



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una herramienta de extracción volumétrica 3D
de dispositivos y artefactos explosivos enterrados
a partir de datos GPR*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alejandro Carrión Velázquez

DIRECTORES: Rafael Asorey Cacheda
Mercedes Solla Carracelas

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una herramienta de extracción volumétrica 3D
de dispositivos y artefactos explosivos enterrados
a partir de datos GPR*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Hoy en día, en los diferentes teatros de operaciones confeccionados a lo largo de los años, ya sea en operaciones bélicas o de mantenimiento de la paz, la principal amenaza que presentan estos mismos son la aparición de los grupos terroristas cuyas tácticas de combate no son las convencionales, sino que su principal característica es la denominada guerra asimétrica.

Una de las maneras más comunes de llevar a cabo la guerra asimétrica es la colocación de artefactos explosivos (UXO, IED o minas) enterrados en el suelo, generalmente en las rutas de las patrullas de nuestras fuerzas armadas que buscan una repercusión que llega más allá de cometer un atentado.

Pero no solo existe el problema en el presente sino que, debido a que estos artefactos pueden mantenerse activos durante varias décadas, ponen en riesgo la seguridad física de la población civil y obstaculizan el normal desarrollo de la vida. Por este motivo, la detección de estos artefactos se considera de especial relevancia en las misiones internacionales en las que están desplegadas nuestras tropas. Además de la detección de los mismos, últimamente se hace especial hincapié en la identificación a tiempo real del mismo, para ello este trabajo ofrece un dimensionamiento de los mismos.

Podemos encontrar diferentes técnicas para la detección de este tipo de artefactos enterrados. En este trabajo en concreto nos centraremos en la utilización del GPR (*Ground Penetrating Radar*) o georradar como método para localizarlas y, en un posterior análisis, conseguir extraer su volumen y dimensionamiento 3D. Para ello, en este trabajo se crea una herramienta de extracción volumétrica 3D en tiempo real, basándose en el programa informático MATLAB, que ayude al dimensionamiento de las mismas y a su correcta identificación. El propósito es proporcionar herramientas de apoyo a su identificación sin necesidad de desenterrar el artefacto ni poner en riesgo la vida de ningún miembro de nuestras Fuerzas Armadas.

PALABRAS CLAVE

Artefactos explosivos, GPR, detección, visualización 3D, reconstrucción volumétrica.

“El Cuerpo de Infantería de Marina es el verbo de la historia militar de España, porque allí donde se ha disparado un tiro, donde se han movido las armas, donde se ha combatido en la mar o en tierra, siempre ha habido un soldado de Infantería de Marina. Un cuerpo que no ha tenido un solo día de descanso cuando la patria ha estado en peligro y que ha combatido, por tierra y por mar, en todas las latitudes, en todos los campos de batalla y en todas las regiones. Esta Infantería de Marina, valiente por tierra y por mar, con su historial de dolor, hambre, fatiga, sufrimiento y sangre, con sus banderas cargadas de gloria, merece que se siga su rastro histórico para ejemplo de las generaciones venideras”.

Excmo. Sr. D. Juan de Madariaga y Suárez
Conde de Torre-Vélez. En las Cortes año 1904

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, José Luis y Paloma, por la educación que me han dado y el ejemplo de constancia y sacrificio que han sido para mí. Sin su apoyo no habría llegado hasta aquí.

A mis tutores del trabajo, Don Rafael Asorey Cacheda y Doña Mercedes Solla Carracelas, por su gran dedicación, ayuda y paciencia durante estos meses.

Contenido

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Justificación	7
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivos generales.....	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
2 Estado del Arte	13
2.1 Historia del georradar.....	13
2.2 Software 3D	16
2.2.1 Ventajas de la representación 3D frente al 2D.	16
2.2.2 Software 3D existente.....	17
3 Fundamentos del método.....	19
3.1 Fundamentos teóricos	19
3.1.1 Propiedades del medio	21
3.1.2 Propagación	22
3.2 Adquisición de datos.....	23
3.2.1 Componentes de un GPR.....	24
3.2.2 Parámetros de adquisición	25
3.2.3 Configuración de los datos GPR.....	27
3.2.4 Adquisición de datos 3D.....	29
3.3 Procesado de datos	29
4 Desarrollo de la aplicación	33
4.1 Descripción de la herramienta 3D y procesamiento de señal.....	33
4.1.1 Procesado 2D	34
4.1.2 Procesado 3D	37
5 Validación de la herramienta.....	41
5.1 Conjunto de datos empleados para la verificación de la aplicación	41
5.1.1 Primer conjunto de datos	41
5.1.2 Segundo conjunto de datos	42
5.2 Resultados y verificación de la aplicación	45
5.2.1 Primer conjunto de minas: antena de 800MHz.....	45

5.2.2 Segundo conjunto de minas: antena de 500 MHz	46
5.2.3 Segundo conjunto de minas: antena de 800 MHz	46
5.2.4 Segundo conjunto de minas: antena de 1 GHz	47
5.2.5 Segundo conjunto de minas: antena de 2,3 GHz	48
6 Conclusiones y líneas futuras	51
6.1 Conclusiones	51
6.2 Líneas futuras	52
7 Bibliografía.....	55
Anexo I: Contenido del primer anexo	59

Índice de Figuras

Figura 1-1 Tropas españolas desplegadas fuera del territorio nacional en 2016 [2].	7
Figura 1-2 Miembro de las Fuerzas Armadas españolas manejando un IED [2].	8
Figura 1-3 Soldados de la 23ª Compañía de Ingenieros del ejército norteamericano detonando un IED en Afganistán [5].	9
Figura 1-4 Vehículo Husky 2G junto a soldados a pie en el proceso de detección de minas en Afganistán [2].	10
Figura 2-1 P-38 encontrado bajo el hielo gracias al GPR y se radargrama correspondiente [16].	14
Figura 2-2 Vehículo Husky 2G Con 4 paneles radar [2].	15
Figura 2-3 Generación de un cubo 3D a partir de radargramas 2D.	16
Figura 2-4 A la izquierda imagen 2D (radargrama) de un conjunto de minas. A la derecha imagen 3D del mismo grupo de minas.	16
Figura 2-5 Imagen extraída del GPR-Slice [24].	17
Figura 3-1 Espectro de ondas electromagnéticas [27].	19
Figura 3-2 Banda de frecuencias y longitudes de onda [27].	20
Figura 3-3 Ecuaciones de Maxwell.	20
Figura 3-4 Ecuaciones de Maxwell en el vacío.	21
Figura 3-5 Esquema de un GPR [28].	24
Figura 3-6 Matriz de datos GPR en bruto donde se aprecian las diferentes intensidades de reflexión.	28
Figura 3-7 Esquema de procesamiento de la señal en la unidad de control [28].	28
Figura 3-8 Disposición en paralelo de los radargramas para su dimensionamiento 3D.	29
Figura 3-9 A la izquierda radargrama sin aplicar el filtro de establecimiento del tiempo cero, a la derecha una vez aplicado el filtro.	30
Figura 3-10 Ejemplo de la utilización de filtro vertical: A) sin filtro y B) con filtro.	30
Figura 3-11 Ejemplo de la utilización del filtro horizontal: A) sin filtro y B) con filtro.	31
Figura 3-12 Esquema de filtro paso-banda [34].	31
Figura 3-13 Ejemplo de aplicación del filtro paso-banda: A) sin filtro y B) con filtro.	32
Figura 3-14 Ejemplo de empleo del filtro ganancia: A) sin ganancia y B) con ganancia.	32
Figura 4-1 Diagrama de flujo de la herramienta.	33
Figura 4-2 Datos GPR utilizados.	34
Figura 4-3 Radargrama en bruto con diferentes frecuencias en gama de grises.	35
Figura 4-4 A la izquierda coordenadas del suelo del radargrama. A la derecha radargrama filtrado.	36
Figura 4-5 Partiendo de la Figura 4-4, proceso de filtro de la función "Filtro2".	36
Figura 4-6 Proceso de filtrado 2D a partir de datos GPR en bruto hasta la eliminación completa del ruido.	37

Figura 4-7 Diagrama del procesado 3D de la señal.....	37
Figura 4-8 Proceso de la introducción de los perfiles en el cubo 3D.	38
Figura 4-9 Representación 3D de tres minas donde se aprecia el volumen que ocupan cada una de ellas.	39
Figura 5-1 Parámetros de adquisición de nuestra señal GPR.....	42
Figura 5-2 Izquierda: Proceso de enterramiento de la mina. Derecha: dimensiones de la mina.....	42
Figura 5-3 Zona experimental del campo de minas en la ENM.....	43
Figura 5-4 Arriba: escenario simulado y zona de estudio de la ENM de Marín. Abajo descripción de minas y disposición de las mismas.....	43
Figura 5-5 Segundo conjunto de datos GPR con antenas de 2,3 GHz y 1 GHz.....	44
Figura 5-6 Segundo conjunto de datos GPR con antenas de 800 MHz y 500 MHz.	44
Figura 5-7 Representación 3D primer conjunto de minas con antena de 800 MHz.	45
Figura 5-8 Imagen 2D con datos GPR de la antena de 500 MHz donde se observa un falso positivo.....	46
Figura 5-9 Representación 3D segundo conjunto de minas con antena de 800 MHz.....	47
Figura 5-10 Representación 3D del segundo conjunto de minas con una antena de 1 GHz.....	48
Figura 5-11 Imagen 2D del conjunto de minas de 1 GHz.....	48
Figura 5-12 Radargrama con datos de antena de 2,3 GHz donde se puede observar que apenas hay reflexión.	49

Índice de Tablas

Tabla 3-1 Clasificación de los materiales según su conductividad.	21
--	----

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación

En el contexto internacional de los últimos años, el principal factor cuya importancia se ha visto incrementada de manera exponencial, en consecuencia de los acontecimientos acaecidos y los diversos cambios sociales y económicos, es la seguridad.

En el marco de misiones internacionales en las que se encuentran desplegadas nuestras Fuerzas Armadas (FAS) (Figura 1-1), uno de los desafíos más importantes es la aparición de grupos terroristas que utilizan tácticas de guerra no convencionales (guerra asimétrica) contra nuestras FAS, en concreto el empleo de artefactos explosivos con fines como la destrucción de convoyes, atentados contra autoridades o simplemente con la idea de difundir el miedo [1]. Dentro de las amenazas derivadas de los explosivos como financiación, transporte del material, colocación o detonación del mismo, nos centraremos en un aspecto importante para contrarrestar la efectividad de los mismos, la detección. De este modo, podemos definir las funciones de la seguridad como: disuadir, retardar, detectar, verificar y reaccionar.



Figura 1-1 Tropas españolas desplegadas fuera del territorio nacional en 2016 [2].

La detección y el desminado es el proceso de detectar y eliminar tanto minas terrestres como minas marinas de cualquier zona (Figura 1-2), encontrando dos tipos dominantes: militar y humanitario. La detección de minas es una preocupación constante que dura en el tiempo, debido al peligro que representan para la población civil. Este es un problema real que afecta a millones de seres humanos en todo el mundo. Debido a la larga vida útil de estos artefactos, las víctimas de las minas terrestres a menudo no tienen ninguna relación con la motivación original para el que fueron resueltas. Hoy en día, todavía existen millones de minas anti-personas en los diferentes países de todo el mundo. Estas minas matan más de 20.000 personas por año [3]. Dentro de un teatro de operaciones en una zona de combate activo se utiliza el concepto de desminado con la prioridad de la rapidez y detección en favor de cualidades como la exactitud o la extracción de las mismas. La rapidez reviste una importancia clave para los soldados que libran una batalla, puesto que en el ámbito militar siempre debe haber un equilibrio entre seguridad y velocidad. En referencia al desminado en zona de operaciones es complicado, puesto que se entiende que la limpieza de un campo de minas es un trabajo laborioso y peligroso a la par que lento; por lo que la lentitud y el peligro de las operaciones de limpieza está determinada en gran parte por la dificultad de localizar artefactos explosivos enterrados [4]. Por consiguiente, durante las operaciones de desminado militar, es probable que solo se abra una brecha en el campo minado y que no se destruyan todas las minas que se hallen en el camino de las FAS en favor de aumentar la velocidad con la que se sobrepasa el obstáculo y se puede continuar con la misión. Por el contrario, en misiones de paz en países como Líbano (2ª fase de la Operación), Haití, etc., el enfoque cambia normalmente a un desminado humanitario donde tiene más prioridad la detección y extracción del total de las minas que han quedado "olvidadas" después de los respectivos conflictos bélicos. El desminado abarca una serie de actividades para la limpieza y remoción de minas sin estallar que incluyen una serie de estudios técnicos, levantamientos cartográficos, señalización, así como documentación posterior al desminado. Se ha desarrollado una amplia gama de métodos para la detección de las mismas, lo que ha provocado un aumento de la importancia y convicción en esta labor de detección. Las Naciones Unidas y las ONG (organización no gubernamental) internacionales y locales. Las fuerzas militares, como es evidente, tienen una especial relevancia en este contexto, pues disponen de un material generalmente más avanzado de lo normal, están entrenados para la actuación en territorios hostiles donde para un civil sería impensable llegar y poner a prueba todos sus equipos en situaciones reales.



Figura 1-2 Miembro de las Fuerzas Armadas españolas manejando un IED [2].

La contribución española al desminado en las misiones de mantenimiento de la paz es elevada. Desde el año 1989, nuestras Fuerzas Armadas han participado en más de 52 operaciones, lo que supuso cerca de 80.000 efectivos de los tres ejércitos. Para el cumplimiento de la misión en cada una de estas operaciones, a menudo se ha de hacer frente a riesgos tales como: utilización por parte del enemigo de tácticas no convencionales, tácticas asimétricas, en especial aquellas que incluyen los IED (Improvised Explosive Device) como principal medio de ataque (Figura 1-3). Estos artefactos han evolucionado debido a la fácil y alta disponibilidad de nuevas tecnologías aplicables a ellos junto con las tácticas rudimentarias. Está previsto que, en los años venideros, los insurgentes en zonas como Afganistán seguirán desarrollando los denominados IED y aumentando su uso. A medida que la sofisticación de la tecnología vaya en aumento también lo hará la sofisticación de los IED, lo que indica que la detección de los mismos también va a tener que seguir un camino de evolución si quiere ponerse al mismo nivel de evolución de los mismos.



Figura 1-3 Soldados de la 23ª Compañía de Ingenieros del ejército norteamericano detonando un IED en Afganistán [5].

Con el objeto de poder protegernos contra amenazas como el uso de explosivos con fines terroristas, será necesario invertir en conocimiento y tecnología. En el ámbito civil, existen diversos documentos que establecen las medidas en el área de seguridad y defensa (Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e innovación [1], [6] o VII Programa-Marco de la Unión Europea [1]). En el ámbito militar, son muchos los foros donde la necesidad de seguridad y defensa se manifiesta con importancia. El hecho de desarrollar la tecnología, favoreciendo el impulso del plan de Investigación, Desarrollo e innovación (I+D+i), se impone como una herramienta imprescindible en el ámbito de la seguridad [1]. Por el contrario, debemos tener presente que la seguridad no solo depende de la tecnología que podamos llegar a desarrollar. La seguridad, tanto del personal como de los bienes, se basa en la seguridad con medios físicos o materiales y medios humanos. El principal dilema de la seguridad radica en encontrar el punto exacto de utilización entre los medios humanos y los físicos o materiales, intentando lograr la mejor relación coste/eficacia.

Por lo tanto, la detección implica el poder sacar ventaja a los diferentes grupos terroristas, ya actúen dentro de nuestras fronteras o fuera de las mismas, además implica el saber el sitio exacto, la naturaleza del explosivo y la cantidad de carga que pueda llegar a tener y así llegar a proteger mejor a nuestras tropas. Asimismo, cuanto más temprana sea la detección del mismo, más ventajas tendremos a nuestro favor. Comúnmente se utiliza el denominado detector de metales (MD) [7] para la detección de IED, basado en el fenómeno de interferencia electromagnética (EMI) [8]. Funciona midiendo las perturbaciones existentes en un campo electromagnético que son emitidas por la presencia de objetos metálicos en el subsuelo. Uno de los mayores problemas al que nos enfrentamos es que el hecho de evolucionar las técnicas y tácticas por parte de los grupos terroristas hace que fabriquen estos

explosivos improvisados con materiales que sean menos sensibles a la detección, como por ejemplo cerámicas o plásticos. Por esto mismo, se define la importancia del uso del georradar o GPR (Ground Penetrating Radar) como medio para la máxima detección posible de este tipo de artefactos. Se trata de un método adecuado y científicamente aceptado que, en contraste con otros métodos como excavaciones o métodos tradicionales [8], permite una evaluación y detección no invasiva y más segura para el personal encargado del desminado.

En los últimos años, la tecnología GPR-3D ha avanzado en este sentido y ya existen vehículos específicos de detección de minas. En concreto, las tropas españolas cuentan con el vehículo Husky 2G (Figura 1-4) como medio de detección en operaciones de ayuda humanitaria. El hecho de poder utilizar esta tecnología para una representación 3D en tiempo real permite al combatiente hacerse una idea del campo de batalla sin tener que "preocuparse" por minas o IED, lo que ayudaría a "abrirse" camino a través de un campo de minas sin necesidad de bajarse del vehículo. Si no se dispone de un buen método de detección de minas puede llegar a causar bajas entre las tropas desplegadas en misiones internacionales, como acaeció tristemente en 2007 cuando un IED hizo explosión al paso de un convoy español en el Líbano ocasionando la muerte de varios soldados españoles; en parte por no disponer de un adecuado sistema de detección de minas y en parte debido al deficiente material del que disponían.



Figura 1-4 Vehículo Husky 2G junto a soldados a pie en el proceso de detección de minas en Afganistán [2].

Por todos estos hechos que se han expuesto, cabe destacar que la detección automática de artefactos explosivos, así como determinar su dimensionamiento u ocupación espacial en el terreno, es una realidad necesaria para nuestras tropas desplegadas en misiones internacionales dada la necesidad de evitar bajas propias como civiles. En este sentido, el objetivo principal de este trabajo será la detección automática de artefactos explosivos a partir de datos GPR- 3D y así poder obtener una visión en tiempo real del tipo de explosivo a detectar y su tamaño. De este modo, se ofrece una visualización completa del terreno prospectado que permitirá una mejor aproximación al tipo de artefactos existentes en el subsuelo. Asimismo, haciendo uso del programa informático MATLAB, se creará una herramienta para la extracción volumétrica de los mismos, lo que permitirá su posterior dimensionamiento en tres dimensiones en un contexto más amplio.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivos generales*

- Comprobar la viabilidad de la utilización de datos GPR para la correcta identificación y dimensionamiento 3D de artefactos explosivos enterrados.
- Desarrollo de una herramienta de detección y extracción volumétrica a partir de umbrales de amplitud (intensidad de reflexión) mediante el programa informático MATLAB.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Reconstrucción volumétrica e identificación de diferentes tipos de minas a partir de datos GPR basándose en los diferentes tipos de antenas y frecuencias utilizadas.
- Utilización del programa informático ReflexW como método para la elección de los umbrales de amplitud.
- Desarrollo del código para el proceso de filtrado 2D en MATLAB.
- Procesado 2D y binarización de la matriz de datos en base a los datos de amplitud y umbrales determinados.
- Programación del código 3D a partir de los datos 2D obtenidos con la herramienta.
- Análisis de detección y representación 3D de una misma mina en función de su disposición. Se tendrán en cuenta diferentes posiciones (vertical, oblicua y horizontal) de las mismas, así como las diferentes frecuencias empleadas durante la adquisición de datos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Historia del georradar

Se trata de un método de prospección geofísica que se fundamenta en la capacidad de las ondas radar de baja frecuencia UHF-VHF (entre 10 MHz y 2.5GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos.

Se puede considerar como una técnica de teledetección cercana y prospección del subsuelo relativamente reciente, a pesar de que a finales del siglo XIX fue cuando se desarrolló y comenzó a surgir la teoría y sus principios de funcionamiento. No fue una técnica popular y no sufrió un gran desarrollo en parte debido a la falta de medios tecnológicos disponibles. Habría que esperar a 1935 para que Robert Wattson-Watt, el que fuera considerado por muchos el padre del radar, demostrara el funcionamiento del radar en tierra que, combinado junto con el desarrollo del radar aerotransportado, se convertiría en la Segunda Guerra Mundial en un sistema muy eficaz de seguimiento a bombarderos. Posteriormente, la técnica fue en decadencia hasta que en los años 70 empieza a ganar cierta popularidad en diversas investigaciones como prospecciones con radar a bordo de helicópteros militares rusos para el estudio de suelos glaciares. También durante la Guerra del Vietnam se utilizó para encontrar minas no metálicas y un sinnúmero de túneles excavados por los vietnamitas. Asimismo, en el ámbito militar, el GPR demostró su utilidad en la localización de líneas enterradas, artillería no explosionada o diversos materiales. A partir de los años 70 da el salto a numerosos ámbitos de aplicación como estudios medioambientales, geológicos y geotécnicos, así como en el campo de la ingeniería civil, arqueología y cartografía. En cuanto a la aplicación del GPR-3D, las primeras contribuciones relacionadas con la imagen 3D surgen en la década de los 90, [9] y [10]. De hecho, la tecnología 3D continúa floreciendo durante las últimas décadas, y la técnica ha demostrado su potencial para producir imágenes más realistas del espacio subterráneo, lo que permite no sólo mejor la detección, sino que también permite la reconstrucción volumétrica de los objetivos enterrados [11] y [12]. Este hecho ha supuesto grandes avances en el ámbito militar, en cuanto al desarrollo de vehículos de adquisición GPR-3D y detección automática [13]. Las principales aplicaciones del GPR en el ámbito militar son:

- Detección de minas y artefactos explosivos improvisados [14].
- Detección de espacios subterráneos (bunkers, túneles, etc.) o zulos de munición [8].
- Inspección de pistas de aterrizaje [15].

La primera aplicación militar del GPR, y por la cual se produjo un auge en su interés, fue su utilización como medio para encontrar un avión P-38 del ejército de los Estados Unidos (Lost-Squadron) cuando se estrelló en un glaciar en Groenlandia el 15 de Julio de 1942 (Figura 2-1).

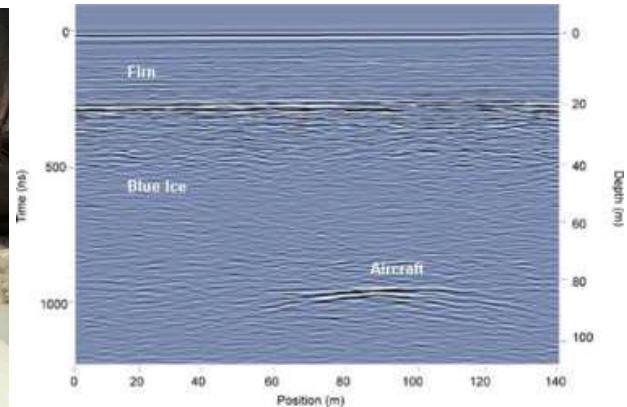


Figura 2-1 P-38 encontrado bajo el hielo gracias al GPR y se radargrama correspondiente [16].

Existen diferentes organizaciones militares, universidades y empresas de desarrollo industrial o tecnológico que han desarrollado programas específicos en este ámbito. Hoy en día, el uso del georadar está muy extendido y el desarrollo de herramientas de visualización 3D de minas y artefactos explosivos en “tiempo real” eleva a un nivel más el método en cuanto a la detección de minas y las labores de desminado. De este modo, en la actualidad disponemos de la más avanzada tecnología en detección y dimensionamiento de imágenes 3D. Los sistemas desarrollados en vehículos utilizan arrays de antenas y generan datos 3D, que luego pasan por un procesamiento posterior para proporcionar imágenes 3D (o cortes horizontales) del subsuelo a distintas profundidades [14] y [17]. Las opciones de señal y procesamiento de imágenes para la detección de minas terrestres basadas en vehículo son más extensos, debido a que el radar 3D (arrays de antenas) en plataforma móvil genera gran cantidad de datos y cubren el terreno con mayor facilidad y resolución. La mayoría de los sistemas radar diseñados para la detección de minas utilizan un diseño integral de arrays de antenas GPR y favorecen el aumento de la capacidad ofrecida por la combinación de múltiples señales radar.

Como ejemplos de programas desarrollados podemos encontrar el vehículo del que dispone el ejército de tierra Husky 2G, con el GPR para representación 3D en tiempo real NIITEK visor 2500 (Figura 2-2), consistente en un radar de barrido del subsuelo que detecta las variaciones en la densidad del terreno advirtiéndole la presencia de un objeto enterrado. Así, el operador tiene una visión 3D del subsuelo escaneado. El radar está formado por cuatro paneles dispuestos en paralelo en la parte frontal de vehículo.



Figura 2-2 Vehículo Husky 2G Con 4 paneles radar [2].

Por otro lado, también cabe citar algunos inconvenientes o limitaciones del GPR a tener en cuenta para cualquier estudio en la detección, tanto de artefactos explosivos como cualquier otro elemento que se encuentre en el subsuelo. En particular, la resolución necesaria para detectar pequeños objetos implica frecuencias de GHz, lo que disminuye la penetración y aumenta el ruido imagen. Una dificultad importante para el funcionamiento de los sistemas GPR es la presencia de ruido dentro o en la superficie del material, o los originados en la propia antena [15], [18], [19]. El ruido se define como la fuente de reflexiones no deseadas que se producen dentro de la ventana efectiva del ancho de banda, y que se presentan como reflectores espacialmente coherentes. Su presencia puede oscurecer por completo la mina enterrada. 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, inutilizando la aplicación del método. Además, el método presenta cierta dependencia de las condiciones superficiales (por ejemplo presencia de piedras o raíces), que pueden llegar a enmascarar los registros provocando interpretaciones erróneas.

Por todo lo anteriormente expuesto, se puede afirmar que el georradar se ha consolidado y se encuentra en su etapa de madurez y esplendor, tanto en el ámbito académico-científico como en el militar [15], [20], [21], [22]. Se presenta, por tanto, como un método eficaz para la detección y limpieza de minas al ser un método no invasivo, así como por la rapidez y seguridad que presenta a la hora de la adquisición de datos, haciendo posible la realización de imágenes del subsuelo de alta resolución. Además, en comparación con los detectores de metales, la técnica GPR tiene la capacidad de detectar tanto objetos metálicos como plásticos, gracias a la diferencia de contraste electromagnético entre el objeto y el medio circundante.

En el presente trabajo se llevará a cabo el desarrollo de una herramienta 3D automática que permita un procesamiento básico para eliminar ruido, así como detectar aquellos patrones de reflexión derivados de la presencia de minas enterradas. Todo esto se llevará a cabo con el programa informático MATLAB. Más concretamente, el trabajo se basará en programar una biblioteca que permita introducir los distintos parámetros necesarios de los datos GPR, ventana de tiempos, trazas, samples y, una vez que la matriz de datos se filtre automáticamente con los distintos rangos de amplitudes, extraer el volumen de los dispositivos presentes en el subsuelo. De esta manera se ofrece una imagen 3D definitiva del espacio subsuelo, facilitando la detección de los mismos, en tiempo real, por parte de los miembros de nuestras fuerzas armadas.

2.2 Software 3D

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 (Figura 2-3).

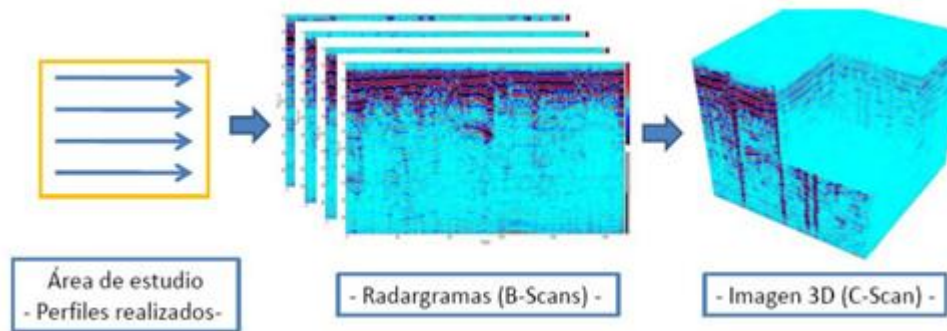


Figura 2-3 Generación de un cubo 3D a partir de radargramas 2D.

2.2.1 Ventajas de la representación 3D frente al 2D.

A medida que la interpretación de las imágenes GPR-2D (radargramas) nos es común, el uso de técnicas de procesamiento y visualización 3D en la detección de minas terrestres ha ido aumentando ampliamente [23].

El uso de la visualización 3D produce imágenes más realistas del espacio subsuelo, y mejora de la ubicación, permitiendo la reconstrucción volumétrica de los objetivos enterrados. 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 o reflectores detectados en relación a la profundidad. Además, se puede apreciar (Figura 2-4) que la representación 3D consigue una imagen más clara del subsuelo mejorando también el posicionamiento tanto vertical como horizontal de los objetos enterrados.

El 3D representa el futuro no solo de los gráficos, sino también del avance tecnológico mundial en el ámbito militar en este tipo de tecnología. Disponer de una herramienta 3D que nos facilite la detección de artefactos explosivos en tiempo real es una ventaja enorme para nuestras tropas. Por tanto, se hace imprescindible disponer de herramientas que nos prospecten y dimensionen todo el campo de batalla de cualquier operación en busca de amenazas, lo que cambiará la forma de ver la "guerra".

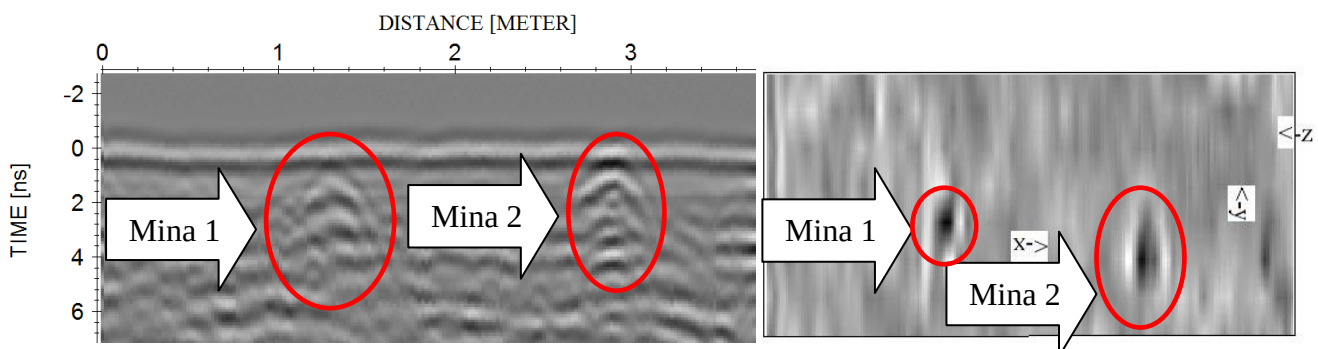


Figura 2-4 A la izquierda imagen 2D (radargrama) de un conjunto de minas. A la derecha imagen 3D del mismo grupo de minas.

2.2.2 Software 3D existente

En este apartado se incluye una revisión del software 3D existente con una breve explicación de su funcionamiento.

2.2.2.1 GPR-Slice

GPR-Slice [24] es el software líder de procesamiento de datos georradar para la generación de imágenes 3D y volúmenes. Compatible con los principales fabricantes de equipos georradar: IDS, MALA, GSSI, S&S, 3D Radar, US Radar, UTSI Electronics y otros formatos como SEG Y, SEG 2 y sistemas radar no convencionales.

Este destacado producto del Geophysical Archaeometry Laboratory se ha convertido en el software preferido por los usuarios de GPR. Actualmente es utilizado por organismos públicos, empresas privadas y universidades a lo largo de todo el mundo. Su uso comprende múltiples aplicaciones en geotecnia, ingeniería, arqueología, etc. El problema de este software es que no está específicamente diseñado para la detección de minas debido a que, al tratar de detectar objetos pequeños como por ejemplo una mina anti-persona, no es capaz de dar soluciones adecuadas. Este software está hecho para la detección de grandes objetos en el subsuelo.

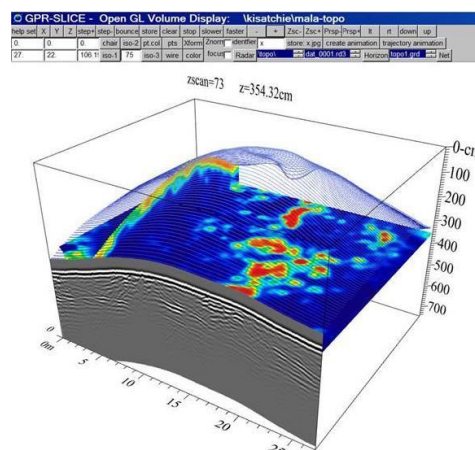


Figura 2-5 Imagen extraída del GPR-Slice [24].

2.2.2.2 Easy3D

Easy 3D [25] es un programa dedicado a crear objetos en tres dimensiones. Sin la necesidad de tener conocimientos en programación se puede llegar a diseñar en 3D. Está hecho para poder añadir objetos (cilindros, cubos, etc.) y aplicar texturas a los mismos, proporcionando imágenes personalizadas a partir de la interpretación de datos. También permite definir la rotación y movimiento de los objetos.

2.2.2.3 MATGPR

MATGPR [26] es un sistema de software realizado en base al programa informático MATLAB. La ventaja que tiene es que no se necesita experiencia para poder utilizarlo, pues presenta una interfaz buena para el usuario. MATGPR proporciona una amplia gama de herramientas de análisis de datos GPR-offset. Sin embargo, aún está en proceso de desarrollo y cabe destacar que todavía no tiene representación 3D. Se ha incluido en la revisión por ser un programa basado en MATLAB y que puede aportar información adicional en el contexto del presente trabajo.

Aunque estas herramientas hayan demostrado su idoneidad para el procesado e interpretación de datos GPR, hay que remarcar que existen pocos software hoy en día, en el ámbito militar, capaces de poder procesar datos GPR y conseguir, en tiempo real, una imagen 3D del campo de batalla y ocupación de sus amenazas. La mayoría de software que nos encontramos es de análisis y procesado 2D. Sin embargo, en el ámbito militar ya se están utilizando vehículos de adquisición de datos 3D, lo que apunta a que los avances de la tecnología deben estar encaminados hacia el desarrollo de herramientas automáticas de detección de artefactos explosivos. Ante la carencia de este tipo de software, al menos en términos de software libre, este trabajo propone la creación de una herramienta/método que permita, por una parte, la detección automática de dichos artefactos y, en segundo lugar, la extracción del volumen de los mismos a partir del cual se podría hacer una caracterización del tipo de mina existente en el subsuelo y apoyo a su desactivación.

3 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

3.1 Fundamentos teóricos

Las ondas electromagnéticas vienen caracterizadas tanto por su frecuencia como por su longitud de onda. Las diferentes señales existentes se clasifican según su frecuencia en el denominado espectro electromagnético (Figura 3-1).

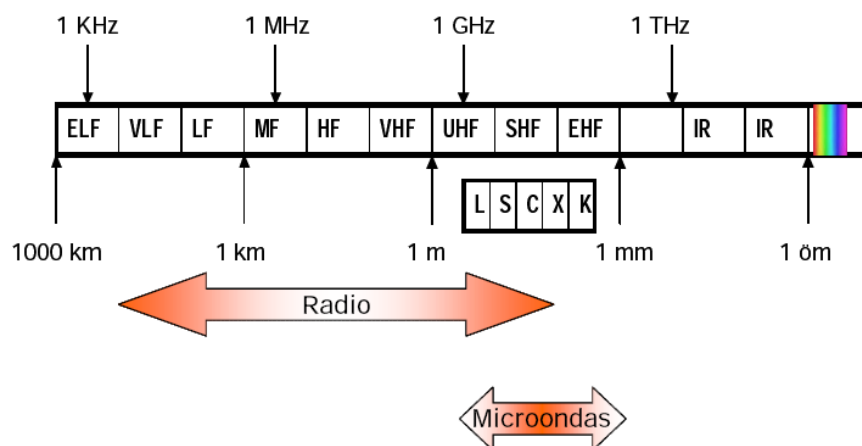


Figura 3-1 Espectro de ondas electromagnéticas [27].

El georradar utiliza las bandas de frecuencias Very High Frequency (VHF) y Ultra High Frequency (UHF) (Figura 3-2).

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias	Longitud de onda
			< 3 Hz	> 100.000 km
Extra baja frecuencia Extremely low frequency	ELF	1	3-30 Hz	100.000–10.000 km
Super baja frecuencia Super low frequency	SLF	2	30-300 Hz	10.000–1.000 km
Ultra baja frecuencia Ultra low frequency	ULF	3	300–3.000 Hz	1.000–100 km
Muy baja frecuencia Very low frequency	VLF	4	3–30 kHz	100–10 km
Baja frecuencia Low frequency	LF	5	30–300 kHz	10–1 km
Media frecuencia Medium frequency	MF	6	300–3.000 kHz	1 km – 100 m
Alta frecuencia High frequency	HF	7	3–30 MHz	100–10 m
Muy alta frecuencia Very high frequency	VHF	8	30–300 MHz	10–1 m
Ultra alta frecuencia Ultra high frequency	UHF	9	300–3.000 MHz	1 m – 100 mm
Super alta frecuencia Super high frequency	SHF	10	3-30 GHz	100–10 mm
Extra alta frecuencia Extremely high frequency	EHF	11	30-300 GHz	10–1 mm
			> 300 GHz	< 1 mm

Figura 3-2 Banda de frecuencias y longitudes de onda [27].

Un campo electromagnético se describe por cuatro vectores de campo, que son las denominadas Ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\
 \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\
 \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}
 \end{aligned}$$

Figura 3-3 Ecuaciones de Maxwell.

Donde E es la intensidad que produce el campo eléctrico, medido en V/m y B sería la densidad del flujo magnético que expresamos en Wb/m². Luego tenemos la H, intensidad del campo magnético (A/m). La J es la densidad de la corriente medida en A/ m², D sería el vector de desplazamiento eléctrico (C/ m²) y por último la densidad de carga libre, ρ , medida en C/m³.

Estas ecuaciones relacionan la variación con respecto al tiempo de las magnitudes de campo en un punto cualquiera del espacio. Para medios homogéneos e isotrópos, las ecuaciones se tienen que complementar utilizando las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 \vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E} \\
 \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} \\
 \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H}
 \end{aligned}$$

Donde las dos últimas ecuaciones corresponden a las ecuaciones que constituyen el medio dieléctrico y magnético, respectivamente; mientras que la primera se conoce como la ley de Ohm puntual, σ es la conductividad eléctrica, ε será la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética será μ . Combinando ambos grupos de ecuaciones, y suponiendo que en el medio no hay cargas, obtenemos como resultado las siguientes ecuaciones:

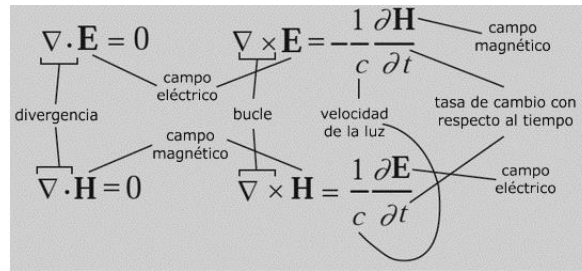


Figura 3-4 Ecuaciones de Maxwell en el vacío.

3.1.1 Propiedades del medio

Las diferentes propiedades que tiene el suelo definen la velocidad de propagación de las ondas georradar y por lo tanto sus amplitudes. Son más importantes las propiedades eléctricas que las magnéticas debido a que, en las frecuencias en las que normalmente trabajan los georradars, las propiedades eléctricas están mayoritariamente controladas por la densidad del medio, sus propiedades químicas, así como por la distribución y contenido en agua.

3.1.1.1 Conductividad eléctrica (σ)

La conductividad eléctrica es la capacidad que presenta un material para conducir una corriente eléctrica. Establece que la diferencia de potencial que aparece entre los extremos de un conductor determinado es proporcional a la intensidad de la corriente que circula por el citado conductor.

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

En resumen, es una proporción entre la densidad de corriente de dicho material y la intensidad que presenta el campo eléctrico externo. Así podemos clasificar los diferentes materiales en función de su conductividad:

Material	σ
Conductor	$>10^5$ S/m
Semiconductor	10^5 S/m $< \sigma < 10^{-8}$ S/m
Aislante	$>10^{-8}$ S/m

Tabla 3-1 Clasificación de los materiales según su conductividad.

3.1.1.2 Permitividad dieléctrica (ϵ)

También es conocido como constante dieléctrica, debido a que en un medio con las mismas características es constante. Es la proporcional entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico.

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

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

Donde;

ε es la permitividad dieléctrica absoluta y sus unidades son F/m.

ε_r es una constante adimensional que expresa la capacidad que tiene un material de polarización con la presencia de un campo eléctrico. En el vacío tiene valor 1.

ε_0 es la permitividad dieléctrica en el vacío y tiene un valor de $10^{-9}/(36\pi)$ F/m.

3.1.1.3 Permeabilidad magnética (μ)

Capacidad que tiene una sustancia para atraer y hacer pasar a través de la misma los campos magnéticos, por lo que podemos encontrar una relación entre la intensidad del campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en dicho material:

$$\mu = B/H$$

La permeabilidad en el vacío se representa como μ_0 y tiene un valor de $\frac{4\pi}{10^{-7}}$ H/m. Para poder comparar varios materiales tenemos la permeabilidad magnética absoluta, que será el producto entre la permeabilidad magnética relativa (μ_r) y la del vacío (μ_0).

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

3.1.2 Propagación

Entendemos la velocidad de propagación (v) de una onda como un factor principal en el georradar ya que, si esta es conocida y tenemos la capacidad de medir el tiempo que tarda dicha onda desde el momento de su emisión hasta que regresa, podremos calcular la profundidad del reflector (objeto).

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right)}}$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \text{ y } \varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$$

Siendo ω la frecuencia angular central del pulso emitido y sabiendo que en el vacío se cumple que $\sigma = 0$, $\mu_r = 1$ y $\varepsilon_r = 0$ y si sustituimos en la ecuación anterior, puede aproximarse la velocidad en el vacío a través de esta expresión:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Donde c es la velocidad de propagación de las ondas en el vacío (0.3 m/ns).

Cuando el pulso emitido detecta una discontinuidad electromagnética en el terreno, ya sea por un cambio de propiedades dieléctricas en el medio o una capa de material diferente, parte de la energía

reflejada vuelve mientras que el resto sigue a través del medio. La energía que se refleja en la interfaz de ambos medios depende del contraste de sus constantes dieléctricas (ϵ) que viene reflejado por el coeficiente de reflexión (r):

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

Donde, ϵ_1 es la constante dieléctrica del medio superior, mientras que ϵ_2 es la constante dieléctrica del medio inferior.

Por lo tanto, para llegar a garantizar el buen funcionamiento de la técnica en un determinado entorno, será necesario que se den dos factores externos e independientes del sistema y del equipo humano que lo maneje de forma simultánea; que exista suficiente contraste electromagnético entre ambos medios y que el medio de propagación sea suficientemente restrictivo para no atenuar drásticamente la señal emitida.

3.2 Adquisición de datos

Para la adquisición de datos, el método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de 1-20 ns de duración hacia el interior del terreno. Este frente de ondas es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en la superficie mediante una antena receptora dispuesta a tal efecto. Al ir desplazando el sistema sobre la superficie del terreno será posible registrar la historia de reflexiones detectadas en el subsuelo bajo la línea de desplazamiento del equipo. De esta forma se obtienen los llamados radargramas, similares a los registros clásicos de sísmica de reflexión, pero con la gran diferencia de que, en el caso del radar, la propagación de las ondas está condicionada por las características electromagnéticas del medio de propagación.

La adquisición de datos con el georradar suele realizarse orientando la antena hacia el subsuelo y registrando las reflexiones detectadas tras la emisión del impulso electromagnético, obteniendo así una traza. Al desplazar la antena sobre la superficie del terreno se irán detectando y almacenando el conjunto de reflexiones existentes bajo la línea de desplazamiento de la antena. De esta forma, el eje de abscisas de los radargramas, o registros georradar, representará el movimiento de la antena en una determinada dirección, mientras que el eje de ordenadas muestra el tiempo de retardo (twt) entre la emisión del pulso y la detección de las reflexiones en la superficie por parte de una antena receptora, siendo éste, por lo tanto, un viaje de ida y vuelta.

Si la velocidad (v) de propagación de las ondas en el medio es conocida, el eje temporal de ordenadas puede ser transformado a profundidades (z) a través de la simple relación:

$$z = v \cdot \frac{twt}{2}$$

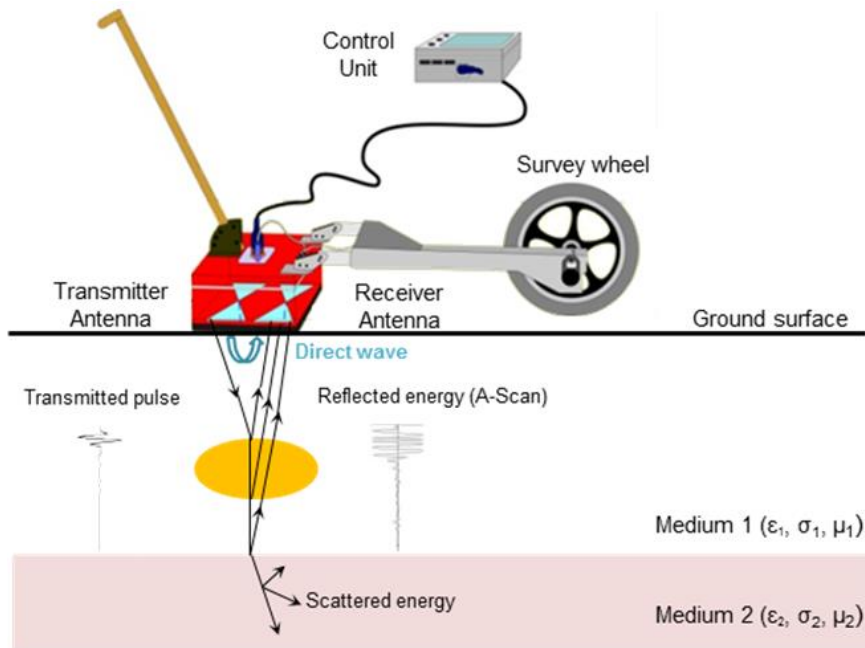


Figura 3-5 Esquema de un GPR [28] .

3.2.1 Componentes de un GPR

Un sistema georradar está constituido, principalmente, por una unidad de control a la que se conecta una antena y un ordenador. Luego estará constituido por elementos auxiliares.

3.2.1.1 Unidad de control

La función principal de la unidad de control es coordinar y controlar los sistemas electrónicos tanto de la antena como de los demás accesorios del mismo. La unidad de control es el corazón del sistema, desde el cual se configura la adquisición de datos, se gestionan las antenas y se da salida a los datos adquiridos. Por regla general, la unidad se configura mediante un software instalado en un ordenador portátil; este además sirve para almacenar información y para visualizarla en tiempo real.

3.2.1.2 Antenas

Las antenas de un sistema son intercambiables y deben seleccionarse en función de la profundidad deseada para la prospección y la resolución que se requiera. Así, para conseguir una alta penetración (10-30m) utilizaremos antenas de baja frecuencia (50 a 200 MHz); mientras que para estudios dedicados a profundidades de alrededor de 3-5 metros utilizaremos antenas mayor frecuencia de entre 400 y 600 MHz, que tienen buena relación profundidad/ resolución. En el presente trabajo se utilizaron unas antenas de 500 MHz, 800, MHz, 1GHz y 2.3GHz, que no penetrará más allá de 2 metro, pero que es capaz de detectar objetos con dimensiones de centímetros, adecuada para la finalidad de nuestro estudio. Las antenas que utilizan estos equipos suelen operar en modo biestático (una antena emite y otra recibe) y suelen estar situadas dentro de una estructura apantallada para evitar el acople de ruido externo. La conexión entre las antenas suele realizarse a través de un cable coaxial o mediante fibra óptica.

3.2.1.3 Elementos auxiliares

- Odómetro

Para situar los perfiles se suelen emplear odómetros conectados a la unidad de control y acoplados a las antenas, aunque en ocasiones se implementan en un soporte con ruedas sobre el que se sitúa la antena. Este sistema sirve como encoder (disparador del pulso electromagnético) durante una adquisición de datos configurada por distancias, así como para determinar con mayor precisión la posición de las trazas en el radargrama y la longitud total del registro.

3.2.2 *Parámetros de adquisición*

En casi todos los equipos de GPR que actualmente existen en el mercado hay una serie de parámetros que se pueden modificar y ajustar en la unidad de control, normalmente vía software, al inicio de cada prospección. Resulta muy recomendable realizar algunas pruebas antes de iniciar la adquisición de datos para que los resultados sean satisfactorios. Es importante conocer la profundidad a alcanzar, así como la resolución que requiere el estudio, para que, con estos datos junto con los resultados preliminares de las pruebas que se puedan realizar en campo, podamos determinar los valores más adecuados de los parámetros de adquisición de registros.

1. **Rango temporal o ventana de tiempos de un registro**

El rango de un registro define su longitud temporal, es decir, define la máxima coordenada vertical que alcanza cada traza y por ende, el registro en general. Por lo tanto, delimita la ventana temporal del registro. Las reflexiones que alcanzan la antena en tiempos dobles de propagación superiores al rango no quedan registradas. Sí que quedan registradas aquellas trayectorias cuyos tiempos dobles de propagación son iguales o inferiores a esta longitud vertical máxima de registro.

El tiempo límite de la ventana se selecciona de tal forma que el registro de la anomalía que se busca quede asegurado. Conviene, sin embargo, que este parámetro sea lo suficientemente grande para que una velocidad más baja de la esperada para el medio no impida detectar los elementos anómalos que se desean localizar. El ajuste de esta ventana requiere, por lo tanto, un conocimiento preliminar acerca de la posible profundidad máxima de estudio y acerca de la velocidad aproximada a la que se propaga la onda electromagnética por el medio.

En la práctica se utiliza la expresión:

$$twt = 1.3 \frac{2 \cdot Profundidad}{Velocidad}$$

Donde la profundidad es la máxima alcanzada y la velocidad es la mínima presente en el medio. Esta expresión incrementa el tiempo estimado en un 30% para cubrir posibles variaciones inciertas en la profundidad y velocidad del terreno.

2. **Puntos por traza (samples)**

Este parámetro determina el número de muestras que serán tomadas para construir y representar cada traza recogida por la antena receptora durante la toma de datos. Cada uno de estos puntos es un valor digital que generalmente estará compuesto por 16 bits, lo que proporciona valores enteros para cada muestra comprendidos entre -32768 y 32767. Valores típicos por ejemplo son: 128, 256, 512, 1024 o 2048 muestras por traza [29].

Si se considera un muestreo de 512 puntos por traza (el valor más utilizado), y se tiene un rango de 256 ns, quiere decir que para reconstruir la traza, se tienen dos puntos por cada ns de tiempo doble de propagación. Normalmente, para obtener una buena representación de la traza, cuanto mayor sea la ventana temporal de registro (rango), más elevado tiene que ser el número de puntos de muestreo.

Aunque siempre debe considerarse la resolución que se desea obtener y el tamaño de los registros que se grabarán. Un muestreo con excesivos puntos puede llegar a generar ficheros enormes, que puede exceder el espacio de almacenado previsto o puede ralentizar excesivamente el procesamiento posterior de los datos. Hay que tener en cuenta que un muestreo elevado supondrá también una toma de datos más lenta, debido a que el tiempo empleado por la unidad de control en reconstruir una traza será mayor, lo que puede ser un importante limitante en cuanto a la velocidad de desplazamiento de la antena y por lo tanto de la prospección que se quiera realizar.

Sin embargo, siempre conviene asegurar que el muestreo permite detectar aquellos eventos de interés, registrando los puntos necesarios para poder dibujar correctamente la traza; por lo que la relación entre este parámetro, el rango y el número de trazas registradas cada segundo determina para cada antena, en gran medida, la resolución que se tiene durante el estudio.

3. Frecuencia de muestreo

Escoger una frecuencia de muestreo y un número de muestras por traza es otra forma de determinar indirectamente el tamaño de la ventana temporal del registro. El intervalo de muestreo es controlado por el criterio de Nyquist, de manera que la frecuencia de muestreo debería ser mayor de dos veces la mayor frecuencia presente en la señal. Para la mayoría de los GPR la relación entre el ancho de banda y la frecuencia central se sitúa alrededor de 1. Esto significa es que el pulso radiado contiene energía desde 0.5 veces la frecuencia central a 1.5 veces la frecuencia central de la señal emitida. Teniendo en cuenta entonces que la mayor frecuencia presente en la señal es de 1.5 veces la frecuencia nominal del pulso emitido por la antena que está siendo utilizada, la señal recibida debería ser muestreada con una frecuencia el doble de esta. Previendo un posible comportamiento anómalo del terreno, es mejor utilizar un margen de seguridad de dos [30]. De manera que la frecuencia de muestreo debería ser de aproximadamente 6 veces la frecuencia central de la antena utilizada. Normalmente, los equipos modernos proponen utilizar valores de entre 6 y 15 veces esta frecuencia central.

En el caso de que sea necesaria una interpretación de datos in-situ, un aumento de la frecuencia de muestreo puede proporcionar una mejor definición de las trazas y resaltar así la aparición de algún evento.

4. Superposición de trazas. Stacking

Durante o posteriormente a la adquisición de datos se puede realizar una suma (o superposición) de trazas adyacentes. Este procedimiento se denomina stacking. El número de trazas superpuestas es un parámetro a determinar en función del estudio que se realiza.

Este procedimiento se utiliza para mejorar la relación entre la señal y el ruido cuando éste es aleatorio. Es decir, cuando se trata de eventos que no se registran para tiempos iguales en varias trazas consecutivas. La superposición de varias trazas hace que los efectos debidos a fenómenos aleatorios se reduzcan, mientras que los efectos ocasionados por fenómenos deterministas (eventos observados en varias trazas adyacentes para un mismo tiempo de propagación) quedan realzados y por lo tanto, definidos con mayor claridad en los registros. Si se realiza este procedimiento durante la adquisición de datos, debe tenerse en cuenta que, para no modificar la resolución horizontal, la velocidad de desplazamiento de la antena debe ser menor cuanto mayor sea el número de trazas que se superponen (considerando una misma velocidad de registro y de emisión).

Para aumentar la resolución horizontal, es decir, el número de trazas registradas cada metro de avance de la antena sin modificar ni las velocidades de emisión y ni la velocidad de desplazamiento de la antena, es necesario disminuir el número de trazas registradas sumadas que han de dar lugar a cada traza del radargrama. Una superposición de trazas excesiva, sobre todo en una zona donde se producen eventos hiperbólicos (ocasionados en elementos individuales), puede disminuir sus amplitudes

(intensidades de reflexión) hasta un nivel en que no se puedan distinguir, obteniendo un radargrama característico de un medio continuo [31].

Los radares no pueden registrar cada una de las trazas individuales reflejadas a partir de cada pulso transmitido a causa de la alta velocidad de propagación. Para solventar este problema, los equipos efectúan un muestreo de la señal obteniendo información de varios pulsos emitidos para reconstruir una única traza. En muchos equipos modernos, para obtener una traza registrada se utiliza la información procedente de 16 trazas emitidas [29]. Esto quiere decir que, si se selecciona 512 puntos por traza para reconstruirla, cada traza registrada proviene de 8192 pulsos emitidos por segundo (scans/s).

Una vez seleccionada la velocidad de transmisión de pulsos al medio se puede estimar la velocidad de registro teniendo en cuenta el muestreo deseado. Si se pretende que cada traza recibida se reconstruya a partir de 512 puntos y la velocidad de transmisión es de 50 kHz, el número máximo de trazas registradas cada segundo resulta ser de 97 scans/s, valor obtenido efectuando el cociente entre la velocidad de transmisión y el número de puntos de muestreo. Valores superiores a estos 97 scans/s generan un número de pulsos menor a 512, de manera que no se consigue alcanzar el muestreo deseado.

En el caso de que la prospección se lleve a cabo mediante el uso de un odómetro que controle el posicionamiento horizontal de los perfiles, como por ejemplo una rueda taquimétrica, en vez de seleccionar una velocidad de transmisión lo que se hace es definir la distancia entre trazas registradas que se desea. Valores de separación de 1 ó 2 cm, son muy adecuados si lo que se pretende es la detección de objetos del orden de centímetros, tales como tubos, tuberías o cables. En el otro extremo, para la evaluación de carreteras con GPR por ejemplo, son típicos intervalos regulares entre 1,5 y 3 m de separación entre trazas [32]. Una separación demasiado elevada entre trazas podría hacer que un objeto de pequeño tamaño quedase comprendido entre dos trazas consecutivas, o bien no sea alcanzado por el número de trazas suficiente para definirlo claramente en el registro. Por otro lado, una separación entre trazas muy pequeña podría hacer que visualmente un registro sencillo apareciese muy compacto o con reflexiones no demasiado claras, además de que en este último caso la velocidad de desplazamiento y capacidad de almacenamiento del equipo serían factores limitantes.

3.2.3 Configuración de los datos GPR

Para poder entender la configuración de los datos GPR, se establece una matriz (Ver Figura 3-6) donde las filas de la misma indican las diferentes intensidades de reflexión (amplitudes) en cada sample que se obtiene a lo largo de la ventana de tiempos. Por otro lado, las columnas indican la posición o traza en el conjunto del registro o perfil GPR.

A 613x228 double																		
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
50	-650	-416	-773	-991	-982	-1001	-1015	-1039	-1047	-1021	-1044	-1059	-1013	-1000	-618	-280	-119	-123
51	-1169	-1170	-1401	-1644	-1371	-1114	-1026	-1003	-986	-943	-998	-1007	-884	-958	-754	-550	-472	-489
52	-1593	-1808	-1950	-2047	-1616	-1223	-1038	-982	-966	-951	-1001	-982	-816	-855	-872	-810	-742	-784
53	-1846	-2042	-2135	-2127	-1710	-1230	-1091	-1027	-977	-985	-1051	-1044	-851	-800	-952	-1042	-1070	-1109
54	-1535	-1828	-1734	-1598	-1415	-1121	-1011	-1011	-970	-977	-1017	-1028	-868	-772	-931	-1078	-1235	-1153
55	-809	-939	-973	-914	-727	-757	-775	-729	-734	-760	-744	-780	-639	-491	-579	-778	-926	-975
56	58	195	127	276	143	187	-110	-161	-74	-180	-185	-112	-51	84	14	-207	-416	-34
57	941	1159	1287	1327	1050	838	626	520	747	527	678	603	725	781	673	662	377	943
58	1615	1819	2000	1947	1736	1505	1309	1271	1468	1319	1409	1291	1420	1431	1344	1485	1375	1770
59	1770	1970	2154	2092	1975	1930	1740	1751	1828	1828	1744	1731	1714	1699	1662	1790	1914	2099
60	1572	1593	1612	1630	1666	1754	1688	1679	1651	1704	1646	1707	1618	1368	1454	1620	1829	1608
61	922	866	870	930	865	1141	1159	1055	1265	900	1105	1225	985	774	844	813	1095	782
62	167	42	46	64	96	252	306	271	359	204	297	302	66	-33	207	66	155	-109
63	-393	-503	-565	-524	-540	-461	-356	-387	-352	-400	-395	-334	-510	-555	-291	-433	-541	-717
64	-562	-640	-727	-762	-797	-825	-713	-689	-686	-755	-696	-599	-671	-553	-447	-518	-711	-812
65	-327	-392	-409	-470	-435	-645	-520	-495	-505	-570	-566	-550	-393	-170	-189	-271	-337	-390
66	182	122	283	190	77	-102	-41	-138	-6	20	112	1	240	463	395	263	225	283
67	742	864	983	973	797	745	743	697	727	841	848	787	998	1144	919	924	1011	1182
68	1430	1518	1717	1691	1624	1611	1566	1423	1494	1494	1573	1507	1626	1727	1409	1468	1641	1697
69	1861	1986	2108	2156	2173	2151	2077	1973	2041	1985	2037	2055	2016	1962	1673	1692	1885	1865
70	1962	2036	2148	2310	2403	2291	2209	2206	2172	2156	2153	2188	2065	1857	1620	1628	1778	1712

Figura 3-6 Matriz de datos GPR en bruto donde se aprecian las diferentes intensidades de reflexión.

También hay que tener en cuenta que para el procesamiento de la señal en la unidad de control el impulso transmitido se propaga a través del medio hasta que encuentra discontinuidades en las propiedades dieléctricas (generalmente en la interface entre dos medios distintos), momento en el cual se refleja parte de la energía. Esta energía reflejada es recibida en la antena receptora y posteriormente registrada por la unidad de control. La intensidad con la que se refleja la señal se mide en términos de valores de amplitudes. La amplitud será mayor conforme mayor sea el contraste dieléctrico entre los dos medios adyacentes. Además, la unidad de control permite procesar todas las trazas individuales (A-scan) en una imagen 2D (B-scan o radargrama). Todo ello se lleva a cabo mediante la aplicación de una paleta de colores a los diferentes valores de amplitud registrados. En la Figura 3-7, se puede ver como se aplica una paleta de colores en la que se asigna el color negro a valores de amplitud mínima, y el color blanco a los valores de máxima amplitud. Los valores intermedios aparecen representados en una escala de grises de diferente tonalidad. La amplitud de la señal recibida dependerá de diferentes factores como son la intensidad del campo que se refleja, la distancia entre el objeto y la antena transmisora/receptora y las distintas propiedades electromagnéticas del medio. El primer factor indica la cantidad de energía que viajará a la antena una vez que la señal haya sufrido la reflexión. El segundo factor determina la atenuación de la onda como consecuencia de la difusión geométrica y el tercer factor provoca la atenuación de la energía de la señal debido a la absorción del medio y la conversión en calor, que también depende de la frecuencia de la señal.

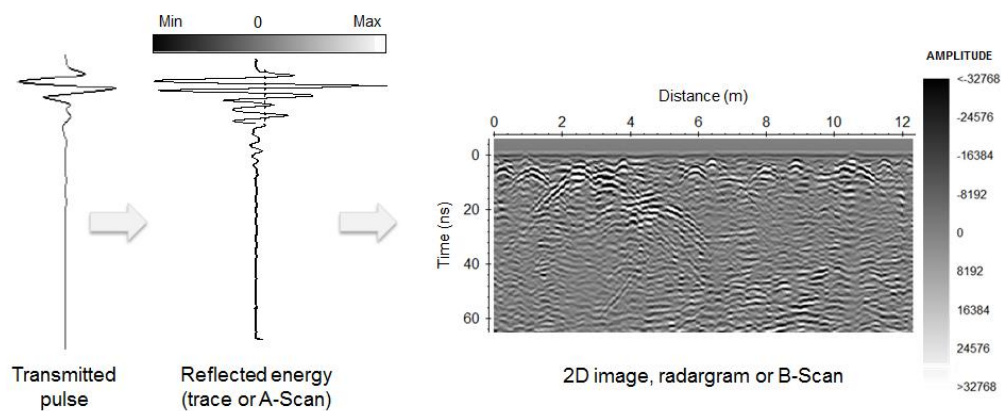


Figura 3-7 Esquema de procesamiento de la señal en la unidad de control [28].

3.2.4 Adquisición de datos 3D

La disposición de los radargramas en paralelo dispuestos en forma de mallado (Figura 3-8) es una herramienta de gran utilidad para la visualización 3D y análisis de las reflexiones observadas. Su objetivo final es la obtención de pseudo-imágenes que se aproximan a cortes horizontales (o time-slices) del subsuelo a distintas profundidades de la ventana de tiempos o rango. A mayores de los parámetros ya mencionados para la toma de datos, es necesario definir el número de perfiles y la distancia entre ellos. Este valor será función del tamaño de objetos a detectar y de la frecuencia de la antena. Por ejemplo, para antenas de 500 MHz se suelen utilizar valores de 20 cm de separación entre perfiles; mientras que para antenas de 1 GHz, utilizamos separaciones más pequeñas, del orden de 10-5 cm.

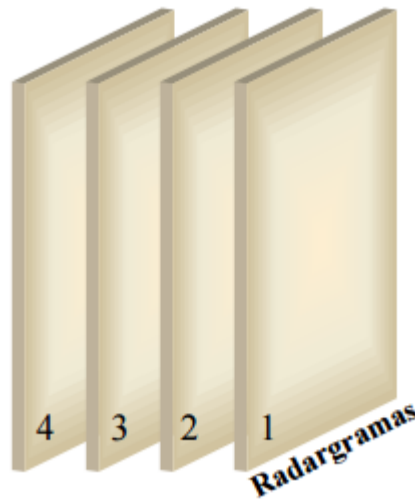


Figura 3-8 Disposición en paralelo de los radargramas para su dimensionamiento 3D.

3.3 Procesado de datos

Muchos son los factores que limitan el desempeño del georradar como, por ejemplo, la atenuación de los impulsos emitidos, ruidos externos, instrumentales, etc. Por esto, antes de interpretar cualquier tipo de datos de georradar, es necesario realizar un procesamiento de los mismos mediante distintas técnicas de filtrado, con el objeto de mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal-ruido. Este procesado se divide en varias partes:

- **Establecimiento del tiempo cero (Offset)**

Necesario para poder calcular la correcta profundidad a la que se sitúan los diferentes eventos registrados. Básicamente, es el retardo de tiempo desde que la señal es emitida hasta que entra en contacto con la superficie del suelo. Hay que sincronizar el contacto de la señal con el suelo con el comienzo de conteo del tiempo, que generalmente coincidirá con el primer punto de rotura de la onda en el aire o pico de máxima amplitud de la traza [33]. Se calcula a menudo automáticamente por el software de procesamiento. Este ajuste de la señal es recomendable antes de utilizar otros filtros de procesamiento que se pueden aplicar [34].

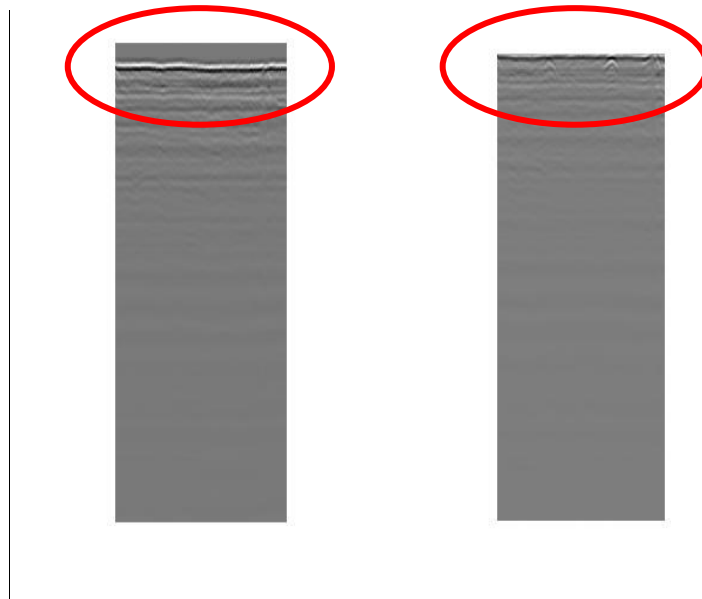


Figura 3-9 A la izquierda radargrama sin aplicar el filtro de establecimiento del tiempo cero, a la derecha una vez aplicado el filtro.

- **Filtros de frecuencia horizontales y verticales**

Con ellos se pretende eliminar el ruido, tanto interno como externo que se superpone a los datos recogidos por el equipo. Para este tipo de procesamiento se utilizan diferentes tipos de filtros en una y dos dimensiones (filtros verticales y horizontales, respectivamente).

1. Filtros verticales

Una característica común en equipos GPR es la aparición de una componente de baja frecuencia (componente DC) continua en las trazas registradas por el radar. El nivel promedio de la señal se traslada de amplitud cero a un valor diferente. La aparición de esta componente se asocia generalmente con fenómenos inductivos o una posible limitación en el rango de los instrumentos. La eliminación de esta componente es un requisito previo no sólo visualmente, sino también para la posterior aplicación de otros filtros de procesamiento puesto que los resultados pueden diferir significativamente de lo que se espera [35].

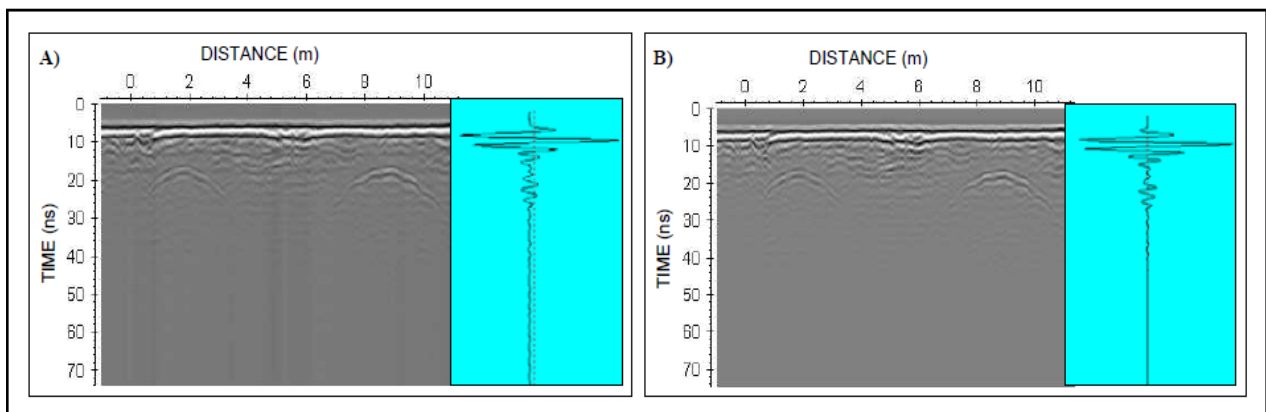


Figura 3-10 Ejemplo de la utilización de filtro vertical: A) sin filtro y B) con filtro.

2. Filtros horizontales

Consiste en un procesador digital de la señal que es aplicado a las diferentes trazas del registro. La función principal de este filtro es eliminar el ruido de baja frecuencia que aparece en forma de bandas horizontales continuas a lo largo del registro o en un número limitado de trazas. Se trata de estimar un promedio de todas las trazas en una ventana temporal y eliminarlo de cada traza individual. El efecto principal en los datos es suprimir reflectores planos haciendo hincapié en las reflexiones más pequeños [34]. estos filtros son óptimos para eliminar ruido originado por un mal acoplamiento entre la antena y la superficie, así como para eliminar las reverberaciones de la propia antena o elementos exteriores al sistema que transporta la antena.

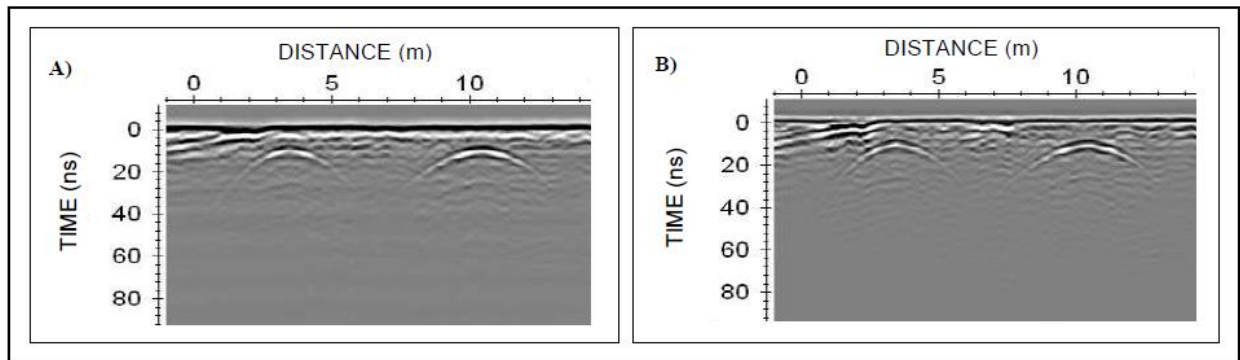


Figura 3-11 Ejemplo de la utilización del filtro horizontal: A) sin filtro y B) con filtro.

3. Filtro paso-banda (band-pass filter)

A veces, la energía de la señal reflejada se coloca en un rango de frecuencia particular, mientras que la mayor parte de las fuentes de ruido se encuentran en un rango de frecuencia diferente. Por lo tanto, el ruido a menudo es posible que se encuentre en la frecuencia dominio. Un filtro paso-banda es una combinación de filtros paso-alto, para eliminar la deriva de la señal de baja frecuencia; y filtros paso-bajo para eliminar el ruido de alta frecuencia [34]. Los filtros paso-banda son muy comunes y hay varios tipos, cada uno con diferentes parámetros que definen la geometría y la forma de la banda de paso. Los filtros paso-banda se definen en general mediante el establecimiento de dos valores de frecuencia. El primer punto determina la frecuencia de corte bajo; mientras que el segundo determina la frecuencia de corte alto (f_1 y f_2 , respectivamente, en la Figura 3-12).

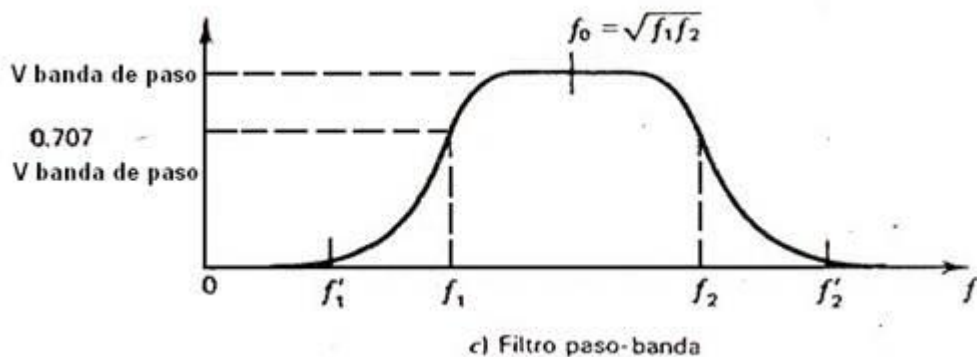


Figura 3-12 Esquema de filtro paso-banda [34].

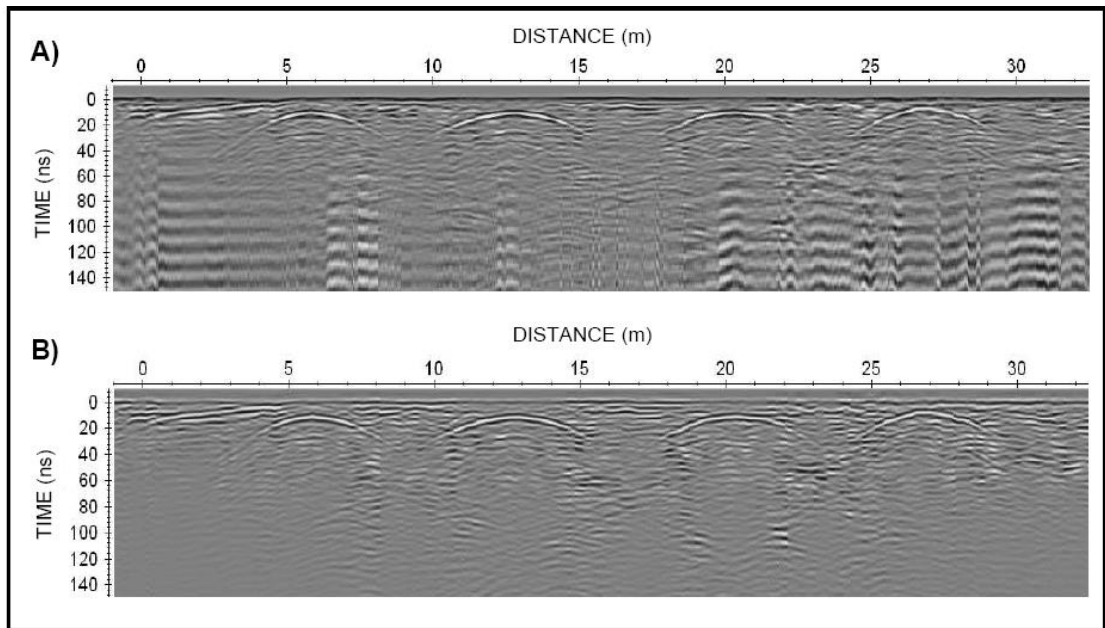


Figura 3-13 Ejemplo de aplicación del filtro paso-banda: A) sin filtro y B) con filtro.

• Ganancia

Consiste en la amplificación de la señal recibida mediante el uso de una función matemática o la introducción manual de los valores de ganancia. Las señales de radar se atenúan rápidamente a medida que se propagan en el subsuelo debido a que a mayores profundidades las señales tienen poca energía de reflexión y a la difusión geométrica.

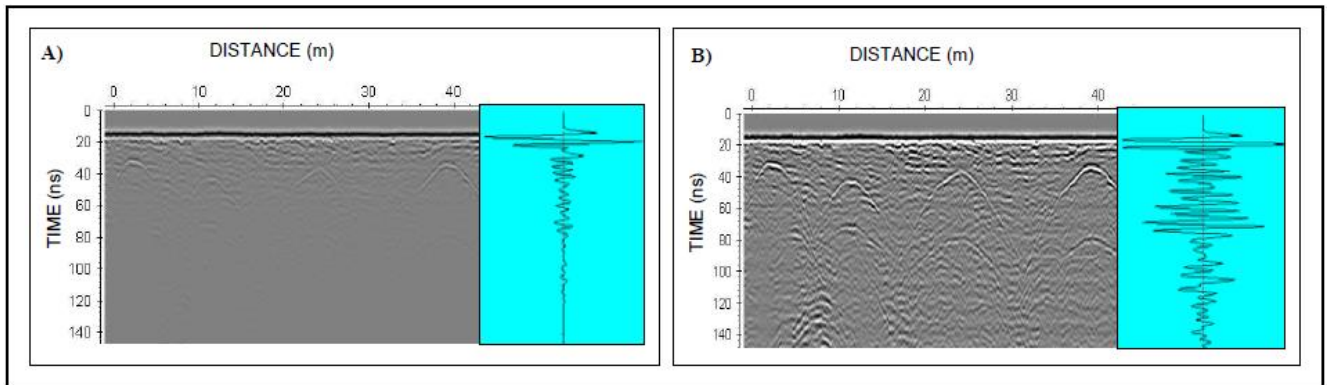


Figura 3-14 Ejemplo de empleo del filtro ganancia: A) sin ganancia y B) con ganancia.

4 DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

4.1 Descripción de la herramienta 3D y procesado de señal

Con objeto de realizar una reconstrucción tanto en 2D como en 3D, se ha desarrollado una herramienta informática de extracción volumétrica. Para ello, se han tenido en cuenta los pasos descritos en el capítulo 3.

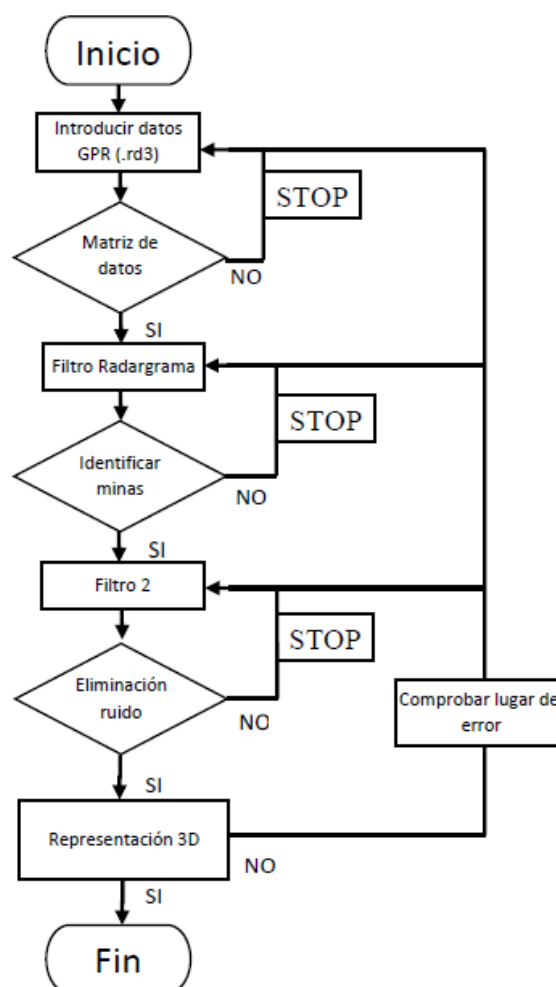


Figura 4-1 Diagrama de flujo de la herramienta.

4.1.1 Procesado 2D

Hay diversos tipos de factores como son la atenuación de la señal electromagnética, ruidos externos y ruidos instrumentales. Antes de comenzar con la interpretación de los datos debemos realizar el procesado de dicha señal. Es decir, debemos procesar los datos tomados mediante técnicas de filtrado con el objeto de mejorar la imagen, la señal–ruido, y aumentar la resolución. El objetivo final es extraer información de las señales/trazas recibidas, obteniendo una imagen del subsuelo que incluya todos los objetos de interés y/o características que harán mucho más fácil la interpretación de los datos.

Además, cabe resaltar que para aquellos artefactos planos el patrón esperado es una reflexión plana continua. Sin embargo, en el caso de elementos de mayor tamaño y forma más o menos circular (en nuestro caso un artefacto explosivo o una mina), la reflexión se aproxima a una hipérbola debido a que el dispositivo se encuentra perpendicular al sentido de adquisición de los datos. De la toma de datos se obtienen dos archivos importantes de cada traza. El primero, en formato “.rd3”, de donde se extrae la información para construir la matriz y el radargrama. El segundo, en formato “.rad”, es un archivo de texto donde se encuentran los distintos parámetros utilizados en la toma de los mismos.

4.1.1.1 Introducción de datos GPR en MATLAB

Para el inicio del proceso se deben cargar los datos en bruto GPR en MATLAB. Para ello, se utiliza la función desarrollada “TransformarRD3” (Anexo 1). Los comandos incluidos en la función son:

```
>>fid=fopen(Nombre,'r');
>>Matriz = fread(fid,[samples,traces],'int16');
>>fclose(fid);
```

El parámetro “Nombre” representa el nombre del archivo GPR que se va a cargar. Los parámetros “samples” y “traces” son propios de cada uno de los datos obtenidos (Figura 4-1). Dependen de la frecuencia de las antenas y otros parámetros expuestos anteriormente. Además, hay que introducir los datos en una variable, en este caso “Z”. Según el perfil introducido se tendrá “Z1”, “Z2”, “Z3”, ... Por lo tanto, el comando en MATLAB para hacerlo es (Figura 4-2):

```
>> Z1=TransformarRD3('p23.rd3',613,213);
```

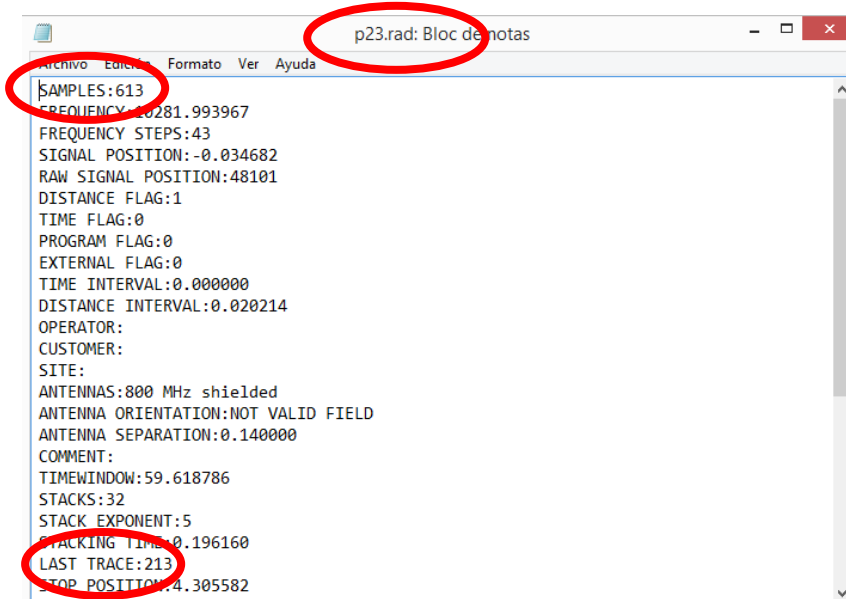


Figura 4-2 Datos GPR utilizados.

Una vez introducidos los datos de los perfiles y los guardamos en la matriz que hemos elegido, con el comando `>>imshow(Z1)` se obtiene un primer radargrama en bruto como el de la Figura 4-3

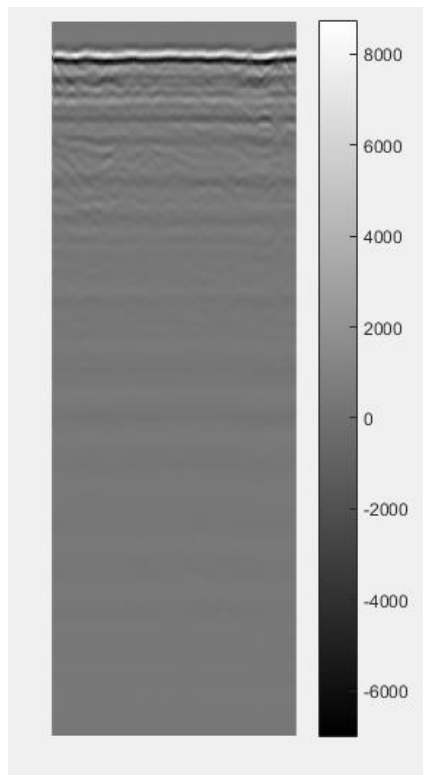


Figura 4-3 Radargrama en bruto con diferentes frecuencias en gama de grises.

A partir de la introducción en la herramienta de todos los perfiles GPR de los que se dispone se pasa al proceso de filtrado para determinar la localización las minas.

4.1.1.2 Proceso de filtrado

El objetivo de este proceso, que consta de dos partes, es distinguir las distintas minas. Primero, con la función “FiltroRadargrama” y, segundo, con la función “Filtro2”. Con estas dos funciones se eliminan todas las reflexiones que no corresponden con las de las minas. Estas dos funciones engloban a todos los filtros explicados anteriormente. Además, también establece el tiempo cero para poner el eje de coordenadas directamente sobre el suelo y eliminar el aire entre las antenas y el suelo, que únicamente es ruido. La llamada a la función se hace de la siguiente manera:

```
>>Z1=FiltroRadargrama2(name,umbral1,umbral2,suelo,eje);
```

En ella, la variable “name” es el nombre de la matriz de los datos “rd3”, “umbral1” y “umbral2” son los límites de amplitud de reflexión en los que se encuentran las minas y, por último, “suelo” y “eje” son dos variables que se utilizan tanto para establecer el nivel de suelo y para fijar la profundidad máxima (al estar las minas a menos de medio metro de la superficie se facilita el procesado de los datos). Para establecer el suelo, debemos fijarnos en el radargrama y para la profundidad utilizamos un valor estándar de 200, que puede variar en función de los datos GPR. Como se puede apreciar en la Figura 4-3 el suelo está aproximadamente en la coordenada Y=35, por la que “suelo” será 35. Así, una vez que la matriz pasa por este filtro se obtendría el resultado de la Figura 4-4 Aunque los artefactos son reconocibles, la identificación es difícil debido a su reducido diámetro y disposición, por lo que se puede llegar a confundir con ruido. Antenas de mayor frecuencia, del orden del GHz (2,3 GHz), serían

idóneas para la detección de dichos conductores enterrados a escasos cm de la superficie del terreno, de manera que se tiene la suficiente distancia para que permita el retorno de la reflexión dada su resolución vertical a dicha frecuencia sin que quede la reflexión solapada, y por tanto oculta, por la señal directa del sistema generada en la interfaz que hay de encuentro entre el aire y la superficie del suelo.

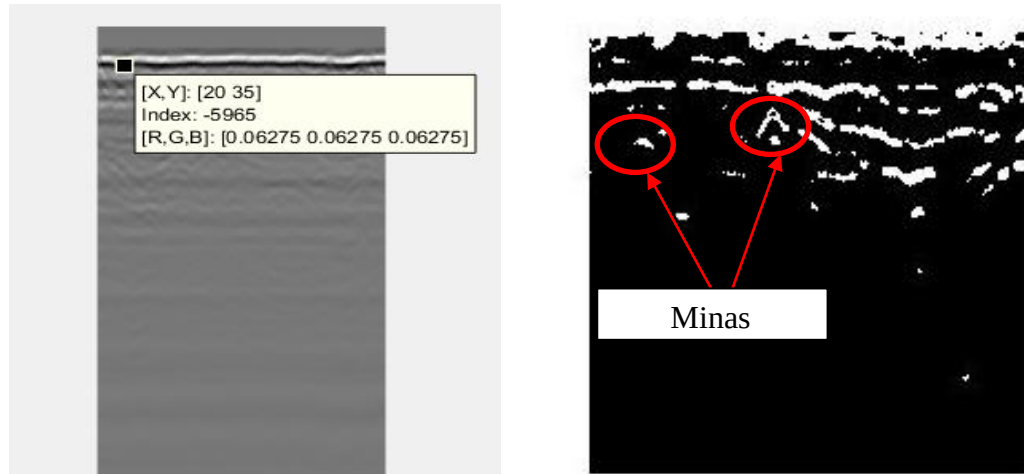


Figura 4-4 A la izquierda coordenadas del suelo del radargrama. A la derecha radargrama filtrado.

Una vez ejecutado este filtro, se repite el proceso hasta que se eliminen todas las amplitudes que se correspondan con ruido. Cuando no se pueda filtrar más, debido a que el GPR detecta también pequeñas piedras y otras fuentes de ruido, se utiliza la función "Filtro2". Esta función requiere una configuración bastante manual. Su funcionalidad se basa en que una vez se conoce la posición de las minas, viendo las coordenadas dentro de la matriz donde se encuentren, se elimina todo lo demás del radargrama para aislar y representar únicamente las reflexiones producidas por la mina. Se trata de, entre los valores que se estimen, eliminar todas esas reflexiones (el código de la función está en el Anexo 1). La llamada a la función se realiza de la siguiente manera:

```
>>Filtro2( Perfil,x1,x2,y1,y2 )
```

En ella, "Perfil" es el perfil de trabajo y el resto de parámetros son los intervalos x e y donde se elimina cualquier reflexión presente. A partir de los resultados de la Figura 4-4 se obtendría un nuevo resultado como el de la Figura 4-5.



Figura 4-5 Partiendo de la Figura 4-4, proceso de filtro de la función "Filtro2".

Con el uso de esta función llega un momento en el que es imposible eliminar más ruido. Por lo tanto es el propio usuario de la herramienta el que tiene que limpiar el ruido a mano a partir de aquí.

Llegados a este punto finaliza el procesado 2D de la señal. Así, para resumir, se parte de los datos en bruto GPR tomados con diferentes antenas (500 MHz, 800 MHz, 1 GHz o 2,3 GHz), dependiendo de la profundidad donde queramos identificar la mina, y diferentes separaciones entre trazas (2 cm, 5 cm, 10 cm), dependiendo de la magnitud de la mina. Primero, esos datos en bruto se cargan a través de la función “TransformarRD3” en MATLAB, guardándolos en diferentes matrices. Después, se lleva a cabo el filtrado de la señal en dos partes en cada perfil que hemos introducido. La primera, con la función “FiltroRadagrama”, donde se establecen unos umbrales de amplitud para estimar la posición de las minas. La segunda, es una eliminación de todas las reflexiones que no coinciden con las minas mediante la función “Filtro2”, donde el resultado es una matriz donde solo aparezcan las minas y la parte del ruido que necesita un filtrado más específico para eliminarlo. Por último, si hubiese ruido indeseado que pueda interferir en la representación 3D haría falta un filtrado manual por parte del usuario. Así el proceso de filtrado de la imagen 2D se ejemplifica en la Figura 4-6.

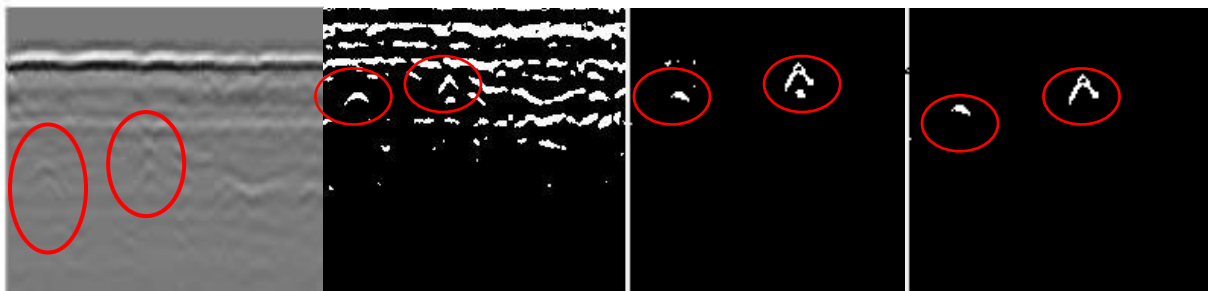


Figura 4-6 Proceso de filtrado 2D a partir de datos GPR en bruto hasta la eliminación completa del ruido.

4.1.2 Procesado 3D

Una vez finaliza el procesado 2D de la señal se pasa a la representación 3D de los datos, que se resumen en el diagrama de la Figura 4-7. Para ello, cabe destacar que se dispone de perfiles en los ejes z e y con una separación que depende de los datos tomados. Así, para la representación 3D se crea un cubo donde se introducen los perfiles teniendo en cuenta la posición del suelo y la numeración de los perfiles.

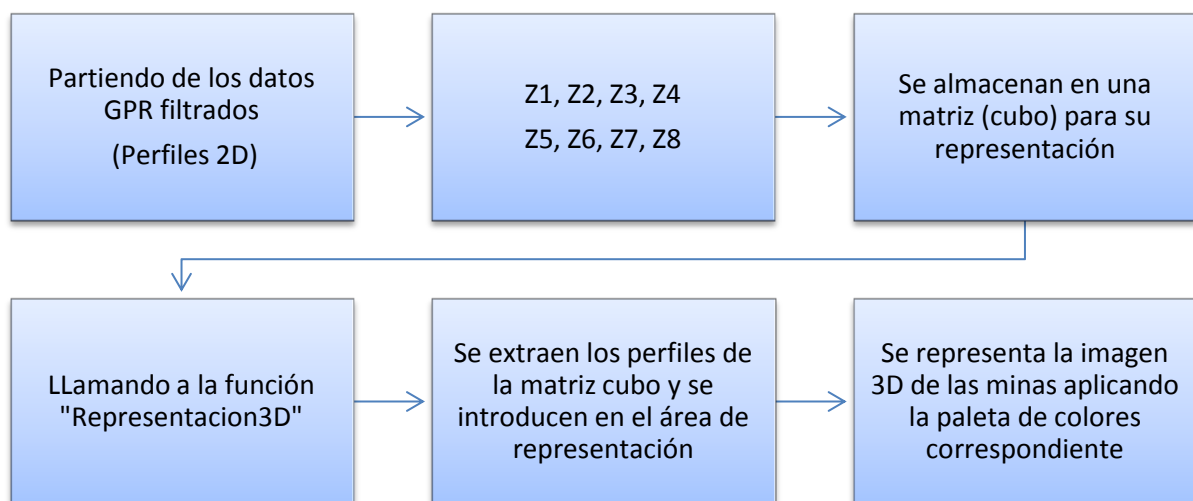


Figura 4-7 Diagrama del procesado 3D de la señal

Para automatizar el proceso se ha creado la función “CrearCubo”, la cual crea un cubo de las dimensiones requeridas mediante la introducción de los perfiles. Esto permitirá la posterior representación 3D. Donde primero de todo se debe crear una matriz de ceros “Ztotal” que será la matriz donde guardemos los diferentes perfiles que utilizemos. Para ello crearemos una matriz que incluya las dimensiones del eje z y el eje y de nuestros perfiles y el número total de perfiles introducidos. Es importante introducir bien el número de perfiles y las dimensiones de las matrices de los perfiles. Todas las matrices deben ser de las mismas dimensiones. En el presente trabajo, dadas las dimensiones iniciales de las matrices de los datos extraídos del GPR, (613x216), se decidió establecer 200x200 como medida estándar de los perfiles para poder trabajar con mayor comodidad con matrices más pequeñas. Al eliminar toda la parte de inferior de los radargramas no se pierde información porque las minas siempre están enterradas a menos de medio metro, no se pierde información.

Una vez que tenemos la matriz donde introduciremos los diferentes perfiles, llamamos a la función “CrearCubo”:

```
CrearCubo(Perfil, Numerodeperfil)
```

La variable “Perfil” es el perfil a introducir y “Número de perfil” depende de la colocación de los perfiles en referencia con el 0 absoluto. Así, la matriz de la primera traza GPR va en la posición 1, la segunda va en la posición 2 y así sucesivamente hasta introducir el total de los perfiles. (Figura 4-8)

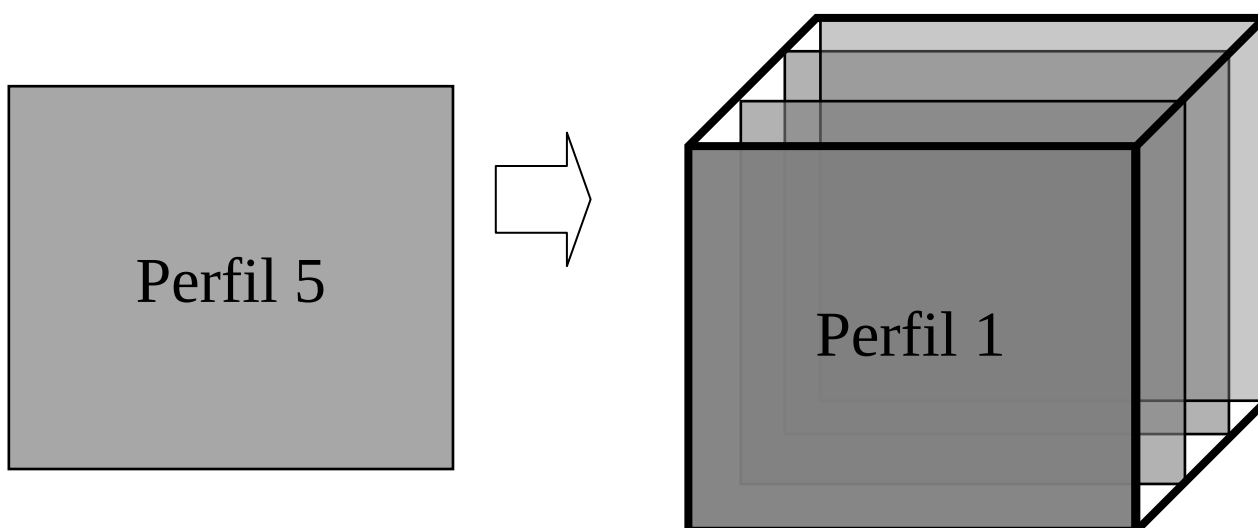


Figura 4-8 Proceso de la introducción de los perfiles en el cubo 3D.

Una vez se dispone de “Ztotal” se llama a la función “representación3D”:

```
representacion3D( cubo, NumeroPerfiles, r, s, t )
```

En ella, la variable “cubo” es la matriz a la que con anterioridad se han introducido los diferentes perfiles, “NumeroPerfiles” es el número de perfiles empleados y las variables r , s y t son parámetros de la relación de aspecto para la representación 3D, cuyo objetivo es facilitar la visualización de los datos a escala. Las variables r , s , y t varían en función de los datos del GPR. Para entender mejor la función y su funcionamiento, a continuación se desglosan los diferentes comandos para su funcionamiento (Anexo 1).

En primer lugar, se crea una matriz de ceros con dimensiones “NumeroPerfiles”x200, (200 está establecido como medida estándar para este trabajo). Esta matriz, llamada “z” es la que se utiliza para la representación 3D de las minas.

```
>>z=zeros(NumeroPerfiles,200);
```

Una vez creada la matriz, se introducen los siguientes comandos:

```
>>for j=1:8; for i=1:200; pos=find(cubo(:,i,j)==1); if pos; z(j,i)=200-  
min(pos);end;end;end
```

En ellos, se recorre la matriz “Ztotal” donde se encuentran los perfiles para introducirlos en la matriz “z” poniendo un 1 en el lugar más elevado donde exista una reflexión. Así, se marca en la matriz “z” la superficie de las minas. Para que MATLAB no represente los 0 se convierten en *NaN* (Not a Number) con el siguiente comando:

```
z(z==0) = NaN;
```

A continuación se utiliza el comando `surf(z)` para representar las minas. Además, se utiliza el comando `daspect([r s t])` y el comando `colormap(map)`. Ambos sirven para cambiar las características de la representación 3D. El comando `daspect([r s t])` ajusta la relación de aspecto de la representación 3D y `colormap(map)` se encarga del mapa de colores para distinguir diferentes profundidades de las minas.

En el presente trabajo se ha utilizado una escala de colores en la cual los valores de reflexión más altos se representarán en rojo y los más bajos en azul, con diferentes tonalidades de entre medias. Todo ello se consigue mediante el comando como el de la Figura 4-9.

```
map=[];for n=0:256;map=[map; n^2/256^2 0 1-n^2/256^2];end
```

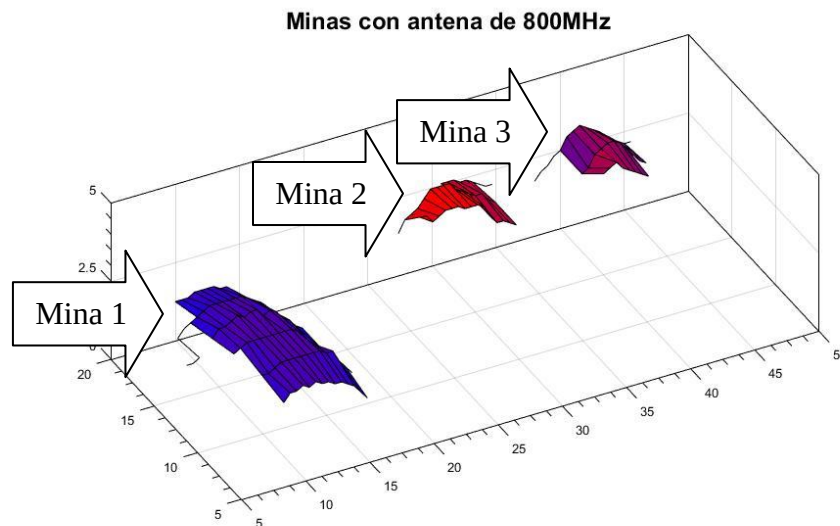


Figura 4-9 Representación 3D de tres minas donde se aprecia el volumen que ocupan cada una de ellas.

Con esto se finaliza la representación 3D y se llega al último paso de la herramienta. En el siguiente capítulo se muestra funcionamiento de la herramienta con diferentes datos GPR.

5 VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Para validar la herramienta desarrollada se han utilizado diferentes datos obtenidos en dos tomas dentro de la Escuela Naval Militar que se exponen a continuación.

5.1 Conjunto de datos empleados para la verificación de la aplicación

La profundidad del estudio y la resolución dependen de la frecuencia de la antena empleada. En el caso de este trabajo, empleamos datos obtenidos con antenas de 500 MHz, 800 MHz, 1GHz y 2,3 GHz con una unidad de control “ProEx” de la compañía Mala Geoscience [36]. Como paso previo a la interpretación 2D de los datos, los radargramas adquiridos fueron procesados utilizando la siguiente secuencia de filtrado: establecimiento/corrección del tiempo cero, filtro temporal o vertical, ganancia o amplificación de la señal, y filtro espacial u horizontal para eliminar el ruido de baja frecuencia que se acopla al sistema. Para ello se filtraron los datos en bruto y gracias a la ayuda del programa ReflexW, se realizó un entrenamiento de la herramienta y se determinaron los umbrales de amplitud.

Los datos empleados provienen de distintos estudios realizados con anterioridad poder verificar el funcionamiento de la herramienta. En estas muestras aparecen minas o artefactos explosivos enterrados a diferentes profundidades, que van desde los 5 hasta los 30 cm. También se han adquirido con diferentes antenas, que afectan a la resolución y la profundidad. Más adelante se analizan los distintos problemas encontrados en función de la frecuencia de trabajo. Además, las dos fuentes de datos usadas con la herramienta son completamente independientes entre sí (disposición y número de minas).

5.1.1 Primer conjunto de datos

En esta toma de datos se disponen dos minas antitanque dispuestas en horizontal y en oblicuo, respectivamente. La toma de datos se realizó en la pista de atletismo de la Escuela Naval Militar.

Como se puede observar en la Figura 5-1, se utilizaron antenas de 800 MHz separadas 14 cm entre sí. La ventana de tiempos era de 60 ns y se obtuvieron 613 muestras por traza. Además, en cada perfil se tomaba una traza cada 2 cm. Asimismo, para la representación 3D se empleó una separación entre perfiles de 10 cm, que es menos que un cuarto de la longitud de onda necesaria para la obtención de imágenes 3D de alta resolución [37]. En este punto nos encontramos con la primera dificultad, que se explica con mayor profundidad más adelante. Así, si las minas miden entre 20 cm y 25 cm de longitud y cada perfil está separado 10 cm, por cada mina solo pasarán un máximo de dos perfiles.

```

SAMPLES:613
FREQUENCY:10281.993967
FREQUENCY STEPS:43
SIGNAL POSITION:-0.034682
RAW SIGNAL POSITION:48101
DISTANCE FLAG:1
TIME FLAG:0
PROGRAM FLAG:0
EXTERNAL FLAG:0
TIME INTERVAL:0.000000
DISTANCE INTERVAL:0.020214
OPERATOR:
CUSTOMER:
SITE:
ANTENNAS:800 MHz shielded
ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD
ANTENNA SEPARATION:0.140000
COMMENT:
TIMEWINDOW:59.618786
STACKS:32
STACK EXPONENT:5
STACKING TIME:0.196160
LAST TRACE:214
STOP POSITION:4.325796
SYSTEM CALIBRATION:0.0000022618
START POSITION:0.0000000000
SHORT FLAG:1
    
```

Figura 5-1 Parámetros de adquisición de nuestra señal GPR.



Figura 5-2 Izquierda: Proceso de enterramiento de la mina. Derecha: dimensiones de la mina.

5.1.2 Segundo conjunto de datos

Dentro de las instalaciones de la Escuela Naval Militar se simuló un campo minado experimental en terreno arenoso (Figura 5-3). Tal y como se describe en la Figura 5-4, se consideraron diferentes tipos de minas. Se trata de material inerte proporcionado por el pañol de Infantería de Marina. Con el fin de realizar un exhaustivo análisis de detección, para la realización del estudio se consideraron diferentes profundidades y orientaciones/disposiciones.

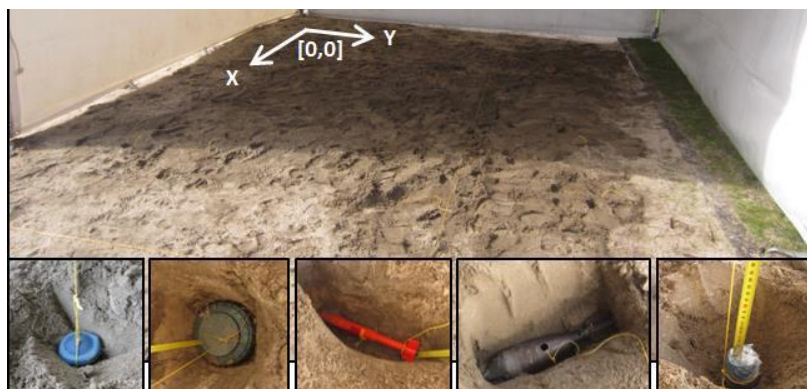


Figura 5-3 Zona experimental del campo de minas en la ENM.

Nº	Objeto	Designación	Imagen	Dimensiones	Material	Profundidad	Disposición
1	Mina Antipersonal	AP-SB33		e = 3.23 cm, Ø = 8.46 cm	Plástico	10 cm	Vertical
2							Horizontal
3							Oblicua
4	Granada de Mortero	GM-ECIA		L = 26 cm, Ø = 5.98 cm	Metal	20 cm	Horizontal
5				L = 38 cm, Ø = 7.86 cm			
6	Mina Antitanque	AT-SB81		e = 10 cm, Ø = 22 cm	Plástico	30 cm	Vertical
7						25 cm	
8						25 cm	Oblicua
9	Granada de Mano	M-67		L = 9.31 cm, Ø = 6.14 cm	Metal	12 cm	Horizontal
10	Granada de Mortero	INSTALAZA II M-63		L = 34.5 cm, Ø = 3.56 cm	Metal	15 cm	Horizontal
11						10 cm	Oblicua
12	Granada de Mano	ALHAMBRA-EJ		L = 7.54 cm, Ø = 6.37 cm	Plástico	10 cm	Vertical
13						7 cm	Oblicua
14						7 cm	Horizontal
15							

Figura 5-4 Arriba: escenario simulado y zona de estudio de la ENM de Marín. Abajo descripción de minas y disposición de las mismas.

Cabe destacar que de esta segunda toma de datos, los únicos que utilizaremos serán el 6, 7 y 8 (Figura 5-4), las tres minas antitanque enterradas a diferentes profundidades y en distintas disposiciones.

1	SAMPLES:292	1	SAMPLES:500
2	FREQUENCY:21004.498047	2	FREQUENCY:11523.999023
3	FREQUENCY STEPS:24	3	FREQUENCY STEPS:45
4	SIGNAL POSITION:26.484405	4	SIGNAL POSITION:30.969189
5	RAW SIGNAL POSITION:52184	5	RAW SIGNAL POSITION:49475
6	DISTANCE FLAG:1	6	DISTANCE FLAG:1
7	TIME FLAG:0	7	TIME FLAG:0
8	PROGRAM FLAG:0	8	PROGRAM FLAG:0
9	EXTERNAL FLAG:0	9	EXTERNAL FLAG:0
10	TIME INTERVAL: 0.000000	10	TIME INTERVAL: 0.000000
11	DISTANCE INTERVAL: 0.017613	11	DISTANCE INTERVAL: 0.017613
12	OPERATOR:_	12	OPERATOR:_
13	CUSTOMER:_	13	CUSTOMER:_
14	SITE:_	14	SITE:_
15	ANTENNAS:[User] HF 2.3 GHz	15	ANTENNAS:[User] 1000 MHz shielded
16	ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD	16	ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD
17	ANTENNA SEPARATION: 0.040000	17	ANTENNA SEPARATION: 0.100000
18	COMMENT:	18	COMMENT:
19	TIMEWINDOW:13.901784	19	TIMEWINDOW:43.387718
20	STACKS:2	20	STACKS:2
21	STACK EXPONENT:1	21	STACK EXPONENT:1
22	STACKING TIME:0.005840	22	STACKING TIME:0.010000
23	LAST TRACE:246	23	LAST TRACE:246

Figura 5-5 Segundo conjunto de datos GPR con antenas de 2,3 GHz y 1 GHz.

1	SAMPLES:613	1	SAMPLES:512
2	FREQUENCY:10281.993967	2	FREQUENCY:6801.934470
3	FREQUENCY STEPS:43	3	FREQUENCY STEPS:65
4	SIGNAL POSITION:-0.035266	4	SIGNAL POSITION:-0.033357
5	RAW SIGNAL POSITION:48359	5	RAW SIGNAL POSITION:47515
6	DISTANCE FLAG:1	6	DISTANCE FLAG:1
7	TIME FLAG:0	7	TIME FLAG:0
8	PROGRAM FLAG:0	8	PROGRAM FLAG:0
9	EXTERNAL FLAG:0	9	EXTERNAL FLAG:0
10	TIME INTERVAL:0.000000	10	TIME INTERVAL:0.000000
11	DISTANCE INTERVAL:0.020214	11	DISTANCE INTERVAL:0.020214
12	OPERATOR:	12	OPERATOR:
13	CUSTOMER:	13	CUSTOMER:
14	SITE:	14	SITE:
15	ANTENNAS:800 MHz shielded	15	ANTENNAS:500 MHz shielded
16	ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD	16	ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD
17	ANTENNA SEPARATION:0.140000	17	ANTENNA SEPARATION:0.180000
18	COMMENT:	18	COMMENT:
19	TIMEWINDOW:59.618786	19	TIMEWINDOW:75.272704
20	STACKS:32	20	STACKS:8
21	STACK EXPONENT:5	21	STACK EXPONENT:3
22	STACKING TIME:0.196160	22	STACKING TIME:0.040960
23	LAST TRACE:205	23	LAST TRACE:208

Figura 5-6 Segundo conjunto de datos GPR con antenas de 800 MHz y 500 MHz.

Como se puede observar en la Figura 5-5 y Figura 5-6, se utilizaron antenas de 500 MHz, 800 MHz, 1 GHz y 2,3 GHz separadas entre sí 18 cm, 14 cm, 10 cm y 4 cm respectivamente. La ventana de tiempos era de 75 ns, 60 ns, 43 ns y 14 ns y se obtuvieron 512, 613, 500 y 292 muestras por traza. Además, en cada perfil se tomaba una traza cada 2 cm. Asimismo, para la representación 3D se empleó una separación entre perfiles de 5 cm, que es menos que un cuarto de la longitud de onda necesaria para la obtención de imágenes 3D de alta resolución [37]. En un principio este conjunto de datos nos debería ofrecer una mejor representación de las minas debido a la menor separación entre trazas y mayor resolución que los datos obtenidos de primer conjunto de datos.

5.2 Resultados y verificación de la aplicación

En función de los diferentes datos se ha verificado la idoneidad de diferentes antenas y parámetros para la representación 3D de artefactos explosivos enterrados.

5.2.1 Primer conjunto de minas: antena de 800MHz

La Figura 5-7 es una representación 3D del primer conjunto de minas enterradas a una profundidad de 20 cm utilizando una antena de 800 MHz. Como se aprecia en la Figura 5-2, se identifican bien las dos minas, una en posición horizontal y la otra en posición oblicua. Cabe destacar que en la segunda mina se pierde algo de información, pero en el conjunto global se puede extraer el volumen de la mina y determinar su naturaleza. En la imagen todavía quedan rastros de ruido en la representación, aunque en este caso no entorpece la labor de la extracción volumétrica.

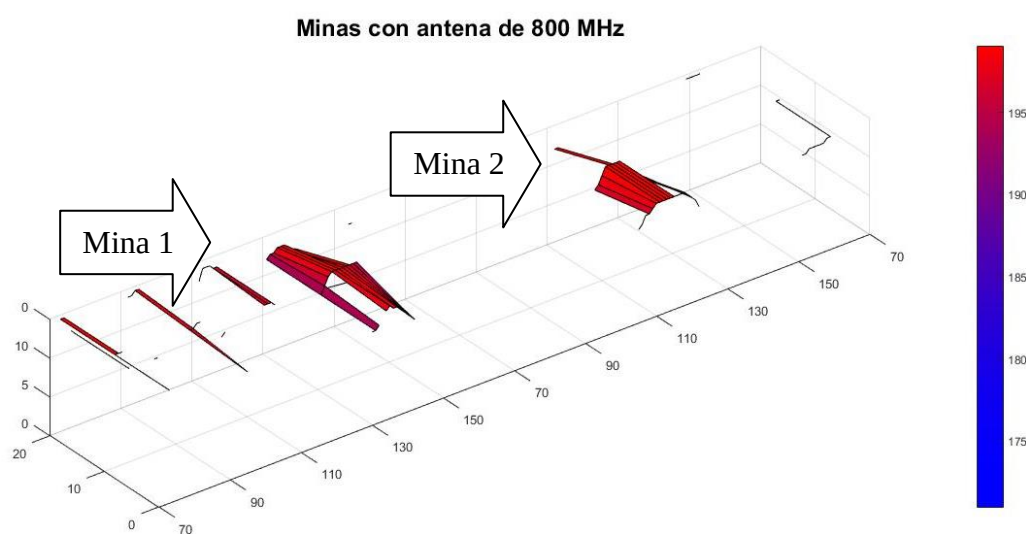


Figura 5-7 Representación 3D primer conjunto de minas con antena de 800 MHz.

Si observamos la Figura 5-7 se puede ver que en la representación 3D de las minas se pierde parte de la información de las mismas. Es decir, no se representan todos los puntos que se necesitarían para la representación completa de la mina. Esto es debido a que el objeto de estudio, la mina, es un objeto pequeño y el GPR no es capaz de hacer una toma de datos con más resolución. En este caso, la mina 1 es una mina en posición horizontal y se puede ver que está casi completamente representada. Por otra parte, la mina 2, en posición oblicua, no aparece completamente representada. Esto se debe a que durante el proceso de filtrado 2D, al no poder hacer una distinción perfecta entre señal y ruido, durante la eliminación del ruido se pierda información de la propia mina.

Este error se podría subsanar utilizando datos recogidos por diferentes antenas. Es decir, utilizar todas las ventajas ofrecidas por cada una de las antenas. Por ejemplo, utilizar la interpretación de la posición de la mina que se consigue con la antena de 800 MHz junto con la resolución que da la antena de 1 GHz. También se podría subsanar este error con el desarrollo de técnicas que permitan la correcta elección del umbral de amplitud. El umbral de amplitud variará dependiendo del medio donde realicemos el estudio por lo que se necesitaría desarrollar una técnica que nos permita la correcta elección del umbral. Por ejemplo, en misiones internacionales el medio serían carreteras de tierra. De este modo, se necesitaría establecer antes el umbral de amplitudes a la que se reflejan las minas en ese terreno para una correcta identificación de las minas.

5.2.2 Segundo conjunto de minas: antena de 500 MHz

En este caso, como se aprecia en la Figura 5-8, debido a la frecuencia utilizada es imposible saber la situación exacta de las minas. Deberían aparecer 3 minas en diferentes posiciones pero, una vez aplicado el umbral de amplitudes, solo se distingue una de ellas, incluso generando un falso positivo. También hay que tener en cuenta que los datos GPR que se han obtenido no son solo para las tres minas con las que estamos trabajando sino que se puede llegar a detectar más minas, como se puede ver en la Figura 5-4 Aunque en el estudio es un falso positivo, existen otras minas en este radargrama. Son falsos positivos debido a que se encuentran a una profundidad distinta de las minas que son objeto de estudio.

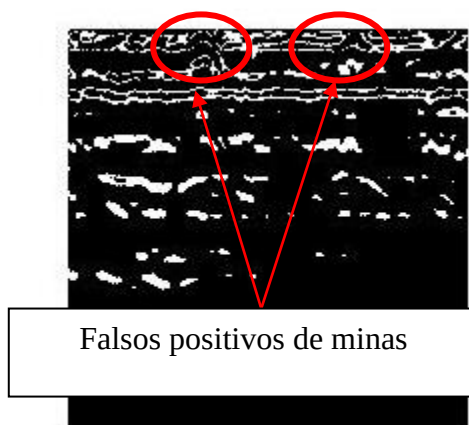


Figura 5-8 Imagen 2D con datos GPR de la antena de 500 MHz donde se observa un falso positivo.

Como se puede comprobar en la Figura 5-8 no se distingue entre ruido y señal. Este es debido a que en el proceso de filtrado de la imagen 2D se ha perdido parte de información de las minas. También es debido a que con los umbrales de amplitud escogidos, con esta antena, la resolución para distinguir entre mina y ruido es mala (al estar esta antena más enfocada a estudios más profundos, aproximadamente 3-4 m dependiendo el medio de propagación). Esta frecuencia presenta una resolución vertical en torno a los 20 cm.

En cualquier caso, habría que llevar a cabo un entrenamiento del usuario de la herramienta para la distinción de falsos positivos. Con práctica se puede llegar a distinguir entre ruido y mina. Además, las minas tienen una reflexión característica que ayuda a su reconocimiento por parte del usuario.

5.2.3 Segundo conjunto de minas: antena de 800 MHz

La Figura 5-9 muestra la imagen 3D obtenida con la herramienta con la antena de 800 MHz a una profundidad de 30 cm la primera mina y las dos siguientes a una profundidad de 25 cm. La selección de las profundidades se hace en función de la profundidad de enterramiento del artefacto, ya que la resolución vertical de la antena de 800 MHz (aproximadamente 12 cm) permite identificar incluso los artefactos más superficiales. A esta profundidad, se identifican fácilmente todos los elementos que fueron enterrados según el croquis de la figura 5-4. Se pueden diferenciar claramente las tres minas y sacar fácilmente el volumen de ellas. Cada traza en esta toma de datos estaba a 5 cm una de la otra por lo que se puede apreciar una resolución mayor y una forma de la mina más cercana a la realidad, pero seguimos teniendo el mismo problema que en todos los casos, que es que debido a la gran separación entre trazas y a el pequeño tamaño de la mina, no se consigue una imagen nítida de la forma de una mina, simplemente una forma aproximada.

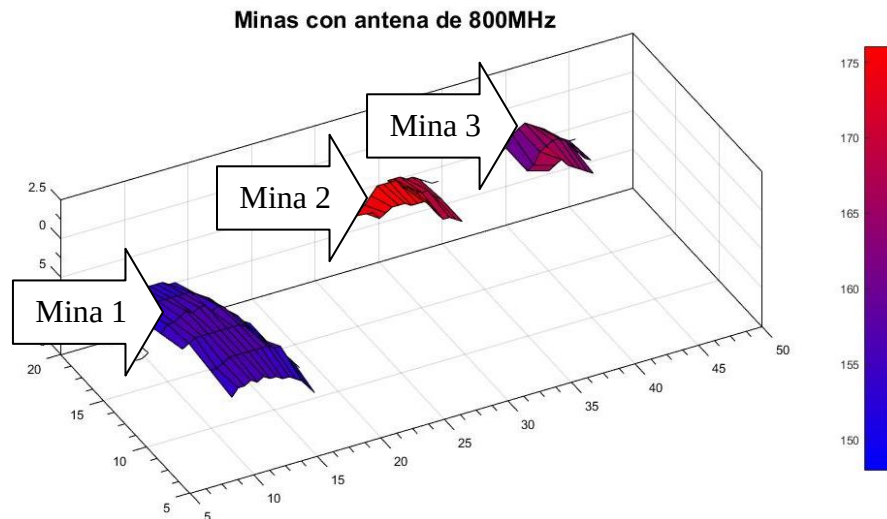


Figura 5-9 Representación 3D segundo conjunto de minas con antena de 800 MHz.

En este caso, al igual que con el primer conjunto de minas, se obtiene una imagen clara de las minas pero se puede apreciar que en las mina 2 y 3 se pierde información. La mina 1, en posición horizontal, aparece representada completamente. Las minas 2 y 3, debido a su colocación vertical/oblicua, aparecen con cierto grado de pérdida de información. Aún así, se puede identificar su posicionamiento y colocación. El aspecto observable es la variación de profundidad de cada mina (estaban enterradas a 30 cm, 25 cm y 25 cm, respectivamente). Como se aprecia en la imagen, la mina 1 está por debajo de las otras dos y las minas 2 y 3 en la misma profundidad.

5.2.4 Segundo conjunto de minas: antena de 1 GHz

En la Figura 5-10 se muestra la imagen 3D obtenida a partir de los datos GPR de la antena de 1 GHz a profundidades de entre 25 y 30 cm. La resolución que se alcanza con la antena de 1 GHz es mayor, se distingue con bastante claridad la posición y la colocación de las diferentes minas, excepto la mina central. En contraposición con la antena de 800 MHz, se puede ver que se representan con más claridad ambas minas, son trazas más suaves y el contorno de las minas se ve, la primera se encuentra en disposición horizontal y la tercera en disposición oblicua. La resolución vertical de esta frecuencia es de aproximadamente 9 cm.

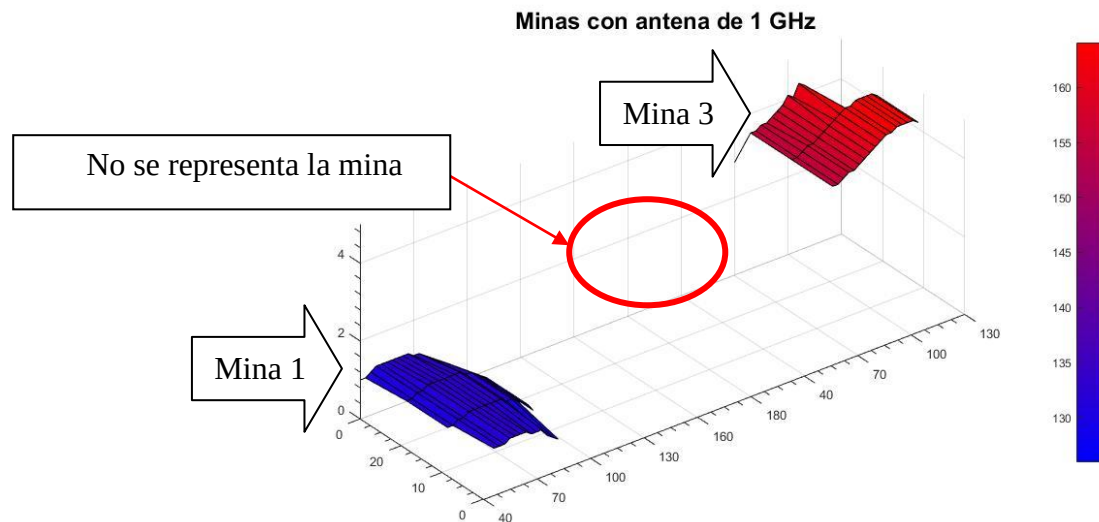


Figura 5-10 Representación 3D del segundo conjunto de minas con una antena de 1 GHz.

No se llega a representar la mina central debido a que aparece un nivel de ruido mayor y la herramienta informática no es capaz de distinguir entre mina y ruido debido a que los umbrales de intensidad son similares. Cabe destacar que esto es un problema que se encuentra en el filtrado de la imagen y procesamiento 2D como se aprecia en la Figura 5-11. En ella se observa que la reflexión producida por la mina es similar a la del ruido. Como ya se ha mencionado, sería necesario un entrenamiento de la herramienta en el medio que se vaya a trabajar para evitar este tipo de problemas.

Otra de las razones por la que no se llega a distinguir entre ruido y señal es por el tamaño de la mina. Al ser un objeto de pequeño tamaño dificulta más la labor de identificación de las minas.

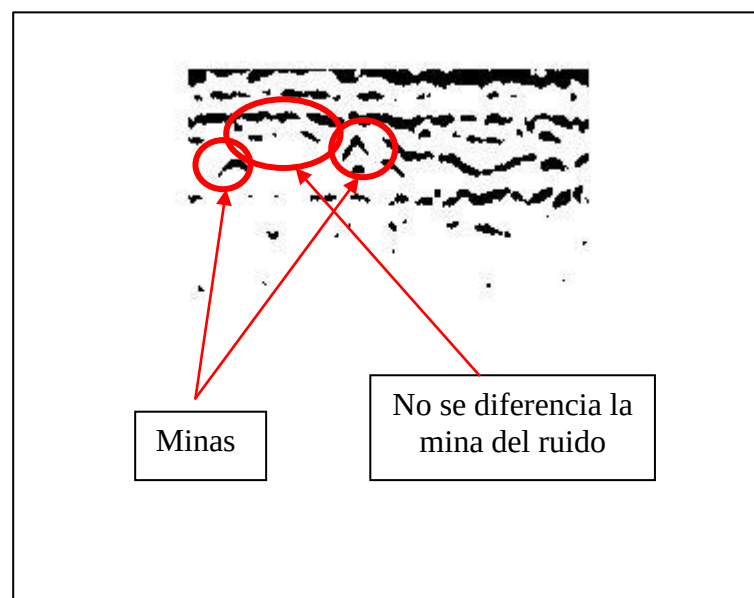


Figura 5-11 Imagen 2D del conjunto de minas de 1 GHz.

5.2.5 Segundo conjunto de minas: antena de 2,3 GHz

A priori, esta antena de 2,3 GHz es adecuada para detectar objetos enterrados a poca profundidad dada su gran resolución (con una resolución vertical de 4-5 cm). Aún así, aparece el mismo problema indicado en todas las demás pruebas. Es imposible distinguir una vez aplicado en umbral de amplitudes lo que es mina y lo que es ruido debido en parte a la poca penetración de la señal. Con esta

antena, y en este medio, se podrían alcanzar los 40-50 cm de profundidad. Sin embargo, al estar las minas situadas a 25-30 cm, casi al final de la ventana de tiempo, la señal ya estaría gravemente afectada por atenuación y se hace difícil la identificación.

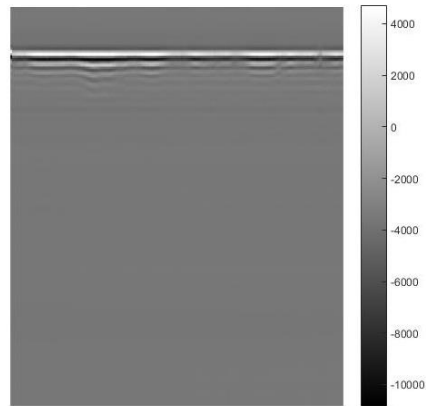


Figura 5-12 Radargrama con datos de antena de 2,3 GHz donde se puede observar que apenas hay reflexión.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Tras la obtención de resultados aplicando la metodología y el procedimiento estudiado, así como poniendo en funcionamiento la herramienta informática, se puede decir que se han cumplido con éxito todos los objetivos generales marcados al inicio de este trabajo. No se puede decir lo mismo de todos los objetivos específicos, ya que hay ciertas carencias de la herramienta informática y se necesitarían mejoras que se exponen a continuación.

El elemento más difícil y que más problemas ha causado es el filtrado de las imágenes 2D, ya que gran parte del proceso debe hacerse manualmente, introduciendo los umbrales de amplitud deseados para detectar las minas. La primera parte del filtrado se ha hecho usando el programa ReflexW para hallar los umbrales de reflexión de las minas. Es decir, la herramienta necesita un entrenamiento previo para poder hallar el umbral de amplitudes asociadas al artefacto acorde con el medio a utilizar (en el caso de nuestra herramienta este entrenamiento se ha llevado a cabo directamente identificando el umbral de amplitudes con el programa ReflexW). Dependiendo del medio y las características del mismo, los umbrales de amplitudes variarán. Si el suelo es húmedo, seco, o con numerosas perturbaciones, el umbral de amplitud variará. Una vez definida la amplitud de reflexión, aparece el problema de la identificación de las minas. Si hay mucho ruido será difícil, y si no se establece bien el umbral de amplitudes la identificación de la mina necesitará más entrenamiento de la herramienta para su correcto funcionamiento.

Una vez desarrollada la herramienta de extracción volumétrica 3D, se ha evaluado la viabilidad de la misma, como se puede comprobar en el Capítulo 5 de esta memoria. En referencia a la elección de los datos GPR sería conveniente, la adecuación de ciertos parámetros específicos, como por ejemplo que la separación entre trazas sea menor para poder representar la mina con más detalle o que varios parámetros configurados como son la ventana de tiempos y las muestras, fueran mayores para así un mayor alcance de detección en términos de profundidad. A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede comprobar que la antena que ha proporcionado mejores resultados ha sido la de 800 MHz, permitiendo estimar el volumen que ocupan las diferentes minas y, a partir de ahí, identificar tanto el tipo de mina que es como su disposición. En ambos conjuntos de datos son las que mejor relación representación-detección han mostrado. Es verdad que con la antena de 1 GHz se han obtenido mejores resultados a la hora de la representación (debido a la separación de trazas ha pasado de 10 cm a 5 cm), pero el problema de la no identificación de una de las minas reduce mucho el nivel de adecuación y el riesgo de no detección. Las antenas de 500 MHz y 2,3 GHz han mostrado que no son idóneas para la herramienta por su detección inexacta de las minas. En el caso de la antena de 500 MHz, la resolución de la señal resultó insuficiente para la detección; mientras que, en el caso de la

antena de 2,3 GHz, fue la capacidad de penetración en el suelo la que limitó el alcance y detección de las minas.

Como conclusión, los objetivos generales se han cumplido y el mayor problema está enfocado en el procesado 2D de los datos. En este proceso, convendría automatizar la detección para que no dependa tanto de la intervención del usuario. De este modo se llegaría a resolver el problema de cara a agilizar la detección de artefactos explosivos enterrados en operaciones reales. A continuación se recomiendan una serie de pautas a seguir durante la toma de datos para la estandarización de los mismos, así como una serie de líneas futuras de acción sobre la herramienta para la automatización de la detección.

6.2 Líneas futuras

El empleo de datos GPR para una representación 3D a nivel militar conforma un punto importante a desarrollar en los conflictos actuales como método para salvar vidas. Llegar a dotar a pequeñas unidades con un sistema de representación 3D en tiempo real de minas puede ser la diferencia que evite más tragedias. Hay que tener en cuenta que este tipo de herramientas necesita un soporte informático para su funcionamiento, por lo que lo hace ideal para ser usado en vehículos. De esta manera, sería de gran ayuda implementar este tipo de herramientas de representación 3D en las cadenas logísticas (S-4) hasta casi nivel SCC (Sección). En estas pequeñas unidades es dónde esta herramienta marcará la diferencia y abrirá un nuevo camino hacia la detección e identificación de minas en un futuro. Todo esto se puede llevar a cabo ya sea en misiones internacionales del ejército español o en misiones de paz. En el caso de aparición de IED o de UXO también sería necesaria una implementación de procedimientos operativos eficaces para la utilización de esta herramienta. La ventaja que se observa es que no se necesita un alto grado de conocimiento para la utilización de la misma. Con un conocimiento básico de sistema casi cualquier miembro de las fuerzas armadas podría utilizarla sin necesidad de adquirir conocimientos de grado avanzado.

Como continuación y mejora a esta herramienta y en el desarrollo de la capacidad de representación 3D de minas o artefactos explosivos enterrados se plantean las siguientes prioridades como trabajos futuros:

- Mejora del filtrado 2D en el paso previo a la representación 3D mediante la implantación de un sistema automático de filtrado total. Se trata de eliminar en la medida de lo posible todas las partes realizadas de forma manual.
- Combinación de muestras de datos tomadas a diferentes frecuencias para mejorar la detección en el filtrado 2D y la representación 3D. De esta manera se podrían aprovechar las ventajas de muestrear a distintas frecuencias.
- Desarrollar técnicas que permitan la elección del umbral de amplitudes en función del medio donde nos encontremos sin necesidad de realizar un entrenamiento.
- Utilizar geoposicionamiento durante la toma de datos GPR para estandarizar los parámetros de distancias para el mejor funcionamiento de la herramienta permitiendo una mayor automatización.
- Estudiar la viabilidad económica de la implantación de herramientas de detección y representación 3D en las unidades de Infantería de Marina.
- Diseño y elaboración de un vehículo de reconocimiento PIRAÑA o URO VAMTAC que incluya una herramienta 3D para pronta detección e identificación de artefactos explosivos enterrados.
- Análisis del funcionamiento de la herramienta con minas enterradas en configuración superpuesta.
- Análisis del funcionamiento de la herramienta 3D con minas antipersona.

- Comprobación del funcionamiento de la herramienta de representación 3D con minas adyacentes, sin apenas separación entre ambas, en base a la resolución de los datos recogidos.
- Exportación de los resultados a herramientas de diseño gráfico CAD.
- Realización de una herramienta de clasificación que permita la identificación del tipo de mina a partir de los resultados obtenidos con la herramienta.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Defensa, “La seguridad frente a artefactos explosivos”. Documentos de Seguridad y Defensa., Vols. %1 de %228, pp 15-225, 2009.
- [2] «Ministerio de Defensa, España,» [En línea]. Available: www.defensa.gob.es. [Último acceso: Febrero 2016].
- [3] K. Kowalenko, Saving lives, one land mine at a time. The IEEE Institute 28:10–11, 2004.
- [4] M. Blasi, S. Espósito, P. Frezza Nocito, L. Pajewsky, L. Porrini, G. Schettini y Twizere, FDTD simulation of GPR measurements in a laboratory sandbox for landmine detection. In: Proceedings of the 5th international workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR’09, Granada, 2009.
- [5] [En línea]. Available: http://www.boston.com/bigpicture/2010/07/afghanistan_july_2010.html.
- [6] Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológico, 2008-2011.
- [7] E. Ejercito de Tierra, MANDO DE ADIESTRAMIENTO Y DOCTRINA "Orientaciones Batallón de Zapadores", 2005.
- [8] M. Solla, X. Núñez Nieto, A. Novo y H. Lorenzo, Uso del Georradar en Aplicaciones Militares: Caso Particular de Detección de Túneles Subterráneos, 2014.
- [9] J. Van Deen y K. Feijter, Three-Dimensional Ground Probing Radar. Geological Survey of Finland Special Paper 16:35-40, 1992.
- [10] A. M Green, 3-D georadar mapping: Looking into the subsurface. Environmental and Engineering Geoscience 2(2):195–200, 1996.
- [11] J. Leckebusch, Ground-penetrating radar: a modern three-dimensional prospection method. Archaeological Prospection 10:213–240, 2003.
- [12] M. Solla, A. Novo, H. Lorenzo y F. Rial, From Pseudo-3D to Full-resolution GPR Imaging of a complex Roman site. Near Surface Geophysics 10:11–15, 2012a.
- [13] D. Danie, Locating Caves, Tunnels and Mines. Geophysics: The Leading Edge of Exploration.

- Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma), 1998.
- [14] M. Sato, T. Kobayashi, K. Takahasi, J. Fujiwara y X. Feng, Vehicle-mounted SAR-GPR and its evaluation. In: Proceedings of SPIE 6217, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI, 62172H, 18 May 2006, 2006.
 - [15] D. Daniels, A review of GPR for landmine detection. *Sensing and Imaging: An International Journal* 7(3):90–123, 2006.
 - [16] «EPPS Aviation,» [En línea]. Available: <http://eppsaviation.com/about/the-lost-squadron/>. [Último acceso: 28 1 2016].
 - [17] J. Wang, Y. Li y Z. Zhou, Image Formation Techniques for Vehicle-Mounted Forward-Looking Ground Penetrating SAR. In: Proceedings of the international conference on information and automation, Changsha, 20–23 June 2008, 2008.
 - [18] G. Testafarim y D. Mali, GPR technologies for landmine detection. *International Journal of Computing Science and Communication Technologies* 5(1):768–774, 2012.
 - [19] R. Firoozabadi, E. Miller, C. Rappaport y A. Morgenthaler, Sub-surface sensing of buried objects under a randomly rough surface using scattered electromagnetic field data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(1):93–104, 2007.
 - [20] M. Sato, J. Mujiwara, Z. Feng, Z. Zhou y T. Kobayasi, «Development of a hand-held GPR MD sensor system (ALIS). Detection and Remediation technologies fos mines and minelike targets,» 2005.
 - [21] P. D. Gader, M. Mystkowsky y Y. Zhao, Landmine detection with ground penetrating radar using hidden Markov models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(6):1231–1244, 2001.
 - [22] M. A. González-Huici, Strategy for Landmine Detection and Recognition Using Simulated GPR Responses, Shanghai, 2012.
 - [23] E. E. Ligthart, A. G. Yarovoy, F. Roth y L. P. Ligthart, «Landmine detection in high resolution 3-D GPR images,» 2004.
 - [24] «GPR-SLICE,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.gpr-survey.com/>. [Último acceso: 15 2 2016].
 - [25] «Easy3D,» [En línea]. Available: <http://www.easy3d.co.il/en/>. [Último acceso: 15 2 2016].
 - [26] «MatGPR,» [En línea]. Available: <http://users.uoa.gr/~atzanis/matgpr/matgpr.html>. [Último acceso: 15 2 2016].
 - [27] «Mecánica cuántica, el espectro electromagnético.,» [En línea]. Available: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/cuantica/experiencias/espectro/espectro.html. [Último acceso: 5 2 2016].
 - [28] M. Solla, H. Lorenzo y V. Pérez-García, Ground Penetratind Radar: fundamentals, methologies and applications in structures and infrastructure.
 - [29] D. Goodman y L. B. Conyers, Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists, 1997.
 - [30] P. Annan, Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures and Applications. Sensors & Software Inc., 2003.

- [31] K. Majjala, Monitoring animal genetic resources and criteria for prioritization of breeds. Expert consultation on the management of global An. Gen. Res, 1992.
- [32] P. Saarenketo, Road analysis, an advanced integrated survey method for road condition evaluation., 1999.
- [33] R. Yelf, Where is true time zero? Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 20–24, 2004.
- [34] H. Jol, Ground penetrating radar: Theory and applications., 2009.
- [35] K. J. Sandmeier, «ReflexW Manual,» [En línea]. Available: <http://www.sandmeier-geo.de>. [Último acceso: 25 3 2016].
- [36] M. Solla Carracelas, X. Núñez Nieto, P. Gómez Pérez y H. Lorenzo Cimadevila, «Caracterización de la señal Georradar para la detección de explosivos enterrados,» II Congreso Nacional de i+d, 2014.
- [37] D. Grasmück y R. Scholz, Risk Perception of Heavy Metal Soil Contamination by High-Exposed and Low-Exposed Inhabitants: The Role of Knowledge and Emotional Concerns. Risk Analysis, 25, 611-622., 2005.

ANEXO I: CONTENIDO DEL PRIMER ANEXO

1. Función TransformarRD3:

```
function [ Matriz ] = TransformarRD3( Nombre, samples,traces)

% Esta función se encarga de convertir los archivos .rd3 obtenidos de los datos
% GPR en matrices para su posterior procesamiento y análisis.
% Es necesario tener el archivo .rad para poder utilizar la función. De ahí se
% sacarán las variables "samples" y "traces".
% Una vez que se llama a la función se deberá asignar un nombre para la matriz
% resultante, ejemplo: A1 = TransformarRD3 ('p25.rd3', 613, 253);

fid = fopen(Nombre,'r');
Matriz = fread(fid,[samples,traces],'int16');

fclose(fid);

end
```

2. Función FiltroRadargrama:

```
function [Y] = FiltroRadargrama( name,umbral1,umbral2,suelo)

% El funcionamiento de esta función se basa en la elección del umbral de
% amplitudes y el establecimiento del tiempo 0.

RadargramaenBruto = ((name)>(umbral1)).*((name)<(umbral2));
[Y] = RadargramaenBruto((suelo:(200+suelo)),(1:200));

imshow(Y);

end
```

3. Función Filtro2:

```
function [ Filtro ] = Filtro2( Perfil,x1,x2,y1,y2 )

% Esta función determina el ruido que vamos a eliminar eligiendo nosotros mismos
% las coordenadas donde se encuentra ruido para su posterior eliminación.

if max(max(Perfil(x1:x2, y1:y2)))==1;
    Perfil(x1:x2, y1:y2) = zeros(x2-x1+1,y2-y1+1);
end;

Filtro = Perfil;
imshow(Filtro);

end
```

4. Función CrearCubo:

```
function [ Ztotal ] = CrearCubo( Perfil,Numerodeperfil)

% Simplemente se crea un cubo para guardar todos los perfiles dentro y se utiliza
posteriormente para la función de representación 3D.

%Antes hay que crear Ztotal = zeros(eje1,eje2,TotalPerfiles);

Ztotal(:, :, Numerodeperfil)=Perfil;

end
```

5. Función representación3D:

```
function [ Minas ] = representacion3D( cubo,NumeroPerfiles,r,s,t )

% Con el cubo creado anteriormente se consigue la representación 3D de las minas.

Z = zeros(NumeroPerfiles,200);

for j=1:8;
    for i=1:200;
        pos = find(cubo(:,i,j)==1);
        if pos;
            z(j,i) = 200-min(pos);
        end;
    end;
end

z(z==0) = NaN;
surf(z);
daspect([r s t]);

map=[];
for n=0:256;
    map = [map; n^2/256^2 0 1-n^2/256^2];
end
colormap(map);

end
```