en general útiles para la detección de anomalías estructurales así como para la composición y condición del pavimentado y los estratos situados en su correspondiente subsuelo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Torre, R. L., Artículo: *La obra faraónica de la ENM*, Faro de Vigo, 21 de Julio de 2013, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [2] Autoridad Portuaria de Marín y Ría de Pontevedra, Historia, Puerto de Marín, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [3] *La Escuela Naval Militar, formando a los Oficiales de la Armada desde 1717*, ISBN: 978-84-9091-160-0, 2016.
- [4] Büyüköztürk, O (et al), *Far-field radar NDT technique for detecting GFRP debonding from concrete*. Construction and Building Materials, 2009, vol. 23, no 4, p. 1678-1689, web page, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [5] Solla, M. *Apuntes de la Asignatura de Topografía y Construcción, Curso 2015-2016*, Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, Tema 7. Subsuelo: Radar de Penetración. 2015.
- [6] Instituto Universitario de Investigación Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [7] Solla, M. *Aplicabilidad del georradar en el estudio de Puentes Romanos. IV Congreso de las Obras Públicas en la Ciudad Romana. Lugo Guitiriz*, 2008. ISBN: 978-84-612-7098-9.
- [8] Riveiro, B, (et. al.). *Non-destructive Techniques for the evaluation of Structures and Infrastructure. Chapter 2. Laser Scanning Technology: Fundamentals, Principles and Applications in Infrastructure*, Chapter 2, DOI: 10.1201/b19024-4.
- [9] Sudyka, J. (et. al.). *Radar technique in application of interlayer Identification connections*, 5th International Conference ‘Bituminous Mixtures and Pavements’, Thessaloniki 1-3/6/2011, page 1449, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [10] Aguilar R (admon.). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Asesoría y consultoría en Ingeniería Geológica, Geotécnica e Hidráulica, Sismología, Geofísica y Topografía, Domingo, 9 de Agosto de 2009, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017], el cual muestra la imagen procedente de Davis (et al), 1989.
- [11] Bauer, A. O. *Christian Hülsmeier and about the Early Days of Radar Inventions: A Survey*, Foundation Centre for German Communications and Related Technologies, 2005, format pdf, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].

- [12] Solla, M., *NDT for the evaluation of structures and infrastructure*, Ground Penetrating Radar: Fundamentals, Methodologies and Applications in Structures and Infrastructure, Chapters 5, página web, DOI: 10.1201/b19024-7.
- [13] Sensor & Software Inc. Subsurface imaging solutions. *Glacier girl*. Presentación pdf, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [14] Solla, M. (et. al.), *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, Springer Introduction, Applications of GPR in association with other non-destructive testing methods in surveying of transport infrastructures, 2015, página web, DOI 10.1007/978-3-319-04813-0_13.
- [15] Solla, M., *NDT for the evaluation of structures and infrastructure*, Ground Penetrating Radar: Fundamentals, Methodologies and Applications in Structures and Infrastructure, Chapter 11, página web, DOI: 10.1201/b19024-7.
- [16] Lorenzo, H. (et al), *A full non-metallic trailer for GPR road surveys*. J. Appl. Geophys. 75, 490–497 (2011).
- [17] Saarenketo, T. (et al), *Road evaluation with ground penetrating radar*, Journal of Applied Geophysics 43, p.119–138, 2000, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [18] Bala D.C. (et al), *GPR based Detection of Structurally Weak Zones of Road Pavement*, 2012 International Conference on Traffic and Transportation Engineering (ICTTE 2012) IPCSIT vol. 26 (2012), IACSIT Press, Singapore.
- [19] Colagrande, S. (et al), *Ground penetrating radar assessment of flexible road pavement degradation*, research article, International Journal of Geophysics, Volume 2011, DOI: 10.1155/2011/989136.
- [20] Texas department of Transportation, *Using ground-coupled radar techniques to detect concealed subsurface voids*, *Construction and materials tips*, September 2010, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [21] Audemard, F. (et al.), *El geo-radar como herramienta para la definición de fallas activas: Aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela*. Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, vol. 2, no 14, p. 57-70, 2006, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [22] Núñez-Nieto, X. (et al). *GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques*. Journal. Remote sensing. 13.10.14. ISSN 2072-4292.
- [23] Núñez-Nieto, X. (et al). *Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling*. Construction and building material. página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [24] Varela. W. *Load testing and GPR assessment for concrete bridges on military installations*. Construction and building material. página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [25] Borchert, O. *Receiver Design for a Directional Borehole Radar System*. Disertación, Universidad de Wuppertal, 2008, presentación pdf, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [26] European GPR Association, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [27] Peña, J.A. (et. al.), *Prospección magnética y radar 3D como métodos para obtener información a priori en la planificación de una excavación arqueológica. Caso de estudio: Yacimiento del Cortijo de Quintos (Córdoba, España)*, presentación pdf, 6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].

- [28] Sagripanti, G. (et. al.), *Geología forense: Métodos aplicados en la búsqueda de desaparecidos en la región central de Argentina*, Revista de la Asociación Geológica Argentina, Marzo 2013, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017], ISSN 0004-4822.
- [29] Peña, J. A., (et. al.), *Prospección geofísica mediante radar de subsuelo en la Villa Romana de Fuente Álamo*. 2006.
- [30] Gutiérrez, J.A., *Diseño conceptual del sistema portante para un sensor GPR en un dispositivo para detección de minas antipersona en Antioquia-Colombia*, Tesis de Postgrado, Facultad de Minas, Medellín, 2011, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [31] Gutiérrez, J. M., *Análisis del subsuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema Georadar RAMAC/GPR*. TopCart 2004 (VII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía). Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de Madrid, 2004. p. 87-88, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [32] Radarteam Sweden AB, *Cobra Plug-Im GPR, real time sampling with 0-120 m penetrating depths*, presentación pdf, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [33] Martín, J., *Análisis del subsuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema Georadar RAMAC/GPR*. VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de Madrid, 2004, formato pdf, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [34] Gracia, P., De la Vega, M., *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*, Capítulo 11, Obtención de la permitividad efectiva, Universitat Politècnica de Catalunya, 2001, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [35] Lorenzo, E. "Prospección geofísica de alta resolución mediante georradar. Aplicación a obras civiles", Monografías CEDEX. Madrid. 1996.
- [36] Rial, F.I. (et al), *Resolution of GPR bowtie antennas: An experimental approach*. J. Appl. Geophys. 67: 367–373. 2009.
- [37] Jol, H.M. *Ground penetrating radar: theory and applications*. Elsevier Science. 2009.
- [38] Pérez-Gracia V. (et al), *Laboratory characterization of a GPR antenna for high-resolution testing: Radiation pattern and vertical resolution*. NDT&E International 42: 336–344. 2009.
- [39] Mesanza, A. *Técnicas no destructivas aplicadas al patrimonio construido. Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura. Trabajo final*. 2011. página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [40] Petri, G. (et al), *Introduction to laser ranging, profiling and scanning*. In: Shan, J. (et al), (Eds.). 2008. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press: 1–27, 2008.
- [41] Martín, A. (et al), *Integración de sensores aéreos y terrestres para la producción de cartografía multiescala 3D en la Alhambra y su territorio*. Virtual Archaeology Review, vol. 3, no 7, p. 50-54, 2012, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [42] Collis, R. T. *Lidar observation of cloud*. Science, 149 (3687): 978–981, 1965.
- [43] Hickman, G. D. (et al), *Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements*. Remote Sensing of Environment, 1(1): 47–58, 1969.
- [44] Link, L. E. (et al), *Airborne laser systems use in terrain mapping*, Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment, MI, pp. 95–110, 1981.
- [45] Krabill, W.B. (et al), *Airborne laser topographic mapping results*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 50(6): 685–694, 1984.

- [46] Beraldin, J. A. (et al), *Portable digital 3-D imaging system for remote sites*. Circuits and Systems, 5: 488–493, 1998.
- [47] Barber, D. (et al), *Laser scanning and photogrammetry: 21st century metrology*. Proceedings of XVIII CIPA Symposium. Postdam, Germany, 18–21 September, 2001.
- [48] Borrazas, P. M., (et al), *La documentación geométrica de elementos patrimoniales con Láser Escáner Terrestre. La experiencia del LaPa en Galicia*. Cuadernos de Estudios Gallegos, vol. 56, no 122, p. 33-65, 2009.
- [49] Arquer, G. A. (et al), *La interdisciplinariedad como factor de innovación en las ingenierías: empleo de la tecnología láser 3D en la gestión de infraestructuras y seguridad vial*, Fundamentos, p. 130, 1974.
- [50] Puente, I., (et al), *NDT Documentation and Evaluation of the Roman Bridge of Lugo Using GPR and Mobile and Static LiDAR*. Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 29, no 1, p. 06014004, 2013.
- [51] Mill, T., (et al), *Road surface surveying using terrestrial laser scanner and total station technologies*. En Proc. of 8th International Conference Environmental Engineering. p. 1142-1147, 2011.
- [52] Mañana, P. (et al), *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, no 5, p. 15-32, 2008, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [53] English Heritage, Historic England, *3D Laser scanning for heritage*, Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture, 2nd edition, 2011, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [54] Ruiz, A. (et al), *Experiencias y aplicaciones del LiDAR*, Institut Cartogràfic de Catalunya, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [55] Ruiz, J. *Obtencion del modelo tridimensional de dos fragmentos de globos de lava de la erupción volcánica submarina de La isla de el hierro en 2011, mediante Sistemas escáner laser 3D*, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, 2012.
- [56] Suksawat, B., *Development of a multifunction international roughness index and profile measuring device*. In: Proc. Int. Conf. Control Autom Systems, pp. 795–799, 2011.
- [57] Puente, I. (et al), *Validation of mobile LiDAR surveying for measuring pavement layer thicknesses and volumes*. NDT&E Int. 60, 70–76, 2013.
- [58] Núñez, A., (et al), *Comportamiento de un sensor láser escáner*, Semana Geomática, 2005, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [59] Soubra. O.-P., *Aplicaciones de láser escáner 3D Trimble-MENSI en estudios de accidentes y de criminología (forensics)*. VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía, TOPCART 2004, Madrid, Octubre 2004, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [60] Irigaray, C. (et al), *Análisis de la actividad de movimientos de ladera mediante láser escáner terrestre en el suroeste de la Cordillera Bética (España)*. Rev Geol Apl Ing Ambient, vol. 31, p. 53-67, 2013.
- [61] Revuelto, J., (et al), *Utilización de técnicas de láser escáner terrestre en la monitorización de procesos geomorfológicos dinámicos en zonas de alta montaña*, Cuadernos de investigación geográfica, no 39, p. 335-357, 2016, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].

- [62] Rubio-Delgado, J. (et al), *Estimación de tasas de erosión históricas en dehesas utilizando raíces arbóreas expuestas y láser escáner terrestre*. Cuaternario y Geomorfología, vol. 28, no 3-4, p. 69-84, 2014.
- [63] Porras, H., (et al), *Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre*. Tecnura, vol. 18, no 41, p. 134-153, 2014.
- [64] Corso, J. M., *Construcción de un modelo urbano a partir de la tecnología de escáner láser terrestre, enfocado al análisis de la radiación solar*, 2010.
- [65] Ingensand, H., *Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology*, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium, Baden, Austria. 2006, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [66] Sanjuán, L., (et al), *Planimetría de alta resolución del dolmen de Menga (Antequera, Málaga) mediante escaneado láser terrestre, levantamiento 3D y fotogrametría*. Menga: Revista de prehistoria de Andalucía, no 5, p. 259-269, 2014.
- [67] Martínez, A., *Desarrollo de prótesis ortopédicas personalizadas mediante tecnologías láser escáner 3D*, Tesis Doctoral. Topografía, 2015, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [68] Trimetari Consulting, *Terrestrial laser scanning, Laser scanning services, Transport (tunnels, bridges, roads)*, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [69] Washington State, Department of Transportation, Photogrammetry and Remote sensing, 3D, *Terrestrial Laser Scanning, Vital Roadway Measurements*. SR 99 Tunnel low Clearance Measurements, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [70] Marambio, A. (et al), *Escaner laser: modelo 3d y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa Maria del Mar en Barcelona*. ACE, Arquitectura Ciudad y Entorno, vol. 1, no 2, 2006, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [71] Carazo, S., (et al), *Obtención del modelo tridimensional de la puerta de La Latina del S. XVI dC mediante equipo láser escáner terrestre*. 2014.
- [72] Molina, D. F., (et al), *El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje*. Antiquitas, 2012, no 24, p. 277-302, 2012.
- [73] Faro Technologies Inc, *FARO Laser Scanner Focus3D X 330. Features, Benefits & Technical Specifications*, versión pdf, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [74] Kaasalainen, S., (et al), *Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets*. Remote Sensing, vol. 1, no 3, p. 144-158, 2009.
- [75] Universitat Politècnica de Valencia. *Servicio integrado de Prevención de Riesgos Laborales. Láser: clases, riesgos, medidas de control*, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [76] Google Maps. página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [77] Instituto Geográfico Nacional. Aplicación Iberpix, página web, [última consulta 18 de Marzo de 2017].
- [78] Sandmeier, K. J. *Reflex Manual*. 1998-2014. www.sandmeier-geo.de, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].
- [79] Solla, M., Universidade de Vigo. *Máster Universitario en Tecnologías para la protección del patrimonio cultural inmueble, Técnicas de prospección del subsuelo artificial, Introducción al procesamiento de datos GPR*, presentación powerpoint.
- [80] Solla, M. *COST Action TU1208. Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar. Training School on NDT Techniques Applied to Civil Engineering, 14-18 March, 2016, Barcelona*,

Data Processing: Filters & Example of Application, University of Vigo & Defense University Center, presentación powerpoint, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].

[81] Gomes, M. P (et. al.). *Fluxo de processamento aplicado a dados de sísmica de alta resolução em ambiente de Plataforma Continental: exemplo: Macau-RN*. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 29, no 1, p. 173-186, 2011, página web , [último acceso: 18 Marzo 2017], ISSN: 0102-261X.

[82] Encinas , E., *Documentación gráfica de la Iglesia de San José mediante sistemas láser escáner 3D*, Trabajo de Fin de Grado, 2016. página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].

[83] Riveiro, B. (et. al.). *Manual Práctico de Modelado 3D mediante Escáner Láser Terrestre*, Universidade de Vigo, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 2011, ISBN: 978-84936762-7-8.

[84] Mora, A. (et al), Comparación de los métodos topográficos aplicados en la construcción de túneles, utilizando el método convencional y la tecnología escáner laser 3D (ELT). Proyecto de Grado, 2016, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].

[85] García-Gómez, I. (et al), *Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios*. *Arqueología de la Arquitectura*, no 8, p. 25-44, 2011.

[86] Riegl Riscan Pro, *Operating & Processing software Manual*, version 1.8.1, Riegl LMS, 2003-2013, versión en formato pdf disponible con el software.

[87] DGM (et al), *Cloud Compare, User's manual for Version 2.1*, página web, [último acceso: 18 Marzo 2017].