



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Empleo del GPR para detección de UXOs e IEDs

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jorge Rodríguez Moreno

DIRECTORES: Mercedes Solla Carracelas

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Empleo del GPR para detección de UXOs e IEDs

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

En los escenarios de operaciones bélicas y de misiones de mantenimiento de la Paz actuales, se desarrollan incontables acciones para luchar contra organizaciones terroristas de carácter generalmente radical islamista. Estas organizaciones atentan continuamente contra la vida de los militares españoles desplegados en operaciones de ámbito multinacional. La insurgencia instala IEDs (Dispositivos Explosivos Improvisados) en las carreteras a la espera del paso de un convoy, o atenta contra blancos de alto valor táctico, para obtener repercusiones, como norma general, a nivel estratégico y operacional, derivando en una desestabilización de las operaciones a nivel internacional.

A pesar de ser empleado en labores de desminado humanitario, el GPR (Ground Penetrating Radar) o georradar de penetración de subsuelo, es una técnica de detección no destructiva muy eficaz y polivalente que no se emplea a nivel de pequeña unidad militar y cuya aplicación en el ámbito de detección de los IEDs no ha sido explotada lo suficiente. Es por ello que se llevó a cabo el presente trabajo, para así, conseguir un estudio de la viabilidad del método para la aplicación en dicho campo. Para ello, se realizó una zona experimental emplazada en la Escuela Naval Militar, con el enterramiento de dos IEDs simulando una carretera o camino. A su vez, se empleó el GPR para comprobar la detección con la posterior interpretación mediante técnicas de procesado 2D y 3D y a mayores, se han utilizado herramientas de simulación numérica FDTD de la señal electromagnética para una mayor comprensión de la propagación de la misma en ambientes complejos.

PALABRAS CLAVE

Georradar, UXO, IED, 3D, Simulación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Departamento No.4 de Infantería de Marina, de la Escuela Naval Militar, la documentación y bibliografía necesaria para llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado y su estrecha colaboración con el pañol IM con el objetivo de proporcionar el material de artillería y explosivos necesarios para conseguir la elaboración de los IEDs. Además, agradecer a la Escuela Naval Militar la puesta en disposición de la zona experimental para el enterramiento de los dispositivos explosivos improvisados en el conjunto de instalaciones deportivas. Se agradece también al Grupo de Investigación de Geotecnologías Aplicadas de la Universidad de Vigo por poner a disposición del trabajo el equipo GPR para la consecución del estudio. Agradecer a mi directora de Trabajo de Fin de Grado, Mercedes Solla, por inculcar en mí las ganas y la dedicación para hacer de este trabajo un reto personal.

Para terminar, y no menos importante, dedicar el presente TFG a dos grandes personas; a mi padre, por enseñarme que los muros se nos presentan en la vida para demostrarnos cuánto queremos algo y a Eva Anleo, por el apoyo incondicional en esta carrera de fondo.

**“LAS GUERRAS VIENEN Y VAN, PERO MIS SOLDADOS
SERÁN ETERNOS”**

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Justificación del proyecto.....	9
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivos generales.....	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
2 Introducción a los IEDs.....	13
2.1 Componentes de un IED	14
2.1.1 Dispositivo de armado y disparo	14
2.1.2 Explosivo	20
2.1.3 Contenedor y potenciadores de efecto	22
2.2 Daños producidos por un IED.....	23
2.3 Clasificación. Tipos de IEDs	24
3 El Georradar	29
3.1 Evolución histórica	29
3.2 Fundamentos teóricos	30
3.2.1 Señal georradar y ecuaciones de Maxwell.....	30
3.2.2. Propagación de la señal y propiedades electromagnéticas del medio	31
3.3 Componentes del equipo.....	34
3.3.1 Antenas	35
3.3.2 Unidad de control	39
3.3.3 Odómetro	39
3.4 Ventajas e inconvenientes del GPR	39
3.5 Aplicabilidad del GPR	40
4 Estado del Arte	41
4.1 Aplicación del GPR en la detección de dispositivos explosivos	41
4.2 Técnicas de procesado y detección automática.....	42
4.3 Investigación y desarrollo en aplicaciones para IEDs	43
5 Desarrollo del TFG.....	49
5.1 Descripción de la zona experimental	49
5.2 Metodología para la adquisición de datos.....	52

5.3 Procesado de la señal	53
5.3.1 <i>Procesado 2D</i>	53
5.3.2 <i>Procesado 3D</i>	58
5.4 Simulación numérica (FDTD)	60
6 Resultados	63
6.1 Resultados 2D	63
6.2 Resultados 3D	65
6.3 Resultados sintéticos	68
7 Conclusión y líneas futuras	71
7.1 Conclusiones generales	71
7.2 Líneas futuras	72
8 Bibliografía.....	73
Anexo I: planos de los platos de presión	77
Anexo II: Datos para la simulación numérica (FDTD)	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Explosión de un IED en Afganistán [1].....	9
Figura 1-2 UXO [3].....	10
Figura 2-1 IEDs compuesto por dos proyectiles de 105mm de artillería [8]	13
Figura 2-2 Efectos de un IED sobre un vehículo MRAV (Mine Resistant Anti-Ambush Vehicle) [9].....	14
Figura 2-3 Componentes básicos de un IED	14
Figura 2-4 Bisección de una espoleta Q (izquierda) y espoletas alojadas en los proyectiles 155mm (derecha) [10].....	15
Figura 2-5 Tipos de dispositivos de armado.....	16
Figura 2-6 Dispositivos electrónicos más comunes	16
Figura 2-7 Dispositivos de activación por RF (izquierda); instalación de los dispositivos para disparo de IEDs al paso de un convoy (derecha) [11]	17
Figura 2-8 Cadena de IEDs (Daisy Chain) activados por cable eléctrico [12]	17
Figura 2-9 Inhibidor de frecuencias [13].....	18
Figura 2-10 Circuito o Tarjetas electrónicos [14]	18
Figura 2-11 Plato de presión para mecanizados y vehículos pesados (izquierda) y para vehículos ligeros (derecha).....	19
Figura 2-12 Montaje habitual de un IED con un plato de presión	19
Figura 2-13 Cuadro resumen de la clasificación de los explosivos.....	20
Figura 2-14 Cebos (Explosivos primarios) [15].....	21
Figura 2-15 Explosivos militares (UPD/ UDP) , cargas huecas y cordón detonante [16]	21
Figura 2-16 Dinamita empleada en voladura de roca [17]	22
Figura 2-17 Resumen de tipos de confinamiento	22
Figura 2-18 Mochila explosiva preparada con metralla primaria (clavos, tuercas y tornillos) Caso 11-M [18]	23
Figura 2-19 Cono de proyección cónica de una explosión [19].....	24
Figura 2-20 Clasificación de los IEDs	24
Figura 3-1 Diagrama espacial - Lost Squadron y radargrama (imagen georradar) obtenido	29
Figura 3-2 Onda armónica plana electromagnética con la polarización eléctrica y los campos magnéticos.	31
Figura 3-3 Forma de la señal (a) y espectro (b) del impulso generado por una antena de georradar de 900 Mhz.....	32
Figura 3-4 Proceso de adquisición (a), radargrama en formato wiggle (b) y formato line scan (c).33	
Figura 3-5 Equipo GPR-Ramac Mala Geoscience utilizado para el desarrollo del presente trabajo	35

Figura 3-6 Antena biestática apantallada de 500 Mhz (izquierda) y antena biestática de 200 Mhz sin apantallar (derecha)	35
Figura 3-7 Esquema de Resolución Vertical y Horizontal	37
Figura 3-8 Foto de la unidad central (RAMAC Multi Channel CU-II)	39
Figura 4-1 El Husky (2G VMMD) desarrollado por DCD Protected Mobility [57].....	44
Figura 4-2 Visor 2500 GPR de NIITEK [58].....	45
Figura 4-3 PEROCC basado en la excavadora CATERPILLAR [59]	46
Figura 4-4 Vehículo Minestalker II [60]	46
Figura 4-5 Montaje del COBHAM sobre Land Rover – DEFENDER [61]	47
Figura 4-6 Vehículo Robot MACE de MIRA ROBOTICS [62].....	48
Figura 5-1 Escenario simulado y zona de estudio en la ENM de Marín	49
Figura 5-2 Esquema del circuito empleado en la fabricación de los IEDs.....	51
Figura 5-3 Croquis y medidas del posicionamiento de los componentes (izquierda) y foto del enterramiento de los IEDs 1 y 2 (derecha).....	52
Figura 5-4 Obtención de los datos GPR en la zona experimental.....	53
Figura 5-5 Página principal del software ReflexW	53
Figura 5-6 Granada Mortero M-81 mm	54
Figura 5-7 Archivo .rad (txt)	54
Figura 5-8 Importación del archivo en ReflexW.....	55
Figura 5-9 Vista wiggle-window para determinación de tiempo cero	55
Figura 5-10 Introducción del “start time= -3ns”	56
Figura 5-11 Datos GPR antes (arriba) y después (abajo) de aplicar un filtro de frecuencia vertical (dewow)	56
Figura 5-12 Configuración de la función ganancial	57
Figura 5-13 Datos GPR después de aplicar la ganancia.....	57
Figura 5-14 Configuración de “Subtracting average” en ReflexW	58
Figura 5-15 Datos GPR después de aplicar “subtracting average”	58
Figura 5-16 Datos GPR finales tras la reducción de la ventana temporal.....	58
Figura 5-17 Forma en la que se genera un cubo 3D y slices a partir de radargramas.....	59
Figura 5-18 Página principal del módulo de interpretación 3D del software ReflexW	59
Figura 5-19 Cubo 3D generado para el caso del UXO de la Figura 5-6 y time-slice horizontal a 20 cm de profundidad mostrando la huella del artefacto	60
Figura 5-20 Archivo .in proyectil y su medio medio “arena”	61
Figura 6-1 Radargrama obtenidos con una frecuencia de 800 Mhz para los dos proyectiles de artillería (105 mm del IED 1 a la izquierda y 155 mm del IED 2 a la derecha)	63
Figura 6-2 Radargrama obtenido con una frecuencia de 800 Mhz donde figuran los conductores del IED 1 (No.6) y el proyectil de 155 mm del IED 2 (No.2)	64

Figura 6-3 Radargrama obtenido con una frecuencia de 800 Mhz del plato de presión del IED 1 (No.3) y los conductores del IED 2 (No.6)	64
Figura 6-4 Radargrama obtenido con una frecuencia de 800 Mhz del plato de presión del IED 2 (No.4)	64
Figura 6-5 Imagen 3D y cubo 3D generados a 20 cm con la antena de 800 Mhz.....	65
Figura 6-6 Procesado 3D de la garrafa a 30 cm de profundidad	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de dispositivos de disparo remoto por RF	17
Tabla 2-2 Resumen gráfico de la clasificación de IEDs [1] y [16]	27
Tabla 3-1 Permitividad, conductividad eléctrica y velocidades de los diferentes materiales [39]...	34
Tabla 3-2 Tipos de antenas según frecuencia y profundidad de penetración.....	36
Tabla 3-3 Resultado de los cálculos teóricos	38
Tabla 4-1 Programas de desarrollo de GPR para la detección de minas.....	43
Tabla 5-1 Descripción del material empleado.....	51
Tabla 6-1 Diferencia de contraste dieléctrico entre los materiales de los platos de presión	66
Tabla 6-2 Resultados 3D para los IEDs 1 y 2	67
Tabla 6-3 Modelos importados y los radargramas sintéticos obtenidos en GprMax2D	68

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación del proyecto

La seguridad constituye un reto global de primera magnitud cuya importancia se ha incrementado debido a los acontecimientos internacionales y a los cambios sociales que se manifiestan en un contexto mundial. Con el objetivo de protegernos de amenazas tales como el empleo de explosivos con fines terroristas, es necesario que invirtamos en conocimiento y tecnología, o en un sentido más amplio y completo, impulsando la investigación, el Desarrollo y la Innovación (I+D+i), que es la herramienta imprescindible en el área de seguridad [1].

En la lucha contra el terrorismo, uno de los desafíos más importantes es la lucha contra el empleo de explosivos o artefactos explosivos con fines terroristas, ya que atentan tanto a la seguridad de las tropas de nuestras Fuerzas Armadas (FAS) desplegadas en misiones internacionales, como a la seguridad interior. La amenaza que deriva de los artefactos explosivos constituye una cadena de actividades perfectamente distribuida en el tiempo: financiación, acopio de material, transporte, ensamblaje, planificación, colocación, detonación y una explotación propagandística de la acción. Tener la capacidad para contrarrestar o disminuir la efectividad de estas actividades forman el conjunto de tareas en la lucha contra los artefactos explosivos, las cuales se pueden resumir en: predicción, prevención, protección, neutralización y finalmente análisis forense del incidente. Debido a que todas ellas están en orden cronológico, queda clara la importancia de enfrentar el problema cuanto antes para reducir los efectos de los artefactos explosivos.



Figura 1-1 Explosión de un IED en Afganistán [1]

De ahora en adelante, objeto de este estudio, denominaremos artefacto explosivo improvisado con la abreviatura IED, iniciales de su denominación inglesa “Improvised Explosive Device”. Se define como “un artefacto ubicado o fabricado de forma improvisada, incorporando agentes destructivos, nocivos letales, químicos incendiarios o pirotécnicos y diseñado para destruir o incapacitar, acosar o

distraer”. Puede incorporar material militar pero normalmente se idea a partir de componentes no militares [2]. El término improvisado no debe llevar a considerar un IED como un sistema poco eficaz, elaborado, o carente de tecnología y sin planificación previa. La mayoría de las acciones terroristas en las que se emplean IEDs son la base de la amenaza de nuestras FAS y es un problema al que se ha tenido que hacer frente desde hace décadas en operaciones y misiones. En el ámbito militar, la intervención de las Fuerzas Armadas en ambientes bélicos fuera del territorio nacional, afronta las siguientes características:

- Combates de media intensidad con alta letalidad.
- Operaciones de Paz.
- Ayuda humanitaria.

Además, dicho teatro de operaciones de nuestras FAS está muy extendido geográficamente, lo que hace que no sea homogéneo, pero podemos afirmar que en las zonas de mayor riesgo la amenaza sigue siendo asimétrica y puede encuadrarse en un entorno generalmente urbano o de difícil geografía. Como máxima expresión de la amenaza asimétrica, un IED presenta unas ciertas características muy peculiares: evoluciona y cambia en cortos periodos de tiempo, es ubicua y descentralizada, asimétrica en costes y tiempo, no tiene inconvenientes en provocar daños desproporcionados, se emplean tecnologías de fácil acceso de forma innovadora y combinada a procedimientos rudimentarios; todo ello encaminado a conseguir efectos como: fracturar alianzas, aterrorizar a la población, influenciar la opinión tanto pública como política, debilitar gobiernos apoyados por operaciones de apoyo (por ejemplo, Afganistán), influir bajas y minar la moral de las tropas así como producir bajas en la población civil.



Figura 1-2 UXO [3]

La justificación principal de este trabajo se debe a que un IED puede presentar baja probabilidad de detección, ya que se fabrican de múltiples formas con diferentes contenedores y materiales (metal y plástico fundamentalmente). Además, los IEDs y sus Tácticas, Técnicas y Procedimientos (TTPs) se experimentan cada día, lo que permite una rápida evolución y adaptación de los mismos a las soluciones usadas por los diferentes ejércitos haciendo la lucha contra IEDs realmente difícil debido a su carácter asimétrico e improvisado y a su laboriosa detección.

Debido a que esta amenaza es común al resto de países, es de destacar la labor de organismos internacionales como la OTAN y la Agencia Europea de Defensa (EDA) iniciando programas y creando centros y organismos con el objetivo de hacer frente a las amenazas que suponen los IEDs. Todos ellos con objetivos similares como por ejemplo, el Force Protection Joint Investment Programme de la EDA o el MOD (Counter Terrorism Science and technology Centre) en el Reino Unido.

Dentro de la alianza, existen dos organismos con un papel destacado en operaciones de desminado: el Mando Aliado de Transformación (ACT) de la OTAN y la Conferencia de Directores Nacionales de Armamento (CNAD). Por un lado, el ACT ha estado trabajando desde el año 2004 en el desarrollo del

concepto y todos los factores relativos a la experimentación para la lucha contra IEDs, definiendo así el objetivo del concepto Contra-IED, C-IED (Counter-IED), como el método para aportar una estrategia completa e integrada en la derrota de los IEDs. Dicho concepto se centrará principalmente en niveles tácticos y operacionales teniendo en cuenta que todos los IEDs en el escenario actual se emplean a nivel táctico (pequeña unidad) con la intención de causar impactos a nivel estratégico.

Por otro lado, en la CNAD se ubica todo el conjunto de medidas que se determinaron en la cumbre de Estambul del 28-29 de junio de 2004, con el fin de consolidar la contribución de la Alianza en la lucha contra el terrorismo y que se recogieron en el Programa de Trabajo de Defensa Contra el Terrorismo, POW-DAT (Programme of Work-Defense Against Terrorism), recogiendo así los siguientes objetivos relacionados a los IEDs:

- Mejorar la comprensión sobre construcción, empleo y efectos de los IEDs.
- Desarrollar equipos, y técnicas para la detección de artefactos explosivos o de señales de dispositivos detonadores, de los talleres donde se fabrican o de los individuos que los fabrican.
- Desarrollar sistemas para destruir o anular IEDs por pre-detonación o perturbación.
- Desarrollar procedimientos, estándares y doctrinas para la detección y derrota de IEDs (TTPs)

Ciñéndonos al ámbito de este trabajo –empleo del GPR para detección de UXOs e IEDs–, las naciones e industria están desarrollando numerosas y variadas soluciones técnicas para esta lucha, tanto en el entorno de defensa como en el de seguridad. Estos esfuerzos han resultado en grandes soluciones y sistemas tecnológicos. Sin embargo, la gran mayoría de estas soluciones y sistemas están basados en sistemas de última generación y no poseen la madurez ni las prestaciones necesarias para contrarrestar la amenaza IED en todos los escenarios y sus variantes posibles. A modo de ejemplo, la detección a distancia de los IEDs sigue siendo uno de los grandes desafíos tecnológicos.

Asimismo, dicha inmadurez y la rápida necesidad de estas tecnologías y soluciones, han motivado el incremento de experimentación con tecnologías y sistemas de otras áreas y entornos civiles. No obstante, a pesar de tener toda esta tecnología, las técnicas más habituales utilizadas para la detección de minas son manuales, donde destaca la detección mediante punzón y la remoción mediante una cuerda con gancho metálico a distancia. La primera, consiste en emplear un palo rígido (punzón) como herramienta de apoyo para ir palpando el suelo formando un pequeño ángulo (típicamente 30°). Esta técnica, aunque eficaz, es lenta y sumamente peligrosa para los artificieros. La segunda consiste en lanzar una cuerda con un gancho para ir levantando parcialmente parte del terreno y detectar el IED. En caso de ser detectado, a su vez puede ser removido. Sin embargo, esta técnica es peligrosa debido a que la cantidad de explosivo y radio de acción es desconocida.

Una de las técnicas comúnmente utilizadas para la detección de UXOs e IEDs es el detector de metales (MD). El MD básico utilizado para la detección de minas, basado en el fenómeno de la interferencia electromagnética (EMI), funciona midiendo la perturbación de un campo electromagnético que es emitido por la presencia de objetos metálicos en el suelo. El principal problema es que muchos de los IEDs actuales están elaborados de materiales cerámicos o plástico y contienen poco o ningún componente metálico, a excepción del detonador. Además, existe otra desventaja debido a que en las TTPs cada vez es menos habitual encontrar IEDs que estén fabricados completamente en metal. Esto puede conducir a un aumento de la tasa de falsas alarmas (FAR), con una evidente disminución de la eficacia del método [4].

Es por ello que se define la importancia del empleo del GPR en la detección de artefactos explosivos. El método GPR (georradar o radar de penetración terrestre) es una técnica extendida en la comunidad científica en el ámbito del desminado [5]-[6]. Esta técnica es ideal, si bien se basa en su seguridad y rapidez como técnica no destructiva [7], en comparación con otros procedimientos más invasivos tales como excavaciones o métodos de cata tradicionales. Además, la técnica GPR tiene la

capacidad de detectar tanto IEDs no metálicos como metálicos, ya que existe una diferencia de contraste electromagnético entre el suelo y el objeto enterrado.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivos generales*

- Comprobar la viabilidad del empleo del GPR, mediante metodologías de adquisición 2D y 3D, en labores de detección de IEDs.
- Análisis de IEDs de actualidad, así como componentes y configuración, para mayor realismo y relevancia del estudio.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Aprender e integrar los fundamentos teóricos y funcionamiento en campo del equipo GPR y sus componentes.
- Revisión y clasificación de IEDs; avances y actualidad en el empleo del método GPR para la detección de UXOs e IEDS, así como vehículos con soporte GPR actualmente disponibles en operaciones de desminado.
- Diseño de una zona experimental recreando, lo más próximo a la realidad, un ambiente de IEDs enmarcadas en el teatro de operaciones actual. Se incluye el diseño y fabricación de los dispositivos de activación mecánica (platos de presión) para el montaje de los distintos IEDs inertes que serán objetivos de estudio.
- Toma de datos GPR mediante metodologías de adquisición de datos 2D y 3D. Comparación de los resultados obtenidos y análisis de las metodologías.
- Empleo de simulación numérica de la señal electromagnética de apoyo a la interpretación de los datos tomados en campo. Asimismo, el uso de la simulación permitirá hacer un breve estudio que permita evaluar en qué grado dicha detección se vería influenciada por la presencia de ruido en el subsuelo (piedras, raíces, etc.).

2 INTRODUCCIÓN A LOS IEDS

Un IED se constituye a raíz de un UXO. Es decir, cualquier proyectil, munición o sub-munición que ha sufrido fallo en alguno de los pasos de su cadena de fuego y que ha quedado inutilizado, bien enterrado o parcialmente enterrado, en el teatro de operaciones. Dicho armamento es removido y almacenado por la insurgencia en países de medio oriente para la elaboración de los artefactos explosivos improvisados los cuales, unidos a la adopción de tácticas asimétricas de los oponentes, constituyen la principal amenaza de múltiples FAS en los conflictos actuales (países como Reino Unido, Holanda, Francia, Estados Unidos, Australia, Canadá y Alemania) [1].

Los IEDs son un conjunto de elementos (Figura 2-1) que están dispuestos de manera que, reuniendo determinadas condiciones y la excitación inicial suficiente, pueden producir una explosión (Figura 2-2). Los IEDs son armas muy efectivas que son empleados en los conflictos asimétricos de la guerra del terrorismo contra ejércitos regulares, Fuerzas Armadas y la población. Están diseñados para matar, destruir, herir o causar perjuicios; y sus inicios se remontan varios siglos atrás.

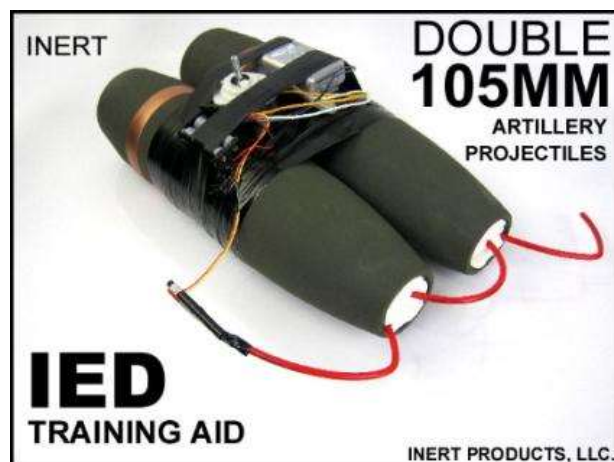


Figura 2-1 IEDs compuesto por dos proyectiles de 105mm de artillería [8]



Figura 2-2 Efectos de un IED sobre un vehículo MRAV (Mine Resistant Anti-Ambush Vehicle) [9]

En comparación con el armamento de las unidades convencionales militares, los IEDs son bastante más diversos por la gran variedad de elementos básicos y baratos que se pueden emplear, como son los sistemas de disparo, mecanismos de cebado, explosivo, confinamiento, etc. Todo el ingenioso diseño del dispositivo explosivo se ve condicionado por el acceso que tiene el terrorista a la tecnología de los diferentes componentes, el conocimiento y la capacidad de producción de la zona en la que se prepara o monta el IED.

Además, teniendo en cuenta que los IEDs fabricados por los insurgentes son muy adaptativos a las TTP's (Tácticas Técnicas y Procedimientos) empleadas por las unidades para contrarrestar los IEDs, y que desde el punto de vista de su operación y construcción son muy diversos, la protección contra IEDs debe ser igualmente adaptativa frente a los diversos cambios que se describirán en este apartado.

2.1 Componentes de un IED

Si se observa la composición de un IED desde el punto de vista técnico, se obtienen 3 componentes básicos (Figura 2-3): (1) Dispositivo de armado y disparo, (2) Explosivo y (3) Contenedor.

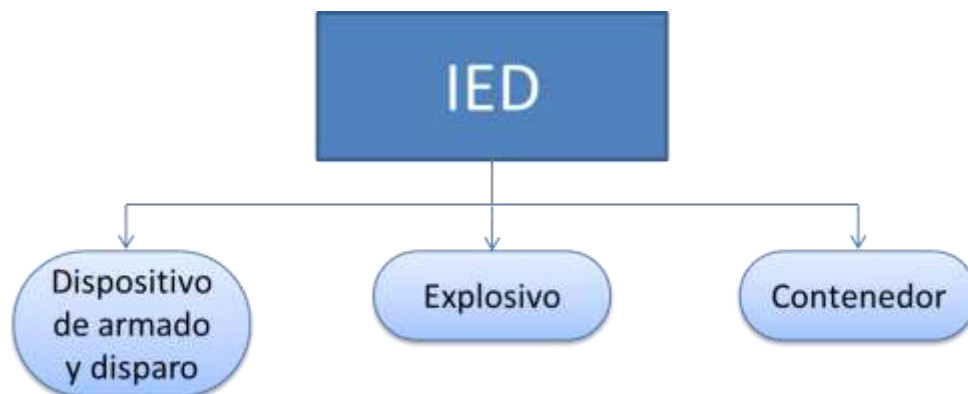


Figura 2-3 Componentes básicos de un IED

2.1.1 Dispositivo de armado y disparo

En las cabezas de guerra convencionales tanto de artillería de campaña o aérea, así como todas las municiones de las armas de apoyo a unidades convencionales, se observa la aplicación de mecanismos de seguridad y armado para separar el elemento de disparo (disparador o espoleta) del detonador que inicia la carga principal. Sin embargo, en los IEDs esa separación física no existe, ya que en muchas

ocasiones se suprime la espoleta y se introduce el cebo o detonador directamente en su cavidad. Es decir, en los IEDs lo que interrumpe la conexión entre el disparador y la carga del detonador es el mecanismo de armado.

Para entender mejor algunos de los conceptos introducidos anteriormente, deben quedar claros ciertos conceptos. Por un lado, la espoleta es el dispositivo que hace que una vez un proyectil ha sido lanzado y se encuentra en vuelo, este detone en el momento oportuno. Para ello, hay un gran número de tipos de espoletas a determinar en función del tipo de efectos que queremos conseguir sobre el blanco. Las espoletas más conocidas son:

- Ti (tiempos)- Se introduce una graduación temporal en la espoleta, que indica el tiempo que tardará en producirse la explosión del proyectil después de haber salido por la boca del cañón.
- Q (alto explosivo/percusión)- Una vez el proyectil se encuentra en vuelo, tras sufrir una aceleración determinada inicial si este incide en el terreno u objetivo con una inclinación determinada, se produce la explosión por impacto. (figura 2-4).
- WP (proximidad)- Se produce la explosión del proyectil a 7 m por encima del suelo, ya que es una espoleta que emite y recibe una señal.

Las espoletas están alojadas en la cabeza de los proyectiles mediante una rosca normalizada y no se introducen hasta que se tiene la certeza de que se realizará el tiro.



Figura 2-4 Bisección de una espoleta Q (izquierda) y espoletas alojadas en los proyectiles 155mm (derecha) [10]

La carga principal, de alta estabilidad, requiere de una elevada energía inicial para su explosión, de ahí que no se emplee una simple llama para desencadenar la cadena de fuego. Es decir, se requiere de otro petardo más pequeño o cebo, el cual es de alta sensibilidad y se transporta por separado, que inicie la carga principal.

El mecanismo de armado y disparo que se emplea en la activación de los IEDs se pueden clasificar en cuatro grandes grupos (figura 2-5): (1) Electrónico, (2) Mecánico, (3) Químico y (4) Biológico.



Figura 2-5 Tipos de dispositivos de armado

Se pueden combinar diferentes tecnologías, bien emplear una para el armado del dispositivo y otra para la detonación, o bien en paralelo como otro mecanismo de disparo para asegurar la detonación del dispositivo en caso de fallo del primer mecanismo.

Dispositivos de disparo electrónicos:

Son aquellos que emplean componentes electrónicos (Figura 2-6) para generar una señal que inicie la carga.

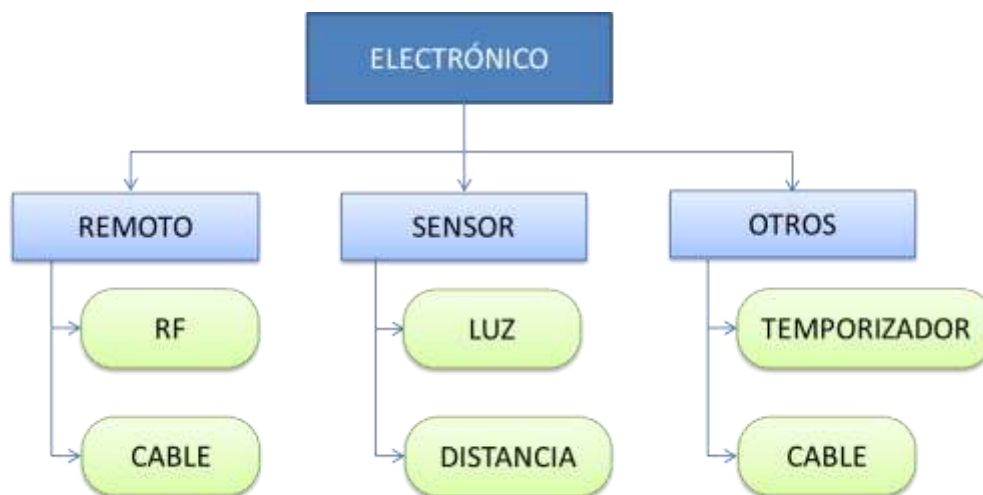


Figura 2-6 Dispositivos electrónicos más comunes

Atendiendo a las estadísticas, el empleo de los activadores remotos en IEDs ha crecido rápidamente en los últimos años, generalmente los dispositivos de Radio-Control (RC) por Radio-Frecuencia (RF) (Figura 2-7). A estos últimos pertenecen las radios, los walkie-talkies, teléfonos móviles, timbres inalámbricos, buscadores, así como todos aquellos dispositivos de RC que son de excesiva fácil adquisición. Además, dentro del gran grupo de componentes electrónicos de activación remota, también es habitual el cable eléctrico (Figura 2-8) debido a su sencillez de operación (interruptor, batería, detonador), aunque la distancia de operación es menor a los RC (desde 10m hasta unos pocos cientos de metros). En la figura 2-8, se puede observar lo que se conoce como “Daisy Chain”, una cadena en serie de proyectiles de artillería (más de seis) que se sitúan de manera que cubren toda la longitud de un convoy militar. Para que esta sea eficaz, normalmente viene acompañada de un medio material que haga reducir la marcha de la columna (autobús, vehículo averiado, etc.), de esta manera al insurgente (“trigger-man”) le es más fácil calcular el momento para detonar el IED.

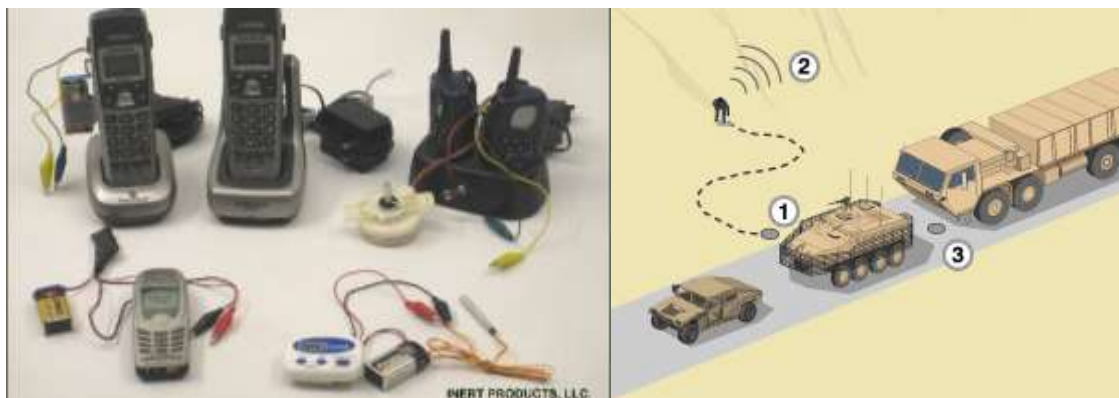


Figura 2-7 Dispositivos de activación por RF (izquierda); instalación de los dispositivos para disparo de IEDs al paso de un convoy (derecha) [11]



Figura 2-8 Cadena de IEDs (Daisy Chain) activados por cable eléctrico [12]

Teniendo en cuenta la clasificación de la (Figura 2-6), se citan a continuación algunas características de distintos dispositivos RF, a los que la frecuencia de nuestro GPR no influirá en absoluto debido a que trabajamos con una frecuencia mucho mayor.

TIPO	FRECUENCIA (Mhz)	APLICACIÓN ESPERADA	DISTANCIA OPERATIVA (M)
Controlado por RC	27 – 40	Urbana y Rural	Hasta 300
Buscador unidireccional	27	Urbana y Rural	600
Buscador bidireccional	150-450	Urbana	Depende de la frecuencia
Radioteléfonos	27-500	Urbana y Rural	100-6000
Telemandos de RF	N/D	Urbana	200
Timbres de puerta	N/D	Urbana	100

Tabla 2-1 Características de dispositivos de disparo remoto por RF

Los dispositivos RF se instalaban en el propio IED, adosado a los proyectiles. Sin embargo, debido a la aplicación de los inhibidores de frecuencia (Figura 2-9) por parte de las fuerzas multinacionales en los conflictos armados, la insurgencia se adaptó a las PTT's de los ejércitos; alejando del IED el dispositivo de RF y consiguiendo que estuviera fuera del alcance de los inhibidores (15 m) permitiendo la explosión de los artefactos. No obstante, debido a este factor, se comienza a ver la presencia y el empleo de circuitos redundantes en caso de que falle el primero. Por ejemplo un circuito RC y un circuito mecánico (de reserva).



Figura 2-9 Inhibidor de frecuencias [13]

Los dispositivos electrónicos con activación por sensor son fabricados con Circuitos o Tarjetas Electrónicas (PCB) que vienen listos para ser instalados como productos comerciales COTS (Comercial Off the Shelf), y los cuales son empleados para disparar directamente el IED (Figura 2-10).



Figura 2-10 Circuito o Tarjetas electrónicos [14]

Los sensores más habituales son los sensores infrarrojos, fotoeléctricos, RADAR y Ultra-sonido. También se pueden detectar temporizadores electrónicos de mayor precisión que los relojes mecánicos.

Dispositivos de disparo mecánicos:

Los dispositivos de disparo mecánicos son aquellos que emplean elementos mecánicos para cerrar el circuito eléctrico que activará el detonador. También se emplean dichos elementos mecánicos para iniciarlo directamente. Es otro de los medios de activación más empleados en escenarios de combate como son Afganistán e Irak, donde las estadísticas muestran que un gran porcentaje de IEDs son activados mediante platos de presión, cuya activación del explosivo se debe a una fuerza vertical determinada (el peso del vehículo).

Un plato de presión no es más que un interruptor conformado por dos maderas y en cuyo interior hay dos planchas metálicas. Dicha unión produce el cierre del circuito eléctrico y con ello la explosión

del IED. La separación entre dichas maderas y su longitud, se determinan en función del vehículo que se pretende active el artefacto.

Dicho plato a presión normalmente es instalado a no más de 15-20 cm de profundidad en las marcas de rodada de los vehículos, para que al paso de un vehículo militar, pesado o blindado, se produzca la explosión del IED.

En este trabajo haremos el estudio para la detección de dichos platos de presión mediante GPR. Por un lado, enterraremos un plato de presión para mecanizados y vehículos pesados, y otro para vehículos ligeros y vehículos civiles (Figura 2-11).

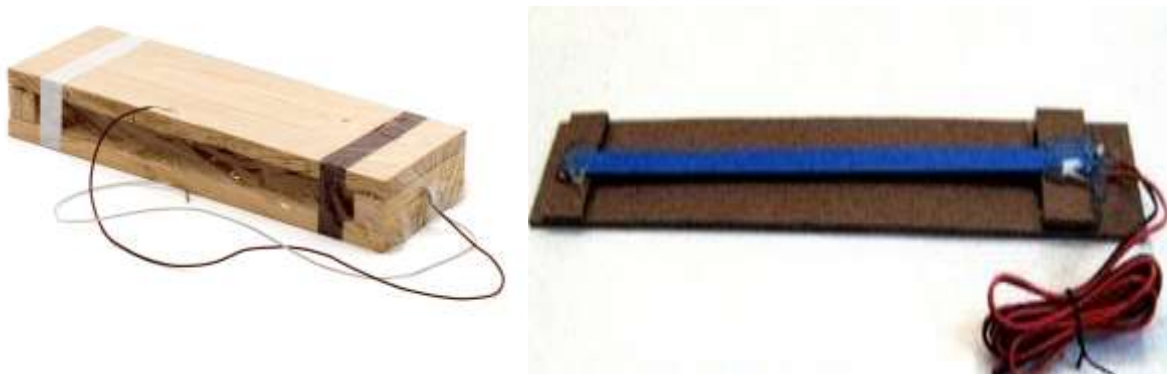


Figura 2-11 Plato de presión para mecanizados y vehículos pesados (izquierda) y para vehículos ligeros (derecha)

En la siguiente Figura 2-12 se muestra el montaje habitual para el empleo de los dispositivos de disparo mecánicos:



Figura 2-12 Montaje habitual de un IED con un plato de presión

Dispositivos de disparo químicos:

Los dispositivos de disparo químicos emplean sustancias químicas (reactivos) que, al entrar en contacto con la carga del IED, producen una reacción exotérmica que es capaz de iniciar la detonación. Son muy poco habituales dada la complejidad para determinar la cantidad necesaria para un tiempo determinado.

Dispositivos biológicos:

Hay dispositivos de disparo que emplean animales y plantas, pero su incidencia es extremadamente baja.

2.1.2 Explosivo

Todo explosivo tiene como base una sustancia química que una vez iniciada, tiene la capacidad de liberar su energía en un tiempo muy breve de tiempo (velocidades de miles de m/s) desarrollando una elevada potencia. Es decir, un material (químico/nuclear) que puede ser iniciado con la finalidad de liberar una rapidísima descomposición exotérmica auto-propagada, y que conlleva a la formación de una materia más estable, en su mayor parte gaseosa, de alta presión y alta temperatura. La efectividad que tiene un explosivo se mide en función de la cantidad de energía que libera, lo cual se refiere a “potencia” explosiva.

Los explosivos, Figura 2-13, se clasifican atendiendo a la susceptibilidad de ignición (facilidad para iniciar la reacción de descomposición) en: (1) explosivos primarios y (2) explosivos secundarios.



Figura 2-13 Cuadro resumen de la clasificación de los explosivos

Por un lado, los explosivos primarios (alta sensibilidad) son los explosivos iniciadores encargados de iniciar los explosivos secundarios (media y alta estabilidad); mientras que, por otro lado, los explosivos secundarios son aquellos que son formulados para que produzcan la detonación sólo en condiciones determinadas, de ahí que sean menos sensibles y por lo tanto, constituyen las cargas principales de los explosivos e IEDs. Estos explosivos secundarios se desglosan a su vez, atendiendo a su aplicación, en: militares, civiles y de fabricación casera. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos:

— Explosivos primarios

Son todos aquellos explosivos que son muy susceptibles a iniciarse, es decir, aquellos que son muy sensibles. Normalmente, detonan ante cualquier estímulo o fuente de ignición (chispa, llama, impacto, fricción o alguna otra fuente de energía de cierta magnitud). Se usan en los detonadores, cebos (Figura 2-14) e iniciadores con el fin de iniciar los explosivos secundarios. Entre los explosivos primarios más conocidos, se encuentran el Tetraceno, el fulminato de mercurio que es generalmente empleado en cartuchería, el trinitroresorcinato de plomo y el dinol.



Figura 2-14 Cebos (Explosivos primarios) [15]

— Explosivos secundarios (Militares)

Son aquellos que se emplean principalmente en armas. Normalmente constituyen la carga principal de la munición, cabeza de guerra o proyectil; y se fabrican con estándares y normas propias de la industria militar (Figura 2-15). Su comercialización se lleva a cabo a través de sistemas diferentes a los explosivos de uso civil.



Figura 2-15 Explosivos militares (UPD/ UDP) , cargas huecas y cordón detonante [16]

De los explosivos militares, dada la diversidad de empleos y destrucciones a realizar en dicho ámbito, se dividen en sustancias o en mezclas de las mismas. Como sustancias más conocidas se tiene la Trilita, el TNT (Trinitrotolueno), Pentrita, Hexógeno, Octógeno y Tetralita.

— Explosivos secundarios (Civiles)

Son todos aquellos diseñados, usados y producidos para todas las aplicaciones comerciales o industriales que difieren de las aplicaciones militares, principalmente en voladura de roca (Figura 2-16). Siguen reglamentos y canales de distribución que son completamente diferentes de los explosivos militares. Los civiles se agrupan atendiendo a su composición en: dinamitas, ANFO's, hidrogeles, emulsiones, y mezclas de los anteriores componentes.



Figura 2-16 Dinamita empleada en voladura de roca [17]

— Explosivos secundarios (Fabricación Casera)

Generalmente, todos aquellos fabricados por los propios terroristas. Es decir, todos aquellos explosivos que no requieren de procesos ni instalaciones sofisticadas, grandes conocimientos, ni materias primas de difícil adquisición; ya que muchas de ellas pueden comprarse libremente en el mercado. Normalmente sólo se necesita la mezcla de dos o tres sustancias o materias primas para la obtención de este tipo de explosivos, bien mediante una simple mezcla física o mediante una sencilla reacción química. A cada una de las materias primas utilizada para la fabricación de explosivos se le denomina precursor (acetonas, nitratos amónicos de fertilizantes, nitrometano, cloratos, percloratos, etc.)

2.1.3 Contenedor y potenciadores de efecto

El último componente de los IEDs es el dispositivo contenedor junto con sus potenciadores de efectos. Este trabajo se limita a todos aquellos confinamientos que son metálicos y, únicamente, los amplificadores de efectos químicos (concretamente gas y combustibles-gasolinas). No se contemplarán los amplificadores de efectos biológicos o de letalidad radiológica.

En el empleo de IEDs conformados a partir de cabezas de guerra, dados los materiales, la propia cabeza en su explosión hace la función de metralla. No obstante, normalmente se emplean confinamientos mecánicos para aumentar el efecto de la letalidad del explosivo. Estos confinamientos pueden producir: (1) fragmentación natural o (2) fragmentación pre-conformada.

Por un lado, la fragmentación natural se produce por la rotura de una estructura robusta en metralla de partículas de distinto tamaño y rangos de letalidad. Por otro lado, los fragmentos pre-conformados consisten en materiales de alta densidad colocados directamente alrededor del explosivo o como una segunda capa alrededor del confinamiento primario.

Los confinamientos quedan clasificados atendiendo a la siguiente (Figura 2-17):

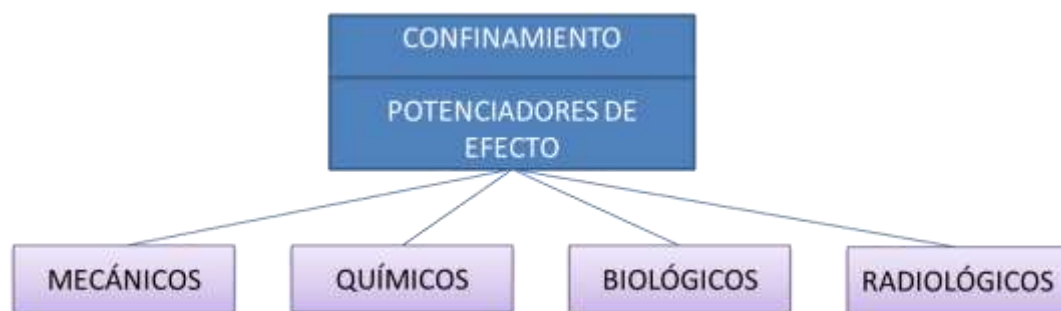


Figura 2-17 Resumen de tipos de confinamiento

Los confinamientos mecánicos son generalmente metálicos o de hormigón. Los metálicos son empleados generalmente reciclando botellas de acero, bombonas de gas, tubos, coches, camiones, motos, carcasas de munición de artillería, ollas de cocción a presión, bidones de combustible, etc. Todos ellos son ejemplos de contenedores que generan fragmentos naturales. Si en estos contenedores se introducen a su vez clavos, bolas de acero (rodamientos), tornillos y tuercas, etc., tendremos una fragmentación de metralla pre-conformada. Además de los metálicos, cabe destacar el empleo de cementos y hormigones para el confinamiento de IEDs. Normalmente, este bloque de hormigón contiene tanto el explosivo como el dispositivo que lo acciona. Estos, se han encontrado casos en ataques a tropas de ejércitos regulares en Chechenia e Irak, así como en acciones terroristas dentro del territorio nacional español. El inconveniente, aunque toda una ventaja desde el punto de vista del terrorista, es que funciona muy bien como camuflaje.

Los amplificadores químicos, bien sean gases o combustibles, son empleados de manera adicional a la explosión que producirá la carga principal con el fin de crear efectos incendiarios o adicionales. Frecuentemente, como gas incendiario, se ha empleado gas butano y/o gasolina; con lo que se crea un efecto similar a lo que se conoce como un <<cóctel Molotov>>.

2.2 Daños producidos por un IED

Generalmente, los daños que produce un IED se deben a dos efectos: (1) la onda expansiva y (2) fragmentación.

El efecto predominante depende del tipo de confinamiento que se haya empleado en la elaboración del IED y del entorno. En principio, en un escenario a espacio abierto, el efecto predominante es la fragmentación, ya que los efectos que se producen por la detonación decrecen rápidamente con la distancia. En cambio, en un escenario urbano, donde la presencia de edificios y paredes ayudan a la reflexión en las paredes, se incrementa el efecto de la onda expansiva.

Antes de continuar, se debe dejar claro el concepto de “onda expansiva”. Esta no es más que una onda de choque, la cual es provocada en el aire por detonación del explosivo. Para aumentar su efecto destructivo, interesa la presencia de objetos físicos (paredes, edificios, etc.) para que haya una reflexión de las ondas, lo cual refuerza el efecto de la onda expansiva.

Al igual que los explosivos, los fragmentos se pueden dividir en dos grupos: (1) primarios y (2) secundarios. Los fragmentos primarios serán todos aquellos que son impulsados por la carga del explosivo, bien sean naturales (generados por la rotura de carcasas o las estructuras portantes) o preconformados, Figura 2-18 (tuercas, tornillos, clavos etc.)

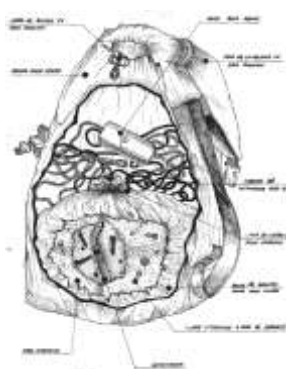


Figura 2-18 Mochila explosiva preparada con metralla primaria (clavos, tuercas y tornillos) Caso 11-M [18]

Los fragmentos secundarios son aquellos que se generan cuando los fragmentos primarios, con una elevada energía cinética, impactan en otro material produciendo su perforación (vidrios de escaparates, láminas de metal, letreros, losas de hormigón, muros de construcción, etc.). Dicha fragmentación se genera en la parte posterior del material donde impactan, generando una proyección cónica similar a un embudo en su parte posterior. Dichos embudos (Figura 2-19), suponen la amenaza más letal para

las personas, y es la responsable de las incontables muertes de civiles en actos terroristas en todo el mundo.

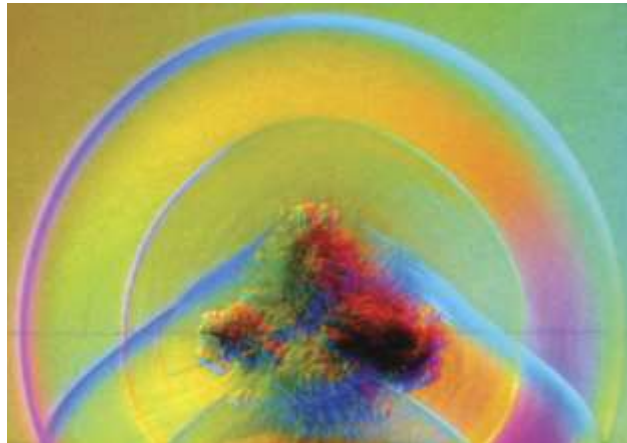


Figura 2-19 Cono de proyección cónica de una explosión [19]

2.3 Clasificación. Tipos de IEDs

Llevar a cabo una clasificación de IEDs (Figura 2-20) es una ardua labor, ya que cualquier variación o combinación de los elementos y componentes de un IED hace que este sea prácticamente único. A pesar de estos factores, tendremos en cuenta dos aspectos importantes; por una parte, la nomenclatura con la que se conocen, y por otra la división según el tipo de mecanismo de disparo, el método de disposición y el método de colocación.

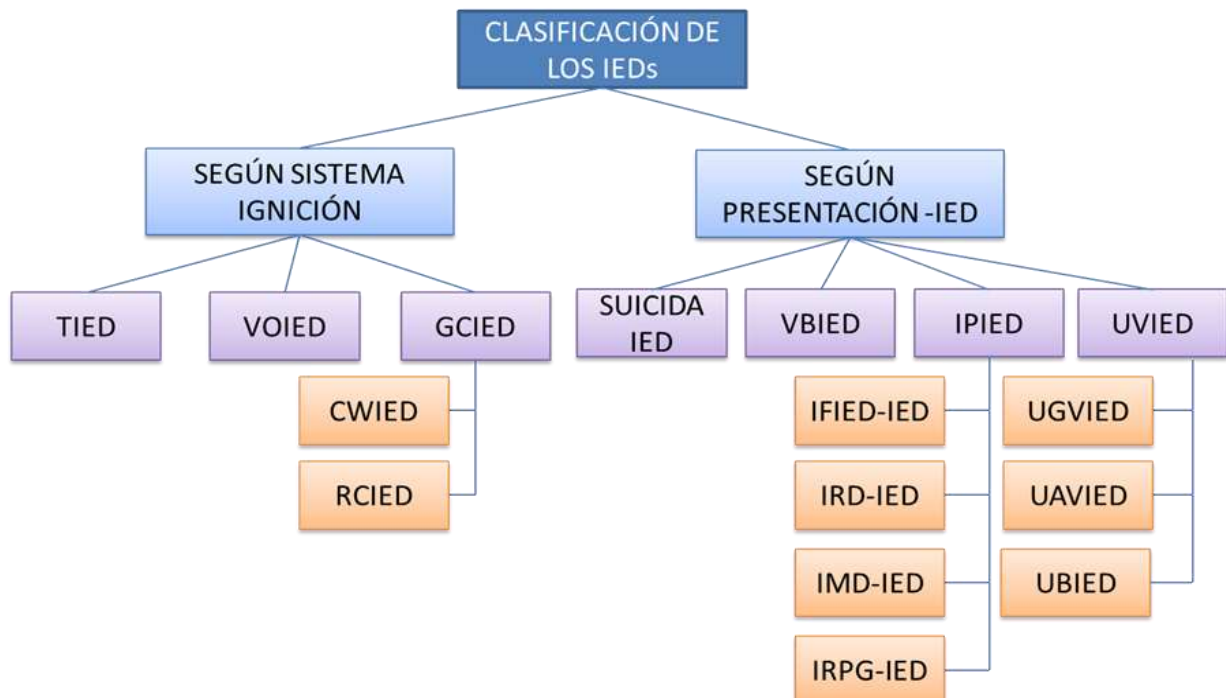


Figura 2-20 Clasificación de los IEDs

La Tabla 2-2 resume los distintos tipo de IEDs. Según el sistema de ignición, nos podemos encontrar:

TIED (Timed IED) – Son todos aquellos IEDs cuya explosión se produce por un detonador con reloj o cuenta atrás. Como norma general, los dispositivos de tiempo son colocados por los terroristas inmediatamente adyacentes a los blancos fijos seleccionados. El dispositivo es entonces “armado” y comienza la cuenta atrás. Este periodo de retraso permite al terrorista desaparecer del radio de acción del IED. Tienen la ventaja de que pueden esconderse bien y es adecuado para blancos fijos contra hombres de negocio o en ataques personales.

VOIED (IED accionado por la víctima) – Son los IEDs llamados “trampas explosivas”. Funcionan cuando la víctima contra la que se atenta realiza una acción involuntaria (tirar, liberar, presionar, mover, inclinar, elevar, vibrar, etc.) que produce la detonación del artefacto por el simple cierre de un circuito eléctrico. No obstante, algunos son más sofisticados y emplean sensores (IR, pasivos, sensibles a la luz, etc.).

GCIED (Generic Command Initiated IED) – Son conocidos como los IEDs accionados de forma remota y se dividen en dispositivos remotos por cable (CWIED) o por control remoto (RCIED). Es el más empleado por terroristas para atacar a blancos móviles que pasan por un punto determinado. El procedimiento consiste en identificar otro punto desde donde se pueda observar el punto de paso, de forma que la tarea sería iniciar el IED en el momento adecuado. Por un lado, si el terrorista emplea el método por cable (50-200m), la fuente de energía puede estar en cualquier extremo pero, por lo general, el terrorista elige tener la batería en su extremo. Este método tiene el inconveniente de que el “trigger-man” tiene la necesidad de poner y ocultar los cables cerca de la ruta que empleará el blanco. Sin embargo, se tienen dos ventajas predominantes frente a las de control remoto y es que tienen un alto nivel de fiabilidad y no es posible el empleo de contramedidas para su inutilización. Por otro lado, los RCIED son aquellos que son accionados de forma remota por el terrorista y que además emplean una forma de activación transmisor-receptor por RF, siendo el equipo receptor parte del mecanismo de iniciación. En este tipo de IEDs, el terrorista sostiene el transmisor y la carga principal está conectada al receptor, de manera que este recibe una señal del transmisor y se cierra un interruptor que inicia la carga explosiva.

Según el tipo de presentación que tiene el IED, podemos identificar:

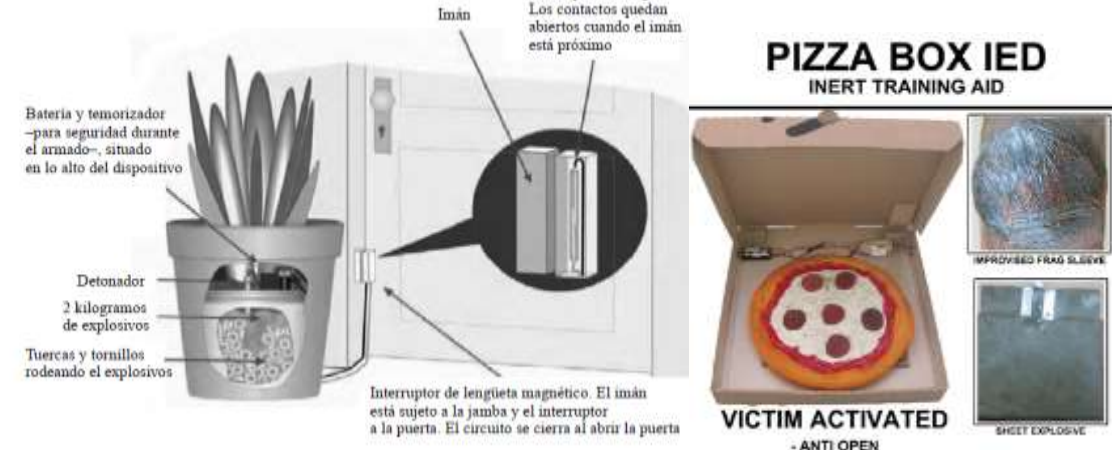
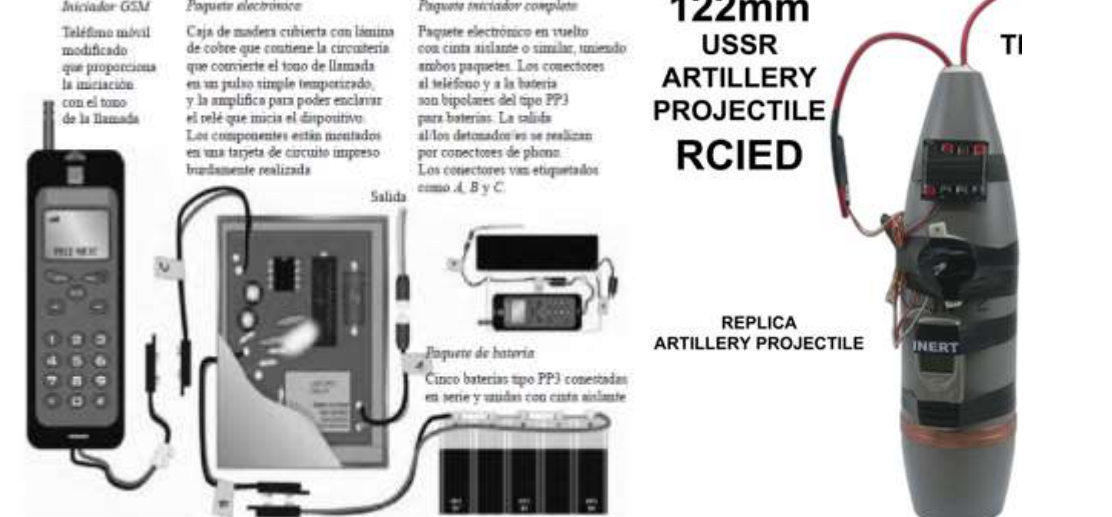
- IED de Persona Suicida
- VBIED (Vehículo bomba)
- IPIED (Improvised Projectil IED)
- UVIED (IED en vehículo no tripulado)

Los IPIEDs propulsados se dividen siguiendo el orden según, Figura 2-20, en:

- IFIED (IED activados por espoletas)
- IRD (IED de cohete)
- IMD (IED de mortero)
- IRPG (IED de granada impulsada por cohete)

En la misma línea, los UVIED sobre vehículos no tripulados pueden ser:

- UGVIED (IED en vehículo terrestre)
- UAVIED (IED en vehículo aéreo no tripulado)
- UBIED (IED en barco no tripulado)

TIED	Indicador formado por una pequeña bombilla (a la que se ha eliminado el vidrio) cuyo filamento puede encender la mezcla explosiva Reloj modificado eliminando el vidrio y pegando un disco conductor que, en su momento, hará contacto con la aguja numerada. También se ha eliminado la aguja horaria Tubo de acero, con tapas roscadas, relleno con mezcla explosiva 
VOIED	Batería y temporizador –para seguridad durante el armado–, situado en lo alto del dispositivo Imán Interruptor de lengüeta. Los contactos quedan abiertos cuando el imán está próximo Detonador 2 kilogramos de explosivos Tuercas y tornillos rodeando el explosivos Interruptor de lengüeta magnético. El imán está sujeto a la jamba y el interruptor a la puerta. El circuito se cierra al abrir la puerta PIZZA BOX IED INERT TRAINING AID VICTIM ACTIVATED - ANTI OPEN IMPROVISED FRAG SLEEVE SHEET EXPLOSIVE 
RCIED	<i>Iniciador GSM</i> Teléfono móvil modificado que proporciona la iniciación con el tono de la llamada <i>Paquete electrónico</i> Caja de madera cubierta con lámina de cobre que contiene la circuitería que convierte el tono de llamada en un pulso simple temporizado, y la amplifica para poder encender el relé que inicia el dispositivo. Los componentes están montados en una tarjeta de circuito impreso cuidadosamente realizada <i>Paquete iniciador completo</i> Paquete electrónico en vuelto con cinta aislante o similar, uniendo ambos paquetes. Los conectores al teléfono y a la batería son bipolares del tipo PP3 para baterías. La salida a los detonadores se realizan por conectores de phone. Los conectores van etiquetados como A, B y C. Salida <i>Paquete de batería</i> Cinco baterías tipo PP3 conectadas en serie y aisladas con cinta aislante 122mm USSR ARTILLERY PROJECTILE RCIED REPLICA ARTILLERY PROJECTILE TI INERT 

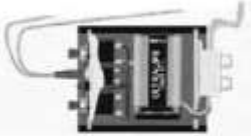
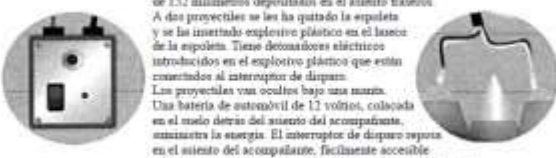
IED SUICIDA	<i>Paquete de disparo (común a todos)</i> Caja de plástico con batería de 9 voltios, pulsadores interruptores de enclavamiento para armado y led indicador. Un cordón inicia el dispositivo tirando de un contacto y cerrando el circuito <i>Cinturón explosivo</i> Ocho bolsillos de lona, alineados, cosidos en una cinta resistente. Cada bolsillo contiene unos 200 gramos de 5 minutos empaquetado, y un capuchón detonador. Los detonadores están conectados entre ellos en serie. Los bolsillos han sido rellenos con bolas de rodamiento para aumentar la letalidad <i>Chaleco de piel</i> Bolsillos cosidos en la trasera del forro, conteniendo bolas de rodamiento y unos 9 kilogramos de explosivo C4. Un cabezal explosivo adapta la unión al cordón detonante. Los hilos pasan a través del forro para disparar el conjunto <i>Chaleco de munición</i> Bolsillos rellenos con aproximadamente 9 kilogramos de explosivos C4 en total, junto con bolas de rodamiento. Un capuchón detonador en cada bolsillo unidos en serie -por hilos ocultos en el forro del chaleco- al paquete de disparo     
VBIED	<i>Construcción del dispositivo</i> El dispositivo consiste en cinco proyectiles de artillería de 152 milímetros depositados en el asiento trasero. A dos proyectiles se les ha quitado la espoleta y se les insertado explosivo plástico en el fondo de la espoleta. Tiene detonadores eléctricos introducidos en el explosivo plástico que están conectados al interruptor de disparo. Los proyectiles van ocultos bajo una manta. Una batería de automóvil de 12 voltios, colocada en el suelo detrás del asiento del acompañante, suministra la energía. El interruptor de disparo reposa en el asiento del acompañante, fácilmente accesible al conductor. Un pulsador actúa como interruptor de disparo y se utiliza un interruptor de balanza para armar el dispositivo <i>Interruptor de disparo</i> <i>Detonador eléctrico y explosivo plástico en la cavidad de la espoleta</i>  
IPIED	 INCLUDES REPLICA PG-7 ROCKET

Tabla 2-2 Resumen gráfico de la clasificación de IEDs [1] y [16]

3 EL GEORRADAR

3.1 Evolución histórica

La teoría que trata sobre los principios y métodos iniciales del georradar ha sido desarrollada por Maxwell JC y Hertz HR, y data de finales del siglo XIX. No obstante, no fue hasta 1935 cuando Robert Alexander Wattson propuso y demostró que el empleo del radar terrestre, junto con el radar aéreo, llegaría a ser efectivo como sistema de defensa militar durante la IIGM. Más tarde, en 1940, tuvo lugar un accidente aéreo (Lost Squadron- 1942), y fue cuando se detectó la cavidad de hielo, cuando se incrementó el interés de la comunidad científica por la aplicación del radar como método de prospección del subsuelo.

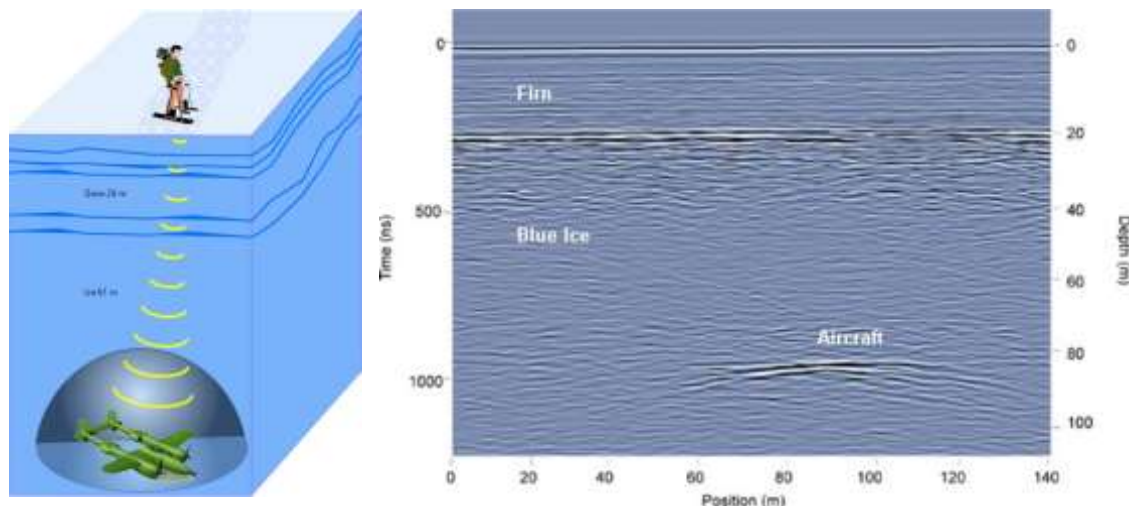


Figura 3-1 Diagrama espacial - Lost Squadron y radargrama (imagen georradar) obtenido

Más tarde, el método cayó en desuso, pero desde 1970 su popularidad se fue incrementando considerablemente. Aparecen publicados los primeros trabajos centrados en investigaciones lunares, geológicas, glaciológicas, así como en el ámbito minero [20], [21], [22] cuyo objetivo principal perseguía estimar la capacidad de penetración máxima de las ondas en el subsuelo empleando antenas de 50-100 Mhz. Posteriormente, en los años ochenta, el método comienza a ser aplicado para estudios más superficiales, y cobran protagonismo las antenas de 200-500 Mhz, de penetración somera pero resolución submétrica, siendo posible destacar los trabajos doctorales [23]-[24] con aportaciones novedosas en estudios medioambientales y el campo de la geotecnia.

A partir de los años noventa, se ha multiplicado el empleo del sistema para investigaciones en entornos costeros sedimentarios [25], [26], [27]. En los últimos 15 años, las antenas de 500 Mhz-1,5 Ghz son prolíficamente utilizadas para el análisis de construcciones y estructuras en ingeniería civil tales como carreteras [28]-[29] o puentes [30]-[31] y también en estudios arqueológicos [32], [33], [34].

Dentro del ámbito que nos ocupa, desde sus orígenes, el GPR ha sido empleado como método de prospección para aplicaciones en seguridad humanitaria, incluyendo el desminado y detección de artefactos sin explotar [35], reconocimiento de los subsuelos defendidos como túneles, trincheras y zulos subterráneos [36], así como detectar y localizar personas atrapadas en áreas de desastres naturales o atentados, [37].

3.2 Fundamentos teóricos

El georradar, o ground penetrating radar (GPR), es una técnica de teledetección de corto alcance con radar. Su fundamento es idéntico al de la teledetección radar convencional desde satélite o avión, pero aplicando una especie de factor de escala. El método se basa en la emisión/recepción de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (1-20 nanosegundos) en la banda de frecuencias de VHF-UHF (habitualmente en un rango entre 10 Mhz - 2 Ghz).

3.2.1 Señal georradar y ecuaciones de Maxwell

Las señales GPR son campos electromagnéticos (EM). La naturaleza del campo electromagnético fue descrita por el científico James Clark Maxwell en 1864, quien definió los principios básicos del electromagnetismo mediante cuatro expresiones fundamentales conocidas como las “Ecuaciones de Maxwell”. Dichas ecuaciones se pueden expresar como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \text{ (Ley de Faraday)} \quad (\text{Ec 3-1})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \text{ (Ley de Ampere-Maxwell)} \quad (\text{Ec 3-2})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \text{ (Ley del campo eléctrico de Gauss)} \quad (\text{Ec 3-3})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \text{ (Ley de Gauss para campos magnéticos)} \quad (\text{Ec 3-4})$$

Donde E es la intensidad del campo eléctrico en voltios por metro (V/m), B la densidad de flujo magnético en Webers por metro cuadrado (Wb/m²), H es la intensidad del campo magnético en amperios por metro (A/m), D es la densidad de flujo eléctrico en culombios por metro cuadrado (C/m²), J es la densidad de corriente en amperios por metro cuadrado (A/m²) y q es la densidad de carga eléctrica en culombios por metro cúbico (C/m³).

Las relaciones que se asocian anteriormente introducen los parámetros de propiedades relevantes en los materiales para la propagación de la señal, es decir: la permitividad, permeabilidad magnética y la conductividad (Ecuaciones 3-5 – 3-7).

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{Ec 3-5})$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (\text{Ec 3-6})$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{Ec 3-7})$$

Donde σ es la conductividad del material en siemens por metro (S/m), ϵ es la permitividad del material en Faradios por metro (F/m), y μ es la permeabilidad del material en Henry por metro (H/m).

3.2.2. Propagación de la señal y propiedades electromagnéticas del medio

Las técnicas de GPR están basadas en un fondo teórico sólido. Para entender cómo se propagan las ondas electromagnéticas, cómo se atenúan y cómo se reflejan en los cambios de superficie, en este apartado vamos a ver una descripción de las propiedades más importantes. En general, las propiedades que mandan la propagación y la pérdida de energía electromagnética a través de materiales naturales y artificiales, son inicialmente asociadas a las propiedades dieléctricas de esos materiales.

Una onda electromagnética consiste en una introducción en el espacio de una intensidad eléctrica (E) y una fuerza magnética (H) en el plano perpendicular a la dirección en la que viaja (polarizada) y que varía en el tiempo (Figura 3-2).

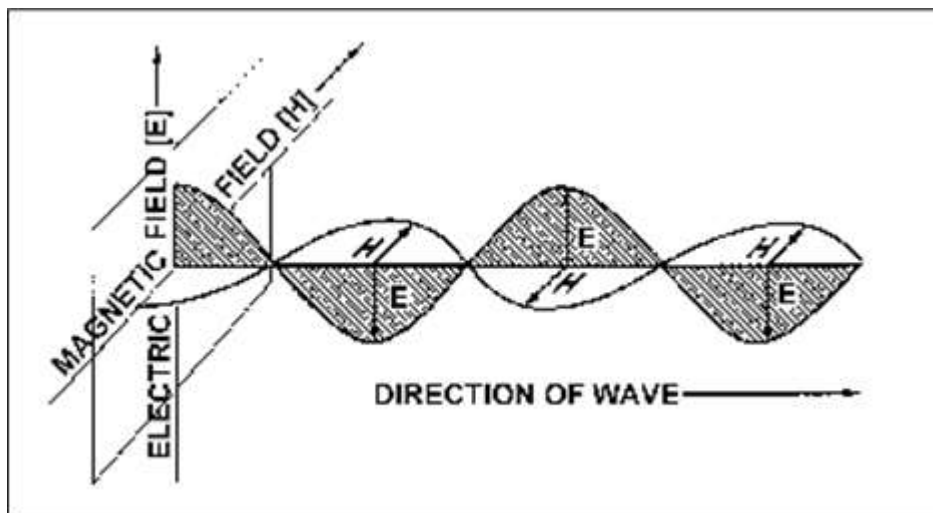


Figura 3-2 Onda armónica plana electromagnética con la polarización eléctrica y los campos magnéticos.

Esas ondas electromagnéticas tienen la particularidad de propagarse a la velocidad de la luz ($c=30 \text{ cm/ns}$) a través del espacio, sin necesidad de materia sólida. Las componentes principales de una onda electromagnética son: frecuencia (f), período de la onda o pulso ($1/f$), longitud de onda (λ) y la amplitud.

La velocidad (v) puede ser obtenida a través de la frecuencia y de la longitud de onda mediante la siguiente expresión (Ecuación 3-8):

$$v = f \cdot \lambda \quad (\text{Ec 3-8})$$

Por otro lado, las antenas georradar han sido diseñadas para emitir un pulso de muy corta duración con el fin de mejorar la resolución vertical del método. Habitualmente, este pulso está constituido por

$1\frac{1}{2}$ - 2 períodos de la frecuencia nominal que caracteriza la antenna. Su corta duración en el dominio de los tiempos (Δt) lleva asociado un aumento inversamente proporcional de la aportación de sus componentes frecuenciales (Δf) según la relación $\Delta t = 1/\Delta f$. Así, la mayor parte de las antenas georradar han sido diseñadas para operar con un ancho de banda similar a su frecuencia central y una duración inversamente proporcional a su centro de frecuencias. En la Figura 3-3 se muestran tanto la forma de la señal, como el espectro del impulso generado por una antenna de 900 Mhz (frecuencia nominal). Una descripción pormenorizada de las características de las señales GPR puede encontrarse en los trabajos de [38]-[39].

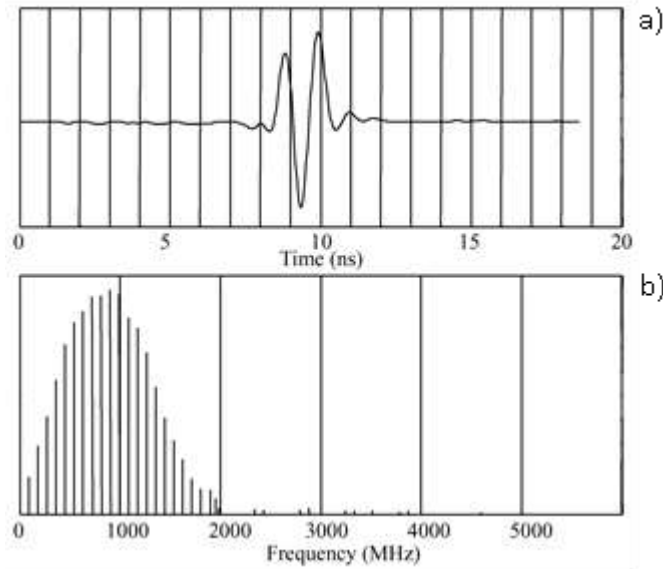


Figura 3-3 Forma de la señal (a) y espectro (b) del impulso generado por una antenna de georradar de 900 Mhz

La adquisición de datos con el georradar suele realizarse orientando la antenna hacia el subsuelo y registrando las reflexiones detectadas tras la emisión del impulso electromagnético, obteniendo así una traza. Al desplazar la antenna sobre la superficie del terreno, se irán detectando y almacenando el conjunto de reflexiones existentes bajo la línea de desplazamiento de la antenna. De esta forma, el eje de abscisas de los radargramas, o registros georradar, representará el movimiento de la antenna 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 antenna receptora, siendo este, por lo tanto, un viaje de ida y vuelta, tal y como se escenifica en la Figura 3-4.

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 $z = v \cdot \text{twt} / 2$. Por su parte, la velocidad puede ser deducida a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (\text{Ec 3-9})$$

Donde ϵ es la constante dieléctrica del material, σ su conductividad, μ la permeabilidad magnética y ω es la frecuencia angular central del pulso emitido. En medios poco conductivos, aquellos en los que se pueda aceptar que $\sigma \ll \omega\epsilon$, la Ecuación 3-9 admite una simplificación, pudiendo aproximarse la velocidad a través de la siguiente expresión:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Ec 3-10})$$

Donde c es la velocidad de propagación de las ondas en el vacío y ϵ_r es la constante dieléctrica relativa del material (variando entre 1-81). Por lo tanto, en la mayor parte de medios susceptibles de estudio con georradar la velocidad oscila entre los 0.3 m/ns (aire) y los 0.03 m/ns (agua dulce).

Como se ha comentado, la antena emisora genera un impulso de corta duración que es transmitido al terreno; mientras tanto, la antena receptora permanece activa tratando de detectar la energía reflejada en los elementos presentes en el subsuelo. La técnica es, en principio, similar a la del sónar o a los métodos de sísmica de reflexión -salvo el empleo de ondas electromagnéticas-, y en ocasiones los usuarios prefieren interpretar los radargramas con la misma apariencia de los perfiles sísmicos (*wiggle plot*). Los equipos de georradar disponen de relojes internos de 50-100 KHz que les permiten procesar gran cantidad de pulsos con los cuales generan varias trazas por segundo. Por este motivo, si la antena se desplaza a baja velocidad es preferible transformar las trazas individuales en un formato de áreas de barrido (*line scan*), el cual ofrece una sensación de continuidad que facilita la interpretación, tal y como se muestra en la Figura 3-4.

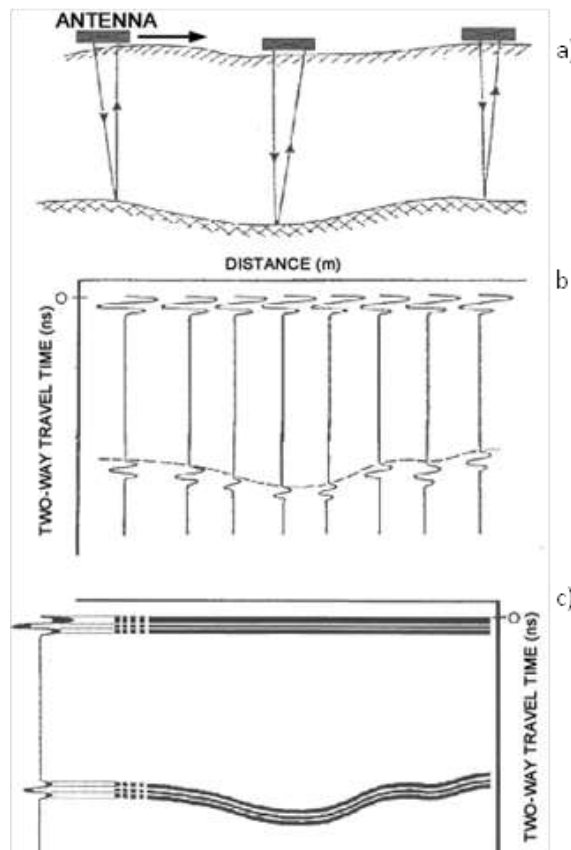


Figura 3-4 Proceso de adquisición (a), radargrama en formato wiggle (b) y formato line scan (c).

Cuando el pulso emitido detecta una discontinuidad electromagnética (por ejemplo, un cambio en las propiedades del medio de propagación o una capa de material diferente), parte de la energía es reflejada de vuelta, mientras que el resto continúa su camino a través del nuevo medio. La energía reflejada en la interfaz de dos medios depende del contraste entre sus impedancias (η), que se manifiesta en el llamado coeficiente de reflexión (r), y que puede expresarse según la siguiente ecuación, siempre y cuando pueda aceptarse incidencia normal:

$$r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2} \quad (\text{Ec 3-11})$$

La Ecuación 3-11 admite una expresión simplificada cuando se trate de medios poco conductivos, tal y como sucedía en la simplificación de la Ecuación 3-1, obteniendo r en función del contraste entre constantes dieléctricas relativas de ambos materiales:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (\text{Ec 3-12})$$

Así pues, para garantizar la obtención de buenos resultados al aplicar la técnica en un determinado entorno, será necesario que se den, de forma simultánea, dos factores externos e independientes del sistema y del equipo humano que lo maneje: que exista suficiente contraste electromagnético entre ambos medios y, sobre todo, que el medio de propagación sea suficientemente resistivo para no atenuar dramáticamente la señal emitida. Estos medios poco conductivos, aquellos donde $\sigma \ll \omega\epsilon$, son los susceptibles de ser estudiados mediante la técnica del georradar.

La Tabla 3-1 nos muestra los valores típicos de las constantes dieléctricas para algunos de los materiales de interés en este estudio.

Material	Permitividad(ϵ_r)	Conductividad eléctrica (mS/m)	Velocidad (cm/ns)
Aire	1	0	30.0
Arena	3-6 (seco)	10^{-4} -1 (seco)	12.0-17.0 (seco)
	25-30 (húmedo)	1-10 (húmedo)	5.5-6.0 (húmedo)

Tabla 3-1 Permitividad, conductividad eléctrica y velocidades de los diferentes materiales [39]

3.3 Componentes del equipo

Todo sistema georradar, esencialmente, está formado por un ordenador y una unidad de control que se conecta a una antena. El equipo empleado para nuestro trabajo es un georradar marca RAMAC de MALA GEOSCIENCE (Figura 3-5), que se compone de:

- Unidad de control Multi Channel (CU-II)
- Antenas
- Cables de fibra óptica (o electrónica)
- Carro de transporte
- Odómetro (sistema de control de distancias)

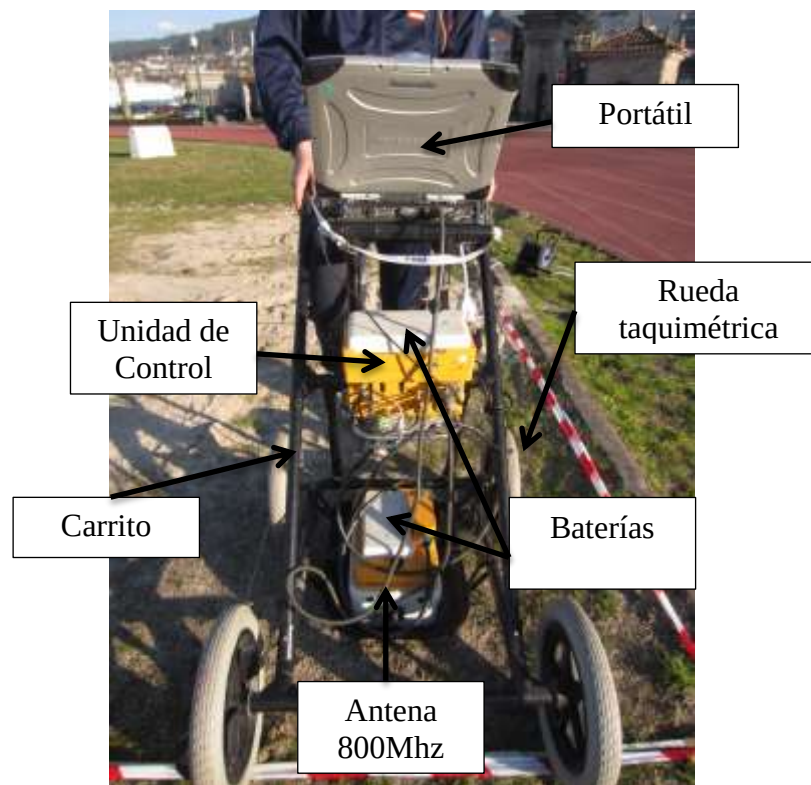


Figura 3-5 Equipo GPR-Ramac Mala Geoscience utilizado para el desarrollo del presente trabajo

3.3.1 Antenas

Las antenas (Figura 3-6) son las encargadas de transmitir y recibir la energía que nos proporcionará la información necesaria, es decir, son aquellas que transmiten el pulso electromagnético al medio y reciben la energía de la reflexión en superficie.

Por un lado, las antenas que emplean estos equipos suelen trabajar en dos modos: (1) modo biestático (una antena emite y la otra recibe) y (2) en modo monoestático (una única antena hace de emisor y receptor). Dentro de estos dos grupos, se puede dividir en dos tipos distintos:

- Apantalladas: que están envueltas con un escudo que no permite el paso de ondas residuales.
- Sin apantallar: no existe escudo protector.



Figura 3-6 Antena biestática apantallada de 500 Mhz (izquierda) y antena biestática de 200 Mhz sin apantallar (derecha)

Por otro lado, una forma muy común de caracterizar a las antenas es por la frecuencia central de emisión, ya que la longitud de onda del pulso que es emitido depende de la frecuencia y de la velocidad de onda en el medio (Ecuación 3-13).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{Ec 3-13})$$

Donde, (λ) es la longitud de onda, (v) es la velocidad de la onda y (f) es la frecuencia.

Por tanto, se deduce que a mayor frecuencia de emisión, la onda sufrirá una mayor atenuación en su propagación. Por esta razón, al depender de la frecuencia, la profundidad de penetración varía. En la Tabla 3-2, se puede observar la profundidad para distintas frecuencias y su aplicación.

FRECUENCIA CENTRAL	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN (m)	APLICACIONES TÍPICAS
2 Ghz	0-0.6	Evaluación de hormigón y espesor de pavimentos
1 Ghz	0-0.9	Carreteras y evaluación de puentes y hormigón
800 Mhz	0-2	Evaluación de hormigón, detección huecos, arqueología
500 Mhz	0-4	Ingeniería, huecos, arqueología y medioambiente
250 Mhz	0-8	Ingeniería, geotécnica, medioambiente
100 Mhz	0-10	Geotécnica, ingeniería, minería
50-25 Mhz	0-50	Geotécnica

Tabla 3-2 Tipos de antenas según frecuencia y profundidad de penetración

La conexión entre la antena o antenas se realiza mediante fibra óptica. El empleo de fibra óptica requiere de transductores que, cuando están conectados a las antenas, interpretan las órdenes tanto de emisión como recepción de la unidad de control. En el sistema empleado para el presente trabajo, las antenas son completamente intercambiables y deben seleccionarse en función de la profundidad deseada para la prospección y la resolución demandada o que queremos conseguir, como se determinó en la Tabla 3-2.

De esta manera, si se quiere una alta penetración (10-30 m), se emplearán antenas de 25-100 Mhz, mientras que si la labor a realizar requiere de estudios de alta resolución se emplean antenas de mayores frecuencias (800-1000 Mhz), las cuales difícilmente penetrarán más allá de 1 m de profundidad, pero sí permiten localizar elementos centimétricos.

La calidad de los resultados, respecto a la detección de objetos en función de su tamaño, depende de la resolución de las antenas (frecuencia) a utilizar. Estos conceptos, y su análisis, se amplían en el siguiente apartado de análisis de frecuencias:

Análisis de frecuencias

Los parámetros que pueden influir en la calidad de los resultados, en cuanto a la detección de reflectores, son la resolución vertical (Δv) y resolución horizontal (Δh), que dependen principalmente de la frecuencia empleada durante la adquisición de datos (Figura 3-7).

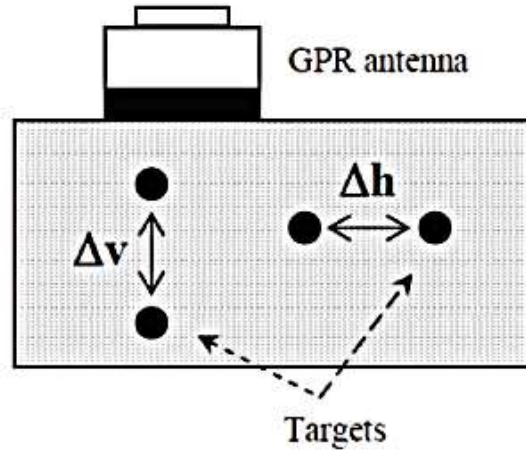


Figura 3-7 Esquema de Resolución Vertical y Horizontal

A) Influencia de la Resolución Vertical (Δv):

La resolución de un equipo se define como su capacidad para resolver elementos independientes en el subsuelo. Conocer la resolución del aparato en un medio determinado permite saber cuál es la distancia mínima que debe existir entre dos reflectores para que estos se registren como eventos separados, es decir, que las dos reflexiones no se solapen la una sobre la otra. La resolución vertical permite conocer la sensibilidad del equipo para diferenciar entre las dos señales adyacentes en el tiempo como eventos diferentes. La sensibilidad del equipo depende de la frecuencia de emisión utilizada y de la duración del pulso. Para calcular la resolución vertical se tiene en cuenta lo siguiente:

La duración del pulso τ_p (ns), que es inversamente proporcional al ancho de banda de la antena utilizada Δf (Hz).

$$\tau_p = \frac{1}{\Delta f} \quad (\text{Ec 3-14})$$

De esta forma, para la antena de 800 Mhz utilizada en este estudio la duración del pulso es:

$$\tau_p (800 \text{ Mhz}) = 1.25 \text{ ns}$$

La longitud de onda del pulso que se propaga es el producto entre la duración del pulso y la velocidad de la onda electromagnética en el medio por el que se está propagando (Ecuación 3-15). Esta longitud equivalente determina la resolución vertical que podremos esperar. A mayor longitud del pulso, menor resolución vertical. Con esta consideración, se define la resolución vertical (Δv) a partir de la Ecuación 3-16, [40].

$$\lambda = v \cdot \tau_p \quad (\text{Ec 3-15})$$

$$\Delta v = 1,39 \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (\text{Ec 3-16})$$

Donde, λ amplitud de onda, v es la velocidad de la onda en el medio y τ_p es el período de la señal.

En nuestro estudio, la resolución vertical teórica para la antena de 800 Mhz, calculada con una velocidad media de 13.5 cm/ns (medio arenoso) es:

$$\Delta v (800 \text{ Mhz}) = 12 \text{ cm.}$$

B) Influencia de la Resolución Horizontal (Δh):

La resolución horizontal indica la distancia mínima que debe existir entre dos reflectores situados uno junto al otro horizontalmente (paralelas a la superficie del medio analizado) para que el georradar los detecte como eventos separados. El límite de esta resolución estará definido por la primera zona de Fresnel. Para el cálculo de la resolución horizontal utilizaremos la fórmula:

$$\Delta h = D = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + d\lambda} \quad (\text{Ec 3-17})$$

Donde, λ = amplitud de onda, d = distancia vertical entre la antena y la superficie del reflector.

En nuestro estudio fue calculada la resolución horizontal teórica para una antena de 800 Mhz, considerando una profundidad del objeto de 10 cm y con una velocidad media de 13.5 cm/ns. De este modo, la resolución horizontal resultante sería de unos 30 cm.

C) Cálculo de Profundidades de las Antenas (Z):

Teniendo en cuenta la ventana de tiempos (twt) seleccionada, la profundidad máxima de muestreo que alcanza la frecuencia empleada se determina por la siguiente fórmula:

$$Z = v \cdot twt / 2 \quad (\text{Ec 3-18})$$

Donde, z es la distancia vertical entre la antena y la superficie del reflector (m), v es la velocidad de la onda de radar (m/ns) y twt es la ventana de tiempos (ns).

En el análisis podemos determinar la profundidad que alcanza una antena de 800 Mhz para una $v = 0.135 \text{ m/ns}$, resultando:

$$Z (800 \text{ Mhz}) = 4.10 \text{ m.}$$

Después de analizar el pulso de frecuencia (τ_p), la resolución vertical (Δv), horizontal (Δh) y la profundidad máxima (Z) para nuestra frecuencia podemos resumir los datos obtenidos en la siguiente Tabla 3-3:

Antena GPR	τ_p (ns)	Δv (cm)	Δh promedio (cm)	Z máximo (m)
800Mhz	1.25	12	39	4.10

Tabla 3-3 Resultado de los cálculos teóricos

3.3.2 Unidad de control

El corazón del sistema GPR es la unidad central, o unidad de control (Figura 3-8), y desde donde se realiza la coordinación y todo el control de las antenas, de los accesorios que podemos añadir al equipo básico y la señal que es emitida. Además, desde la unidad de control podemos configurar toda la adquisición de datos que se gestiona en las antenas y que da como salida los datos adquiridos. Normalmente, la unidad central se configura con un software que está instalado en un ordenador portátil; este ordenador además almacena la información para visualizarla en tiempo real.



Figura 3-8 Foto de la unidad central (RAMAC Multi Channel CU-II)

3.3.3 Odómetro

Para situar los perfiles se suelen emplear odómetros conectados a la unidad central y se añaden a las antenas, aunque en ocasiones se implementan en un soporte con ruedas sobre el que se sitúa la antena. Este sistema permite determinar con mayor precisión los distintos puntos del radargrama o posicionamiento de las trazas en el radargrama (y longitud total del registro GPR), además de servir como encoder durante una adquisición de datos por distancias.

3.4 Ventajas e inconvenientes del GPR

De todos los múltiples factores vistos anteriormente, podemos presentar las siguientes ventajas para un sistema GPR:

- El GPR genera una imagen del subsuelo que supera en resolución a cualquier otro método de prospección por medio de una alta capacidad de escaneo por segundo (>500 muestras/segundo) y antenas de alta sensibilidad, permitiendo tanto la identificación de elementos singulares como la caracterización del entorno.
- Es un método no destructivo y no invasivo, por lo que no produce ningún efecto secundario sobre el medio estudiado.
- Es una técnica rápida en su ejecución y aplicable en la mayoría de situaciones, destacando en especial su aplicabilidad en entornos urbanos.
- Posibilidad de interpretación en tiempo real, pues los radargramas se generan a la vez que se adquieren los datos, lo que permite aportar información instantánea sobre el propio terreno.

Además, también cabe citar algunos inconvenientes o limitaciones del GPR a tener en cuenta para cualquier estudio en la detección tanto de IEDs como cualquier otro elemento que se encuentre en el subsuelo:

- El principal condicionante del georradar se refiere a su penetración limitada en el subsuelo. Por una parte, los equipos han sido diseñados para ser ligeros y poder ser manejados por 1-2 personas, lo que implica una reducción del tamaño de las fuentes de alimentación y que redunde en una potencia limitada en cuanto al impulso emitido y, por lo tanto, su penetración en el medio.
- Por otra parte, la naturaleza del suelo juega un factor decisivo en ese aspecto, ya que los medios conductivos (por ejemplo, arcillas húmedas) pueden llegar a atenuar totalmente la señal, haciendo inútil la aplicación del método.
- Además, el método presenta cierta dependencia de las condiciones superficiales, que pueden llegar a enmascarar los registros provocando interpretaciones erróneas.

3.5 Aplicabilidad del GPR

A continuación se resumen algunas de las aplicaciones del método que han demostrado ser de gran utilidad para afrontar estudios alternativos en prospección del subsuelo.

- Aplicaciones medioambientales:
 - Detección de plumas de contaminación.
 - Delimitación de vertederos.
 - Localización de bidones y/o depósitos enterrados.
- Geología y geotecnia:
 - Estratigrafía del subsuelo.
 - Profundidad de la roca.
 - Localización del nivel freático.
 - Detección de cavidades.
 - Fracturas y fallas.
- Obra civil:
 - Localización de servicios enterrados (metálicos y no metálicos).
 - Evaluación de estructuras de hormigón.
 - Control del pavimento en firmes de carreteras.
 - Patologías en la construcción.
- Arqueología:
 - Localización de estructuras enterradas.
 - Posicionamiento de túneles y/o galerías ancestrales.
 - Estudios in-situ en edificios históricos.
- Cartografía:
 - Batimetrías en agua dulce (y espesor de la capa de sedimentos depositados).
- Militar:
 - Detección de minas, IEDs y UXOs.
 - Detección de bunkers.
 - Inspección de pistas de aterrizajes.
 - Localización de subterráneos y zulos de munición.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 Aplicación del GPR en la detección de dispositivos explosivos

Es considerable el abanico de tecnologías desarrolladas para la detección de minas y UXOs, incluyendo sensores acústicos, sistemas de imagen infrarroja, métodos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, así como técnicas micro-ondas.

A pesar de la enorme variedad de tecnologías, la mayoría de las técnicas empleadas para la detección de minas es manual, concretamente el “prodding”. Este método consiste en el empleo de una varilla rígida (prodger), como única herramienta para la detección de sólidos, siendo aplicada con un ángulo de 30°. Aunque efectiva, esta técnica es lenta y altamente peligrosa para el desminado. Además, podemos encontrar como tecnología manual para detección de minas y UXOs (Unexploded ordnance) el detector de metales (MD). El MD básico empleado en la detección de minas se basa en el fenómeno de la Interferencia Electromagnética (EMI). Se mide la perturbación del campo electromagnético emitido debido a la presencia de objetos metálicos en el terreno. El mayor problema con el MD es que muchas de las minas modernas están hechas de plásticos y contienen pocas o ninguna pieza metálica, excepto el pequeño percutor. Además, hay otro factor a tener en cuenta con esta tecnología de detección. La presencia de basura o restos metálicos en el campo de minas pueden incrementar las falsas alarmas (FAR- False Alarm Rate) con la consiguiente disminución de la eficiencia y el rendimiento de este método.

El radar de penetración terrestre, o GPR, es una técnica muy reconocida por la comunidad científica como método para la detección de minas y UXOs [41], [5], [6], así como IEDs [42]-[43]. caso particular del presente estudio. La idoneidad del método se basa en la rapidez y la seguridad como técnica no destructiva en comparación con otros procedimientos destructivos por excavación o métodos de detección manual, como los anteriormente citados, obviamente mucho más peligrosos. Y lo que es más, la técnica del GPR tiene la habilidad de detectar tanto minas metálicas y no metálicas a partir del contraste electromagnético existente entre el terreno y el objeto. La probabilidad de detección de la señal depende del tipo de material del objeto (plástico, madera, metal, cerámica) y la cantidad de metal presente. A mayor cantidad de metal, mayor contraste dieléctrico, y mayor probabilidad de detección. El GPR cumple los criterios necesarios en un sistema de desminado [6], es decir:

- Fácil transporte.
- Bajo coste de construcción.
- Posibilidad de operar e interpretar por personal no experto.
- Rápido despliegue en caso de emergencia.
- Alta probabilidad de detección de minas, UXOs e IEDs.

- Baja probabilidad de Falsa Alarma.
- Identificación del tipo de mina.
- Rendimiento constante en condiciones rugosas del terreno.

Pero la tecnología también tiene sus limitaciones, en particular, la resolución necesaria para detectar objetos pequeños, que requiere frecuencias de Ghz, lo cual disminuye la penetración en el terreno e incrementa el ruido.

4.2 Técnicas de procesamiento y detección automática

El ruido se define como una fuente de reflexiones indeseadas (clutter) que tienen lugar dentro del ancho de banda y de la ventana de búsqueda del georradar [44]. Su presencia puede esconder completamente la reflexión generada por la mina enterrada objeto de detección [45], [46], [47]. En la aplicación de artefactos explosivos, por ruido se entiende:

- Heterogeneidad del subsuelo.
- Humedad.
- Presencia de raíces.
- Presencia de piedras.
- Restos de otros objetos en el subsuelo.

Existen técnicas de procesamiento que pueden ser utilizadas para reducir las componentes de ruido y así reducir la probabilidad de falsa alarma e incrementar la probabilidad de detección. En este sentido, en [48] se expusieron diferentes técnicas de procesamiento de la señal para reducir el ruido en la señal GPR:

- Singular Value Decomposition (SVD)
- Factor Analysis (FA)
- Principal Component Analysis (PCA)
- Wavelet Transform

Además, la simulación numérica está siendo aplicada constantemente en muchos trabajos para facilitar la comprensión del fenómeno de propagación de las ondas electromagnéticas en el medio. Así, algunos autores como [49], [50], [51], emplearon el método FDTD (Finite-Difference Time-Domain) como ayuda a la caracterización de los patrones de reflexión obtenidos en la toma de datos.

Asimismo, el empleo del procesamiento y técnicas de visualización 3D se ha incrementado, en las últimas décadas, en aplicaciones de detección de minas [52]. Empleando la visualización 3D obtenemos imágenes más reales del subsuelo, mejorando la localización y permitiendo así la reconstrucción de los objetos enterrados [53]. Además, la visualización 3D proporciona una mejor interpretación de los resultados y correlación espacial entre objetos [54].

Aunque estos métodos pueden proporcionar mejoras significativas, la mayoría de las técnicas de procesamiento de señal GPR conllevan métodos estáticos clásicos. Las máquinas con sistema de aprendizaje supervisado son capaces de extraer automáticamente patrones de los datos obtenidos, no son computacionalmente caras y pueden ser empleados para detectar objetos enterrados con éxito. Se trata de aplicaciones de clasificación entre zona segura y zona no segura, y cuyo funcionamiento consiste en que el algoritmo aprenda los patrones que caracterizan el clutter, el ruido de fondo y los objetos que están siendo estudiados (IEDs y UXOs). Cabe destacar el estudio [36], en el que se han utilizado dos técnicas de inteligencia artificial y machine learning con aprendizaje supervisado: regresiones logísticas y redes neuronales, obteniendo una tasa de acierto para una frecuencia de 2.3 Ghz de 65% y 92%, respectivamente.

4.3 Investigación y desarrollo en aplicaciones para IEDs

Existen organizaciones militares, universidades, organizaciones de desarrollo industrial y tecnológico, además de compañías privadas, que han desarrollado programas específicos de investigación y desarrollo, tales como el International Advanced Robotics Programme (IARP) para el diseño de vehículos exclusivos focalizados en el problema del desminado. Hay vehículos que han sido desarrollados para emplear arrays de antenas y generar así un 3D, lo que posteriormente se procesa para proporcionar un mapa de detección [55]-[56]. Ejemplos de vehículos desarrollados para el desminado en diferentes países son: US (*Planning Systems, GeoCenters, Basystems (ex GDE), NIITEK, Mirage, ARL, Jaycor, SRI, Coleman*), Reino Unido (*ERA Technology, Thales y Pipe-Hawk*), Francia (*Thales, Satimo*), Alemania (*Rheinmetall*) e Israel (*Elta*). En este sentido, se han realizado considerables esfuerzos para desarrollar una solución a los problemas de detección de minas e IEDs tanto de aplicaciones militares como humanitarias. La Tabla 4-1, muestra diferentes programas tanto civiles como militares que están desarrollando sensores GPR para la detección de minas [47].

PAÍS	PROGRAMA	CARÁCTER	TIPO DE GPR
AUSTRALIA	HILDA	Militar	Manual
	RRMNS	Militar	Montado en vehículo
BEGIUM	HUDEM	Miltar	Manual
CANADA	ILDP	Militar	Montado en vehículo
UNIÓN EUROPEA	GEODE	Civil	Montado en vehículo
	LOTOS	Civil	Montado en vehículo
	DEMINE	Civil	Manual
	MINEREC	Civil	Manual
	HOPE	Civil	Manual
	PICE	Civil	Manual
FRANCIA	SALMANDER	Militar	Montado en vehículo
ALEMANIA	MMSR	Militar	Montado en vehículo
ISRAEL	ELTA	Militar	Montado en vehículo
JAPÓN	MEXTSENCION	Civil	Manual
REINO UNIDO	PICE	Civil	Manual
	MINETECT	Civil	Manual
	DCMC	Militar	Montado en vehículo
USA	MCMC	Militar	Manual
	HSTAMIDS	Militar	Montado en vehículo

Tabla 4-1 Programas de desarrollo de GPR para la detección de minas

Actualmente, son muchos los productos diseñados para la detección de minas e IEDs recogidos en los programas de la Tabla 4-1, que hacen que se reduzca el número de bajas de todas las Fuerzas multinacionales que se encuentran desplegadas en escenarios de combate en la era moderna. Por ello, se hará una breve reseña de las tecnologías desarrolladas hasta la época. Se destacarán vehículos terrestres como el Husky (NIITEK TECH), el PEROCC, el Minestalker y el montaje en vehículos del sistema GPR de la marca COBHAM.

4.3.1 Husky Vehicle Mounted Mine Detector (VMMD)

El Husky (VMMD), Figura 4-1, es un vehículo de detección de minas y despeje de rutas de IEDs producido por DCD Protected Mobility con elementos desarrollados por NIITEK.



Figura 4-1 El Husky (2G VMMD) desarrollado por DCD Protected Mobility [57]

El vehículo fue originalmente desarrollado por el ejército sudafricano en los setenta. Tiene la capacidad de detectar explosivos enterrados tanto metálicos como no metálicos. Puede limpiar una carretera de 3m de ancho a una velocidad máxima de 50 km/h. Actualmente es producido por Estados Unidos por el Critical Solutions International (CSI), que también es responsable de la venta a nivel internacional del vehículo, el cual es operado por incontables países de todo el mundo.

Hay cuatro versiones, el Husky MkI fue el que se desarrolló en los setenta para la detección de minas. DCD introdujo el Husky MK II y el Husky MKIII que fueron versiones mejoradas, pero la última versión que contiene el GPR es el Husky 2G.

El Husky 2G está equipado con el GPR VISOR 2500 (Figura 4-2) de la marca NIITEK'S con cuatro paneles de arrays de 3,2 m de longitud total que detecta minas y explosivos empleando un hidráulico para desplegar y retraer el sistema. El VISOR 2500 le proporciona desarrollo en detección automática, reconocimiento y mayor precisión en hallazgos de explosivos enterrados. Combina algoritmos ATR (Reconocimiento de objetivos automática) en un software de fácil manejo y ruggedizado. Incorpora un chasis en V para ofrecer la máxima protección contra las explosiones al resto de componentes. La cabina está cubierta por cristal blindado a prueba de balas y en su parte superior contiene una única escotilla. El vehículo tiene 7,34 metros de largo, 2,53 metros de ancho y una altura total de 3,54 metros. El peso del Husky ronda los 8350 kg. El vehículo monta en su parte delantera el GPR que le proporciona capacidad de detección de minas e IEDs con alta probabilidad de detección y con una baja probabilidad de Falsa Alarma. El control del sensor se puede ajustar automáticamente al terreno y está equipado con el Mine Detonation Trailer (MDT) para detonar cualquier mina que se ha quedado rezagada. La protección en V del chasis puede proteger al vehículo y la dotación de las explosiones recogidas en el STANAG 4569 de nivel 4 además de conseguir el nivel 3 de protección en explosiones balísticas. Puede alcanzar una velocidad de crucero máxima de 72 km/h y alcanza de 0 a 50 km /h en 16 segundos.



Figura 4-2 Visor 2500 GPR de NIITEK [58]

CAPACIDADES:

- Detección de minas e IEDs tanto metálicos como no metálicos.
- Detección a tiempo real.
- Modos de detección seleccionables por el usuario.
- Sensor de imagen a tiempo real con visualización en 3D.
- Monitor del estado del sistema.
- Coordenadas GPS de los objetos detectados.
- El cuerpo central del visor monta 12 arrays de antenas con 14 cm de resolución.
- La parte frontal monta 4 arrays con 1m de resolución.
- Almacena 100km de datos escaneados.

BENEFICIOS:

- Confiable para operaciones de contraminado.
- Maximiza la protección de los operadores.
- Capacidad en todo tipo de terrenos.
- Alta eficiencia y fácil uso.
- Compatible con los planes de los ejércitos.

En 2012, el Ministerio de Defensa firmó un contrato con Critical Solutions International para la adquisición y entrega en 2013 de 6 unidades del vehículo Husky 2G, así como repuestos y entrenamiento de tripulaciones por un importe aproximado de 14 millones de euros. El mantenimiento y el apoyo tanto técnico, como de instrucción del personal, son llevados a cabo por ELEYCON 21, una empresa del sector de la electrónica y de las telecomunicaciones. Además, desde finales de Febrero, el Ejército de Tierra cuenta en Afganistán con los primeros vehículos Husky 2G operativos en la Base Ruy González de Clavijo de Qala-i-Naw, cuya misión será la detección de minas, UXOs e IEDs para la limpieza de las rutas por las que se llevará a cabo el repliegue de las fuerzas españolas de la Provincia de Badghis rumbo a Herat en los próximos meses.

4.3.2 Vehículo PEROCC

La joya de la corona en el desarrollo de tecnología contraminado y C-IED hasta el momento es el PEROCC. Es un producto de PEARSON ENGINEERING, el cual funciona como una única plataforma que da solución a los requisitos de la actividad contra IEDs. Gracias a la aplicación de múltiples herramientas a un chasis, tiene la capacidad de detectar explosivos y limpiar rutas al mismo tiempo que mantiene, en todo momento, un alto nivel de auto-protección.

Está construido sobre una excavadora hidráulica Caterpillar convencional cuya tecnología ha sido ya muy depurada (Figura 4-3). Va equipado con rodillos de presión que proporcionan un contacto constante con la superficie, limpiando la ruta de toda mina o IED de activación mecánica por plato de presión que esté presente. Posée un brazo hidráulico investigador cuyo cabezal se puede intercambiar por un brazo manipulador que puede ser empleados en numerosas tareas, como pueden ser: (1) investigar el terreno una vez el GPR ha confirmado la presencia de un IED y (2) eliminar todo obstáculo que bloquee la carretera con una capacidad de carga de hasta 1,5 Tm. El doble chasis en V, protege el compartimento de la dotación de explosiones recogidas en el STANAG 4569 de hasta nivel 3. Además, está equipado con ruedas antipinchazos y antiexplosiones. Los cabezales son fácilmente intercambiables si la situación requiere retirar el GPR y emplear cualquier otra herramienta como si de una excavadora se tratase y la autoprotección es posible gracias a la estación superior de armas fácilmente instalable que proporciona seguridad en todas direcciones con sistemas de visión Día/Noche.



Figura 4-3 PEROCC basado en la excavadora CATERPILLAR [59]

4.3.3 MINESTALKER II

El Minestalker (Figura 4-4) es otro vehículo que monta el mismo VISOR 2500 GPR que el Husky, con la salvedad de que tratamos con un vehículo más ligero. Está diseñado para trabajar en todo tipo de condiciones y terrenos tanto secos como húmedos. Con pack adicional de control remoto diseñado por la universidad de ingeniería robótica de Carnegie Mellon, proporciona toda la seguridad y la precisión de las plataformas controladas remotamente con un kit de tres paneles GPR en vez de 4 como era el caso del Husky.



Figura 4-4 Vehículo Minestalker II [60]

Fue construido con el propósito de servicios de desminado humanitario con zonas de antiguos conflictos armados. Combina algoritmos (ATR) de reconocimiento de objetos automático a tiempo real y puede integrar opcionalmente detector de metales, un kit de control remoto, y un software muy sencillo en un equipo ruggedizado.

CARACTERÍSTICAS:

- Escaner de alta resolución.
- Pantalla táctil de control.
- Transmisión inalámbrica de datos radar.
- Visualización 3D.
- Detección automática con base en algoritmos y alertas visuales.
- Integración con la navegación GPS.
- Control automático de la altura del sensor de arrays del GPR.

4.3.4 Minehound – montaje COBHAM

COBHAM ha estado a la vanguardia del desarrollo de tecnología durante más de 70 años. Esta experiencia ha sido aplicada en el desarrollo de la siguiente generación de sistemas multi-canal de sensores GPR para vehículos militares. Esta tecnología está basada en el sistema COBHAM que incorpora el Minehound (Figura 4-5), un sensor dual (GPR+MD) para objetos tanto metálicos como no metálicos.

Para cumplir con los requisitos de los ambientes actuales en las zonas de combate, COBHAM también incluye posicionamiento GPS, marcado con spray de pintura e integración con el MD a tiempo real. La clave del beneficio es la modularidad de canales. A bordo, se procesan los canales individualmente y una salida de USB simplifica la interfaz con el procesador de imagen y el monitor. El número de canales del GPR (16, 32 ó 64) pueden ser modificados para conseguir una resolución adicional.



Figura 4-5 Montaje del COBHAM sobre Land Rover – DEFENDER [61]

4.3.5 Vehículo MACE

Últimamente, la tendencia es emplear vehículos de pequeñas dimensiones teledirigidos que disminuyen la peligrosidad de las acciones de desminado, así como la detección y desactivación de IEDs, pero que tienen el inconveniente de que el ancho de ruta que pueden escanear no supera los 0,5 m. Es por ello que su empleo se ve reducido a la localización exacta una vez se sabe de la situación aproximada del IED.

El MACE (Figura 4-6), es de la casa MIRA ROBOTICS y posee una propulsión híbrida eléctrica que proporciona apoyo óptimo al GPR en el movimiento lento que requieren para la limpieza de rutas en las distintas misiones. Sus dimensiones están basadas en un vehículo ATV Quad.



Figura 4-6 Vehículo Robot MACE de MIRA ROBOTICS [62]

5 DESARROLLO DEL TFG

5.1 Descripción de la zona experimental

En el interior de las instalaciones de la Escuela Naval Militar (ENM) de Marín, se simuló un camino con presencia de IEDs en terreno arenoso (Figura 5-1). Tal como se describe en la Tabla 5-2, se consideraron dos tipos de IEDs desarrollados a partir de dos UXOs de artillería (proyectil de 155mm y proyectil de 105 mm), calibres OTAN empleados por todas las fuerzas multinacionales desplegadas en el teatro estratégico y operacional. Se trata de material inerte proporcionado por el pañol de Infantería de Marina y el Dto No.4 de la ENM.

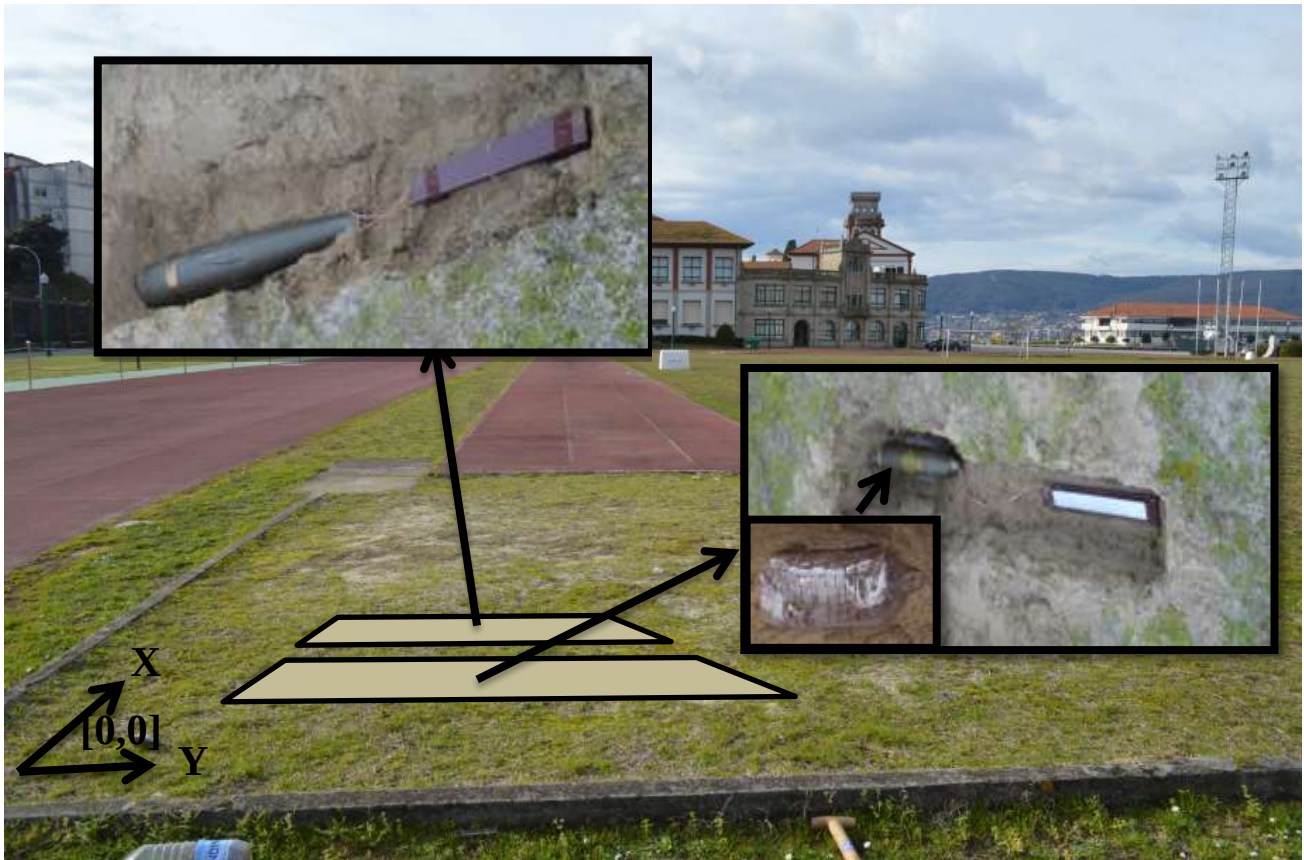


Figura 5-1 Escenario simulado y zona de estudio en la ENM de Marín

Con el fin de realizar un análisis de detección exhaustivo para la realización del estudio, y para optimización del estudio real, se tuvo en cuenta como medio mecánico de activación del IED dos platos de presión (Tabla 5-2). Se puede observar que el proyectil de 155 mm está montado con el plato de presión de vehículos pesados, ya que contiene una mayor cantidad de carga principal. Por otro lado, el montaje del proyectil de 105mm, de menor carga, se montó con el plato de presión de vehículos ligeros. Los IEDs se han instalado horizontalmente, disposición en las que se hayan en la mayoría de los casos estudiados desde el año 2000 [1]. Al IED desarrollado a partir del proyectil de 105mm se le ha añadido metralla de proyección, para aumentar los daños causados mediante una garrafa de 5 litros llena de tornillos y tuercas (objeto No.5 en la Tabla 5-2).

No.	OBJETO	DESIG.	IMAGEN	DIMENSIONES	MATERIAL
1	Proyectil 155mm	M483A1 HE		D=15,5 cm L=70 cm	METAL
2	Proyectil 105mm	M329A1 HE		D=10,5 cm L=40 cm	METAL
3	Plato Presión ligero	P1		L=50 cm A=7,9 cm H=3,8 cm	METAL Y MADERA
4	Plato Presión pesado	P2		L=50,2 cm A=7,9 cm H=6,8cm	METAL Y MADERA

5	Metralla	Tornillos y tuercas		5 LITROS L=30 cm D= 18 cm	PLÁSTICO Y METAL
6	Cables y cebos			L=1 m	METAL

Tabla 5-1 Descripción del material empleado

Los cebos han sido alojados en la cavidad de la espoleta, tal y como se puede observar en el No.6 de la Tabla 5-1 y, las correspondientes espoletas, han sido retiradas como en todo montaje de IEDs, y sustituidas por cebos, explosivo plástico o petardos que en situaciones reales cuentan con suficiente potencia como para poder detonar la carga principal del proyectil. La Figura 5-2 muestra el circuito típico empleado en la fabricación de un IED, asumido en el presente trabajo. Los circuitos empleados se recogen en la Figura 5-3, junto con una ilustración del mismo.

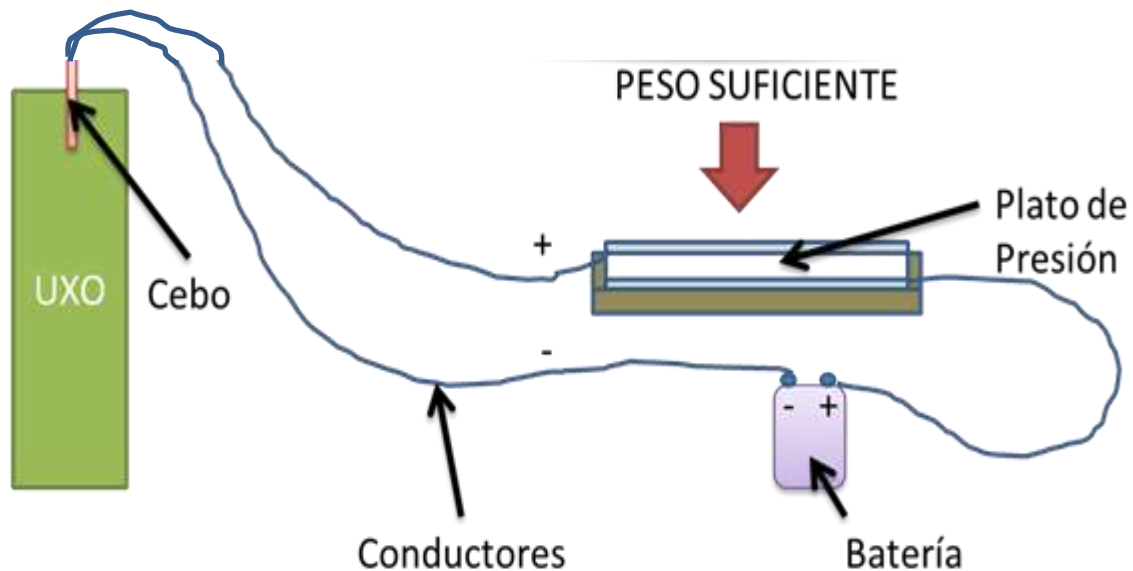


Figura 5-2 Esquema del circuito empleado en la fabricación de los IEDs

Todos los objetos, cuyo emplazamiento se observan en la Figura 5-3, fueron enterrados a una profundidad de 15 cm para enterramiento de los No.1 y No.2, y a 10 cm para los platos de presión. Los cebos han sido alojados en la cavidad como sustituto de la espoleta de los proyectiles y los conductores han sido unidos entre proyectil y mecanismo de activación mecánica. Además, la garrafa (No.5), con la metralla de protección para la multiplicación de los daños y efectos, quedó enterrada debajo del proyectil de 105 mm, conformando así el IED 1 para vehículos ligeros.

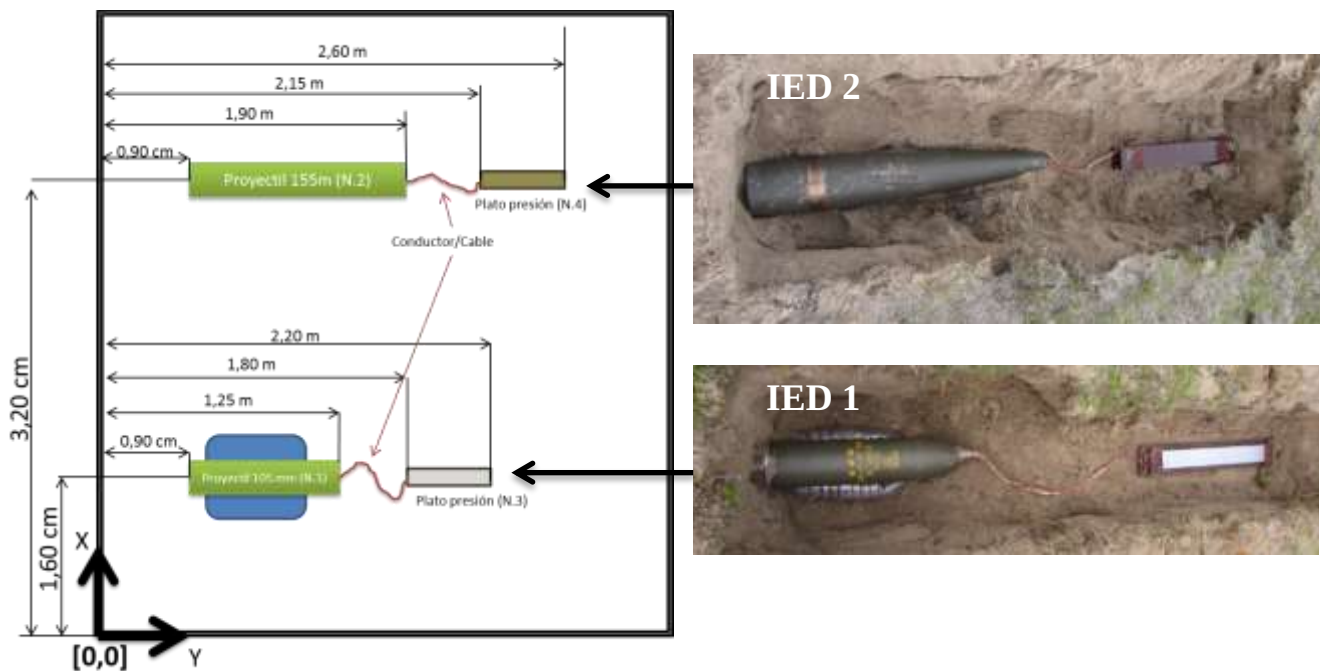


Figura 5-3 Croquis y medidas del posicionamiento de los componentes (izquierda) y foto del enterramiento de los IEDs 1 y 2 (derecha)

5.2 Metodología para la adquisición de datos

La profundidad de estudio y la resolución demandada para la detección de los IEDs fabricados, dependen de la frecuencia de la antena empleada. Las antenas que proporcionan mayor resolución, es decir, los primeros centímetros del suelo, son aquellas de muy alta frecuencia (2.3-4 Ghz) que permiten localizar elementos centimétricos. Sin embargo, dada la profundidad que pueden alcanzar dichos dispositivos improvisados, se ha seleccionado la una frecuencia de 800 Mhz para la realización de este estudio. Se ha empleado una unidad de control RAMAC CU-II de la compañía Mala Geoscience y se establecieron, como parámetros de ajuste para la toma de datos, una distancia entre trazas de 2 cm y una ventana de tiempos total de 60 ns.

En el presente trabajo, para ayudar a la mejor interpretación y visualización de los datos obtenidos, también se han considerado metodologías de adquisición y procesamiento en 3D. Por ello realizamos, teniendo en cuenta el croquis de la Figura 5-3, perfiles paralelos en dirección X a lo largo de toda la zona experimental (Figura 5-4) con un espaciado entre perfiles de 10 cm. La malla prospectada final resultó ser un rectángulo de 4,80x3,5 m.



Figura 5-4 Obtención de los datos GPR en la zona experimental

5.3 Procesado de la señal

El programa informático empleado (Figura 5-5) para el procesamiento de la señal es el ReflexW v.7.1.6 [63]. Este programa permite la fácil y rápida importación, procesamiento y representación de datos GPR previos a su interpretación.

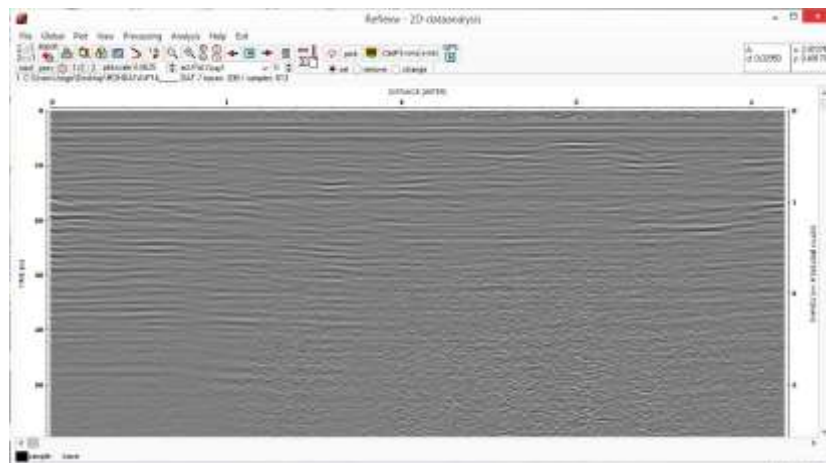


Figura 5-5 Página principal del software ReflexW

5.3.1 Procesado 2D

Hay diversos tipos de factores que limitan el empleo del georradar, como son la atenuación de la señal electromagnética, ruidos externos y ruidos instrumentales, de ahí que antes de interpretar los datos del georradar debemos realizar el procesamiento 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.

Podemos clasificar los filtros en dos tipos: unidimensionales y bidimensionales. Los filtros unidimensionales (1D) son también llamados filtros verticales o filtros temporales, y son aquellos que se aplican sobre cada traza de manera individual, realizando en todas ellas la misma operación y que afectan exclusivamente a la dimensión vertical. A este tipo de filtros corresponden los filtros frecuenciales de paso baja, paso banda, etc.

Los filtros bidimensionales (2D), son todos aquellos filtros que sólo afectan a la dimensión horizontal. El filtrado paso alta horizontal es muy útil, ya que se elimina del radargrama lo que se repite en todas las trazas y por tanto que pueda ser interpretado como ruido que procede del georradar, de las ondas aéreas, señal directa, etc. Esta operación se realiza simplemente sustrayendo la traza media de todo el perfil (Background removal), o directamente en la ventana (Subtracting average).

Como ejemplo para la explicación del procesado 2D, se utilizarán los datos tomados de un UXO, en concreto una granada de mortero calibre 81mm (Figura 5-6).



Figura 5-6 Granada Mortero M-81 mm

De la toma de datos se generan dos archivos: (1) .rad (.txt file) y (2) .rd3 (matriz de datos). Del fichero de texto (Figura 5-7), obtenemos los siguientes datos importantes: (1) intervalo entre trazas=0,020m, (2) antenas=800 Mhz (apantallada), (3) ventana de tiempos= 60 ns, y (4) separación entre dipolos= 0,14 m

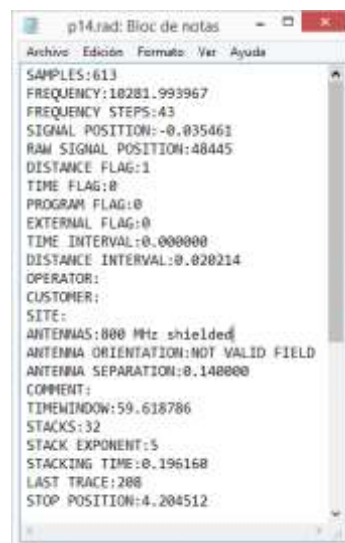


Figura 5-7 Archivo .rad (txt)

En primer lugar importamos el archivo (.rd3) en el programa y obtenemos el radargrama en bruto (Figura 5-8).

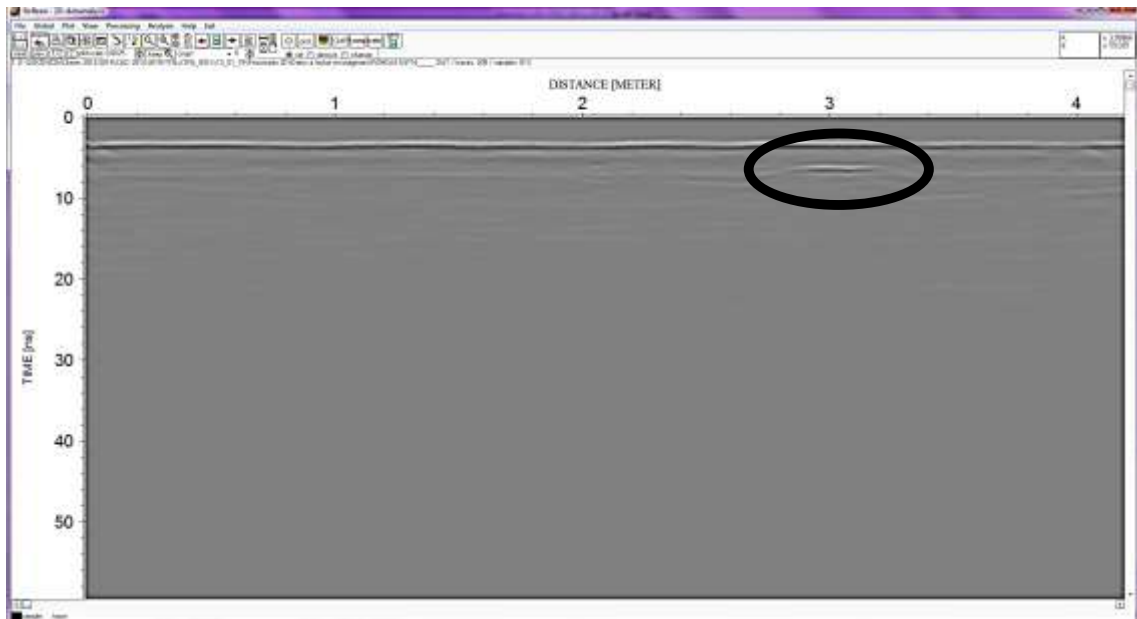


Figura 5-8 Importación del archivo en ReflexW

Antes de aplicar cualquier otro filtro, tenemos que ajustar el tiempo cero (Figura 5-9), para evitar derivas térmicas, la inestabilidad, la diferencia de longitudes de los cables electrónicos o las variaciones del espacio de aire entre la antena y la superficie del suelo, causando “saltos” en el registro inicial de la señal. Dicha corrección es necesaria para un cálculo correcto de la profundidad a la que se sitúan los diferentes eventos registrados. El criterio que utilizamos es la elección del pico de máxima amplitud de la traza.

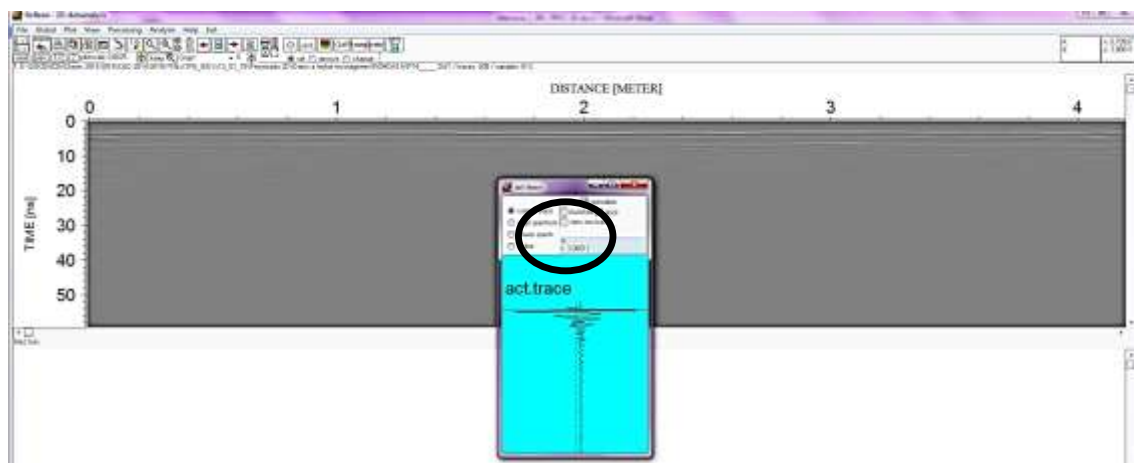


Figura 5-9 Vista wigggle-window para determinación de tiempo cero

Una vez obtenido el tiempo cero, se aplica el “start time” (Figura 5-10) y se observa como los valores de los ejes se han centrado respecto al suelo.



Figura 5-10 Introducción del “start time= -3ns”

Acto seguido se aplican los filtros 1D y 2D: (1) filtro de frecuencia vertical (1D)/dewow, (2) amplificación de la señal o ganancia, y (3) filtros de frecuencia horizontal (2D).

1. Filtro de frecuencia vertical (1D)/Dewow

Es común a todos los equipos GPR la aparición de una componente continua de baja frecuencia en las trazas registradas por el GPR, porque el nivel promediado de la señal sufre un desplazamiento de amplitud cero a un valor diferente. Dicho efecto está asociado con fenómenos de inducción o generalmente a posibles limitaciones instrumentales del sistema dentro del rango dinámico. Se le aplica el filtro Dewow, obteniendo el resultado de la Figura 5-11, [38].

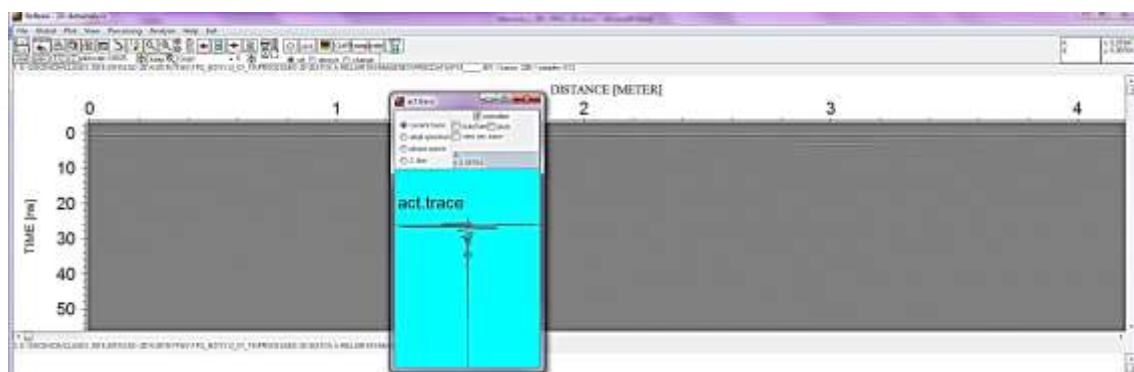


Figura 5-11 Datos GPR antes (arriba) y después (abajo) de aplicar un filtro de frecuencia vertical (dewow)

2. Amplificación de la señal/Ganancia

Consiste en amplificar la señal recibida a partir de una función matemática exponencial. Lo que buscamos es contrarrestar el efecto producido por la atenuación geométrica de la onda en su

propagación y por las características electromagnéticas que tengan los materiales del subsuelo. Las señales de radar se ven rápidamente atenuadas cuando se propagan por el subsuelo, y a mayor profundidad mayor atenuación, por lo que amplificamos las amplitudes aplicando una función ganancial dependiente del tiempo para compensar la rápida caída de la señal del GPR (Figura 5-12), [39].

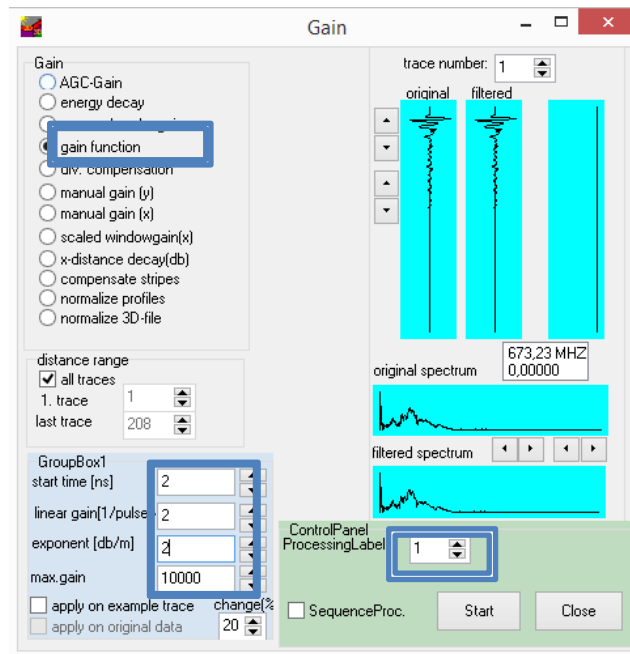


Figura 5-12 Configuración de la función ganancial

Una vez aplicada la función ganancial podemos observar cierta diferencia con respecto a la (Figura 5-12). Podemos observar que una vez amplificada la ganancia, se comienza a detectar perfectamente el UXO (Figura 5-13).



Figura 5-13 Datos GPR después de aplicar la ganancia

3. Filtros de frecuencia horizontal (2D)/Subtracting average.

La función principal de este filtro es eliminar el ruido de baja frecuencia que aparece en forma de bandas horizontales continuas a lo largo de todo el radargrama (conjunto de trazas del perfil). Es decir, se intenta estimar un promedio de todas las trazas y eliminarlo de cada una de ellas. Por lo tanto, el objetivo final es eliminar estos reflectores continuos tratando de enfatizarlo en las reflexiones que son más pequeñas. Además, son óptimos para eliminar todo aquel ruido que es originado por el mal acoplamiento entre la antena y el medio en el que empleamos el GPR y también para disminuir las posibles reverberaciones de la señal. Aplicando la configuración de este filtro (Figura 5-14), obtendremos que dichas reverberaciones se eliminen parcialmente (Figura 5-15), [40].

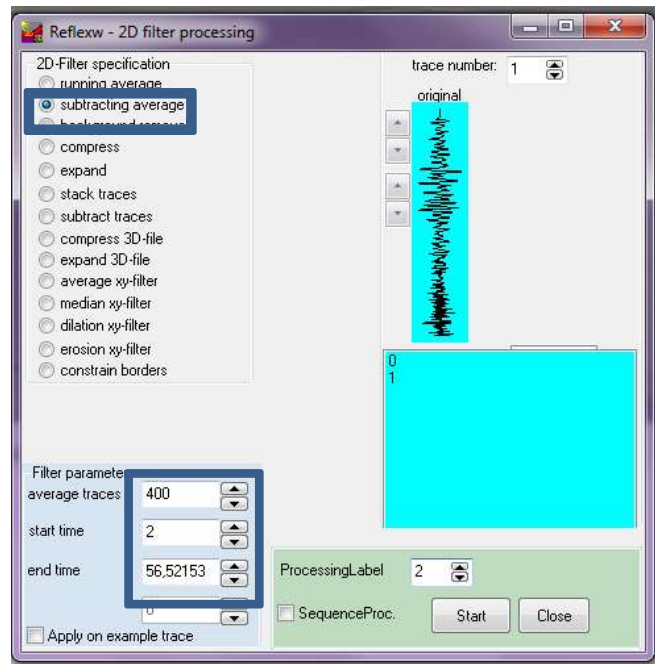


Figura 5-14 Configuración de “Subtracting average” en ReflexW

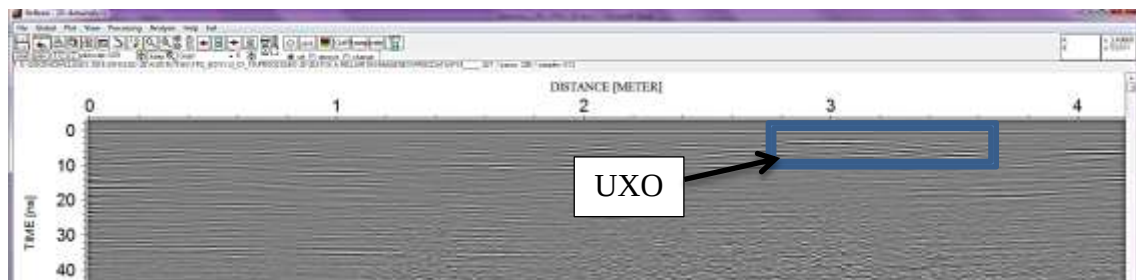


Figura 5-15 Datos GPR después de aplicar “subtracting average”

En la imagen de la Figura 5-16 se hace un recorte de la ventana temporal y se consigue una imagen más en detalle.

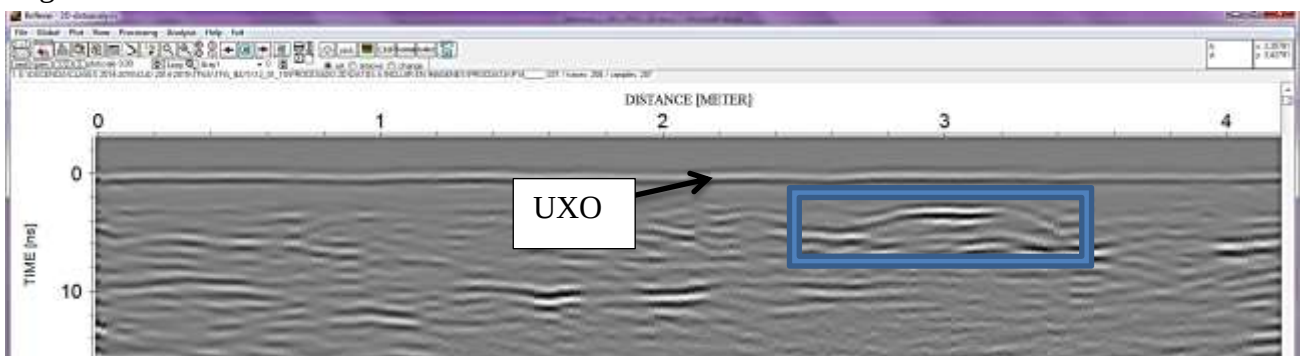


Figura 5-16 Datos GPR finales tras la reducción de la ventana temporal

5.3.2 Procesado 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 entre sí (adquisición 3D) y con una separación constante entre perfiles en la dirección denominada Y (Figura 5-4). Este cubo de datos se puede cortar por diferentes planos, estos cortes son llamados time-slices o C-scans (Figura 5-17). Es decir, 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.

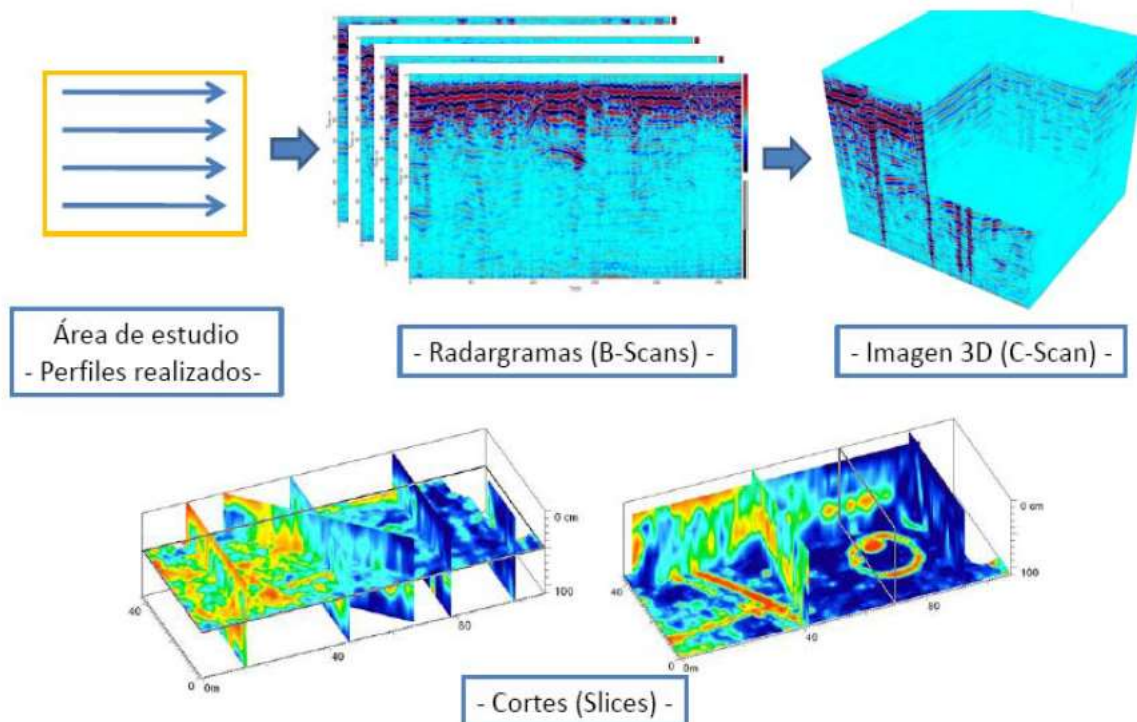


Figura 5-17 Forma en la que se genera un cubo 3D y slices a partir de radargramas

En el presente trabajo, una vez que los datos 2D se procesaron, se exportaron al módulo “3D-data interpretation” del mismo software ReflexW (Figura 5-18) de procesamiento con el fin de crear un cubo 3D. Todos los radargramas se registraron con la misma distancia tanto de traza e incremento de tiempo.

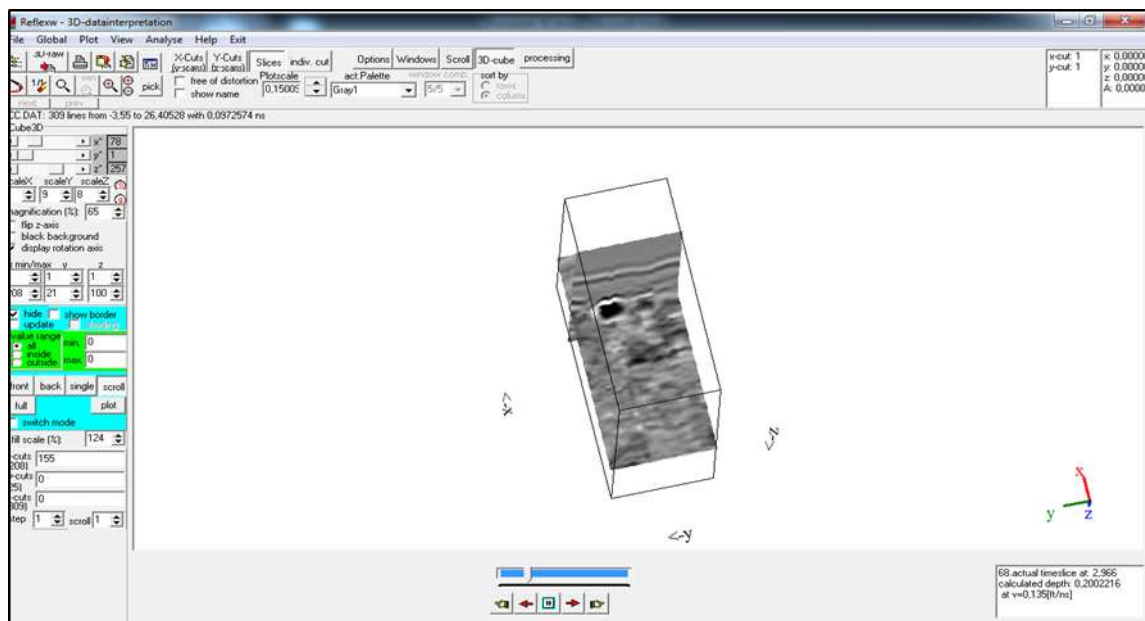


Figura 5-18 Página principal del módulo de interpretación 3D del software ReflexW

Como ejemplo, para el caso concreto de la granada de mortero de la Figura 5-6, con la antena de 800 Mhz y perfiles paralelos espaciados cada 10 cm, se muestran diferentes cubos construidos (Figura

5-19), así como la time-slice (imagen XY) a 20 cm de profundidad, mostrando la huella de la señal generada por la presencia del UXO en profundidad (círculo rojo).

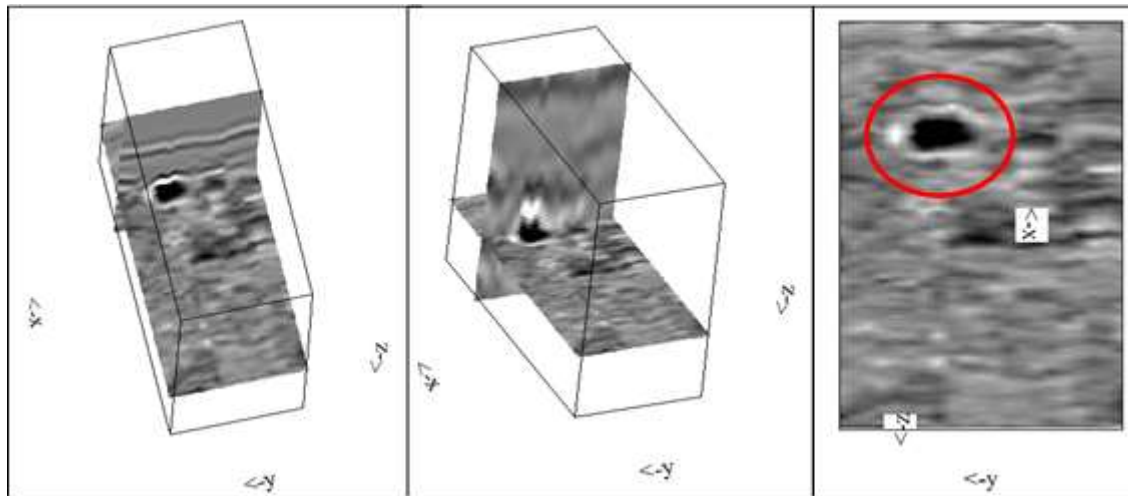


Figura 5-19 Cubo 3D generado para el caso del UXO de la Figura 5-6 y time-slice horizontal a 20 cm de profundidad mostrando la huella del artefacto

5.4 Simulación numérica (FDTD)

El medio de propagación utilizado en este estudio ha sido un medio arenoso por ser este el más habitual para las tropas de Infantería de Marina. Sin embargo, la capacidad de detección de la técnica podría variar si se tratase de ambientes más heterogéneos y, con este fin, se han simulado ambientes con menor y mayor grado de presencia de piedras. Hay numerosos métodos de simulación disponibles para simular la propagación de las ondas GPR. Sin embargo, el método de simulación numérica FDTD es el mayormente empleado para una mejor comprensión de la señal y su propagación. La interpretación y análisis de datos GPR resulta muy complicada cuando se trata de ambientes heterogéneos, principalmente debido a la existencia de eventos de difracción de la señal, presencia de reflexiones múltiples, clutter (ruido), etc. Por lo tanto, la simulación numérica es una herramienta de interpretación cada vez más empleada para entender el fenómeno de propagación de las ondas del radar en tales ambientes complejos [64]-[65].

El GprMax2D y el GprMax3D son dos programas de ordenador que implementan el método FDTD para el modelado 3D y 2D, respectivamente [66]. En nuestro trabajo hemos empleado el GprMax2D que está disponible gratuitamente para enseñanza e investigación, descargable en [67] y que fue desarrollado por el Dr Antonis Giannopoulos de la Universidad de Edimburgo.

El modelo se elaboró con una resolución espacial de 8 mm (discretización del volumen o tamaño de celda) y una excitación de pulsos Gaussianos de 800 Mhz de frecuencia central. La distancia entre trazas y la ventana de tiempos fueron 3 cm y 60 ns, respectivamente. Para llevar a cabo este apartado de simulación FDTD, se realizó la simulación de tres casos diferentes: (1) un proyectil en medio arenoso homogéneo, (2) el mismo proyectil en medio arenoso con una cantidad reducida de elementos heterogéneos (piedras) y (3) el proyectil en medio arenoso con una cantidad grande de elementos heterogéneos (piedras).

Para ello se editó el archivo “.in”, que no es más que un archivo de texto para configuración del escenario a simular y parámetros de adquisición de datos. A continuación, en la Figura 5-20, podemos observar el archivo “.in” que se editó para el primer caso en medio homogéneo.

```
#medium: 5 0.0 0.0 0.0001 1.0 0.0 arena
#medium: 7.0 0.0 0.0 0.0001 1.0 0.0 piedra
-----
#domain: 4.0 3.0
#dx_dy: 0.008 0.008
#time_window: 60e-9
-----
#box: 0.0 0.0 4.0 2.5 arena
#cylinder: 2.0 1.5 0.1 pec
-----
#line_source: 2.0 800e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 100 proy1.out b
#tx: 0.20 2.55 MyLineSource 0.0 100e-9
#rx: 0.34 2.55
#tx_steps: 0.03 0.0
#rx_steps: 0.03 0.0
#end_analysis:
-----
#geometry_file: proy1.geo
#title: PROYECTIL v.2
#messages: y
```

Figura 5-20 Archivo .in proyectil y su medio “arena”

Los comandos generales incluyen los tamaños y la discretización del modelo.

#medium: f1 f2 f3 f4 f5 f6 str1

Este commando introduce los parámetros de un medio determinado. En nuestro caso, tenemos arena como medio principal y piedra para los elementos de la simulación que emplearemos para ver su influencia en las ondas del GPR.

F1- La permitividad del medio; en nuestro caso valor 5.

F2- la permitividad relativa a una frecuencia teóricamente infinita.

F3- El retardo del medio (segundos).

F4- la conductividad del medio (S/m); en nuestro caso valor 0,0001 S/m.

F5- la permeabilidad relativa del medio; en nuestro caso valor 1,00.

F6- la conductividad magnética del medio.

Str1- identificador del medio; en nuestro caso arena/piedra.

#domain f1 f2

Este comando se emplea para especificar el tamaño del modelo. Los parámetros f1 y f2 son el tamaño en metros en las direcciones x e y. En nuestro caso es un tamaño de modelo de 4 m de largo por 3 m de profundidad.

#dx_dy: f1 f2

Este comando se emplea para especificar la resolución espacial en las direcciones x e y respectivamente. El f1 es la resolución en la dirección x y f2 la resolución espacial en el eje y. Este comando combinado con el #domain determina el número de celdas que se va a emplear para describir el modelo. Este tamaño de celda será función de las geometrías a simular; a menor tamaño de celda, mayor resolución geométrica de los elementos.

#time_window: f1

Este comando especifica el tiempo total requerido simulado o la ventana de tiempo en nanosegundos. En nuestro caso 60ns.

#box f1 f2 f3 f4 str1

Este comando introduce un rectángulo en la simulación de unas propiedades específicas en el modelo. Los parámetros f1 y f2 son las coordenadas de la esquina inferior izquierda del rectángulo (x,y) en metros. De manera similar f3 y f4 son las coordenadas de la esquina superior derecha (x,y) en metros del rectángulo. El parámetro str1 es el medio identificador definido anteriormente con el comando #domain.

#cylinder: f1 f2 f3 str1

Este comando es el empleado para introducir los círculos en el modelo. Es el que se empleó para introducir las piedras en los distintos casos de estudio. Los parámetros f1 y f2 son las coordenadas (x,y) del centro del círculo en metros y el parámetro f3 es el radio en metros. Str1 es el medio identificador, en nuestro caso piedra.

#line_source: f1 f2 str1 str2

Este comando es para introducir las variables. f1 y f2 son la amplitud en Amperios (A) de la corriente de la fuente y la frecuencia central en Hertzios. En nuestro caso, 2A y 800 Mhz. Por otro lado, str1 es el parámetro de control que determina el tipo de excitación y str2 es el parámetro que relaciona las especificaciones de esa fuente con el punto de aplicación en el modelo.

#analysis: i1 file1 c1

El parámetro i1 es el número de elementos que forman el modelo lo que genera el array y el tiempo a cero por cada uno de los i1. El parámetro file1 es el nombre del archivo y el parámetro c1 puede ser a o b y denota el formato de salida del archivo (file1) que puede ser ASCII o BINARY, respectivamente.

#tx: f1 f2 str1 f3 f4

Los parámetros f1 y f2 son las cordenadas (x,y) en metros del punto transmisor en el modelo. El parámetro str1 indica el identificador de la fuente que ha sido especificado anteriormente con el comando #line_source. El parámetro f3 es un de retardo para el inicio de la fuente. El parámetro f4 es el tiempo. Si la simulación se inicia por más tiempo que dicho tiempo la fuente dejará de funcionar en el modelo después de los f4 segundos.

#rx: f1 f2

Los parámetros f1 y f2 son las coordenadas (x,y) en metros donde se posiciona el receptor en el modelo.

#tx_steps:f1 f2/#rx_steps:f1 f2

Los parámetros f1 y f2 son el incremento en metros de las coordenadas (x,y) de acuerdo a todas las fuentes especificadas usando (#tx command/#rx command). Sería cada cuántos metros emite un impulso electromagnético.

#geometry_file:file1.geo

Es posible especificar un archivo en el cual la información de la geometría del modelo se guarde en formato binario. Esta información puede ser usada para crear una imagen del modelo y comprobar si está construido convenientemente. El parámetro file 1 es el nombre del archivo geométrico.

#messages: c1

Este comando puede controlar parcialmente la cantidad de información mostrada en pantalla. El parámetro c1 puede ser bien y(yes) o n(no), lo que enciende o apaga los mensajes en pantalla.

6 RESULTADOS

6.1 Resultados 2D

Para la consecución del objetivo general de este trabajo, con el análisis de idoneidad del GPR para la detección de IEDs, se ha particularizado dos tipos de dispositivos de manera individual. El primero, fabricado con un proyectil de 105 mm y, el segundo, con un proyectil de 155 mm. Ambos artefactos improvisados son activados mediante dispositivos de activación mecánica. En el caso del proyectil de 105 mm, mediante un plato de presión para vehículos ligeros y, en el caso del proyectil de 155 mm, mediante un plato de presión para vehículos pesados.

Antes de comenzar con la interpretación de los datos, cabe resaltar que para aquellos artefactos planos, como los platos de presión, el patrón esperado es una reflexión plana continua (No. 3 y No.4, en Tabla 5-2). Sin embargo, en el caso de elementos de mayor tamaño y forma más o menos circular, la reflexión que se genera se aproxima a una hipérbola (por ejemplo, No.1 y No.2, en Tabla 5-2) debido a que el dispositivo se encuentra en perpendicular al sentido de adquisición de los datos.

Una vez realizada la toma de datos, se obtuvieron los radargramas para los distintos IEDs fabricados, todos ellos identificados con una flecha y el número correspondiente al objeto (Tabla 5-2). El primer radargrama (Figura 6-1) corresponde a los componentes de los IED (No.1 y No. 2), que son los proyectiles de 105 mm y los proyectiles de 155 mm. Se puede confirmar su reflexión hipérbólica debido a la disposición de los dispositivos según el croquis de la Figura 5-3 a una distancia de (1,10 m) desde el origen en el eje Y.

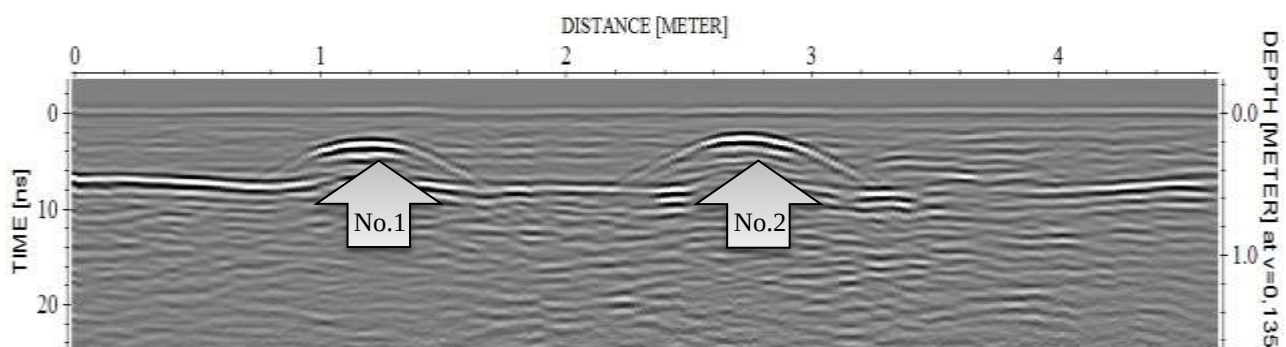


Figura 6-1 Radargrama obtenidos con una frecuencia de 800 Mhz para los dos proyectiles de artillería (105 mm del IED 1 a la izquierda y 155 mm del IED 2 a la derecha)

Conforme se continuo la toma de datos, a una distancia de (1,60 m) desde el origen en el eje Y (Figura 6-2), se deja de observar el proyectil de artillería de 105 mm y se distingue la variación generada por los conductores (No.6), aunque el proyectil del IED 2 de 155 mm, al ser más grande, se continúa viendo (No.2).

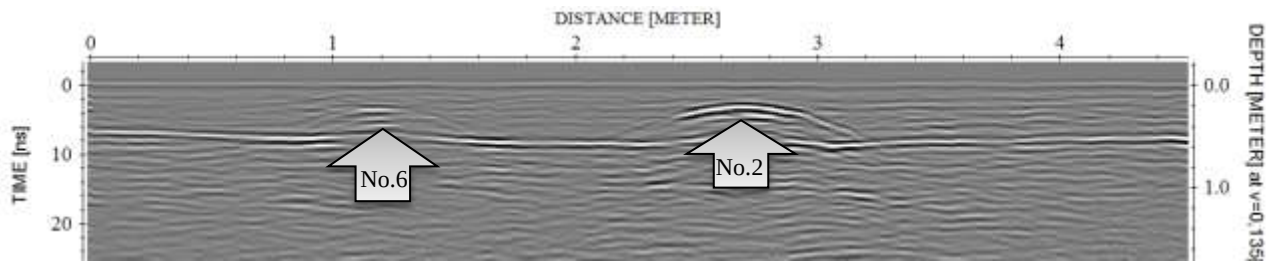


Figura 6-2 Radargrama obtenido con una frecuencia de 800 Mhz donde figuran los conductores del IED 1 (No.6) y el proyectil de 155 mm del IED 2 (No.2)

En la Figura 6-3, se muestra el radargrama a (2,10 m) del origen y se detectó el plato de presión del IED 1 (No.3) y se deja de distinguir el proyectil de artillería del IED 2, diferenciando levemente la presencia de los conductores (No. 6) que van hacia el plato de presión.

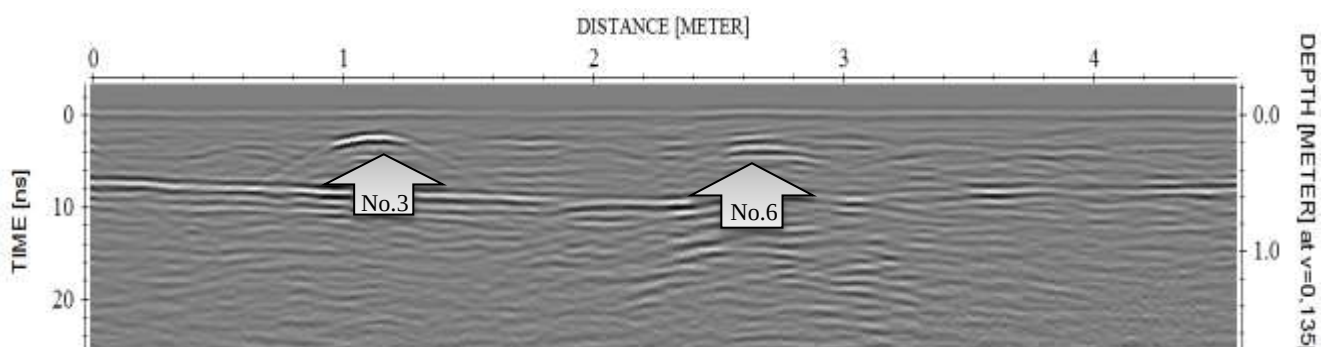


Figura 6-3 Radargrama obtenido con una frecuencia de 800 Mhz del plato de presión del IED 1 (No.3) y los conductores del IED 2 (No.6)

Por último, en la Figura 6-4, puesto que estaba más separado que ningún otro elemento, se detectó el plato de presión para vehículos pesados del IED 2 (No.4) a una distancia del perfil al origen de 2,50 m.

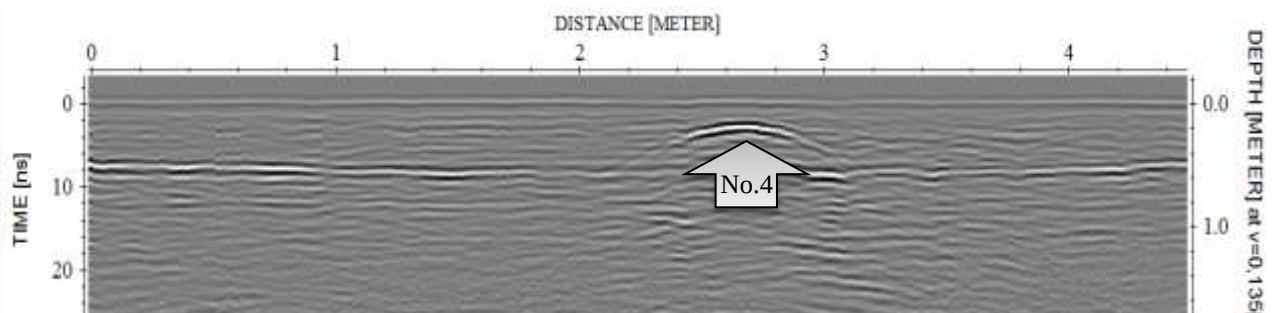


Figura 6-4 Radargrama obtenido con una frecuencia de 800 Mhz del plato de presión del IED 2 (No.4)

Aunque los artefactos son reconocibles, la identificación por interpretación del patrón de reflexión se dificulta en los cables/conductores debido a su reducido diámetro y disposición y, únicamente, se identifica una pequeña reverberación de la señal. 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.

6.2 Resultados 3D

La Figura 6-5 muestra la imagen 3D (time-slice) obtenida con la antena de 800 Mhz a una profundidad de 20 cm. La selección de las profundidades se hace en función de la profundidad de enterramiento del IED, ya que la resolución vertical a 800 Mhz permite identificar incluso los artefactos más superficiales. El eje temporal de ordenadas a profundidades se transforma a través de la Ecuación 3-17 que se citó anteriormente, considerando una velocidad de propagación de 13,5 cm/ns. A esta profundidad, se identifican fácilmente todos los elementos que fueron enterrados según el croquis de la figura 5-3, salvo la garrafa (No.5) con la metralla, la cual, al ser enterrada bajo el elemento No.1 (proyector de artillería de 105 mm), está a más profundidad y habría que seleccionar otra time-slice para detectarla.

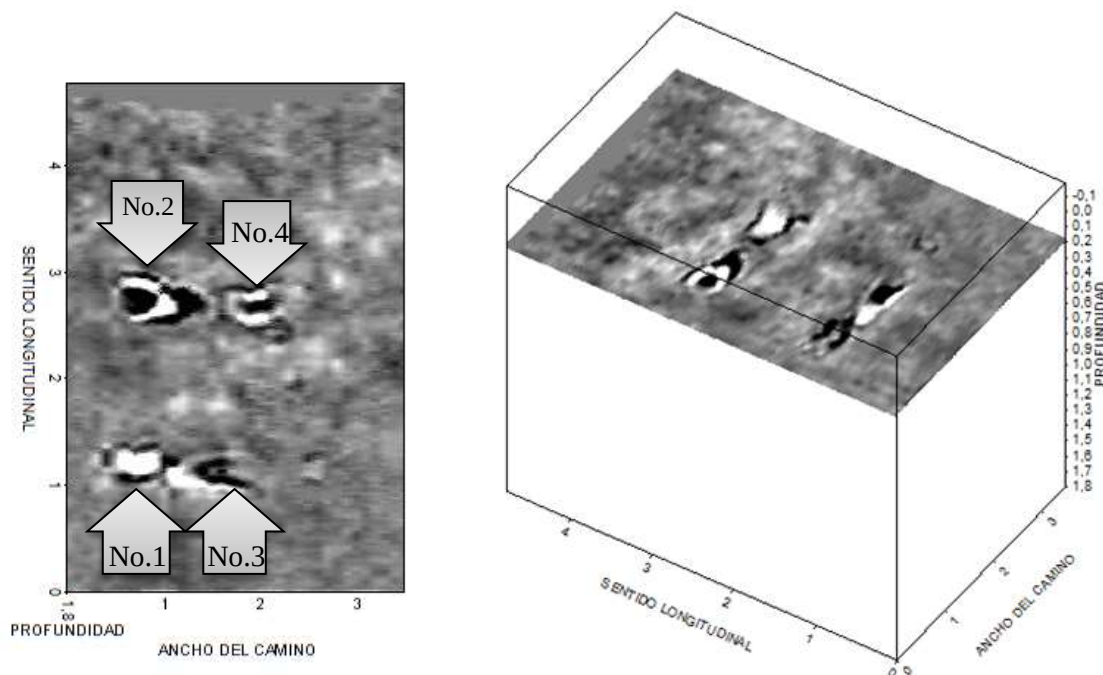


Figura 6-5 Imagen 3D y cubo 3D generados a 20 cm con la antena de 800 Mhz.

Se detectan claramente los platos de presión. Por un lado, el plato de presión de vehículos ligeros (No.3) es el que mejor define una forma rectangular en el procesado 3D debido a que en su parte superior hay directamente una plancha metálica con un elevado índice de reflexión. En cambio, el plato de presión para vehículos pesados (No.4) tiene en su parte superior una pieza de madera, lo que hace que sea igual de detectable pero más difícil de definir el mismo tipo de reflexión. Cabe destacar que esto se debe a que el contraste dieléctrico es mayor entre el metal y la arena que entre la madera y la arena, puesto que el metal es un reflector ideal que refleja toda la energía recibida.

Atendiendo a la permitividad de cada medio y haciendo uso de la Ecuación 3-12, podemos obtener y comprobar que la diferencia de contraste dieléctrico entre madera y arena, es menor que entre metal y arena.

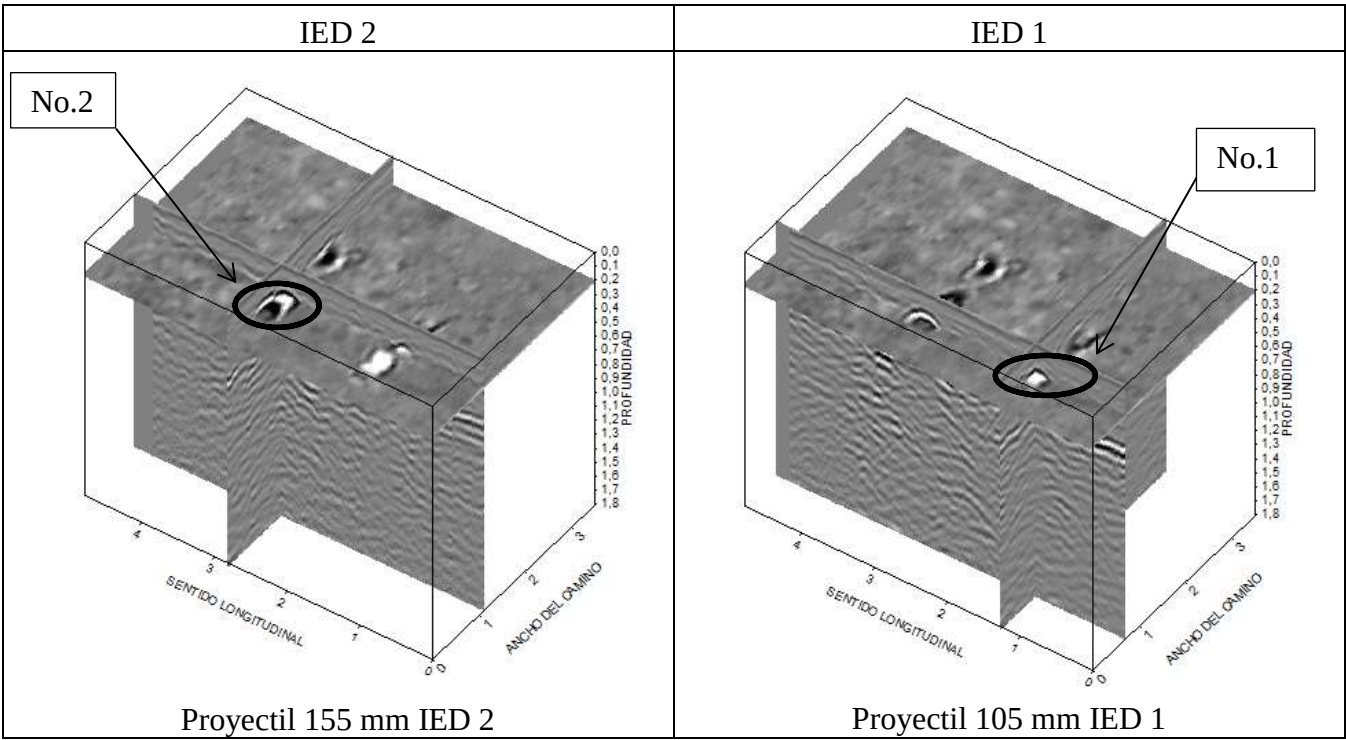
MEDIO	R (Coeficientes de reflexión)	ϵ_r (Permitividades)
Arena	-1	5
Metal		∞

Arena	0.171	5
Madera		2,5
Conclusión→ R Madera-Arena << R Metal-Arena		

Tabla 6-1 Diferencia de contraste dieléctrico entre los materiales de los platos de presión

Atendiendo a la Figura 6-5, cabe además destacar la detección de los cables o conductores que van desde los cebos alojados en las cavidades de las espoletas de los proyectiles (No.1 y No.2) a los platos de presión (No.3 y No.4). Se obtendría mejor definición de los mismos si empleáramos una antena del orden de Ghz.

La Tabla 6-2 muestra las distintas secciones (XY, YZ, XZ), generadas a partir del cubo 3D para una mejor interpretación y correlación entre los objetos detectados. Señalados de izquierda a derecha, y de arriba abajo, podemos observar en primer lugar los proyectiles de artillería de 155 mm y de 105 mm respectivamente, así como los platos de presión del IED 2 y del IED 1.



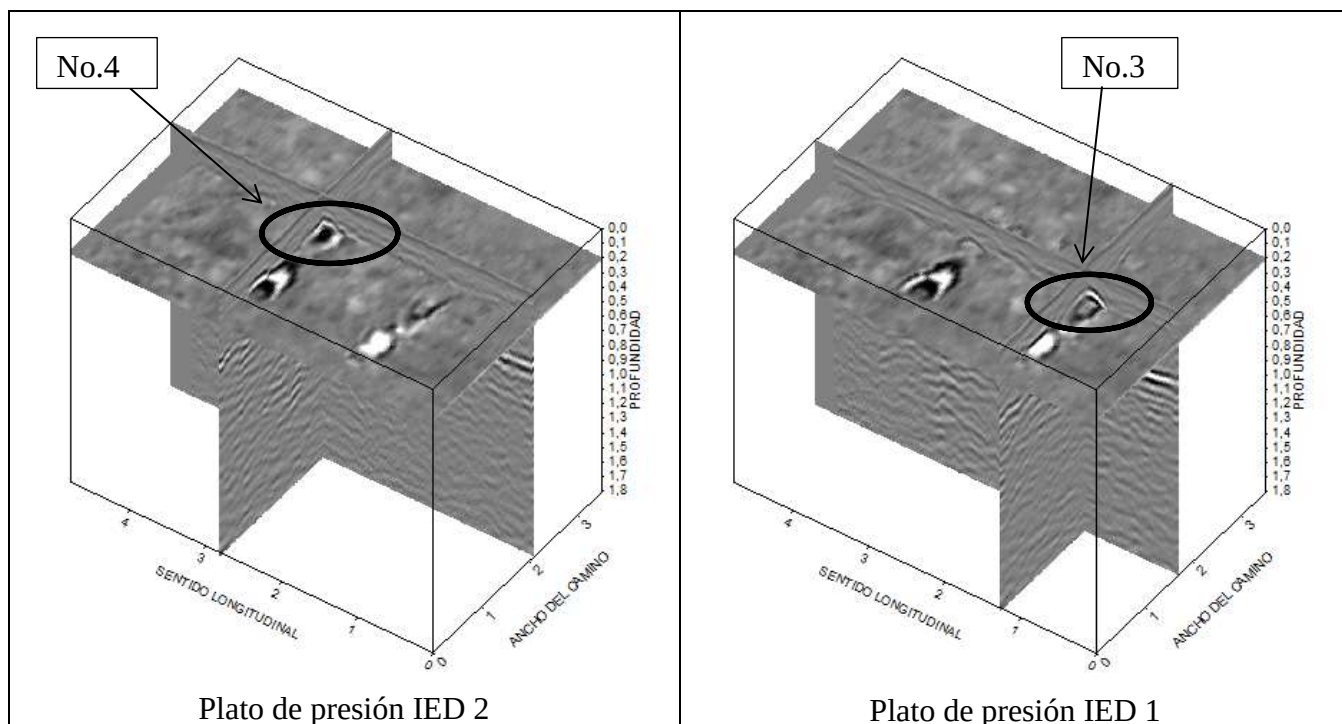


Tabla 6-2 Resultados 3D para los IEDs 1 y 2

Del procesado 3D, además podemos analizar los resultados obtenidos para la garrafa (No. 5) que se confeccionó con metralla para aumentar los efectos y daños del IED 1. En la Figura 6-6 se puede observar tanto el corte en profundidad a 30 cm, como el cubo 3D resultante del procesado, donde se señala la localización de dicho elemento.

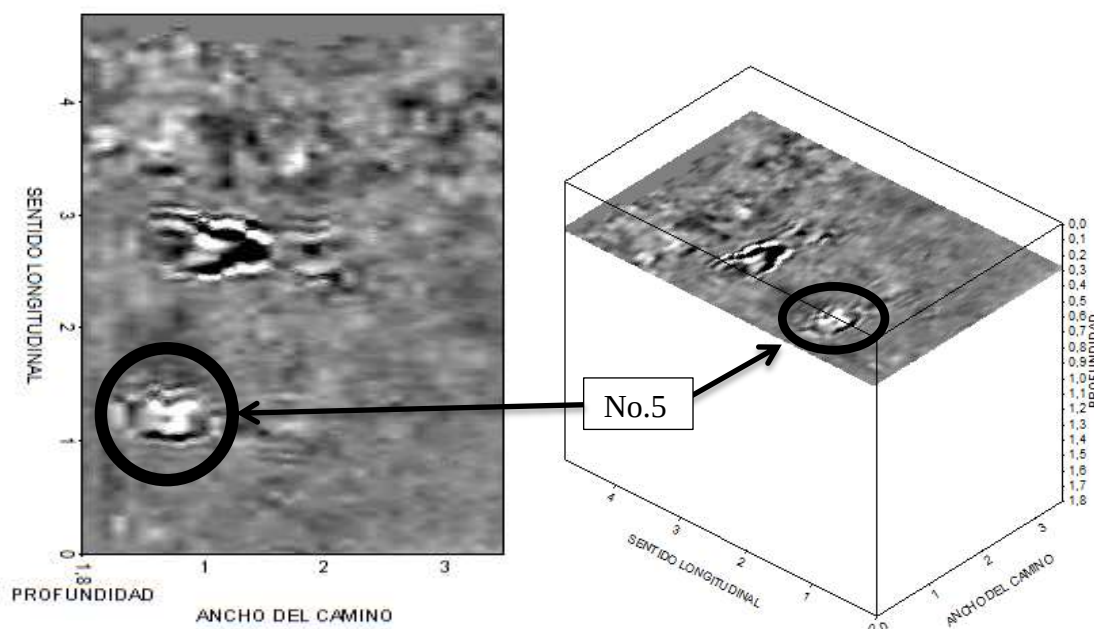


Figura 6-6 Procesado 3D de la garrafa a 30 cm de profundidad

6.3 Resultados sintéticos

Una vez programado e iniciado el software GprMax2D y exportado los archivos a MATLAB para obtener la solución, hemos obtenido los resultados recogidos en la Tabla 6-3. Se muestran tanto el modelo como el radargrama sintético obtenidos.

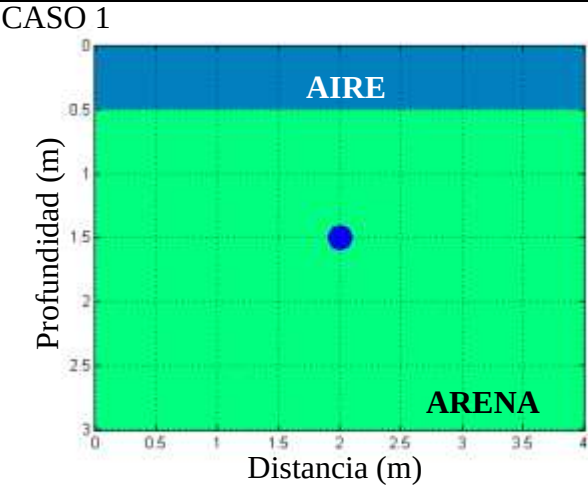
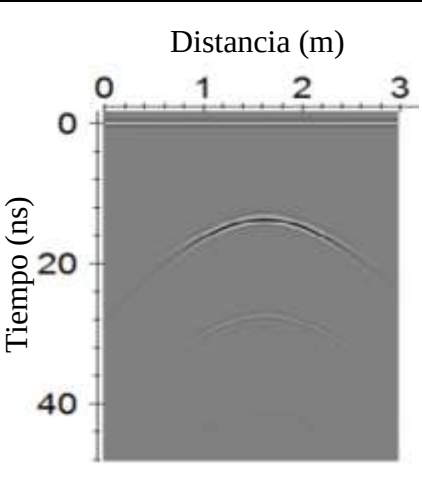
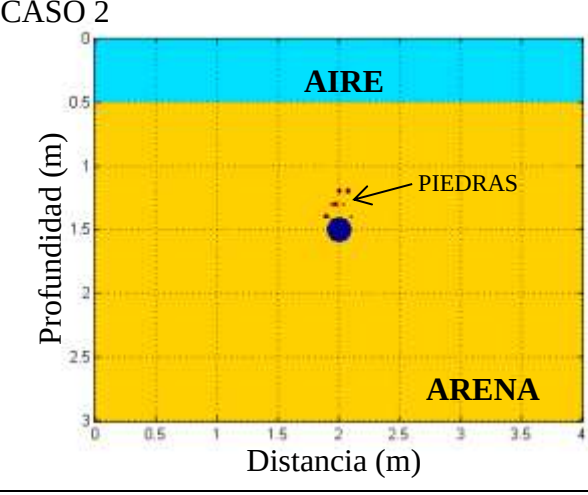
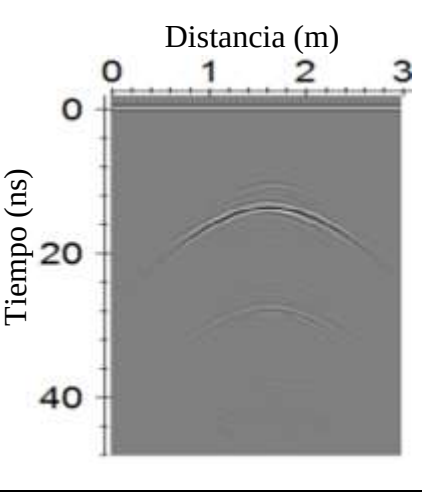
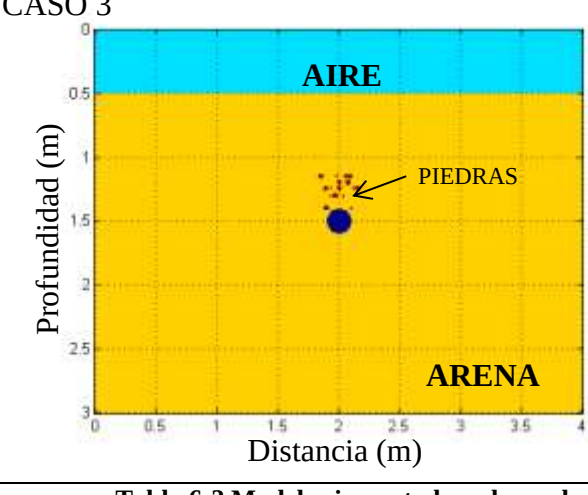
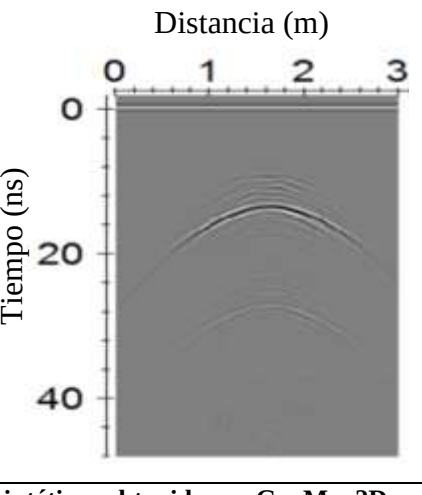
MODELO IMPORTADO	RADARGRAMA SINTÉTICO
CASO 1 	
CASO 2 	
CASO 3 	

Tabla 6-3 Modelos importados y los radargramas sintéticos obtenidos en GprMax2D

En el caso 1, Tabla 6-3, se simuló un proyectil de acero de 200 mm de diámetro en ambiente arenoso homogéneo. El radargrama sintético generado muestra la reflexión limpia, en forma de hipérbola, generada por la presencia de dicho proyectil.

En el caso 2 se simula el mismo proyectil en un ambiente con mayor grado de heterogeneidad sobre dicho dispositivo. En este caso, se ha simulado la existencia de 7 piedras con diámetro variante entre 2 y 4 cm. Se observan las difracciones de la señal producidas justo encima del proyectil.

Por último, para el caso 3, se simuló más heterogeneidad. En concreto, se han simulado 17 piedras con el mismo rango de diámetros. Atendiendo al radargrama sintético, se observa que en comparación con el caso 2, se generan más difracciones debido a la irregularidad de los elementos heterogéneos (piedras).

No obstante, aunque el número de difracciones aumenta, el proyectil se identifica en todos los casos. Esto se debe a la gran potencia de reflexión que presenta el metal, considerado como un reflector perfecto.

7 CONCLUSIÓN Y LINEAS FUTURAS

7.1 Conclusiones generales

Tras la obtención de resultados aplicando la metodología y el procedimiento estudiado, se han conseguido cumplir con éxito todos los objetivos generales y específicos que se marcaron al inicio de este trabajo.

Por un lado, se ha comprobado la viabilidad del empleo del GPR, mediante metodologías de adquisición 2D y 3D en las labores de detección, todo ello mediante procesamiento de datos con el programa ReflexW creando para ello una zona experimental adecuada que caracterizó la disposición de los IEDs en el terreno y el emplazamiento habitual en un camino de tierra típico de paso de convoyes para su posterior toma de datos.

Por otro lado, se analizaron los IEDs de actualidad, sus componentes y configuración para entender su preparación y método de instalación en el terreno y poder montar, dentro de la zona experimental, los IEDs simulados más parecidos a aquellos que podemos encontrar en el escenario de combate actual. Además, se analizaron algunos vehículos empleados actualmente en el ámbito civil para el desminado humanitario y en el ámbito militar para la remoción de artefactos, que equipan la tecnología del radar de penetración del subsuelo para la detección de minas y explosivos que han quedado sin explotar en los viejos campos de batalla, pero no se encontraron aplicaciones a nivel táctico o de unidades a pie. Las unidades ligeras, características de los Batallones de Desembarco de Infantería de Marina, carecen de medios de detección de IEDs tanto vehiculares como de equipos portables manuales a emplear por un sólo usuario.

Analizando la metodología y la toma de datos seguida, cabe destacar que la antena de 800 Mhz, con una resolución vertical de (12 cm), se muestra idónea incluso para la detección de los elementos más superficiales (platos de presión, cables...etc.), pero la situación o el emplazamiento de los conductores no es el interés fundamental en el empleo de esta técnica; lo mejor para detección es localizar los componentes principales y de mayor tamaño. En el caso de que el interés sea detectar los conductores para una posterior desactivación del artefacto, lo mejor sería emplear una antena del orden de Ghz, con una menor penetración pero con mejor resolución. Esta resolución permitiría localizar la disposición exacta de los conductores así

Ya con el análisis de los resultados 2D se identificaron todos los componentes enterrados en la zona experimental y se comprobó que con la aplicación del procesamiento 3D se consigue visualizar de manera más sencilla los componentes de los IEDs, de manera que cualquier usuario prácticamente sin experiencia, pueda determinar la forma geométrica de los componentes y sus tipos sin necesidad de remoción de material o empleo de un procedimiento destructivo. Todos los resultados 3D mostraron a la profundidad de enterramiento todos los elementos salvo la garrafa con metralla, la cual, al estar

debajo del proyectil de 105 mm que conformaba el IED 1, hubo que modificar la profundidad para conseguir visualizarla.

En última instancia se realizó la simulación numérica de la señal electromagnética de apoyo a la interpretación de datos tomados en campo, lo cual permitió hacer un breve estudio para evaluar en qué grado dicha detección se vería influenciada por la presencia de ruido en el subsuelo (piedras, raíces, etc.). En este sentido, la simulación numérica FDTD proporcionó información de interés adicional para la interpretación que puede ser comparada con los datos reales del radar, lo cual resultó además ser un apoyo para la propia interpretación. Toda esta información puede ser de interés tanto en el ámbito de ingeniería civil como en el ámbito militar para la detección de IEDs y para la lucha contra IED (C-IED).

7.2 Líneas futuras

Una vez obtenido los resultados y atendiendo a las necesidades actuales en lo que respecta a la detección de IEDs, el empleo de equipos GPR a nivel militar conforma la piedra angular en los conflictos actuales como método para salvar vidas de combatientes españoles luchando en un tipo de guerra que no sólo tiene repercusiones a nivel táctico, sino que llega a nivel operacional y estratégico; por no citar las incontables bajas civiles que han tenido lugar a lo largo de los últimos años en atentados y ataques insurgentes. De esta manera, sería una buena idea implementar esta tecnología en las cadenas logísticas S-4 hasta nivel CIA (Compañía) en todas las Brigadas del Ejército Español que despliegan en operaciones y Misiones de Paz en el extranjero, de manera que el despliegue de medios bajo petición de las unidades operativas en caso de presencia de amenaza IED, haga que la detección sea parte de un procedimiento operativo eficaz y con capacidad de enfrentarse a citadas amenazas.

Como continuación a este trabajo, en el desarrollo de la capacidad de detección de IEDs se plantean las siguientes prioridades como trabajos futuros:

- El análisis de influencia del GPR en la activación de los IEDs radiocontrolados.
- El desarrollo de TTP's (Técnicas, Tácticas y Procedimientos) para el empleo del GPR por una unidad que puede ser desplegada en los distintos escenarios de operaciones.
- El estudio de viabilidad económica y presupuesto de la implantación del GPR en las unidades de Infantería de Marina.
- Diseño, elaboración de planos e instalación de un equipo ligero GPR en un vehículo todo terreno, ATV.
- Diseño del refuerzo de la estructura del vehículo "Land Rover DEFENDER" y selección de los materiales para soportar las cargas que exige el STANAG 4569 para sus distintos niveles.
- Análisis y toma de datos mediante GPR modificando las condiciones de la zona experimental. De esta manera, empleando distintos tipos de suelos con distintos grados de humedad o presencia de agua, heterogeneidad (piedras), etc, se atenúa la señal, pudiendo así obtener datos para su posterior análisis.

8 BIBLIOGRAFÍA

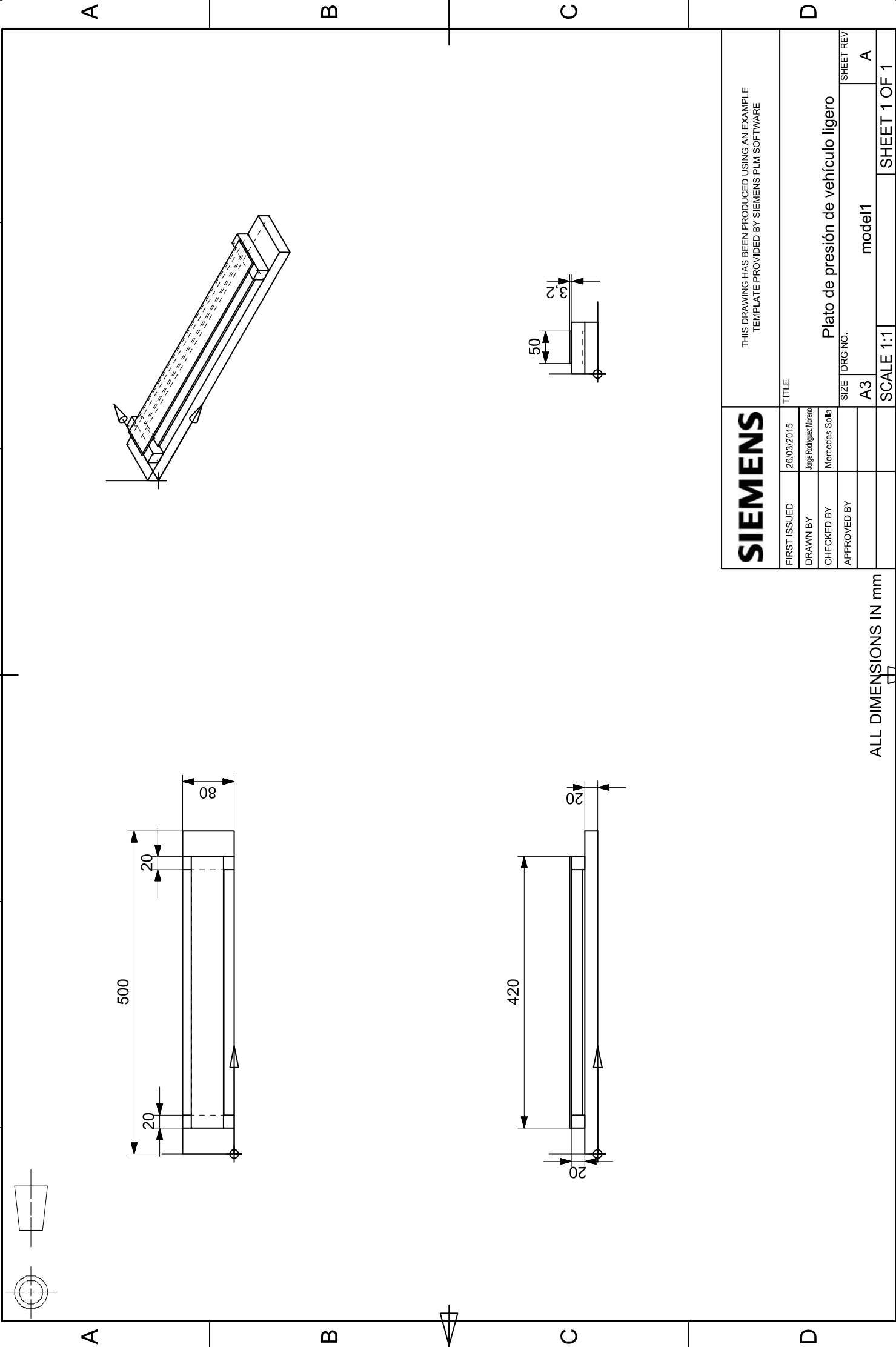
- [1] Ministerio de Defensa, “La seguridad frente a artefactos explosivos”. Documentos de Seguridad y Defensa, vol. 28, pp. 23-225, 2009.
- [2] OTAN “APP-6A – Military Symbols for land based systems”, Defence R&D Canada, 2005.
- [3] Global Security. <http://www.globalsecurity.org/military/intro/ied-packaged.htm>
- [4] C. Bruschini, B. Gros, F. Guerne, PY. Pièce and O. Carmona, ”Ground penetrating radar and imaging radar detector for antipersonnel mine detection”, Journal of Applied Geophysics, vol. 40, pp. 59–71, 1998.
- [5] M. Sato, J. Fujiwara, Z. Feng, Z. Zhou and T. Kobayashi, “Development of a hand-held GPR MD sensor system (ALIS)”, Proceedings of SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets, vol. 2, pp. 1192–1199, 10 June 2005.
- [6] D.J. Daniels, “A review of GPR for landmine detection”. Sensing and Imaging: An International Journal, vol. 7, no.3, 90–123, 2006.
- [7] C. Maierhofer, “Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar”. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 15, n.3, pp. 287–297, 2003.
- [8] Geocaching. http://www.geocaching.com/geocache/GC4XVF0_velmi-nebezpecny-magnet?guid=6a506358-dee9-4b90-94fa-f64db8b414bf
- [9] Military Aerospace. <http://www.militaryaerospace.com/articles/2012/06/counter-ied-rfp.html>
- [10] Razón y Fuerza. <http://razonyfuerza.mforos.com/549910/10464426-noticias-del-ejercito-de-chile-svjv-v/?pag=11>
- [11] BBC NEWS. http://news.bbc.co.uk/2/hi/south_asia/8136266.stm
- [12] Fuerzas Especiales. <http://fuerzaesp.org/foro/viewtopic.php?t=879&start=9>
- [13] Industria y Defensa. <http://defensa.pe>
- [14] Dreams Time. <http://es.dreamstime.com/im%C3%A1genes-de-archivo-libres-deregal%C3%ADas-tarjeta-electr%C3%B3nica-verde-image1786469>
- [15] Atmosfera News. <http://www.atmosferis.com/explosivos-cebos/>
- [16] Inert Products. http://www.inertproducts.com/ied_training_kits
- [17] Mai Blog. <http://maiturralde.blogspot.com>

- [18] GSM España. http://www.gsmspain.com/foros/h380782_Off-topic-Politica_bombas-11-carecian-metralla-revelaron-autopsias.html
- [19] Slide Player. <http://slideplayer.es/slide/1777212/>
- [20] K.J. Campbell and A.S. Orange, "The electrical anisotropy of sea ice in the horizontal plane". *Journal of Geophysical Research*, vol. 79, no. 33, pp. 5059-5063, 1974.
- [21] A.P. Annan and J. L. Davis, "Impulse radar sounding in permafrost." *Radio Science* vol. 11, no. 4, pp. 383-394, 1976.
- [22] L.A. Rubin and J. C. Fowler, "Ground-probing radar for delineation of rock features." *Engineering Geology* vol. 12, pp. 163-170, 1978
- [23] Ulriksen and C.F. Peter, "Application of impulse radar to civil engineering". 1982.
- [24] J.M. Glover, "The Use Of Sub-Surface Radar For Shallow Site Investigation", PhD thesis, Kings College, University of London, London, 1987.
- [25] CS. Bristow, P.N Chroston and S.D. Bailey, "The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: insights from ground-penetrating radar surveys", *Sedimentology*, vol. 47, n. 5, pp. 923-944, Norfolk, UK, 2000.
- [26] Neal and Adrian, "Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress", *Earth-science reviews*, vol. 66, no.3, pp. 261-330, 2004.
- [27] S.D. Carrière, K. Chalikakis, G. Sénéchal, C. Danquigny and C. Emblanch, "Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated zone", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 94, pp. 31-41, 2013.
- [28] Olhoeft, R. Gary, and S. Stanley, "Automatic processing and modeling of GPR data for pavement thickness and properties.", 8th International Conference on Ground Penetrating Radar and International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [29] I.L AL-Qadi and S. Lahouar, "Measuring layer thicknesses with GPR—Theory to practice", *Construction and Building Materials* vol. 19, pp. 763–72, 2005.
- [31] M. Solla, H. Lorenzo, F.I. Rial and A. Novo, "Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools", *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 458-465, 2012.
- [32] Goodman and Dean. "Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology" *Geophysics*, vol. 59, n.2, pp. 224-232, 1994.
- [33] V. Pérez-Gracia, J. O. Caselles, J. Clapés, G. Martinez and R. Osorio, "Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures" *NDT & E International*, vol. 59, pp. 40-47, October 2013.
- [34] A. Novo, M. Solla, J.L. Montero Fenollós and H. Lorenzo, "Searching for the remains of an Early Bronze Age city at Tell Qubr Abu al-‘Atiq (Syria) through archaeological investigations and GPR imaging". *Journal of Cultural Heritage* vol. 15, pp. 575–579, 2014.
- [35] G.T. Testafariam and D. Mali, "GPR technologies for landmine detection", *International Journal of Computing Science and Communication Technologies* vol. 5, n. 1, pp. 768–774, 2012.
- [36] X. Núñez-Nieto, M. Solla, P. Gómez-Pérez, H. Lorenzo," GPR Signal Characterization for Automated Landmine and UXO Detection Based on Machine Learning Techniques", *Remote Sensing*, vol. 6, n. 10, pp. 9729-9748, 2014.
- [37] J.J. Modroo and G.R. Olhoeft, "Avalanche Rescue using Ground Penetrating Radar", *Proceedings of the 10th international conference on ground penetrating radar*, Delft University of Technology, Delft, pp. 21–24, June 2004.

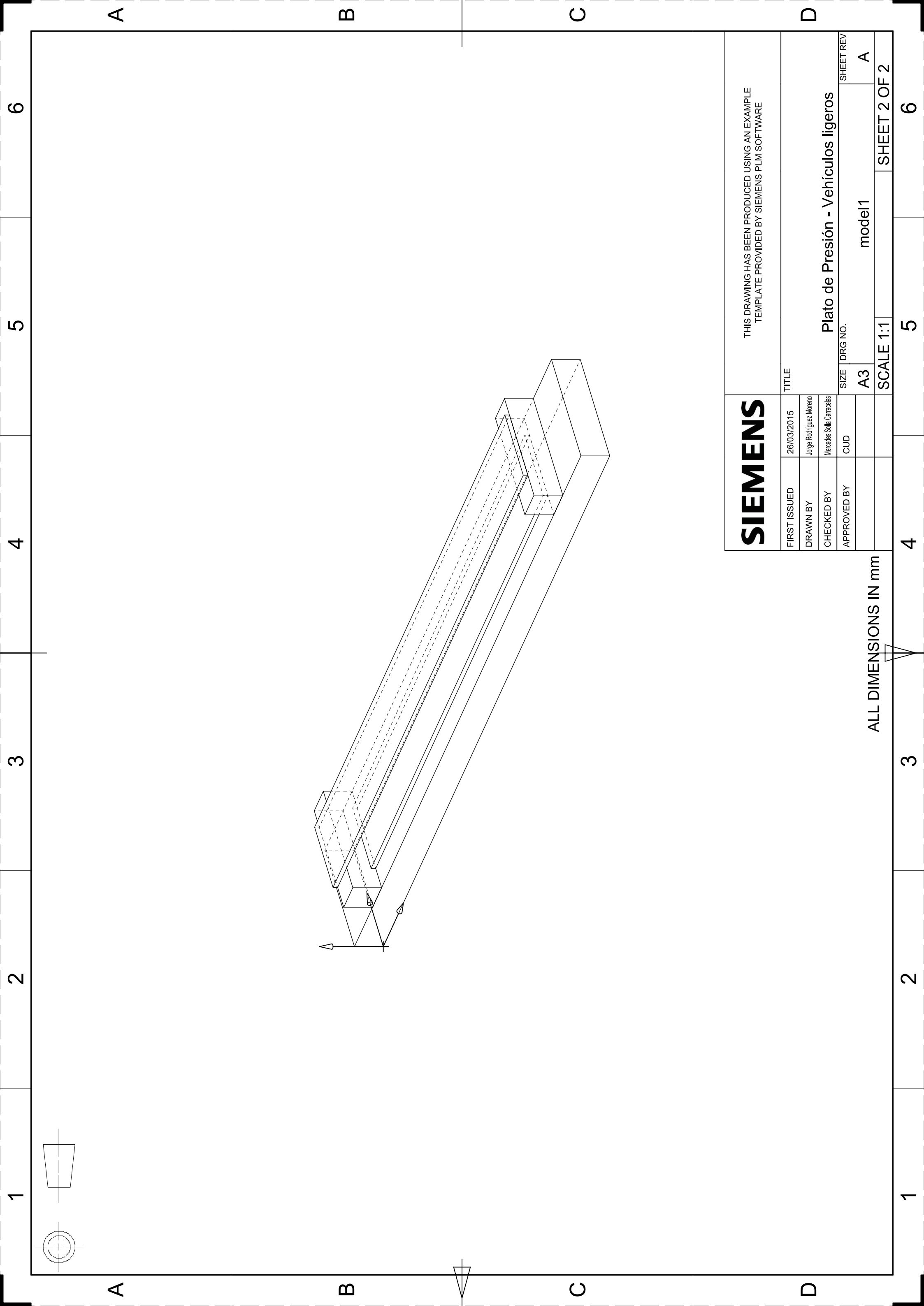
- [38] A.P. Annan, "Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications" Mississauga, Sensors & Software Inc, 2003.
- [39] D. Daniels, "Ground Penetrating Radar", 2nd edition. London, IEE, 2004.
- [40] H.M. Jol, "Groundpenetrating radar: theory and applications" Elsevier Science, Amsterdam, 2009.
- [41] P.D. Gader, M. Mystkowski and Y. Zhao, "Landmine detection with ground penetrating radar using hidden Markov models". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 3, n. 6, pp.1231–1244, 2001.
- [42] Hendrickx et al., "Humanitarian IED clearance in Colombia", SPIE Defense and Security Symposium, International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [43] Cardona, Lorena, Jovani Jiménez and Nelson Vanegas, "Tecnologías para la detección de minas frente al problema de desminado en Antioquía", 2013.
- [44] R. Firoozabadi, E.L. Miller, C.M. Rappaport, A.W. Morgenthaler, "Sub-surface sensing of buried objects under a randomly rough surface using scattered electromagnetic field data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, n.1, pp. 93–104, 2007.
- [45] J. Igel and H. Preetz, "Small-scale variability of electromagnetic soil properties and their influence on landmine detection: How to measure, how to analyse, and how to interpret?", Proceedings of SPIE Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIV, Vol. 7303, 2009.
- [46] K. Takahashi, H. Preetz and J. Igel, "The influence of soil properties on landmine detection", SPIE Newsroom, pp. 10-12, 2012.
- [47] GT. Testafariam and D. Mali, "GPR technologies for landmine detection". International Journal of Computing Science and Communication Technologies vol. 5, n. 1, pp. 768–774, 2012.
- [48] F. Abujarad, "Ground penetrating radar signal processing for landmine detection". Dissertation, Otto von Guericke University, Magdeburg, 2007.
- [49] M. Balsi, S. Esposito, F. Frezza, P. Nocito, L. Pajewski, L. Porrini, G. Schettini and C. Twizere, "FDTD simulation of GPR measurements in a laboratory sandbox for landmine detection", Proceedings of the 5th international workshop on advanced ground penetrating radar (IWAGPR'09), Granada, pp. 27–29, May 2009.
- [50] D. Deiana and L. Anitori, "Detection and classification of landmines using AR modeling of GPR data", Proceedings of the 13th international conference on ground penetrating radar, Lecce, pp. 21–25, June 2010.
- [51] DP. Nabelek and KC. Ho, "Detection of shallow buried objects using an autoregressive model on the ground penetrating radar signal", Proceedings of SPIE 8709, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets, vol. 18, June 7, 2013.
- [52] EE. Ligthart, AG. Yarovoy, F. Roth and LP. Ligthart, "Landmine detection in high resolution 3D GPR images", Proceedings of MIKON, 2004.
- [53] A. Dyana, CH-Srinivas Rao, R. Kuloor, "3D Segmentation of Ground Penetrating Radar Data for Landmine Detection", Proceedings of the 14th international conference on ground penetrating radar, Shanghai, pp. 4–8, June 2012.
- [54] L. Capineri, S. Ivashov, T. Bechtel, A. Zhuravlev, P. Falorni, C. Windsor, G. Borgioli, I. Vasiliev and A. Sheyko, "Comparison of GPR Sensor Types for Landmine Detection and Classification", Proceedings of the 12th international conference on ground penetrating radar, University of Birmingham, Birmingham, pp. 16–19, June 2008.

- [55] M. Sato, T. Kobayashi, K. Takahashi, J. Fujiwara, X. Feng, "Vehicle-mounted SAR-GPR and its evaluation", Proceedings of SPIE 6217, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets, 18 May 2006.
- [56] J Wang, Y. Li, Z. Zhou et al., "Image Formation Techniques for Vehicle-Mounted Forward-Looking Ground Penetrating SAR.", Proceedings of the international conference on information and automation, Changsha, pp. 20–23, June 2008.
- [57] CSI. <http://c-s-i.com/vehicles/husky-mk-iii/>
- [58] Ejercito Español. http://www.ejercito.mde.es/materiales/Vehiculos_ingenieros/husky.html
- [59] Pearson Engineering. <http://www.pearson-eng.com/products/perocc/>
- [60] Niitek. http://www.niitek.com/media/NIITEK_MSII.pdf
- [61] Cobham <http://www.cobham.com/about-cobham/communications-and-connectivity/about-us/antenna-systems/counter-ied-systems/products-and-services/counter-ied-vehicle-mounted-detection-systems.aspx>
- [62] Defense Update. http://defense-update.com/20130911_dsei-2013-unmanned-systems-report.html
- [63] KJ. Sandmeier, "ReflexW v7.5 Manual", from available: <http://www.sandmeier-geo.de/reflexw.html>, February 2015.
- [64] Roberts, L. Roger, and Jeffrey J. Daniels, "Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method", Geophysics, vol. 62, n. 4, pp. 1114-1126, 1997.
- [65] Cassidy and J. Nigel, "Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis." Ground Penetrating, 2005.
- [66] Giannopoulos and Antonis. "Modelling ground penetrating radar by GprMax.", Construction and building materials, vol. 19, n.10, pp. 755-762, 2005.
- [67] GPR Max. www.gprmax.org.

ANEXO I: PLANOS DE LOS PLATOS DE PRESIÓN



SIEMENS		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE	
FIRST ISSUED	26/03/2015	TITLE	
DRAWN BY	Jorge Rodríguez Moreno	Plato de presión de vehículo ligero	
CHECKED BY	Mercedes Solla		
APPROVED BY			
		SIZE	DRG NO.
		A3	model1
		SCALE	1:1
		SHEET 1 OF 1	



A

B

C

D

1

2

3

4

5

6

A

B

C

D

1

2

3

4

5

6

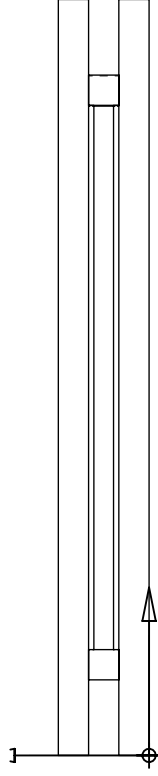
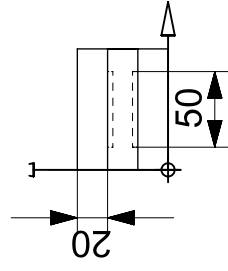
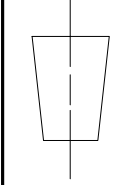
SIEMENS

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE
TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE

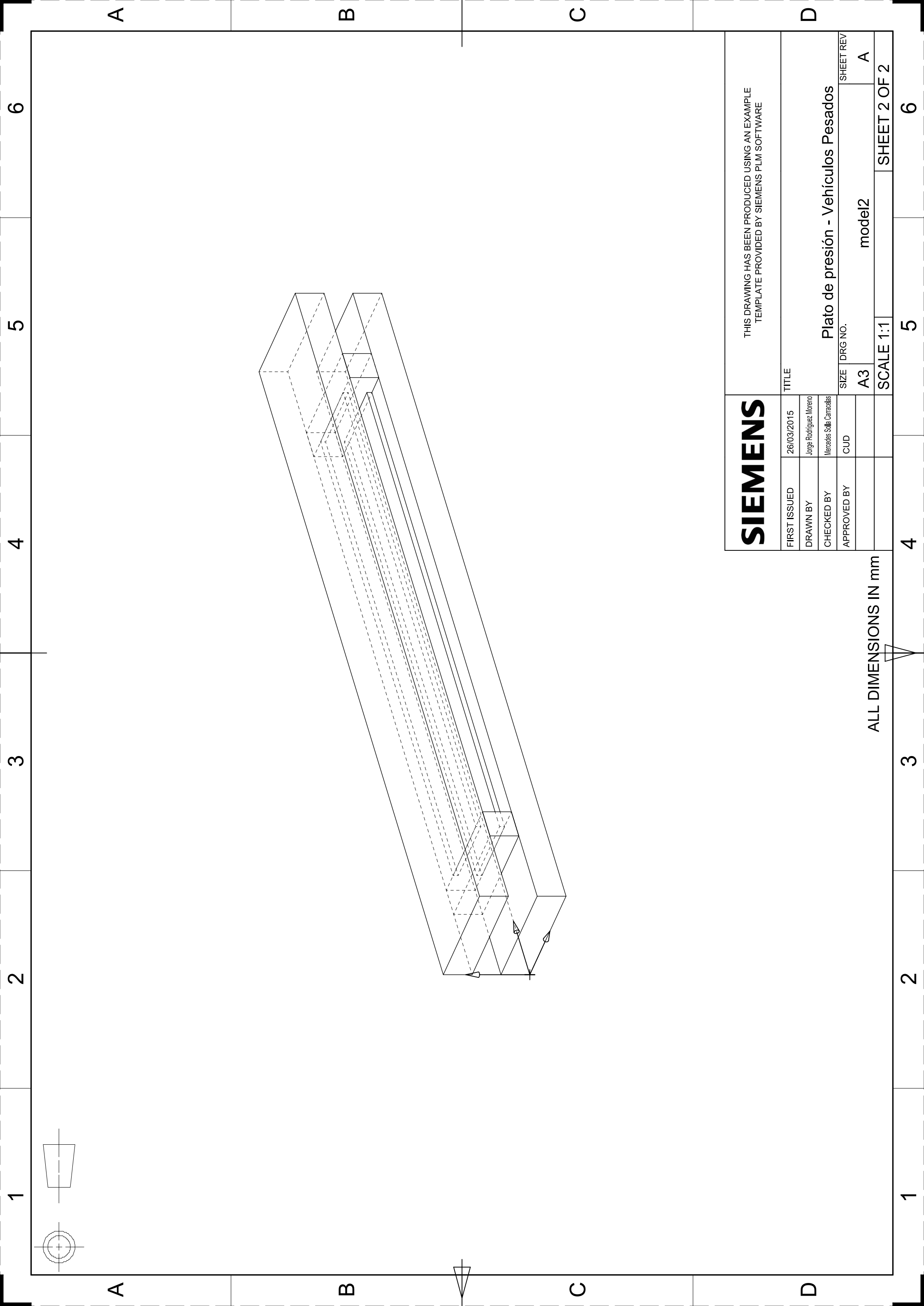
FIRST ISSUED	26/03/2015	TITLE	
DRAWN BY	Jorge Rodriguez Moreno	Plato de Presión - Vehículos ligeros	
CHECKED BY	Mercedes Salla Carracelas		
APPROVED BY	CUD		
		SIZE	DRG NO.
		A3	model1
		SCALE 1:1	
		SHEET 2 OF 2	

SHEET REV
A

ALL DIMENSIONS IN mm



SIEMENS			THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE		
FIRST ISSUED	26/03/2015		TITLE		
DRAWN BY	Jorge Rodriguez Moreno		Plato de Presión - Vehículos Pesados		
CHECKED BY	Mercedes Salla Carrascosas				
APPROVED BY	CUD				
			SIZE	DRG NO.	SHEET REV
			A3	model2	A
			SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1



SIEMENS		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE			
FIRST ISSUED	26/03/2015	TITLE			
DRAWN BY	Jorge Rodríguez Moreno	Plato de presión - Vehículos Pesados			
CHECKED BY	Mercedes Salla Carracelas	SIZE	DRG NO.	SHEET REV	
APPROVED BY	CUD	A3	model2	A	
		SCALE 1:1		SHEET 2 OF 2	

ALL DIMENSIONS IN mm

ANEXO II: DATOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA (FDTD)

Una vez editado el archivo “.in”, se puso a funcionar el simulador GprMax2D para cada archivo y posteriormente se exportan a MATLAB para obtener los radargramas respectivos.

En el caso 2, se generaron 7 piedras, que atienden a la configuración de la tabla 5-2.

Nº PIEDRA	X(m)	Y (m)	R (m)
1	1,90	1,6	0,02
2	1,93	1,7	0,01
3	1,97	1,7	0,02
4	2,00	1,8	0,02
5	2,03	1,7	0,01
6	2,07	1,8	0,02
7	2,10	1,6	0,01

Tabla 0-1 Datos de elementos heterogéneos del Caso 2 para GprMax2D

Podemos observar que el radargrama sintético obtenido en el Caso 2, está en concordancia con las reflexiones típicas que se tendrían en caso de presencia de heterogeneidad en el medio arenoso. La presencia de piedras hace que la reflexión no sea perfectamente convexa, sino que hace que esta adquiera una forma más lineal debido a la presencia de las mismas.

Para el caso 3, se generaron 10 piedras sumadas al caso 2 para aumentar la heterogeneidad en el medio. Se programaron de acuerdo a los datos de la tabla 5-3 que aparece a continuación.

Nº PIEDRA	X(m)	Y(m)	R(m)
1	1,85	1,85	0,02
2	1,87	1,85	0,01
3	1,89	1,75	0,02
4	1,93	1,75	0,01
5	1,98	1,85	0,01
6	2,00	1,75	0,02
7	2,06	1,85	0,02
8	2,09	1,85	0,02
9	2,11	1,75	0,01
10	2,15	1,75	0,02

Tabla 0-2 Datos de los elementos heterogéneos del Caso 3 para GprMax2D

