



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación no destructiva mediante GPR del relleno de la
explanada para el análisis de las zonas de mayor afección*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Gonzalo Dabán Castro

DIRECTORA: Mercedes Solla Carracelas

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluación no destructiva mediante GPR del relleno de la explanada para el análisis de las zonas de mayor afección.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Debido al mal estado de la explanada de la Escuela Naval Militar y al gran uso que se hace de ella en el día a día, se ha decidido llevar a cabo este estudio para ayudar a recuperar el buen estado de ésta. En primer lugar, se realizó un reconocimiento visual de la zona para definir el área más susceptible de ser objeto de estudio. Posteriormente, se ha procedido a la realización de un estudio no destructivo mediante georradar (GPR) para tratar de localizar aquellas zonas más dañadas por falta de material en el relleno. Una vez se han adquirido los datos GPR en campo, se han aplicado técnicas 2D y 3D de procesamiento de la señal con el fin de reconocer y facilitar la extensión de dichas áreas de afección en la zona prospectada. Finalmente, mediante herramientas de Sistemas de información geográfica (SIG) se ha efectuado el análisis y tratamiento espacial de los datos GPR obtenidos (tanto en profundidad como en continuidad superficial) con el fin de determinar la superficie de afección, y el volumen de relleno afectado. Los datos así obtenidos permitirán tomar decisiones futuras a la hora de diseñar planes de actuación y restauración del material de relleno de la explanada de una manera más eficiente y sin alterar la condición de las zonas en buen estado.

PALABRAS CLAVE

GPR, Subsuelo, Cavidades, SIG, Zonas de afección.

AGRADECIMIENTOS

Para empezar, quiero agradecerle a mi directora del TFG, Dña. Mercedes Solla Carracelas, por el esfuerzo y el tiempo que ha dedicado para ayudarme en la realización de este trabajo. Además quiero mostrar mi agradecimiento a toda mi familia, por el gran apoyo que me han dado a lo largo de estos cinco años de carrera, a la confianza que me han transmitido y a la motivación aportada para afrontar todo esto con ganas y alegría. Gracias también al Capitán de Corbeta Carrascosa por la información aportada. Finalmente, quiero agradecer a todos aquellos que no han sido nombrados expresamente y que me han ayudado a la realización de este trabajo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Motivación o Justificación	7
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivos generales.....	8
1.2.2 Objetivos específicos	8
2 El GPR en la Ingeniería Civil. Estado del Arte.	9
2.1 Historia.....	9
2.2 Actualidad.	10
2.3 Introducción al georradar	12
2.3.1 Fundamentos teóricos del método.	12
2.3.2 Componentes de un sistema GPR.....	14
2.3.3 Ventajas e inconvenientes del método.....	16
3 Desarrollo del TFG.....	19
3.1 Materiales y métodos	19
3.1.1 Descripción de la zona de actuación.....	19
3.1.2 Metodología de adquisición de datos GPR.....	21
3.2 Procesamiento de la señal GPR	21
3.2.1 Procesamiento de datos 2D.....	22
3.2.2 Procesamiento de datos 3D.....	24
3.3 Los sistemas de información geográfica. Georreferenciación y Digitalización	25
3.3.1 Concepto de un Sistema de Información Geográfica (SIG).	25
3.3.2 Antecedentes.	26
3.3.3 Principales aplicaciones SIG.	26
3.3.4 Software gvSIG	27
3.3.5 Herramientas de análisis a emplear.	27
4 Resultados	33
4.1 Resultados 2D	33
4.2 Resultados 3D	37
4.3 Estimación de volúmenes de relleno afectado con SIG	40
5 Conclusiones y líneas futuras	45

5.1 Conclusiones 45

5.2 Líneas futuras 46

6 Bibliografía.....47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Equipo empleado y radargrama obtenido en [20].	11
Figura 2-2: Cavidad en superficie encontrada en [21].	12
Figura 2-3: Radargrama que muestra la cavidad [21].	12
Figura 2-4: Esquema funcionamiento básico GPR	13
Figura 2-5: Radargrama	14
Figura 2-6: Componentes esenciales de un sistema GPR.	14
Figura 2-7: Frecuencias GPR: alcance y resolución.	15
Figura 2-8: Ejemplo de rueda taquimétrica y odómetro	16
Figura 3-1: Imagen aérea de la Escuela Naval Militar de Marín, mostrando (recuadro rojo) la zona de actuación	19
Figura 3-2: Vista general de la zona de estudio.	20
Figura 3-3: Muro del muelle con falta de juntas	20
Figura 3-4: Pequeños hundimientos en la zona	20
Figura 3-5: Toma de datos en zona de actuación.	21
Figura 3-6: Radargrama sin ajustar el tiempo cero.	22
Figura 3-7: Radargrama con el tiempo cero asociado a la superficie	22
Figura 3-8: Imagen previa al procesamiento del filtro.	23
Figura 3-9: Imagen tras procesar el filtro.	23
Figura 3-10: Radargrama tras amplificar la señal recibida.	24
Figura 3-11: Resultado final tras el procesado 2D.	24
Figura 3-12: Cubo 3D y slices a partir de los radargramas.	25
Figura 3-13: Time Slice (o corte horizontal 3D) obtenida con el georradar a 1 metro de profundidad.	28
Figura 3-14: Imagen general cartografía empleada	29
Figura 3-15: Imagen aérea de la zona.	29
Figura 3-16: Situación puntos de referencia	30
Figura 3-17: Resultado final tras Georreferenciación.	30
Figura 3-18: Capa shp.	31
Figura 3-19: Distintas áreas, junto a tabla de atributos.	31
Figura 3-20: Tabla con grados de afección.	32
Figura 3-21: Superficie calculada para cada área	32
Figura 4-1: Esquema de situación de radargramas	33
Figura 4-2: Análisis Radargrama 1.	34
Figura 4-3: Estado de la zona de 0 a 100 metros de distancia	34

Figura 4-4: Análisis Radargrama 2.	35
Figura 4-5: Estado de la zona pasados los 200 metros	35
Figura 4-6: Análisis Radargrama 3.	36
Figura 4-7: Radargrama detallado.	36
Figura 4-8: Tubería y bloque de hormigón mencionados anteriormente.	37
Figura 4-9: Cubo 3D.....	38
Figura 4-10: Time-Slice 15 cm profundidad	38
Figura 4-11: Time-Slice 22 cm profundidad	39
Figura 4-12: Time-Slice 35 cm de profundidad	39
Figura 4-13: Time-Slice 60 cm profundidad	40
Figura 4-14: Zonas afectadas y sus superficies a 15 cm de profundidad	42
Figura 4-15: Zonas afectadas y sus superficies a 35 cm de profundidad	42
Figura 4-16: Zonas afectadas y sus superficies a 60 cm de profundidad	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Zonas de afección y su ubicación	40
Tabla 4-2: Grados de afección.....	40
Tabla 4-3: Superficies y volúmenes de las distintas zonas	43

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En esta sección se realizará una breve introducción al trabajo, explicando la justificación de por qué se ha decidido llevarlo a cabo y enumerando los objetivos que han sido propuestos.

1.1 Motivación o Justificación

La Escuela Naval Militar es el centro de enseñanza donde se forman los futuros oficiales de la Armada. En 1943 se formó la primera promoción y hasta ahora, cada año salen de ella los oficiales necesarios en cada uno de los buques y las unidades españolas.

En ella se realizan todo tipo de actividades; clases, instrucción, actos, etc. Por ello, con el paso de los años, algunas zonas se han visto deterioradas, es el caso de la zona en la que vamos a llevar a cabo el estudio. En concreto, se trata de la zona de la explanada, donde cada día se produce un gran tránsito tanto de personal como de vehículos. Nos centraremos, como más adelante se explica, en la zona Este del edificio Isaac Peral, donde se pueden ver grandes daños, en forma de irregularidades en la superficie. Éstas son debidas a numerosos huecos bajo la superficie por lavado del material de relleno, que dificultan el tránsito por esta zona y podrían incluso, provocar alguna lesión en los alumnos que hacen uso de ella.

Para buscar una posible solución, se realizará un estudio no destructivo con el fin de determinar aquellas zonas más afectadas y que pueden suponer mayor riesgo constructivo. Se denomina estudio no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de *Non-Destructive Testing*) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los estudios no destructivos implican un daño imperceptible o nulo, y permiten prospectar todo el área a estudiar de una forma rápida en comparación con otros métodos destructivos más habitualmente utilizados, como el caso de las catas, lo que facilita la localización de las zonas dañadas y focalizar las actuaciones de restauración.

Los diferentes métodos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada. En particular, la prospección Geofísica consiste en inferir la estructura geológica del subsuelo a través de la distribución de alguna propiedad física del subsuelo, dependiendo del método utilizado. De acuerdo a la propiedad física de la Tierra a estudiar podemos definir los métodos a utilizar, entre ellos tenemos a: Geoelectrónicos, Sísmicos, Gravimétricos y Magnetométricos [1].

El GPR (Ground Penetrating Radar) o georradar, que es el que se va a emplear para nuestro estudio, estaría dentro de los métodos electromagnéticos. El Georradar es una técnica geofísica, que se

enmarca en el conjunto de técnicas de evaluación no destructiva, con una cada vez más amplia y eficaz aplicación en la inspección, monitorización y diagnosis de patologías en diversos tipos de estructuras de obra civil. El método utiliza ondas electromagnéticas en la banda de frecuencias de los 10 a 1000 MHz. La ventaja de este método es que al generar una señal de relativamente corta longitud de onda que se irradia dentro del suelo, permite detectar variaciones anómalas en las propiedades dieléctricas del medio de propagación. Se trata de una técnica relativamente rápida que ofrece una imagen cualitativa interna de conjunto del subsuelo, al tiempo que proporciona tanto buena resolución como gran profundidad de penetración [2].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

El objetivo general de este trabajo fin de grado consiste en llevar a cabo un estudio no destructivo mediante georradar del estado del relleno de la explanada en la Escuela Naval Militar (Marín). En esencia, se trata de evaluar el estado del material de relleno y localizar aquellas zonas de afección susceptibles de ser restauradas, con el fin de evitar que se produzcan hundimientos y otra serie de problemas constructivos derivados.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos cabe resaltar:

- Empleo del GPR y metodologías 3D de adquisición de datos.
- Procesamiento 3D de datos GPR e interpretación de imágenes identificando aquellas áreas más afectadas por lavado de material de relleno.
- Inspección visual de la zona de ayuda a la interpretación de los datos GPR.
- Empleo de herramientas SIG, en concreto el gvSIG, para el análisis y tratamiento de los datos GPR obtenidos.
- Estimación de superficies y volúmenes de zonas de afección por falta de material.

2 EL GPR EN LA INGENIERÍA CIVIL. ESTADO DEL ARTE.

En esta segunda sección se hablará en primer lugar de la historia del GPR, desde sus comienzos hasta el presente. Posteriormente se enumerarán y explicarán las aplicaciones más importantes del GPR en la actualidad. Para finalizar, se hará una breve explicación sobre el georradar, su funcionamiento y los componentes que lo forman.

2.1 Historia

El GPR es una técnica geofísica que ha sido amplia y eficazmente aplicada en ingeniería civil. A pesar de que la teoría que rige sus principios de funcionamiento fue desarrollada ya a finales del siglo XIX, la carencia de medios tecnológicos de la época ralentizó su desarrollo y popularización. A partir de los años 70 del siglo XX comienza el despegue de la popularidad del radar de penetración terrestre, llevándose a cabo los primeros estudios en investigaciones lunares, Geología y Glaciología y de ahí se produce el salto al campo de la ingeniería civil (1970-1980's). De las primeras aplicaciones del georradar en el ámbito de la ingeniería civil es el trabajo de Bertram et al. [3], en 1974, que versa sobre la aplicación del GPR para la evaluación de pavimentos en aeropuertos.

El GPR no se introdujo en España hasta el año 1990, el primer trabajo destacado fue la tesis realizada por H. Lorenzo en el año 1994, llamada “Geofísica de alta resolución en Ingeniería Civil. Estudios en estructuras de hormigón utilizando georradar” [4]. En este trabajo se estudian tres situaciones de interés en ingeniería en las que el georradar se manifiesta como una gran ayuda para la resolución y prevención de problemas relacionados con estructuras de hormigón. El primer estudio muestra cómo el georradar es útil para la detección de cavidades bajo superficies rígidas. El segundo caso describe la localización de tuberías en el subsuelo. Finalmente, en el tercer estudio se analizan las posibilidades de reconocer las armaduras (redondos) dentro de una masa de hormigón armado utilizando esta técnica.

Debido al éxito obtenido, el empleo del GPR se fue incrementando sobre todo para la detección de tuberías, cableado y servicios urbanos principalmente. Los sistemas de georradar han ayudado mucho en el ámbito de los servicios urbanos, se emplean a menudo para la inspección no destructiva de infraestructuras, la evaluación no destructiva y no invasiva, así como el estudio de diversas patologías en carreteras, puentes, túneles, ferrocarril y en general en cualquier obra civil lineal [5].

2.2 Actualidad.

Actualmente, en el ámbito de la Ingeniería Civil, el GPR es utilizado para diversas aplicaciones, a continuación se enumerarán algunas de las principales, además de diferentes investigaciones que han sido realizadas por distintos autores en cada ámbito.

- **Inspección de túneles.** El GPR se utiliza en este ámbito para obtener cuantiosa información, como la detección de espesores de diferentes capas de materiales y de gunita [6], así como para identificar defectos en la interfaz gunita-roca, como pueden ser huecos o grietas [7]-[8]. Además, se puede obtener también información adicional de gran interés, que ayude a definir elementos de refuerzo estructural (como armaduras), incluyendo corrosión [9], además de la existencia de elementos adicionales de sustentación, tales como cerchas metálicas [10]. Como ejemplos, en primer lugar tenemos “*GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel*”, investigación realizada en el túnel de Damaoshan [11] (Fujian, China), que tiene por objeto el estudio del espesor de su revestimiento y realizar una inspección anual en busca de posibles daños en el túnel. Se encontraron diversas fracturas y fisuras en la estructura del túnel, además de problemas con el número de barras de refuerzo (Menor del que debería haber) y de algunos espesores. Otro ejemplo, sería “*Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground tunneling*” [12], en el que se recoge información sobre los túneles situados bajo el gimnasio de la Escuela Naval Militar (Marín, Pontevedra). En este, el GPR es utilizado para la identificación de las distintas galerías que conforman dichos túneles, además de para localizar algunos elementos de refuerzo que se encuentran en estas.

- **Medición de pavimentos.** La detección de pavimentos y la medición de su espesor es otra de las aplicaciones para las que es utilizado el GPR. Podemos tomar como ejemplos los siguientes estudios; “*GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland*” [13], donde el empleo del georradar fue de gran utilidad a la hora de localizar pavimentos dañados, ayudando así a llevar a cabo los trabajos de mantenimiento necesarios en el túnel Gotthard, bajo los Alpes suizos. También fue utilizado en “*Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches*” [14], para evaluar la exactitud y precisión del método en la estimación de los espesores de firme en distintas carreteras.

- **Detección de Humedades en mampostería.** Es común el uso del radar de penetración para la detección de problemas de humedad en distintas obras. Esta aplicación podemos verla en “*Detecting moisture damage in archaeology and cultural heritage sites using the GPR technique: a brief introduction*” [15], donde se resalta la importancia de detectar estos focos de humedad localizados en la estructura de distintas construcciones, originadas por la intrusión de humedad desde el exterior, o por condensación desde el interior de edificios. Es de vital importancia la localización de estos, pues de no ser así, la integridad de la estructura puede verse en peligro, ya que restan estabilidad a esta. Otro caso es “*Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies*” [16], que trata de cómo se deterioran los materiales utilizados en distintas edificaciones, debido al tiempo y a la exposición al aire libre. Este artículo, se centra en la comprobación del estado del interior de columnas y pilares. En él se combina el uso de GPR con estudios sísmicos. Finalmente se llega a la conclusión de que esta combinación es la mejor para confirmar el estado de columnas y pilares.

- **Inspección de puentes.** Hoy en día, el empleo del GPR para obtener información sobre obras de mampostería es muy común, como por ejemplo el caso de puentes históricos de mampostería granítica. Se han hecho numerosos estudios para evaluar el estado de distintos puentes, entre ellos destacamos “*Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools*” [17], donde se evalúan distintos puentes de piedra situados en Galicia (España). Mediante el uso del GPR, se encontró información sobre estos puentes, como la localización de restauraciones previas (usando otro material distinto al original), o refuerzos en los pilares de los

puentes. Además, también se encontraron zonas con humedades, debidas a desperfectos en la piedra y algunas cavidades.

- **Localización y mapeado de tuberías subterráneas.** Otra de las aplicaciones del radar de subsuelo es la comprobación del estado de tuberías subterráneas y la localización de posibles fugas en ellas. Como ejemplo de estos estudios, tenemos “Pipe-flange detection with GPR” [18] donde se describe el empleo del GPR para comprobar el estado de las juntas de algunas tuberías. También “Neural Detection of Pipe Signatures in Ground Penetrating Radar Images” [19], donde se presenta una aplicación de utilidad para la localización automática de tuberías enterradas mediante datos GPR.

- **Detección de Oquedades.** La última de las aplicaciones a tratar, será la de localizar posibles oquedades bajo carreteras y distintas superficies. Esta será sobre la que más se profundice, ya que nuestro estudio está incluido en este ámbito. Las técnicas de adquisición de datos GPR son capaces de revelar datos constructivos inéditos, no detectables a simple vista, y localizar zonas de daño situadas bajo la capa de rodadura de una carretera. Estas zonas dañadas, pueden acabar provocando hundimientos. Mediante el empleo del georradar, será posible localizarlas y posteriormente actuar en ellas para así solucionar los problemas, evitando de esta manera que se produzcan accidentes.

A continuación se muestran algunos estudios donde se ha llevado a cabo este procedimiento. En “GPR Monitoring System for Evaluation of Asphalt Pavement” [20], podemos observar un estudio en Korea, en el que son utilizados dos equipos radar de penetración a distinta frecuencia (Figura 2-1), uno de ellos para observar el estado del asfalto (GPR higher band, 500-1500 MHz) y el otro para encontrar posibles huecos vacíos por debajo de este (GPR lower band, 100-500 MHz).

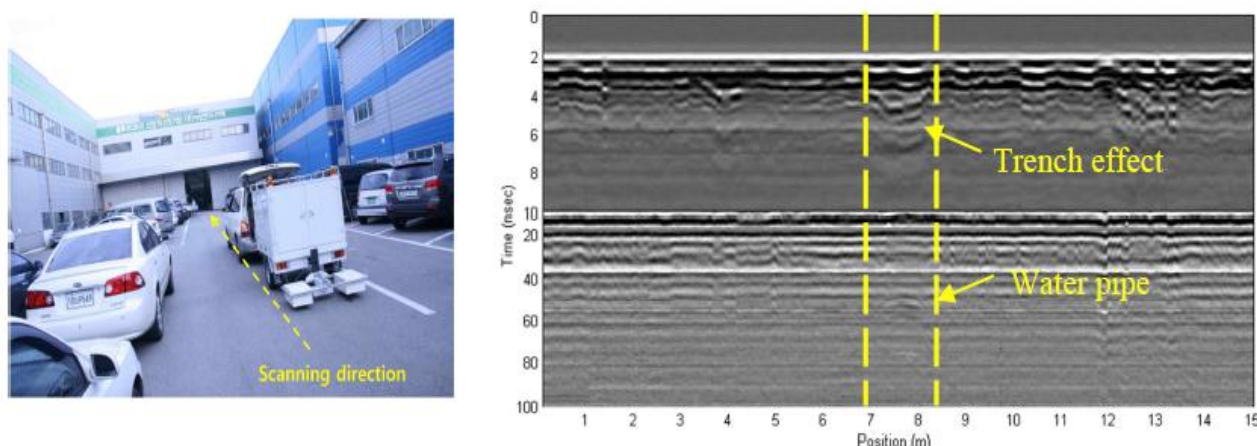


Figura 2-1: Equipo empleado y radargrama obtenido en [20].

También encontramos “Using Ground-Coupled Radar Techniques to Detect Concealed Subsurface voids” [21], en el cual se utiliza una antena de 400 MHz para localizar posibles cavidades bajo la superficie en distintas carreteras de Texas. Donde la amplitud y el tiempo que tarda en volver la señal al GPR son continuos, indica que el área está en buen estado. Sin embargo, cuando estos varían, podemos encontrar una zona dañada. A continuación se muestran imágenes que ilustran los resultados, donde podemos encontrar una cavidad de tamaño considerable (Figura 2-2), representada en su correspondiente radargrama (Figura 2-3).



Figura 2-2: Cavity en superficie encontrada en [21].

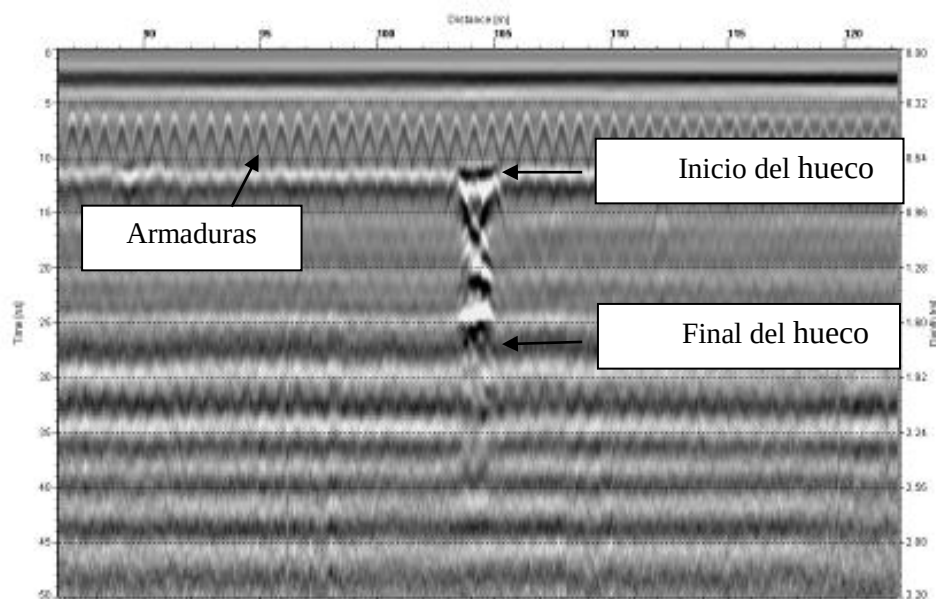


Figura 2-3: Radargrama que muestra la cavity [21].

2.3 Introducción al georradar

En la presente sección, se exponen brevemente los fundamentos teóricos del método, así como los componentes del mismo y sus principales ventajas e inconvenientes.

2.3.1 Fundamentos teóricos del método.

La prospección geofísica por medio del georradar, es capaz de dar solución a la mayoría de los problemas relacionados con el estudio del subsuelo, de una manera eficaz, precisa y sin necesidad de utilizar métodos invasivos o destructivos.

Extremadamente versátil y rápido para investigaciones a una profundidad limitada (en función de la frecuencia empleada), el radar de subsuelo tiene como característica principal la posibilidad de delinear interfaces entre los diferentes materiales que constituyen el subsuelo (siempre que exista cierto contraste entre sus propiedades dieléctricas).

Estos equipos radian impulsos de energía electromagnética entre 10 MHz y 2 GHz mediante una antena transmisora. Cuando la onda radiada encuentra heterogeneidades en el terreno (materiales con distintas propiedades dieléctricas, principalmente permitividad, permeabilidad y conductividad), parte de la energía se refleja hacia la superficie, mientras que otra parte se transmite, para alcanzar una mayor profundidad. La señal reflejada, es detectada por el receptor y amplificada en la unidad de control, transformándose al espectro de audio-frecuencia. La Figura 2-4 representa el funcionamiento de un sistema GPR.

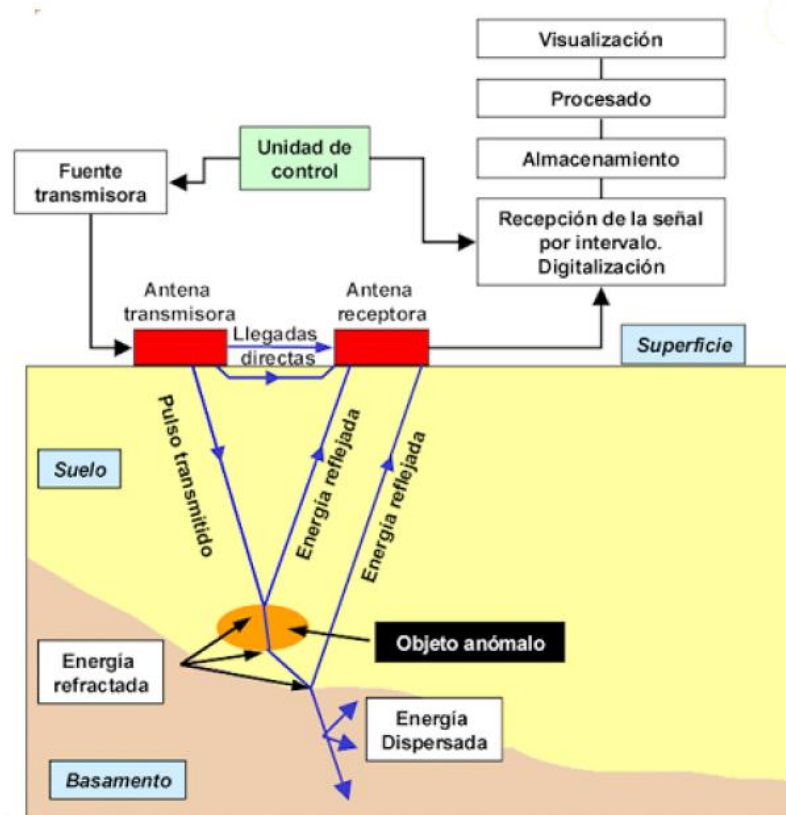


Figura 2-4: Esquema funcionamiento básico GPR

El resultado obtenido, es un perfil vertical continuo del subsuelo, en el cual el eje de abscisas corresponde a la distancia recorrida, y por otro lado, el de ordenadas corresponde al tiempo que tarda la onda en encontrar la superficie donde se refleja y volver al receptor (tiempo doble de ida y vuelta).

Los resultados son representados por medio de los radargramas (Figura 2-5), que posteriormente serán procesados e interpretados para obtener la información de ellos.

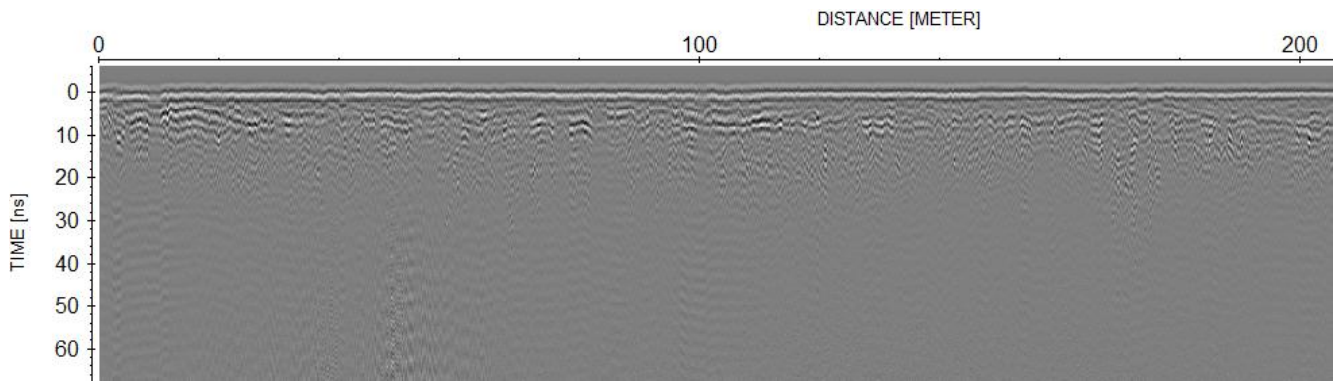


Figura 2-5: Radargrama

2.3.2 Componentes de un sistema GPR.

En cuanto a los componentes por los que está formado el GPR, podemos decir que se dividen en tres grupos esenciales; las antenas, la unidad central y un ordenador. En la Figura 2-6 se muestran los componentes esenciales del georradar empleado para la realización del presente estudio.

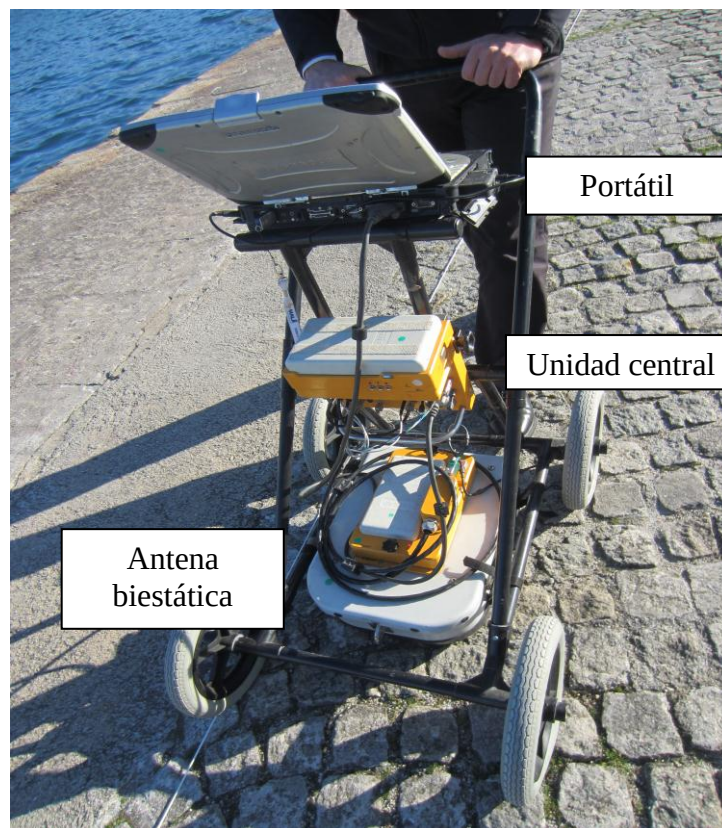


Figura 2-6: Componentes esenciales de un sistema GPR.

Antenas

Las antenas son las que transmiten y reciben la energía de la que posteriormente obtendremos la información que necesitamos. Transmiten el pulso electromagnético al medio y reciben la energía reflejada.

Pueden ser clasificadas de distintas maneras. Una de las formas más comunes de diferenciar las antenas, es por la frecuencia central de su emisión. La longitud de onda del pulso emitido depende de esta frecuencia central y de la velocidad de onda en el medio. Puede verse expresada de esta forma:

$$\lambda = v / f$$

Donde:

λ es la longitud de onda

v es la velocidad de la onda en el medio de propagación

f es la frecuencia

A mayor frecuencia de emisión, la onda sufrirá una mayor atenuación, por lo tanto, la profundidad de penetración variará dependiendo de la frecuencia.

También pueden ser diferenciadas por el número de antenas empleadas;

- Monoestáticas: Una sola antena hace de emisora y de receptora.
- Biestáticas: Existen dos antenas distintas, una emisora y la otra receptora.

La Figura 2-7 describe la resolución y alcance para distintas frecuencias utilizadas en un sistema GPR. Se observa como a mayor frecuencia, aumenta la resolución del método, pero disminuye la penetración de la señal en el subsuelo.

Center Frequency (MHz)	Resolution (m)	Max Penetration (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

Figura 2-7: Frecuencias GPR: alcance y resolución.

Unidad central

Es en este componente donde se lleva a cabo la coordinación y el control de las antenas, de los accesorios que se añadan al equipo básico y de la señal emitida.

La unidad de control normalmente irá conectada a un monitor, para así, poder observar la señal que se está adquiriendo.

Por regla general, la unidad central se configura mediante un software instalado en un ordenador portátil; este ordenador sirve, además, para almacenar la información y poder visualizarla en tiempo real, si bien también existen en el mercado equipos que integran un ordenador con un pequeño monitor en la propia unidad central.

Accesorios

Este equipo puede ser complementado por diversos accesorios, los cuales clasificaremos en dos grupos; aquellos para la visualización y almacenamiento de los registros y los utilizados para situar los perfiles, en los cuales nos centraremos más.

Dentro de los complementos de visualización, tenemos impresoras, pantallas, programas informáticos, etc.

Para situar los perfiles se van a utilizar normalmente dos tipos de accesorios: marcadores y odómetros:

-Marcadores: Conectados tanto a la unidad central como a las antenas, permiten introducir una marca en el registro cada vez que se presiona un pulsador.

-Odómetros (Figura 2-8): Conectados a la unidad central. Permiten determinar la posición de los distintos puntos del radargrama con más precisión que en el caso de los marcadores.



Figura 2-8: Ejemplo de rueda taquimétrica y odómetro.

2.3.3 Ventajas e inconvenientes del método

Ventajas

El georradar genera una imagen del subsuelo que supera en resolución a cualquier otro método de prospección por medio de una alta capacidad de escaneo por segundo (> 500 muestras/segundo) y antenas de alta sensibilidad, permitiendo tanto la identificación de elementos singulares como la caracterización del entorno. Es un método no destructivo y no invasivo, por lo que no produce ningún efecto secundario sobre el medio estudiado. Es una técnica rápida en su ejecución y aplicable en la

mayoría de situaciones, destacando en especial su aplicabilidad en entornos urbanos. Ofrece posicionamiento tanto vertical (profundidad) como horizontal (distancia). Por último, destacar la posibilidad de interpretación en tiempo real, pues los radargramas se generan a la vez que se adquieren los datos, lo que permite aportar información instantánea sobre el propio terreno.

Inconvenientes

El principal condicionante del georradar se refiere a su penetración limitada en el subsuelo. Por una parte, los equipos han sido diseñados para ser ligeros y poder ser manejados por 1-2 personas, lo que implica una reducción del tamaño de las fuentes de alimentación y que redundaría en una potencia limitada en cuanto al impulso emitido y, por lo tanto, su penetración en el medio. Por otra parte, la naturaleza del suelo juega un factor decisivo en ese aspecto, ya que los medios conductivos (por ejemplo, arcillas húmedas) pueden llegar a atenuar totalmente la señal, haciendo inútil la aplicación del método. Además, el método presenta cierta dependencia de las condiciones superficiales, que pueden llegar a enmascarar los registros provocando interpretaciones erróneas. Con todo, el principal inconveniente del georradar no se deriva de las razones anteriores, sino de su empleo inadecuado: su uso sin el conocimiento adecuado de sus capacidades impide el aprovechamiento óptimo de sus ventajas y puede llevar a incurrir en errores que perjudican el prestigio de la técnica al presentar resultados no acordes con su alcance real.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Materiales y métodos

3.1.1 Descripción de la zona de actuación

La zona en la que se va a llevar a cabo el trabajo, se encuentra situada en la Escuela Naval Militar de Marín (Figura 3-1), en la provincia de Pontevedra, perteneciente a la Comunidad Autónoma de Galicia, al Noroeste de España.

Coordenadas UTM: (524168; 4693864; 2).

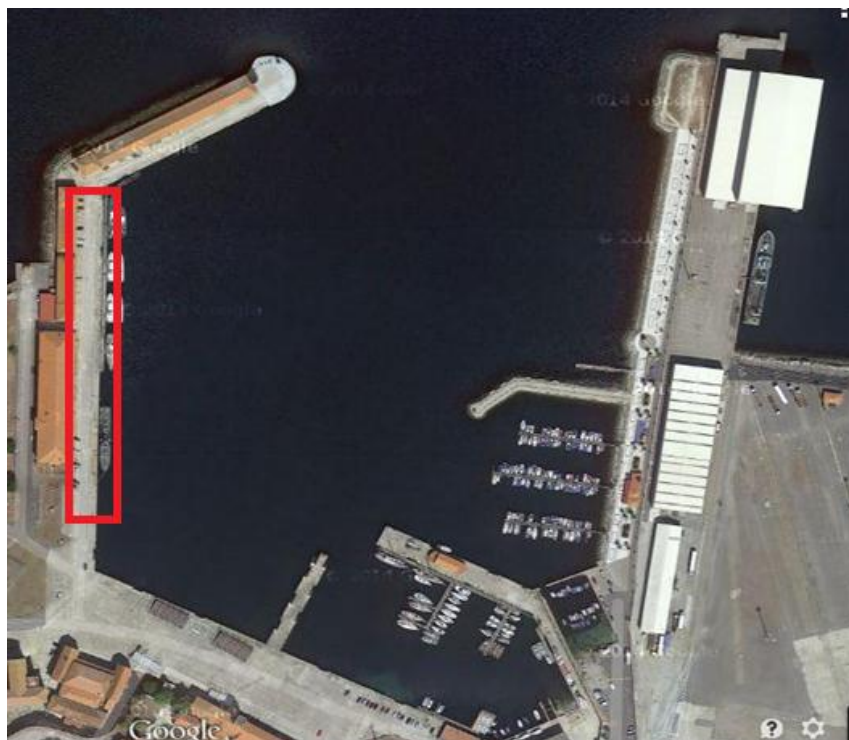


Figura 3-1: Imagen aérea de la Escuela Naval Militar de Marín, mostrando (recuadro rojo) la zona de actuación.

Dentro de esta, la evaluación del estado de la explanada se realizará en la parte delantera del edificio “Isaac Peral”, que es la parte más afectada de la zona (Figura 3-2). Anteriormente, se han realizado pequeñas obras de mantenimiento en la zona más cercana al muelle, debido al mal estado de ésta, pero no se ha hecho ningún estudio amplio para su restauración. Se sabe que en la zona trasera del edificio se han producido algunos hundimientos, por ello, y para evitar que se produzcan en la parte frontal, se lleva a cabo este estudio.



Figura 3-2: Vista general de la zona de estudio.

Tras una inspección visual in situ en la zona de estudio, se ha observado el mal estado de la instalación en cuestión. Se ha documentado la falta de juntas en el muro del muelle (Figura 3-3), debido al efecto de la acción del mar sobre la estructura, lo que facilita la entrada de agua en la explanada y el lavado del material de relleno. Como consecuencia, se han producido pequeños hundimientos en la zona superficial .



Figura 3-3: Muro del muelle con falta de juntas



Figura 3-4: Pequeños hundimientos en la zona

3.1.2 Metodología de adquisición de datos GPR.

Para llevar a cabo la adquisición de datos con el georradar, se utilizó un sistema RAMAC/GPR de la compañía Malå Geoscience. Se empleó una antena apantallada de 500 MHz, estableciéndose, como parámetros de ajuste para la toma de datos, una distancia entre trazas de 3 cm y una ventana de tiempos de 75 ns. El equipo se mueve a lo largo de la zona de estudio sobre un carro adaptado para este, que cuenta con una rueda taquimétrica (que hace las funciones de odómetro), que es la que mide la distancia entre la que se generan los impulsos y la distancia total de los perfiles producidos (perfiles de 260 metros de longitud).

Para una mejor interpretación y visualización de los datos obtenidos se han considerado metodologías de adquisición y procesamiento en tres dimensiones (3D). Para ello, se realizaron perfiles paralelos en dirección X a lo largo de toda la zona de estudio (Figura 3-5), con un espaciado entre perfiles de 20 cm. La malla prospectada final correspondió a un rectángulo de 260 x 3 m, con una profundidad de propagación de la señal de aproximadamente 3-4 metros para un material tipo relleno.



Figura 3-5: Toma de datos en zona de actuación.

3.2 Procesamiento de la señal GPR.

Para realizar el procesado de la señal, emplearemos el software REFLEXW, que es un programa que se emplea para el procesamiento 2D y 3D de datos GPR [22].

3.2.1 Procesamiento de datos 2D.

El empleo del georradar está limitado por diversos factores como, por ejemplo, la atenuación de los impulsos emitidos, ruidos externos, ruidos instrumentales, etc. Por ello, antes de interpretar los datos obtenidos por el georradar, es necesario realizar un procesamiento de los mismos mediante distintas técnicas de filtrado, para así, mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal a ruido. El procesamiento de datos es realizado mediante filtros que se utilizan para reducir el ruido y perturbaciones de los datos de campo y realzar así, la extracción de las señales recibidas, obteniendo una imagen del subsuelo que incluya todos los rasgos de interés que harán más fácil la interpretación.

La secuencia de filtrado que se llevará a cabo será la siguiente;

1.-Establecimiento del tiempo cero:

Este paso es necesario para poder conocer la profundidad exacta a la cual se encuentran los distintos eventos registrados. Con ello, se corrigen algunos desajustes producidos por derivas térmicas, diferencias de longitud de cables, inestabilidad o para evitar saltos en el registro inicial debidos a variaciones en el espacio aire de la antena. Consiste en ajustar todas las trazas del radargrama una posición común, que es la denominada "tiempo cero" [23].

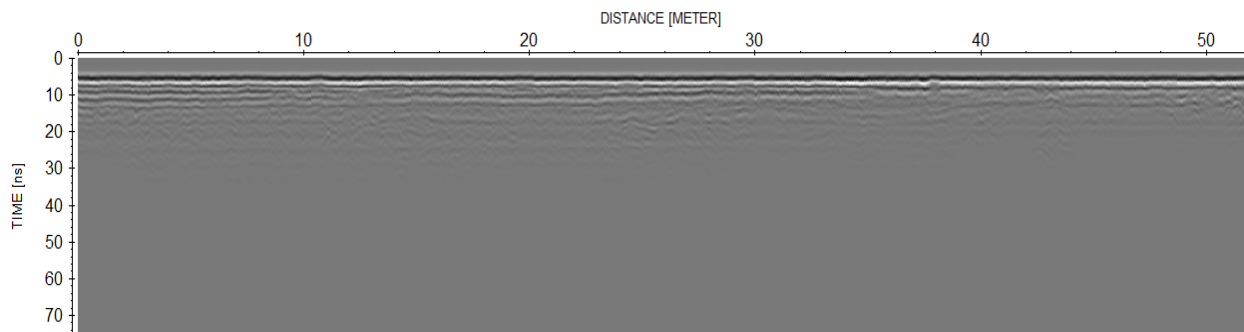


Figura 3-6: Radargrama sin ajustar el tiempo cero.

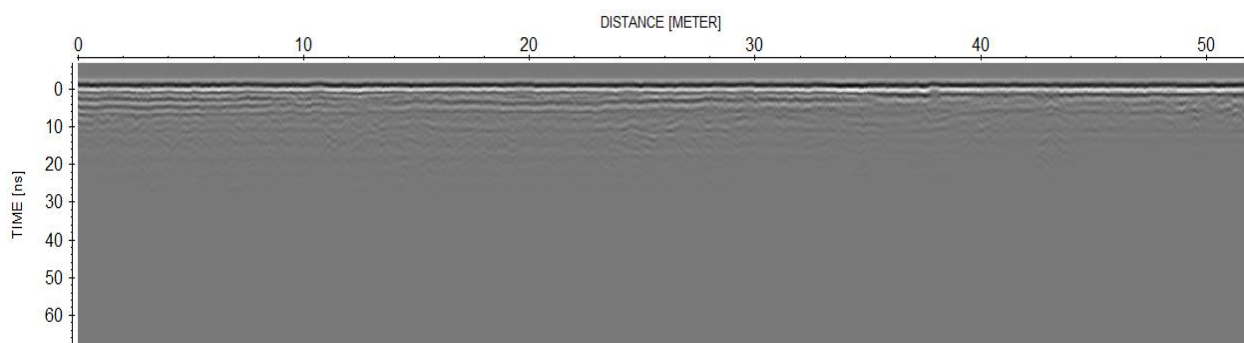


Figura 3-7: Radargrama con el tiempo cero asociado a la superficie

2.-Filtros de frecuencia vertical (1D Dewow):

Debido a diferentes fenómenos de inducción o a posibles limitaciones instrumentales del sistema en el rango dinámico, suele aparecer en los equipos GPR una componente continua de baja frecuencia en las trazas que este registra, como consecuencia de que el nivel promediado de la señal se traslada de cero a otro valor diferente [24].

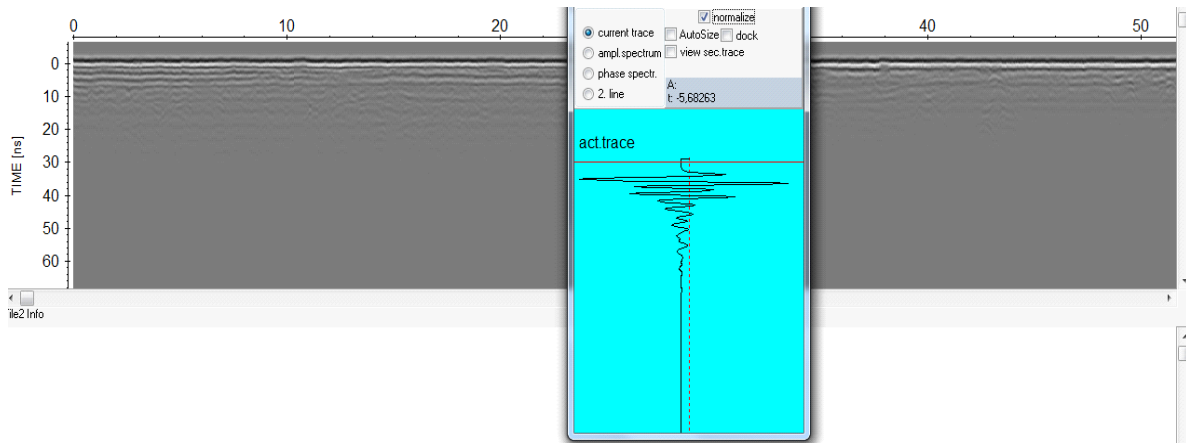


Figura 3-8: Imagen previa al procesamiento del filtro.

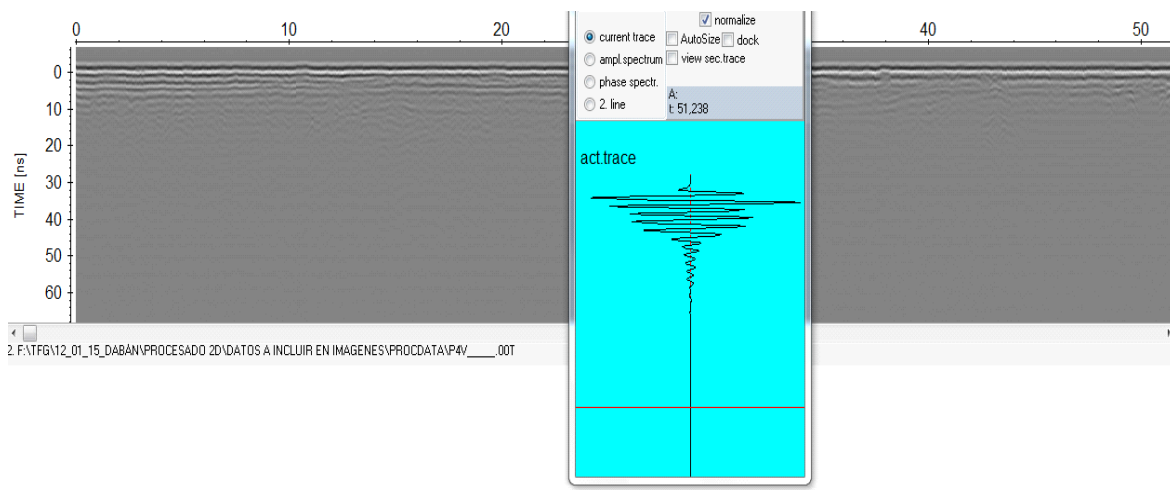


Figura 3-9: Imagen tras procesar el filtro.

3.-Ganancia:

La señal radar se atenúa rápidamente mientras se propaga por el terreno. A continuación se llevará a cabo una amplificación de la señal recibida, para contrarrestar esta atenuación producida por la propagación de la onda y por las características electromagnéticas de los materiales del suelo.

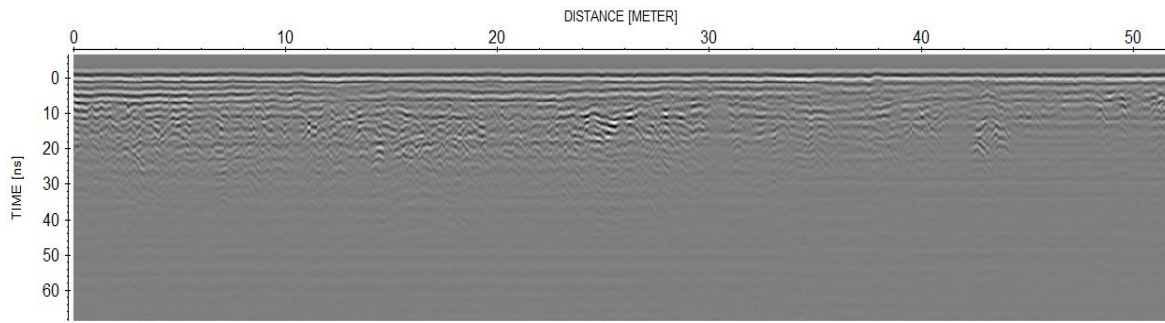


Figura 3-10: Radargrama tras amplificar la señal recibida.

4.-Filtros de frecuencia horizontal (2D):

Estos filtros tratan de eliminar el ruido de baja frecuencia representado por bandas horizontales continuas a lo largo del radargrama. Son los necesarios para eliminar el ruido originado por el mal acoplamiento entre la antena y el medio, y para reducir posibles reverberaciones de la señal [25].

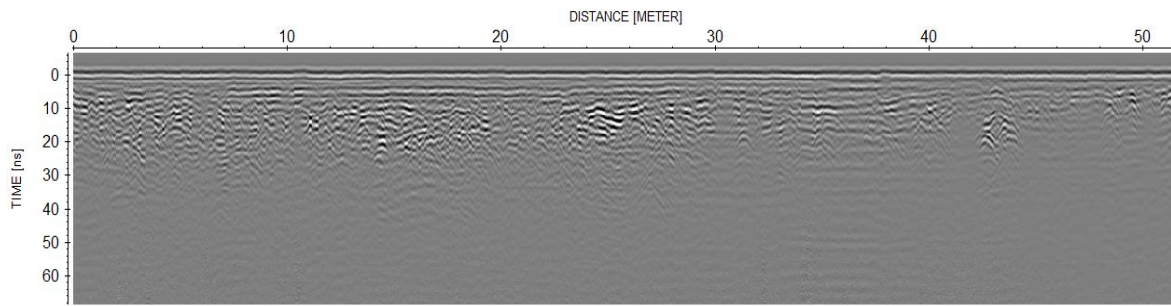


Figura 3-11: Resultado final tras el procesado 2D.

3.2.2 Procesamiento de datos 3D.

Una vez que los datos 2D se procesaron, se exportaron al módulo 3D del mismo software de procesamiento.

Todos los radargramas se registraron con la misma distancia tanto de traza e incremento de tiempo. Para la visualización de los datos GPR en 3D, se genera un cubo con todos los radargramas obtenidos mediante mallas densas de perfiles GPR paralelos entre sí (adquisición 3D), con una separación constante entre perfiles (20 cm en el presente estudio), en las direcciones denominadas X e Y. Este cubo de datos se puede cortar por diferentes planos horizontales, estos cortes son llamados time-slices o C-scans (Figura 3-12).

Además, esta interpretación 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 capas sedimentarias en relación a la profundidad.

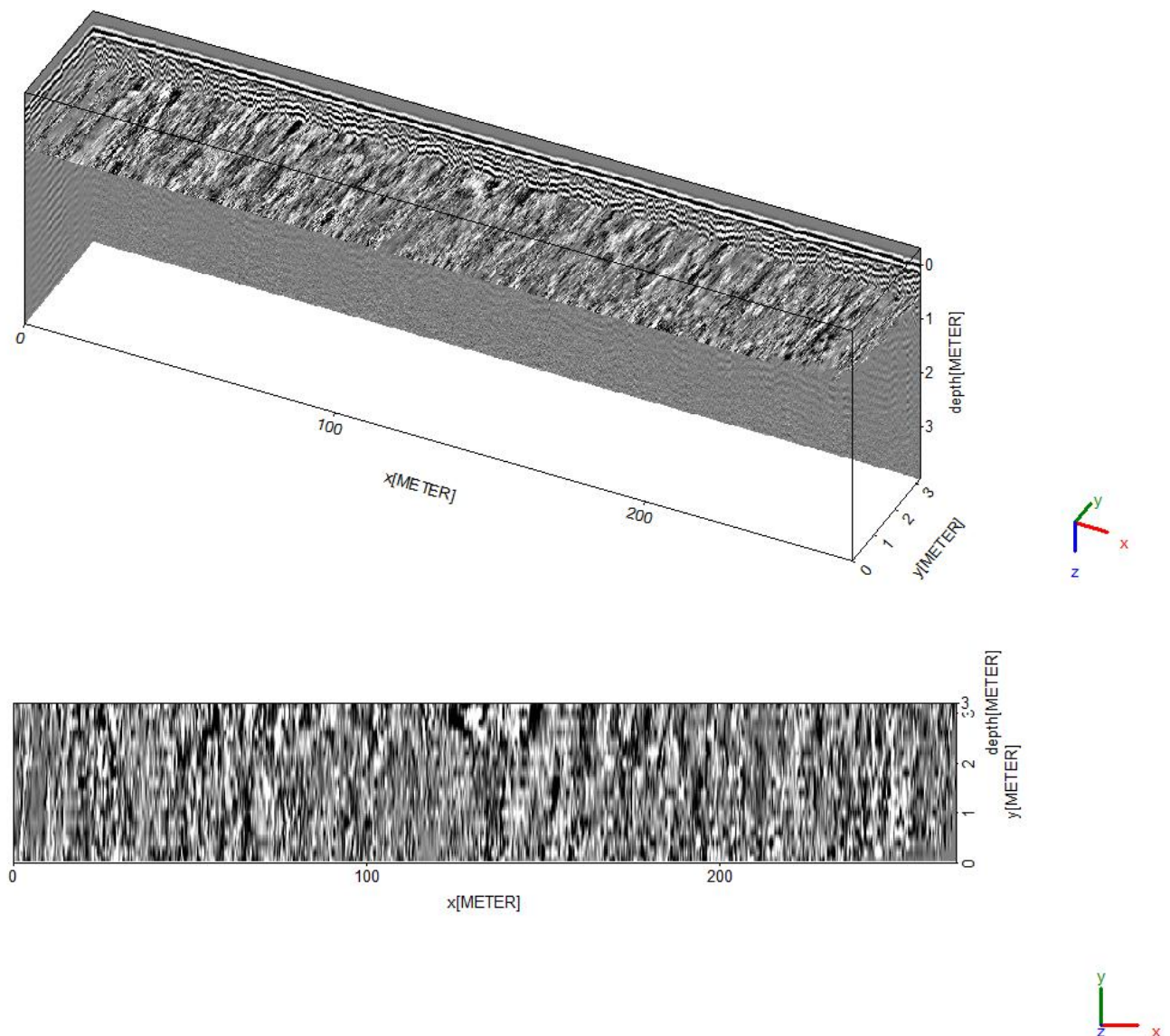


Figura 3-12: Cubo 3D y slices a partir de los radargramas.

3.3 Los sistemas de información geográfica. Georreferenciación y Digitalización

3.3.1 Concepto de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

El término SIG proviene del inglés Geographic Information System (GIS). Es una herramienta de software que nos permite almacenar, recuperar, analizar y desplegar información geográfica.

Este tiene la capacidad de efectuar una gestión completa de datos referenciados geográficamente. Por datos referenciados se indica a los datos geográficos o mapas que constan de coordenadas geográficas reales asociadas.

3.3.2 Antecedentes.

La primera utilización real de sistemas de información geográfica se remonta al año 1962, cuando en Ottawa (Canadá), el llamado Sistema de información geográfica de Canadá se empleó para almacenar, analizar y manipular algunos datos recogidos para el Inventario de Tierras Canadá. Este sistema fue un considerable avance respecto a las aplicaciones cartográficas que había en el momento.

Ya en la década de los 80, emergieron nuevos proveedores comerciales de software SIG, como M&S Computing o CARIS (Computer Aided Resource Information System).

Es ya a finales del siglo XX e inicios del actual cuando el crecimiento de estos sistemas ha sido consolidado. El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha incrementado notablemente en estos últimos años, gracias a que son un medio de integración de información que ayuda a orientar y a entender algunos de los problemas con mayor impacto, a los que se enfrenta el mundo actual. Es decir, son herramientas que permiten resolver problemas prácticos que van desde la visualización de información geográfica, pasando por el cálculo del movimiento de la tierra, hasta evaluar su impacto en una región susceptible a sismos.

3.3.3 Principales aplicaciones SIG

Algunos ejemplos de aplicación que los SIG han mostrado beneficio y utilidad son los siguientes:

-Cartografía automatizada

Las entidades públicas han implementado este componente de los SIG en la construcción y mantenimiento de planos digitales de cartografía.

-Infraestructura

Algunos de los primeros sistemas SIG fueron utilizados por las empresas encargadas del desarrollo, mantenimiento y administración de redes de electricidad, gas, agua, teléfono, alcantarillado, etc.

-Gestión territorial

Son aplicaciones SIG dirigidas a la gestión de entidades territoriales y permiten un rápido acceso a la información gráfica y alfanumérica, y suministran herramientas para el análisis espacial de la información. Facilitan labores de mantenimiento de infraestructura, mobiliario urbano, etc., y permiten realizar una optimización en los trabajos de mantenimiento de empresas de servicios.

-Medio ambiente

Son aplicaciones implementadas por instituciones de medio ambiente, que facilitan la evaluación del impacto ambiental en la ejecución de proyectos. Integrados con sistemas de adquisición de datos permiten el análisis en tiempo real de la concentración de contaminantes, a fin de tomar las precauciones y medidas del caso. Facilitan una ayuda fundamental en trabajos tales como reforestación, explotaciones agrícolas, estudios de representatividad, caracterización de ecosistemas, etc.

-Planimetría

La planimetría tiene como objetivo la representación bidimensional del terreno proporcionándole al usuario la posibilidad de proyectar su trabajo sobre un papel o en pantalla sin haber estado antes en el sitio físico del proyecto. El fin de la planimetría es que el usuario tenga un fácil acceso a la información del predio; por ejemplo, saber qué cantidad de terrenos desocupados se encuentran en el lugar, o qué cantidad de postes telefónicos necesita para ampliar su red, o qué cantidad de cable

necesita para llegar hasta un cliente, o emplearlo en soluciones móviles, o utilizarlo como plataforma de archivos GIS. En otras palabras, permite el usuario visualizar de forma clara y con gran exactitud la información que se encuentra dentro de su proyecto.

-Cartografía Digital 3D

Este tipo de información tridimensional de construcciones civiles, es requerida para realizar, por ejemplo, la planeación de la cobertura de las ondas de radio en una población ubicando los rebotes de ondas radiales entre antenas, optimización de redes, ubicación de antenas, interferencias de radio frecuencia, tendido de líneas de transmisión en 3D; o en el caso de la planeación de un aeropuerto este modelado tridimensional permitiría realizar el estudio de los espacios aéreos que intervienen en el proceso de diseño referenciado, en su caso, la viabilidad técnica de su construcción.

3.3.4 *Software gvSIG.*

El software gvSIG es un sofisticado Sistema de Información Geográfica que permite gestionar datos espaciales y realizar análisis complejos sobre estos. La aplicación es de código abierto, con licencia GPL (General Public License o licencia pública general) y gratuita.

El origen de gvSIG se remonta al año 2004, y surge por iniciativa de la Generalitat Valenciana, a través de la Conselleria de Infraestructuras y Transporte (CIT) (concurso público "Servicios informáticos de desarrollo de aplicaciones SIG para la CIT utilizando software libre"). Inicialmente nace con unos objetivos acordes a las necesidades de la CIT. Estos objetivos se ven rápidamente ampliados, fruto por un lado de la naturaleza del software libre -que facilita enormemente la expansión de la tecnología, del conocimiento y establece las bases sobre la que constituir una comunidad y por otro de una visión de proyecto materializada en unas líneas de demarcación y un plan acorde para llevarlas a cabo.

El programa gvSIG está orientado al manejo de información geográfica. Se caracteriza por una interfaz amigable y sencilla, con capacidad para acceder ágilmente a los formatos más usuales (ráster y vectoriales).gvSIG además es capaz de integrar datos en una vista, tanto locales como remotos, a través de un origen WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service) WCS (Web Coverage Service) O JDBC (Java Database Connectivity).

Está orientado a usuarios finales de información geográfica, profesionales o personal de Administraciones Públicas (Ayuntamientos, Diputaciones, Consejerías o Ministerios). También resulta de especial interés para los ambientes universitarios, debido a su componente I+D+I (Investigación+Desarrollo+Innovación).

3.3.5 *Herramientas de análisis a emplear.*

Se describirán los dos procesos a utilizar: Georreferenciación y Digitalización.

3.3.5.1 Georreferenciación

La georreferenciación es el proceso por el cual dotamos de un sistema de referencia (coordenadas terreno) a una imagen digital que se encuentra en coordenadas píxel (filas y columnas). Este proceso exige una búsqueda de puntos homólogos entre la imagen y el mapa final. El resultado es una transformación que supone un escalado, giro y deformación de la imagen original para adaptarse al mapa final. Su uso principal es la de poner imágenes raster como referencia de datos vectoriales.

En nuestro caso particular, se desea dotar de coordenadas UTM29n a la imagen GPR 3D obtenida del terreno que tiene coordenadas relativas planas (el origen de coordenadas está en el extremo inferior izquierdo de la imagen). Para ello se utilizarán como puntos de control aquellos que sean más fácilmente identificables en la imagen y que se correspondan con puntos de la cartografía del PNOA.

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) tiene como principal objetivo la obtención de ortofotografías aéreas digitales y modelos digitales de elevaciones (MDE) de alta precisión de todo el territorio español, con un período de actualización de 2 ó 3 años, variando según las zonas. Su manera de realizarlos es mediante la realización de un vuelo fotogramétrico único y un tratamiento riguroso de los datos cumpliendo con unas especificaciones técnicas consensuadas entre todas las Administraciones Públicas participantes. Este planteamiento de producción descentralizada y cooperativa entre las distintas administraciones es acorde con el espíritu de la Directiva Europea INSPIRE para el establecimiento de una Infraestructura de datos geográficos en Europa, que persigue que el nivel de detalle máximo de la información geográfica se capture una sola vez y que se comparta abiertamente entre los distintos agentes sociales que tengan necesidad de la misma. La fotografía aérea es la base para la realización de cartografía y la información geográfica en general, ocupación del suelo, urbanismo y ordenación del territorio, catastro, etc [28].

A continuación, como ejemplo, se realizará la georreferenciación de una parte de la zona que vamos a estudiar;

Cartografía base: PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea).

Imagen a georreferenciar: Imagen GPR 3D.

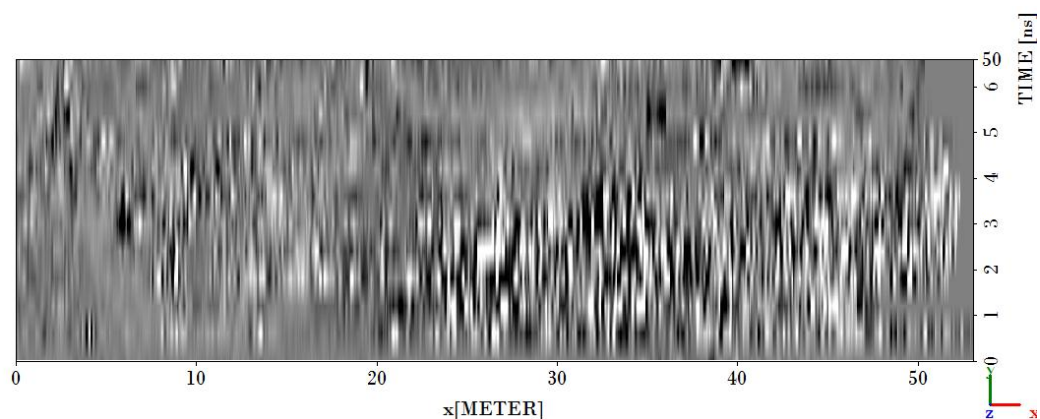


Figura 3-3: Time Slice (o corte horizontal 3D) obtenida con el georradar a 1 metro de profundidad.

En primer lugar, se busca en la cartografía empleada, la localización de la zona en la que se ha obtenido la imagen (Figuras 3-14 y 3-15).

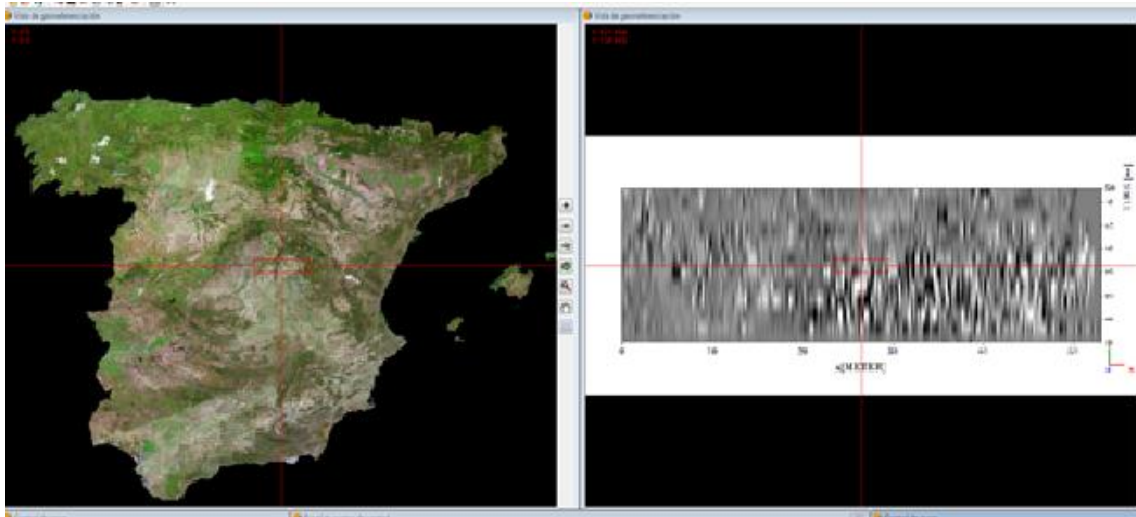


Figura 3-4: Imagen general cartografía empleada.

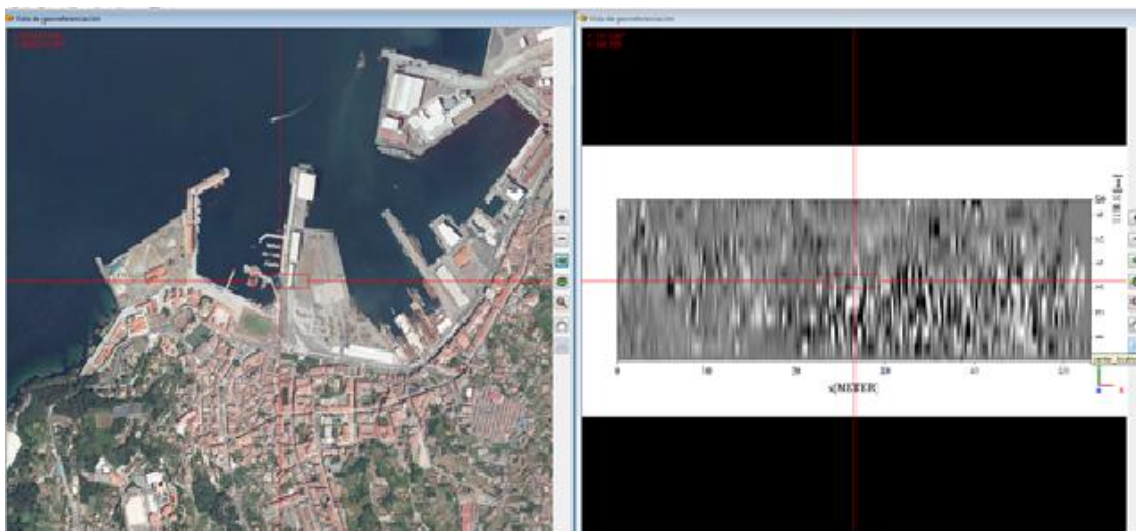


Figura 3-5: Imagen aérea de la zona.

Posteriormente, se sitúan puntos de referencia, teniendo en cuenta las esquinas de la imagen como puntos de control (Figura 3-16).

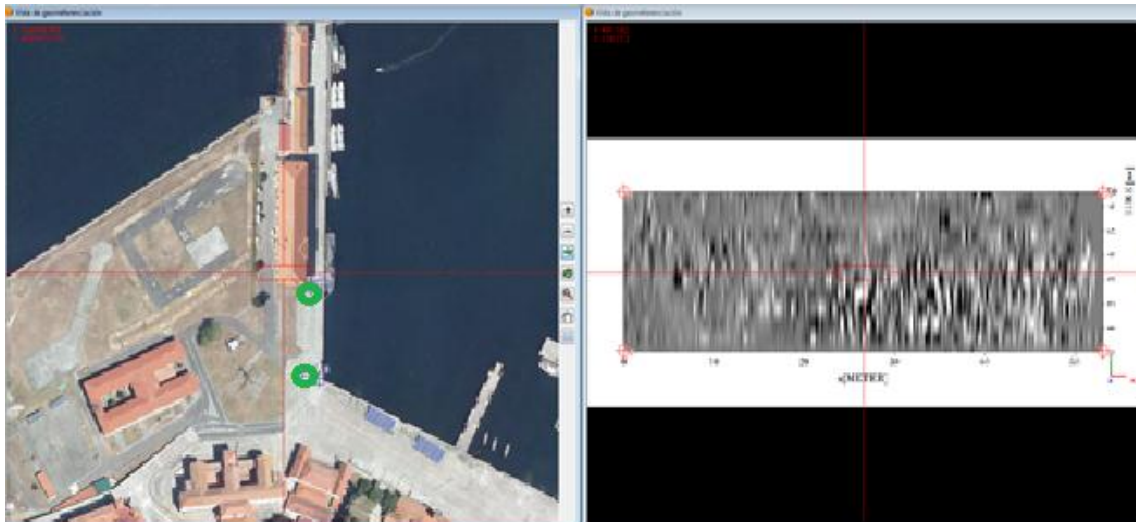


Figura 3-6: Situación puntos de referencia.

Como resultado del proceso, la imagen se girará y escalará hasta su superposición con la cartografía base (Figura 3-17).

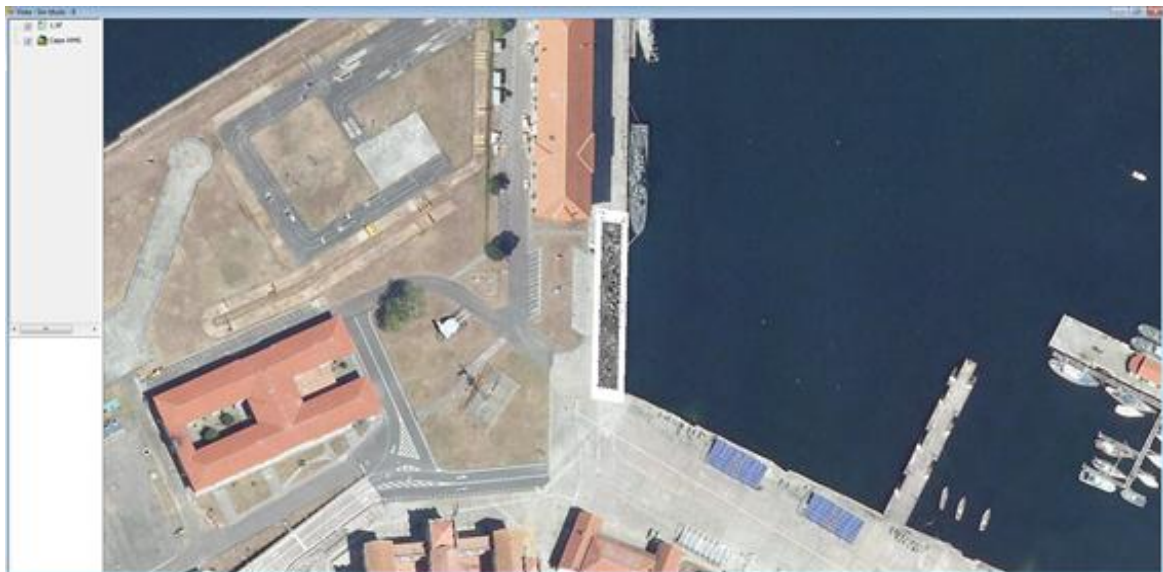


Figura 3-7: Resultado final tras Georreferenciación.

3.3.5.2 Digitalización.

Mediante el proceso de digitalización, se seleccionarán (creando polígonos) las zonas de más afección y se realizará una asignación de atributos.

En primer lugar, creamos una nueva capa shp para generar las áreas afectadas (Figura 3-18).

Tipo de geometría para capa: polígono.



Figura 3-18: Capa shp.

A continuación, designamos las distintas áreas, identificadas en la imagen, en una tabla de atributos (Figura 3-19).

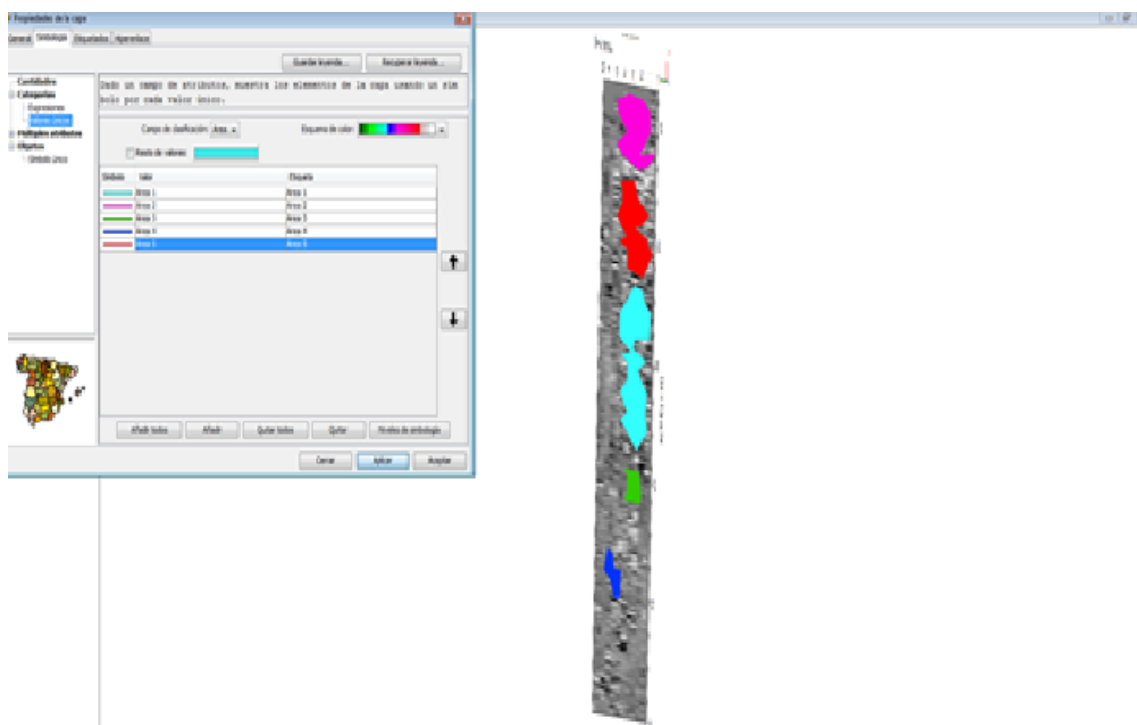


Figura 3-9: Distintas áreas, junto a tabla de atributos.

En el siguiente paso, creamos un nuevo campo en la tabla, donde asignaremos el grado de afección de la zona. En este caso definimos 4 grados distintos. De 1 a 4 de mayor a menor afección, respectivamente. De esta forma, podemos visualizar nuestras áreas, en función de su grado de afección (Figura 3-20).

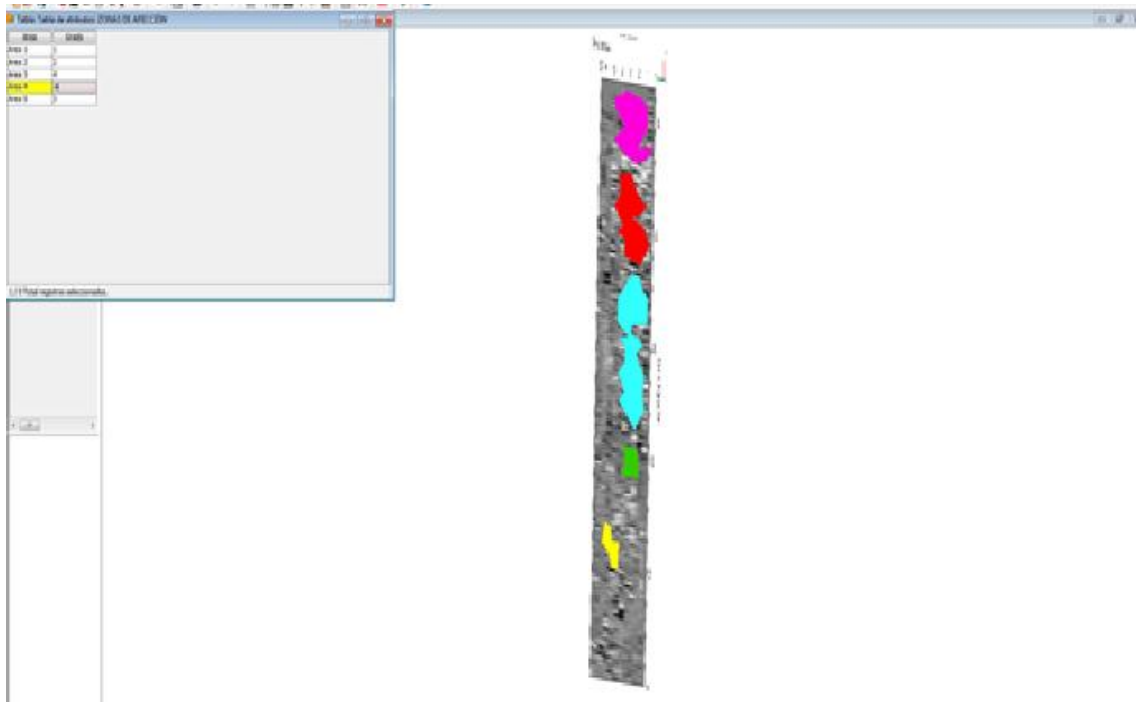


Figura 3-20: Tabla con grados de afección.

Esta digitalización permite también hacer cálculos de interés, como por ejemplo: perímetro de áreas de afección, superficies y volúmenes.

En la siguiente imagen, a modo de ejemplo (Figura 3-21), se muestra la tabla de atributos con la superficie calculada para cada área (polígono) en planta.

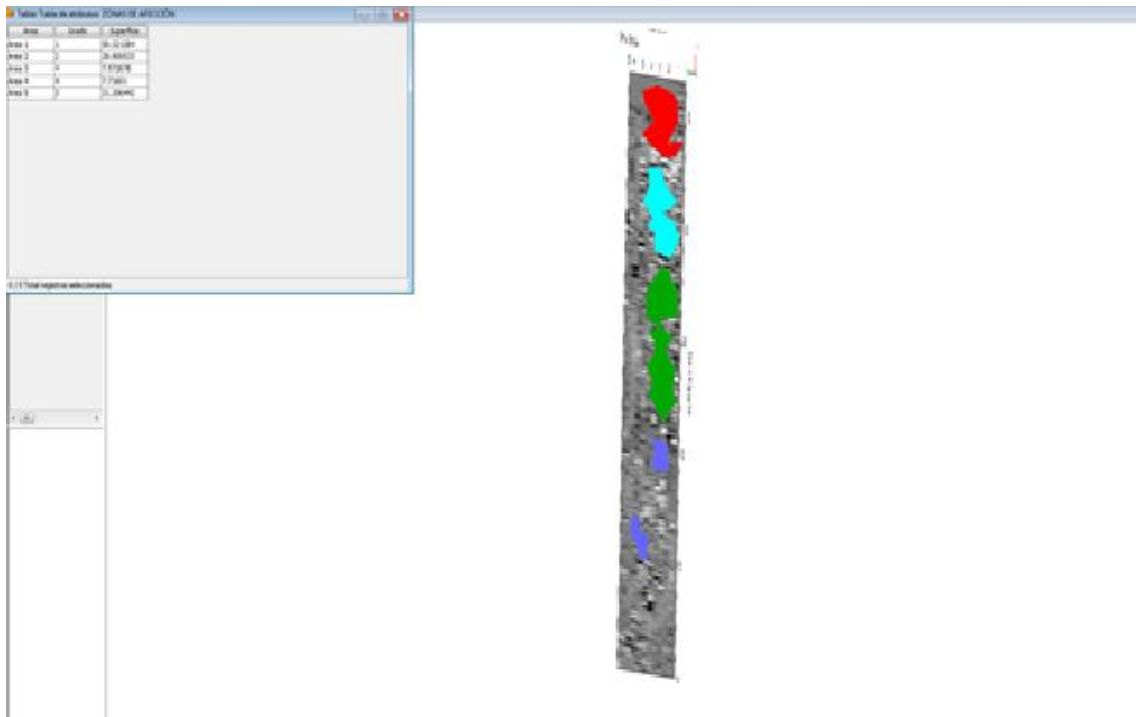


Figura 3-21: Superficie calculada para cada área.

4 RESULTADOS

A continuación se mostrarán los resultados 2D y 3D obtenidos tras procesar los datos recogidos en la zona de estudio.

4.1 Resultados 2D

En primer lugar nos centraremos en el procesado 2D, para lo que se expondrán algunos de los radargramas obtenidos con la antena de 500 MHz, una vez aplicada una adecuada secuencia de filtrado. En estos radargramas, se localizarán y remarcarán las zonas más afectadas, y todo ello será contrastado con fotografías de la correspondiente zona.

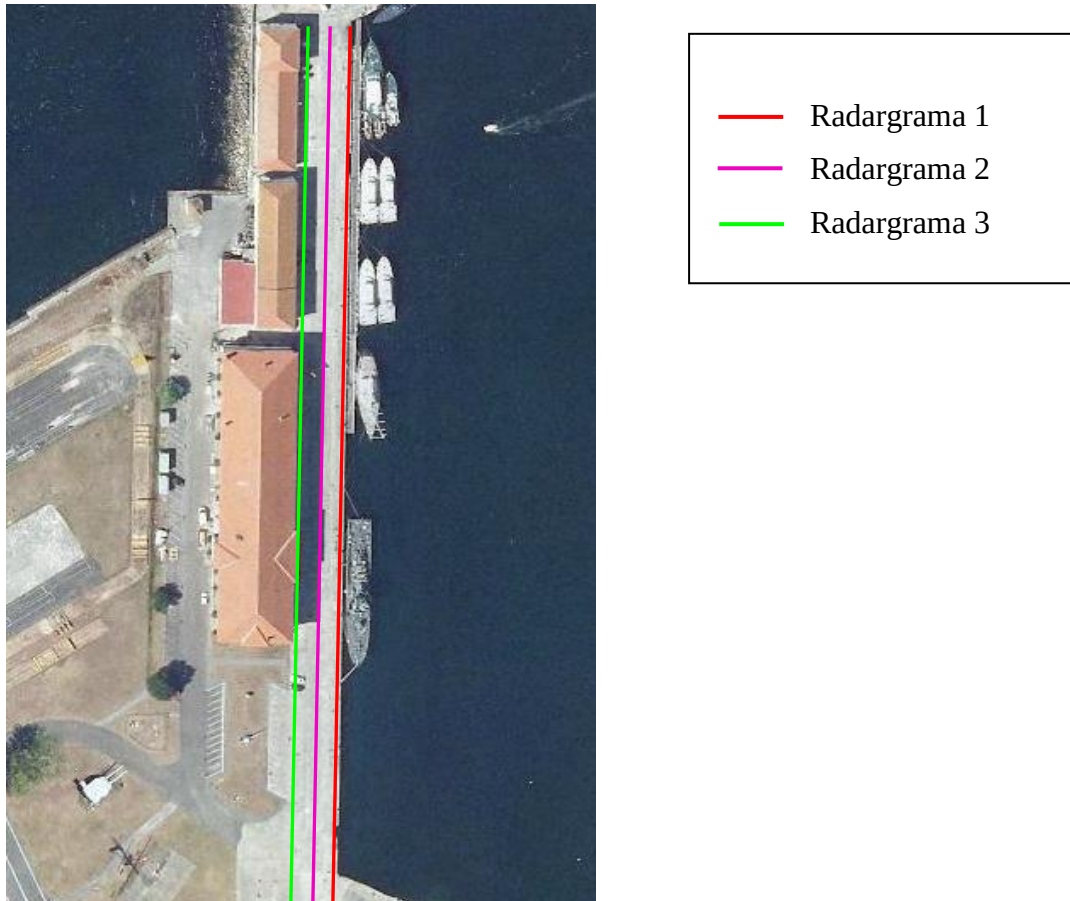


Figura 4-1: Esquema de situación de radargramas.

Se van a establecer 3 grados de afección, representados de color rojo (mayor grado de afección), color naranja (grado de afección medio) y color amarillo (menor grado de afección). Se establecerá el color verde, para las zonas que no se encuentren dañadas.

Radargrama 1

Este radargrama representa el estado de la zona más pegada al muelle.

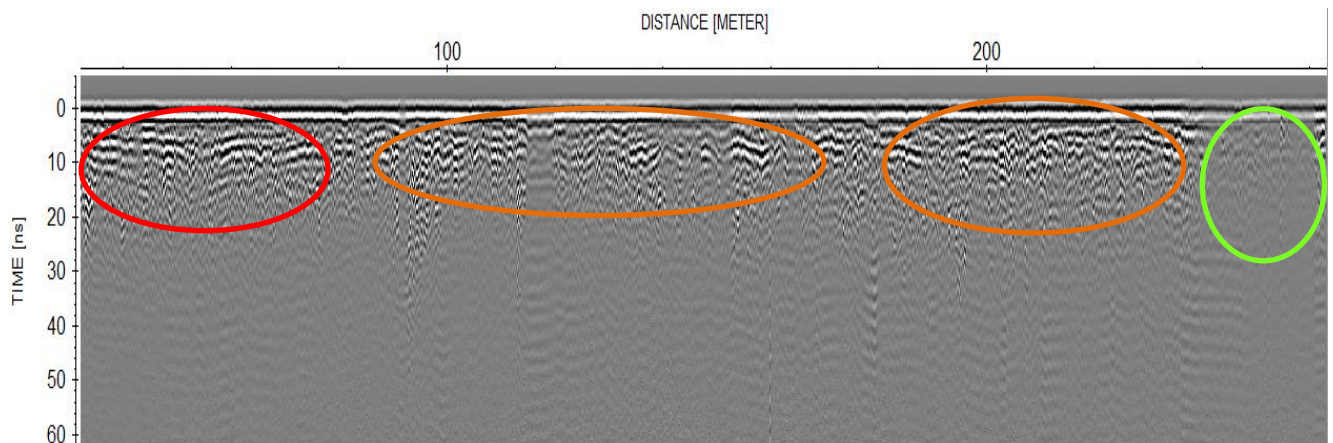


Figura 4-2: Análisis Radargrama 1.

Podemos observar que la zona más dañada, resaltada en color rojo, se corresponde con los primeros 70 metros aproximadamente (Figura 4-2). Se puede decir que es la más afectada debido a la mayor confluencia de difracciones de la señal GPR, por presencia de huecos en el relleno, y al mayor contraste de amplitudes (intensidad de reflexión) observado. Dicha interpretación queda avalada por el deterioro en superficie observado en esa zona de la explanada (Figura 4-3).



Figura 4-3: Estado de la zona de 0 a 100 metros de distancia

Las siguientes zonas más dañadas, son las señaladas en naranja, que se encuentran entre los 100 y los 250 metros aproximadamente (Figura 4-2). Por último, pueden ver la franja de color verde que se encuentra al final de la zona de estudio. Esta se encuentra en buen estado, ya que pueden ver que no hay contraste alguno que indique presencia de huecos.

Radargrama 2

Este radargrama, representa el estado de la zona situada en el centro de la explanada.

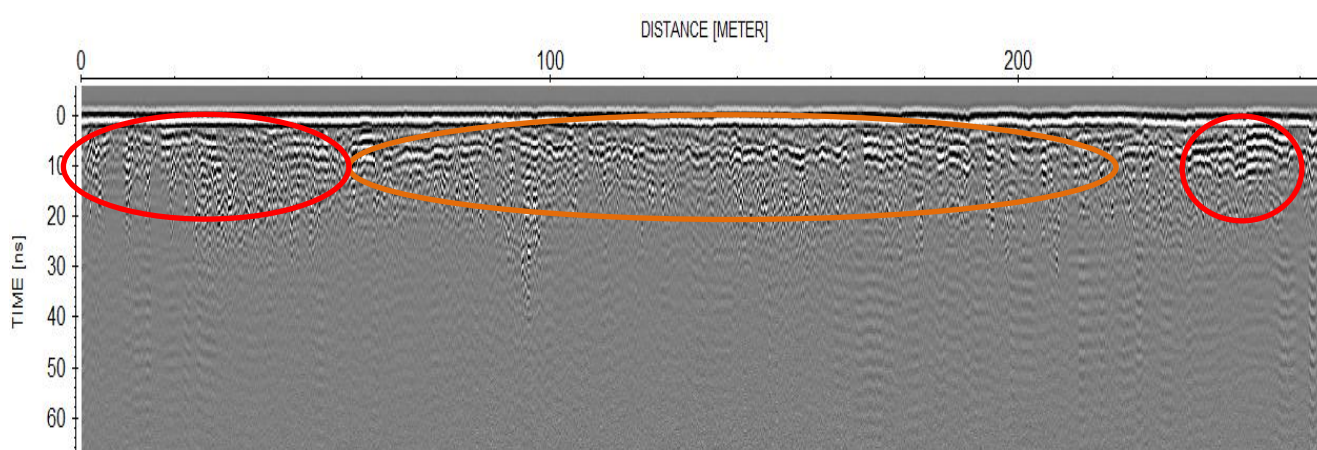


Figura 4-4: Análisis Radargrama 2.

En la Figura 4-4, se puede observar como el grado de afección de la parte central es menor. Esto puede ser debido a qué, a diferencia de la zona más pegada al muelle (anteriormente explicada), aquí el terreno no se ve tan afectado por la entrada de agua y consecuente lavado del material. Vemos como la capa reflejada en la interfaz pavimento-relleno (a 6-8 ns, aproximadamente) va cogiendo mayor continuidad, lo que representa los distintos materiales que se encuentran bajo la superficie.

La zona roja representa una zanja importante, que sólo se encuentra en esta zona central (Figura 4-5), ya que en la perfil GPR anterior (Figura 4-2) veíamos como no había daños a esta altura.



Figura 4-5: Estado de la zona pasados los 200 metros.

Radargrama 3

Este último radargrama (Figura 4-6), representa la parte más pegada al edificio Isaac Peral, en el que se puede apreciar que hay varias zonas afectadas, marcadas de color naranja (laterales) y color amarillo (central). El grado de afección va disminuyendo, y es posible observar con mayor claridad la capa pavimento-relleno.

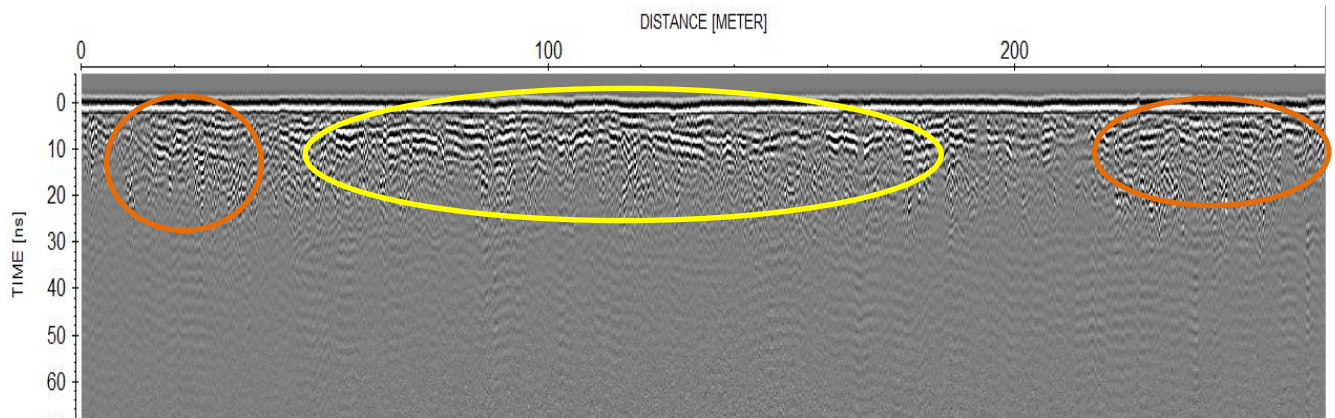


Figura 4-6: Análisis Radargrama 3.

A continuación, en la Figura 4-7, se muestra un radargrama más al detalle mostrando la presencia de una tubería que atraviesa la zona de estudio y la existencia de un bloque de hormigón armado. Las fotografías tomadas durante la inspección visual llevada a cabo confirman la existencia de dichos elementos constructivos y de servicio (Figura 4-8).

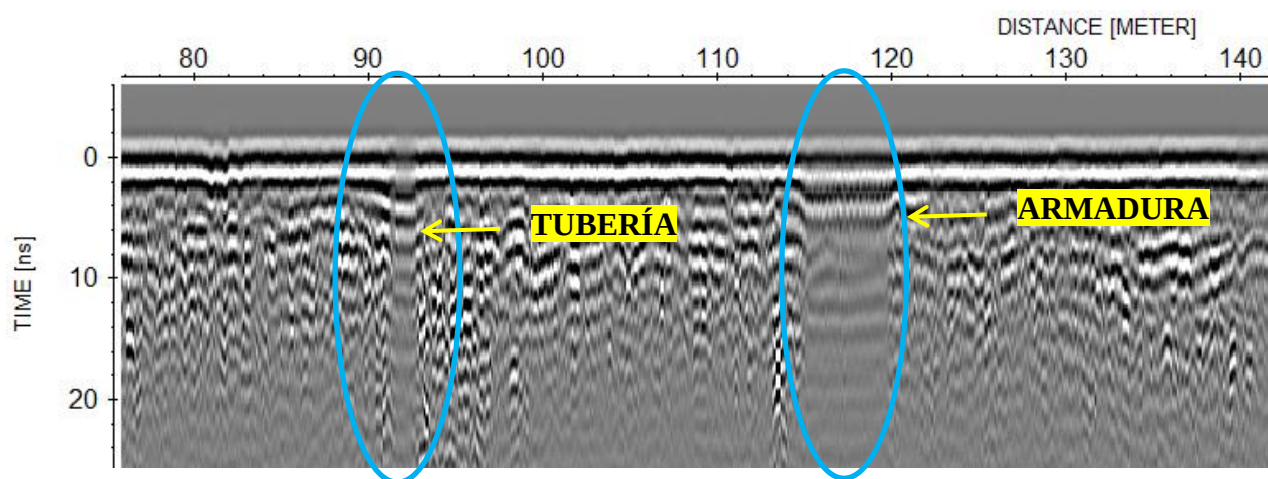


Figura 4-7: Radargrama detallado.



Figura 4-8: Tubería y bloque de hormigón mencionados anteriormente.

4.2 Resultados 3D

En este apartado se muestra el modelo 3D obtenido, lo que servirá de gran ayuda para localizar, con más detalle, las zonas mas dañadas. Este procesado 3D permite comprender las correlaciones espaciales entre las distintas capas en profundidad. En esta primera Figura 4-9, podemos observar cortes en las tres direcciones: XY, XZ, YZ, lo que nos ayuda a percibir con mayor claridad, la situación de las zonas de mayor afección.

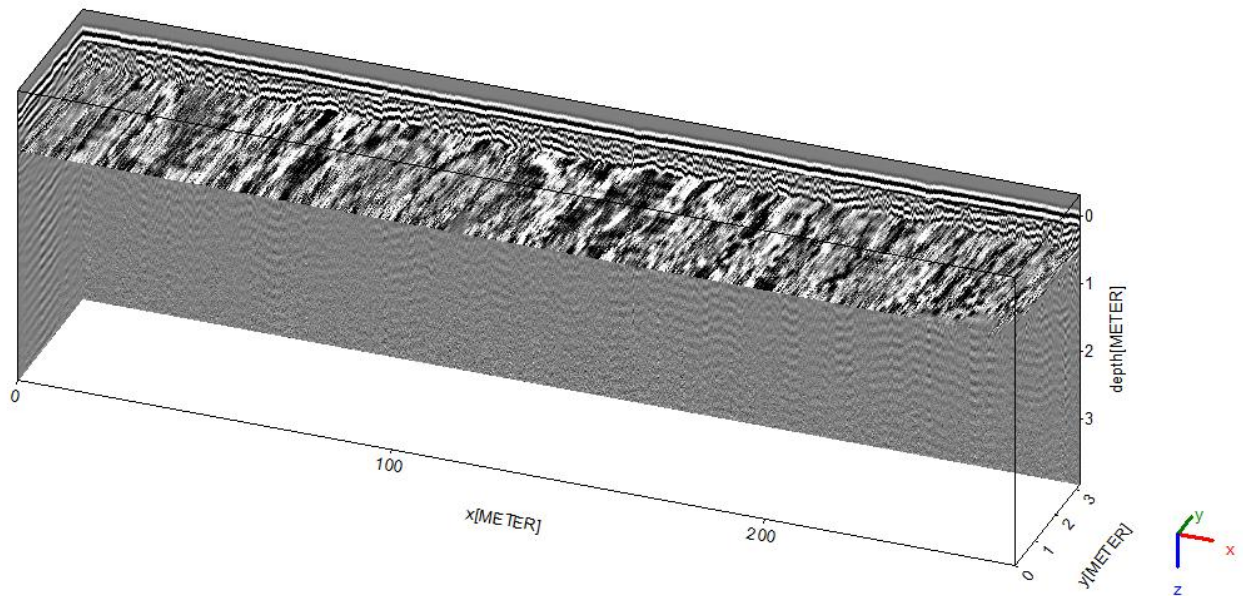


Figura 4-9: Cubo 3D

A continuación se mostrarán una serie de cortes en los ejes XY a distintas profundidades. Esto nos permitirá observar más al detalle la localización de los huecos más importantes. Para el cálculo de las profundidades, se ha utilizado una velocidad de 0,11 m/ns para caracterizar el material de relleno según valores bibliográficos [27].

En la time-slice (corte horizontal) a 15 cm de profundidad (Figura 4-10), podemos distinguir la tubería de la que se habló en el procesado 2D (Figura 4-7), a una distancia de 90 metros aproximadamente y resaltada de color azul. Además, podemos observar la zona en buen estado, de la que también se habló en el procesado 2D (Figura 4-2), que se encuentra al final, resaltada en color verde.

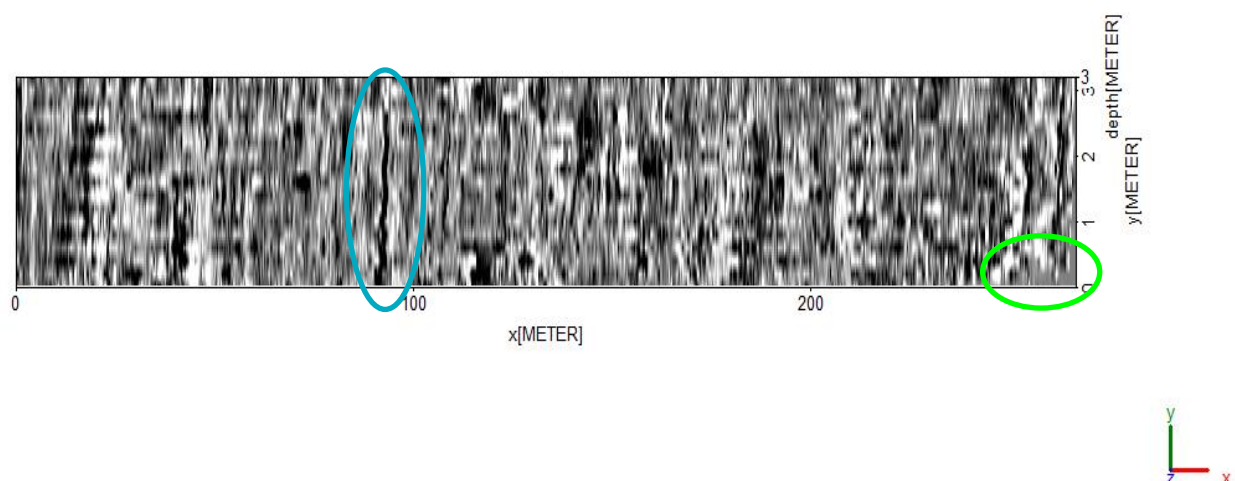


Figura 4-10: Time-Slice 15 cm profundidad

En la Figura 4-11 se representa un corte horizontal a 22 cm de profundidad. En ella podemos visualizar las zonas más afectadas, remarcadas en rojo, que se encuentran al principio y al final de la zona de

estudio. Además, tenemos una zona de menor afección, resaltada en color naranja, y la misma tubería interpretada en la imagen anterior.

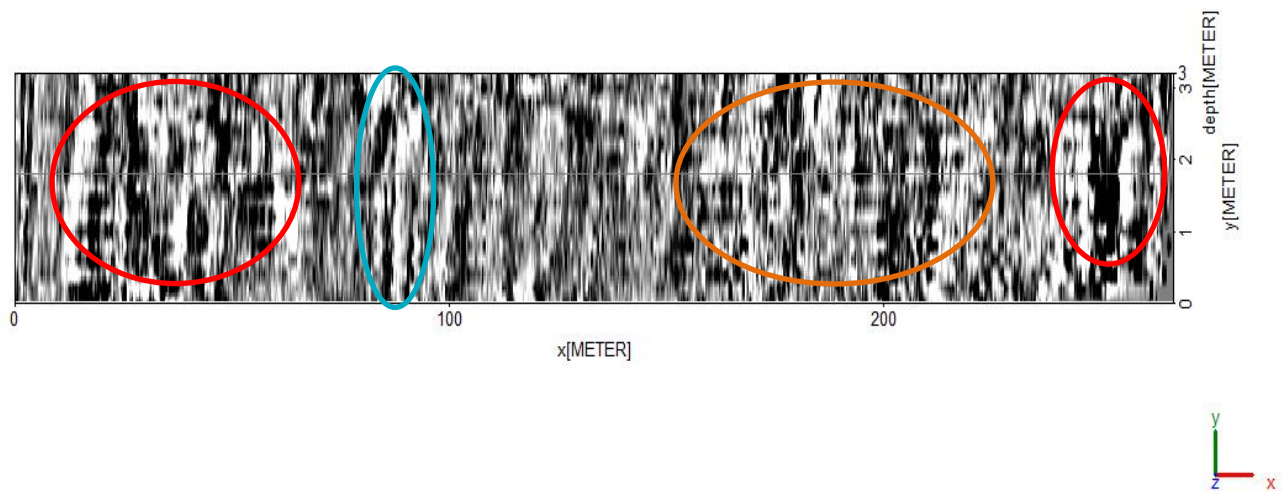


Figura 4-11: Time-Slice 22 cm profundidad

Con el corte horizontal realizado a 35 cm de profundidad (Figura 4-12), podemos comprobar como el hueco que antes veíamos al principio se mantiene, lo que confirma que es una zanja profunda. Sin embargo, el del final, poco a poco va desapareciendo con la profundidad. Por último, en torno a los 200 metros, donde antes se distinguía una zona de afección media, vemos como esta se va suavizando.

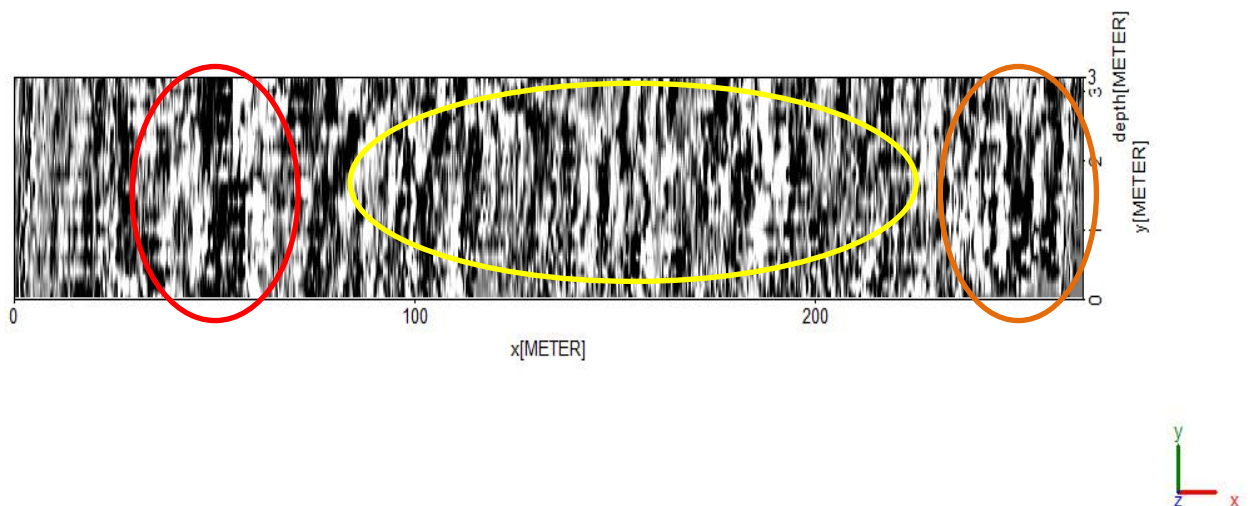


Figura 4-12: Time-Slice 35 cm de profundidad

Para finalizar, he escogido la time-slice de la Figura 4-13, a 60 cm de profundidad, en la que se puede apreciar como los huecos van desapareciendo en su totalidad. Esto confirma que las zanjas halladas son más bien superficiales, sin llegar a mucha profundidad.

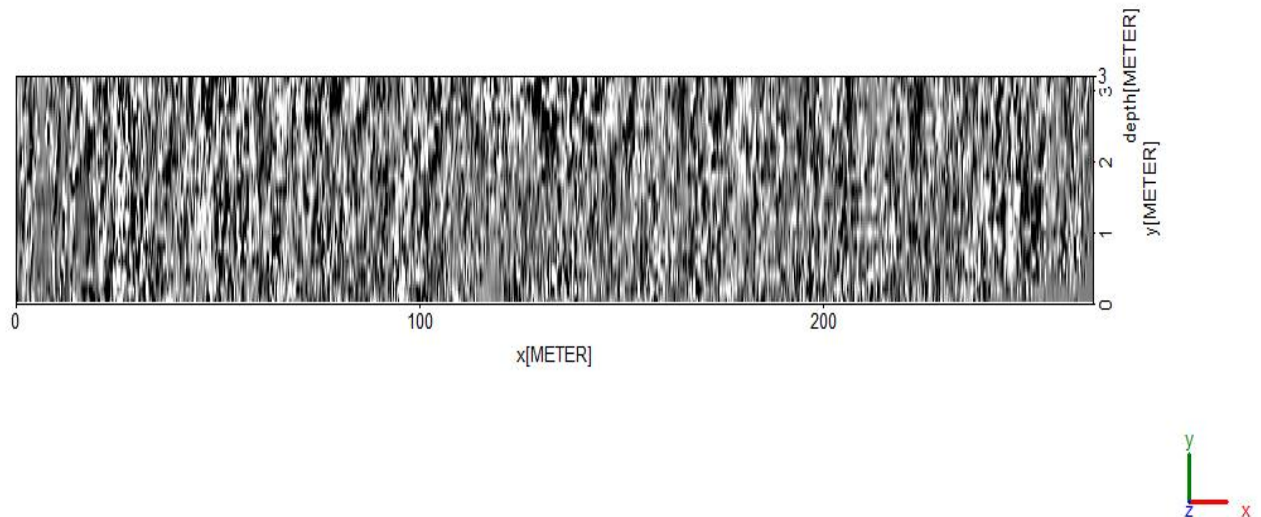


Figura 4-13: Time-Slice 60 cm profundidad

4.3 Estimación de volúmenes de relleno afectado con SIG.

A partir de herramientas SIG (Software gvSIG), se procederá al análisis del estado de relleno de la zona de estudio y a la determinación de áreas afectadas. Posteriormente se realizará un cálculo de superficies y volúmenes de las mismas.

Las time-slices seleccionadas son a 15 cm, 35 cm y 60 cm de profundidad, ya que se considera que son las profundidades más apropiadas para hacer una aproximación de las superficies y volúmenes de las zonas afectadas. El primer time-slice no se cogerá de la superficie, sino a 15 cm de profundidad, ya que se considera que es ahí cuando se puede empezar a considerar relleno.

El proceso a seguir, será el explicado en los apartados 3.3.5.1 (Georreferenciación) y 3.3.5.2 (Digitalización).

Tras un análisis inicial, se han diferenciado 3 zonas de afección claras, que serán nombradas según la siguiente tabla:

Nombre	Ubicación
Zona 1	Sur
Zona 2	Centro
Zona 3	Norte

Tabla 4-1: Zonas de afección y su ubicación

En cada una de ellas se medirá la superficie de las 3 zonas de afección diferenciadas y éstas serán clasificadas según su grado de afección de la siguiente manera:

Grado afección	% Daños	Color
1	0-25 %	Verde
2	25- 60 %	Amarillo
3	+ del 60 %	Rojo

Tabla 4-2: Grados de afección

Finalmente, una vez obtenidas las superficies de las zonas afectadas a distintas profundidades, obtendremos el volumen total de cada una de estas zonas.

A continuación se muestran las imágenes de los distintos time-slices con las zonas de afección marcadas y una tabla mostrando las superficies de éstas a distintas profundidades. (Figura 4-14 a 15 cm, Figura 4-15 a 35 cm y Figura 4-16 a 60 cm).



Figura 4-14: Zonas afectadas y sus superficies a 15 cm de profundidad

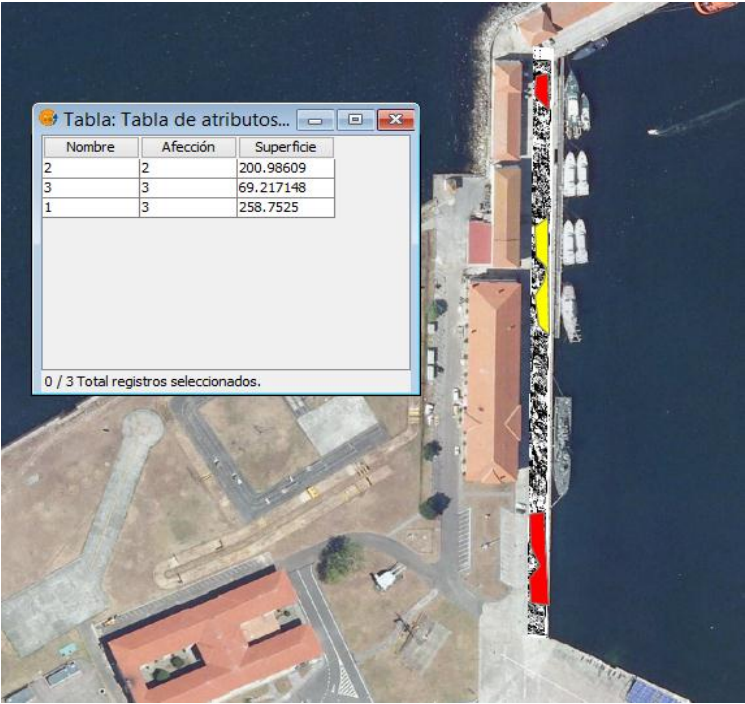


Figura 4-15: Zonas afectadas y sus superficies a 35 cm de profundidad

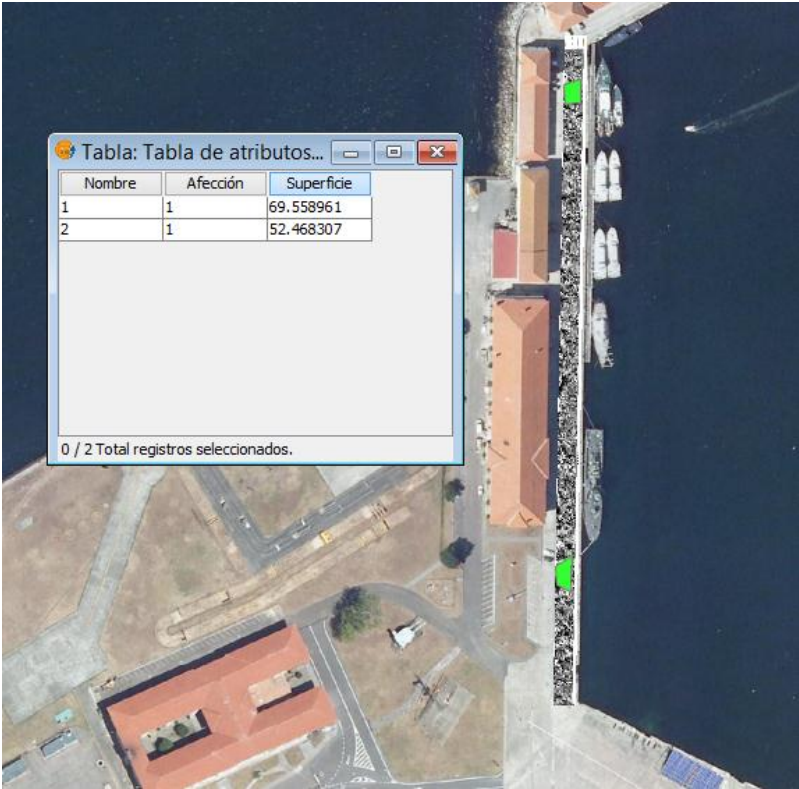


Figura 4-16: Zonas afectadas y sus superficies a 60 cm de profundidad

-Zona 1: Tras analizar los datos obtenidos, podemos observar como la superficie de esta zona aumenta desde los 15 cm (Figura 4-18) hasta los 35 cm (Figura 4-19), mientras que disminuye hasta casi desaparecer a los 60 cm de profundidad (Figura 4-20). En cuanto al grado de afección, se considera de grado 3 (color rojo) hasta llegar a los 35 cm de profundidad, donde posteriormente comienza a suavizarse.

-Zona 2: En esta zona se puede decir que la superficie se mantiene prácticamente constante hasta los 35 cm de profundidad y que al seguir bajando se estrecha hasta desaparecer (No se aprecia en la Figura 4-20). Con respecto a su grado de afección, es la menos afectada de las tres, considerándose de grado 2 (color amarillo) únicamente a 35 cm de profundidad, punto en el que está más dañada.

-Zona 3: Se puede apreciar como la zona 3, al igual que la 1, aumenta su superficie de los 15 cm a los 35 cm de profundidad, mientras que a más profundidad va disminuyendo progresivamente. Su grado de afección es pequeño a 15 y 60 cm de profundidad (grado 1, color verde), pero aumenta a grado 3 a los 35 cm de profundidad, donde se encuentra gravemente dañada.

Por último, se mostrará la Tabla 4-3 en la que se pueden observar numéricamente las superficies (en metros cuadrados) de cada una de las zonas afectadas a las distintas profundidades. Con ellas, también se ha calculado el volumen total de las zonas afectadas en su relleno (en metros cúbicos).

Nombre zona	Superficie a 15 cm	Superficie a 35 cm	Superficie a 60 cm	Volumen
1	233,3	258,7	69,5	90,2
2	198,9	201	0	65,1
3	131,2	69,2	52,4	35,2

Tabla 4-3: Superficies y volúmenes de las distintas zonas

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Para finalizar, en esta sección se incluyen las conclusiones más importantes obtenidas tras la realización del trabajo (5.1 Conclusiones) y posibles líneas futuras que puedan ser interés (5.2 Líneas Futuras).

5.1 Conclusiones

Debido al mal estado del relleno de gran parte de la explanada, se decide llevar a cabo un estudio no destructivo de ésta mediante GPR, para localizar los focos más dañados y obtener información sobre ellos para una posible actuación futura.

En primer lugar, en cuanto al objetivo general que fue propuesto, a pesar del poco tiempo del que se disponía para la realización del trabajo, se ha llevado a cabo un estudio sobre el terreno por medio del georradar. Durante la toma de datos, se localizaron heterogeneidades en el terreno (detectadas por el sistema debido a las diferencias de las propiedades dieléctricas de los distintos materiales, resaltadas en las distintas imágenes obtenidas por las diferencias de amplitud en la señal) y finalmente ha sido posible localizar las zonas de mayor afección bajo la superficie, por lo que se puede decir que el objetivo se ha cumplido.

Posteriormente, el procesado de los datos obtenidos fue quizás el proceso de mayor dificultad. Se utilizó software 2D y 3D para un mayor tratamiento y análisis de los datos. Se ha demostrado como un procesamiento básico, o sencillo, ha permitido la localización de las zonas afectadas. La interpretación de datos 3D fue de gran ayuda, ya que con ésta se pudieron obtener perfiles 2D en las direcciones longitudinal y transversal, mejorando así las correlaciones espaciales entre capas a distinta profundidad.

Tras el análisis, mediante herramientas SIG (software gvSIG), se ha podido dotar de coordenadas terreno (UTM29n) a las distintas imágenes obtenidas mediante el GPR, permitiendo una adaptación de todas éstas al mapa. Esto ha permitido que posteriormente, mediante el empleo del mismo software, se obtuviera una estimación de las superficies y los volúmenes afectados por falta de material. Esta estimación obtenida, habla de que hay un volumen afectado de unos 190 metros cúbicos aproximadamente en toda la zona de estudio.

Como conclusión final, se puede confirmar el mal estado del relleno de la explanada y sería más que recomendable llevar a cabo una restauración para así evitar posibles hundimientos y problemas constructivos en la zona.

5.2 Líneas futuras

Como líneas futuras, se recomienda realizar este mismo estudio en distintas zonas de la escuela como pueden ser el patio de aulas o la zona del barrio industrial, donde a simple vista se pueden observar problemas similares a los encontrados en la zona de estudio. Una vez localizadas todas las zonas dañadas, sería conveniente estudiar la manera de subsanarlas y finalmente realizar la remodelación.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Geofísica Exploraciones - <http://www.geofisicaexploraciones.com/metodos> (Último acceso 24 Febrero 2015)
- [2] Georradar - http://www.xpresacorp.com/geophysics/georradar_esp.php#.VOzR3CyLW1Q (Último acceso 24 Febrero 2015)
- [3] Bertram, C.L., Morey, R.M., Sandler, S.S., Feasibility study for rapid evaluation of airfield pavements. Rep. No. AFWL-TR-71-178, U.S. Air Force Weapons Lab., Dayton, Ohio, 38pp. 1974.
- [4] Lorenzo E y Cuellar V., 1995, Geofísica de alta resolución en Ingeniería Civil. Estudios en estructuras de hormigón utilizando Georadar, Física de la Tierra nº7, 243-257, CEDEX (MOPTMA), Universidad de La Coruña.
- [5] Pérez Gracia, Vega, 2001, Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Departamento de ingeniería de Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad de Cataluña.
- [6] Liu, H., Accurate thickness estimation of a backfill grouting layer behind shield tunnel lining by CMP measurement using GPR, 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, Shanghai, China, 2012, pp. 137-142.
- [7] Karlovšek, J., Investigation of voids and cavities in Bored Tunnels using GPR, 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, Shanghai, China, 2012, pp. 496-501.
- [8] Parkinson, G.; Ekes, C., Ground penetrating radar evaluation of concrete tunnel linings, 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, UK, 2008, 11 pp.
- [9] Saricicek, I.; Seren, A., Imaging of deteriorations and concrete quality of the tunnels (Zigana, Torul) with ground penetrating radar, 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium, 2014, pp. 397-400.
- [10] Alani, A.M.; Banks, K., Applications of Ground Penetrating Radar in the Medway Tunnel – Inspection of Structural Joints, 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium, 2014, pp. 476-483.
- [11] Lei X., Hui-lin Zhou, ZhenShu, Si-hao Tan, Guo-qing Liang, Jian Zhu b “GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study”, NDT&E Int., 2013, vol. 59, pp. 68-76.
- [12] Núñez-Nieto, M. Solla, A. Novo y H. Lorenzo, 2014, Three-dimensional ground-penetrating radar methodologies for the characterization and volumetric reconstruction of underground Tunneling, Construction and Building Materials 71 (2014), 551-560.

- [13] J.Hugenschmidt, M.N. Partl a y H. de Witte, 1997, GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland, *Journal of Applied Geophysics* 40 (1998), 95–104.
- [14] Andreas Loizosa y Christina Plati, 2006, Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches, *NDT&E International* 40 (2007) , 147–157.
- [15] Carlotta Ferrara y Pier Matteo Barone, 2015, Detecting moisture damage in archaeology and cultural heritage sites using the GPR technique: a brief introduction, *International Journal of Archaeology* 2015, 57-61.
- [16] Sonia Santos-Assunção, Vega Perez-Gracia, Oriol Caselles, Jaume Clapes y Victor Salinas, 2014, Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies, *Remote Sensing* 2014, 6, 8220-8237.
- [17] Mercedes Solla, H. Lorenzo, F.I. Rial y A. Novo, 2011, Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools, *Construction and Building Materials* 29 (2012), 458–465
- [18] Nestor Bonomo, Matías de la Vega, Patricia Martinelli y Ana Osella, 2011, Pipe-flange detection with GPR, *J. Geophys. Eng.* 8 (2011), 35–45.
- [19] Paolo Gamba y Simone Lossani, 2000, Neural Detection of Pipe Signatures in Ground Penetrating Radar Images, *IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, VOL. 38, NO. 2, Marzo 2000.
- [20] Sang-Wook Kim, GPR Monitoring System for Evaluation of Asphalt Pavement, R&D Division, Isung Engineering Co. Ltd.
- [21] Dar Hao Chen, 2010, Using Ground-Coupled Radar Techniques to Detect Concealed Subsurface voids, Texas Department of Transportation
- [22] Sandmeier, K.J. ReflexW Manual. Available online: <http://www.sandmeier-geo.de> (accessed on 21 May 2014).
- [23] Jol, H.M. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2009; pp. 3–40.
- [24] Annan, P. *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*; Sensors & Software Inc.: Mississauga, ON, Canada, 2003; p. 286.
- [25] Daniels, D.J. *Ground Penetrating Radar*; Institution of Electrical Engineering: London, UK, 2004.
- [26] Instituto geográfico nacional – Ministerio de Fomento <http://www.ign.es>
[Último acceso 3 Febrero 2015]