

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS IMPROVISADOS

Lorena Cardona^{1*}, Jovani Jiménez², Nelson Vanegas³

1: Ingeniera Mecánica, Ph.D. (c), Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia

2: Ingeniero Mecánico, Ph.D. (c), Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia

3: Ingeniero de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia

* Contacto: lcardon0@unal.edu.co

RESUMEN

Los artefactos explosivos improvisados (AEI), al igual que las minas anti-persona (MAP), hieren, mutilan y matan animales y personas, pero a diferencia de las MAP, los AEI están fabricados con envases de materiales, formas y tamaños muy diversos. El detector de metales que se emplea actualmente no logra encontrarlos a todos porque algunos AEI no tienen partes metálicas. Por esta razón, una alternativa que se viene estudiando en Colombia es el empleo del radar de penetración terrestre (GPR), el cual detecta anomalías en el subsuelo, enviando señales en radiofrecuencia que se reflejan en las discontinuidades. De este modo, el desempeño del GPR está influenciado por las propiedades del suelo y por las propiedades de los materiales con que se fabrican los AEI. Hasta ahora no se ha realizado una caracterización de estos AEI, que permitan estimar el desempeño de un sistema de GPR en la detección de estos artefactos. En este trabajo se identifica la constante dieléctrica de una selección de envases utilizados en la fabricación de AEI, para estimar el desempeño de un GPR en su detección, usando un programa de simulación.

Palabras Clave: *Artefactos explosivos improvisados, Constante dieléctrica, GPR, Minas antipersona, Radar de penetración terrestre*

ABSTRACT

Improvised explosive devices (IEDs) are the Colombian version of anti-personnel mines (MAP). Like MAP, AEI hurt, maim and kill animals and people. However, AEI differ from conventional MAP because they are made of containers of varied materials, shapes and sizes. The metal detector that is currently used cannot find them all because some AEI does not have metal parts. For this reason, an alternative that has been studied in Colombia is the use of ground penetrating radar (GPR), which detects anomalies in the subsoil, sending radio signals that are reflected in the discontinuities. Thus, the performance of the GPR is influenced by the soil properties and the properties of the materials used to manufacture the AEI. Until now there has been no characterization of these AEI, to estimate the performance of a GPR system in detecting these artifacts. In this paper we identify the dielectric constant of a selection of containers used in the manufacture of AEI, in order to estimate the performance of a GPR for AEI detection, using software to estimate its performance.

Key Words: *Anti-personnel landmines, Dielectric constant, GPR, Ground penetrating radar, Improvised explosive devices,*

1 INTRODUCCIÓN

En la fabricación de artefactos explosivos improvisados (AEI), los grupos armados suelen usar empaques de diferentes productos que se consumen en la región, por lo cual los AEI suelen tener formas, materiales y tamaños muy diversos. Según lo expresan miembros del ejército de Colombia, estos artefactos son tan variados que a su modo de ver no pueden caracterizarse. En la Figura 1 se presentan imágenes de algunos AEI encontrados por el ejército de Colombia.



Figura 1. Imágenes de Artefactos explosivos improvisados encontrados típicamente [1]

A pesar de la gran variedad de estos dispositivos, el desempeño del radar de penetración terrestre (GPR) para detectar AEI está determinado principalmente por las propiedades electromagnéticas del suelo y las del objeto a detectar, más específicamente por su permitividad (o constante dieléctrica). En este artículo se calculan las propiedades eléctricas relevantes de una muestra de suelo y se mide la constante dieléctrica de diferentes materiales usados en la fabricación de AEI, para determinar, mediante una simulación, el desempeño del GPR para detectar estos artefactos.

2 RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE

El principio de operación del GPR es sencillo. Él envía ondas electromagnéticas hacia el suelo y analiza los ecos retrodispersados por un contraste en cualquier parámetro eléctrico, ya sea la permitividad ϵ , la permeabilidad μ o la conductividad σ . Sin embargo, en la práctica, es el contraste en permitividad lo que ocasiona una reflexión de las ondas radiadas [2].

Se puede modelar la señal obtenida de un objeto bajo el suelo asumiendo que la superficie de este es una combinación de reflectores tipo punto, y que estos reflectores no interactúan, de modo que la superposición es válida. Aunque ésta es sólo una aproximación, es una simplificación usada comúnmente. Usando este modelo, se puede escribir la señal reflejada desde un punto como una versión retardada y escalada de la señal transmitida [3], como muestra la ecuación (1).

$$f(\beta, t) = \Gamma F \left(\frac{\beta}{v} - \omega t \right) e^{-\alpha\beta} \quad (1)$$

Donde β es la distancia recorrida en la dirección de propagación, F es la señal irradiada, Γ es el coeficiente de reflexión, ω es la frecuencia, $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ es la velocidad de propagación de la onda en el medio y α es el factor de atenuación del medio.

El coeficiente de reflexión se define como lo expresa la ecuación (2) [4].

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2)$$

Donde ϵ_1 y ϵ_2 son la permitividad eléctrica del suelo y del objeto que ocasiona la reflexión. Los valores en la ecuación (2) son reales, pero la permitividad es compleja (ecuación (3)).

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (3)$$

La parte real es la que se conoce comúnmente como constante dieléctrica y la imaginaria como pérdida dieléctrica. A pesar de lo anterior, para casi todas las aplicaciones prácticas del GPR, la permitividad eléctrica suele considerarse como constante, independiente de la frecuencia [5], y la parte imaginaria puede ser despreciada con respecto a la influencia de la parte real [2].

Como se observa, en teoría, conociendo las propiedades eléctricas del suelo y la constante dieléctrica del objeto a detectar, es posible tener un modelo del comportamiento del radar. Aunque este modelo es muy simplificado si se ignoran otras propiedades del suelo como la falta de homogeneidad (*clutter*), es un buen indicador del desempeño del GPR para detectar el objeto.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Propiedades del suelo

Colombia es el país más afectado por el problema de MAP y AEI en el mundo [6] y Antioquia es el departamento que presenta el mayor número de víctimas. Los datos disponibles de las áreas afectadas por AEI son limitados debido a la imposibilidad de tomar medidas in situ y a la falta de bases de datos geofísicos en el país. Sin embargo, se tiene conocimiento de las propiedades de suelos en áreas de Antioquia cercanas a las afectadas, que se muestran en la Tabla 1 [7].

Tabla 1. Propiedades del suelo de la región de Antioquia estudiada en [7].

| % Arena | % Limo | % Arcilla | Densidad, ρ_B (g/cm ³) | Agua residual Θ_r (%) | Agua saturada Θ_s (%) | Susceptibilidad magnética χ_{FD} |
|---------|--------|-----------|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 72,1 | 26,9 | 1 | 1,3 | 3,2 | 41 | 11 |

El modelo desarrollado en [8] proporciona expresiones para la constante dieléctrica relativa del suelo en términos de la fracción de partículas de arena S , la fracción de partículas de arcilla C , el contenido volumétrico de agua Θ y la densidad aparente del suelo ρ_S (ecuaciones (4) y (5)).

$$\epsilon' = 1,15 \left[1 + \frac{\rho_B}{\rho_S} (\epsilon_S^{0,65} - 1) + \Theta^{\beta'} \epsilon_{FW}^{\prime 0,65} - \Theta \right]^{\frac{1}{0,65}} - 0,68 \quad (4)$$

$$\epsilon'' = (\Theta^{\beta''} \epsilon_{FW}^{\prime\prime})^{\frac{1}{0,65}} \quad (5)$$

Donde:

ρ_S es la densidad de las partículas del suelo, siendo $2,66 \text{ g/cm}^3$ un valor típico

$\varepsilon_S = (1,01 + 0,44\rho_S)^2 - 0,062$ es el modelo empírico de la constante dieléctrica de las partículas del suelo

$$\beta' = 1,2748 - 0,519S - 0,152C$$

$$\beta'' = 1,33797 - 0,603S - 0,166C$$

ε'_{FW} y ε''_{FW} son las componentes real e imaginaria de la constante dieléctrica del agua.

El factor de amortiguamiento α se puede calcular a partir de la ecuación (6) [7].

$$\alpha = \omega \left\{ \mu \varepsilon' \varepsilon_0 \left[1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (6)$$

Donde $\mu = \mu_0(1 + \chi_{FD})$ es la permeabilidad magnética del suelo.

Las expresiones mostradas en las ecuaciones (4) a (6) se usaron junto con la Tabla 1 para calcular los valores de ε' , ε'' y α para diferentes valores del contenido volumétrico de agua Θ .

2.2 Propiedades de los AEI

Para medir la constante dieléctrica de diferentes materiales, se recolectaron recipientes de bebidas, productos cosméticos y fármacos, de diferentes materiales, y de cada uno se tomaron muestras. En la Tabla 2 se resume la información de las muestras recolectadas.

Tabla 2. Materiales analizados, cantidad de muestras y constante dieléctrica.

| Material | Polietileno tereftalato (PET) | Polietileno de Alta Densidad (PEAD) | Polietileno de Baja Densidad (PEBD) | Polipropileno (PP) | Policloruro de vinilo (PVC) | Otros / sin clasificación |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Cantidad | 50 | 30 | 16 | 20 | 20 | 40 |
| ε'_m (100 KHz) | 3,22 | 2,29 | 2,30 | 2,44 | 3,20 | 2,70 |

Para medir la constante dieléctrica de los materiales, se usó el montaje esquematizado en la Figura 2. Este cumple con la norma ASTM D150. El material de los electrodos es cobre y el medidor LCR usado es el UNI-T UT612. La permitividad del material se determinó a partir de la ecuación (7).

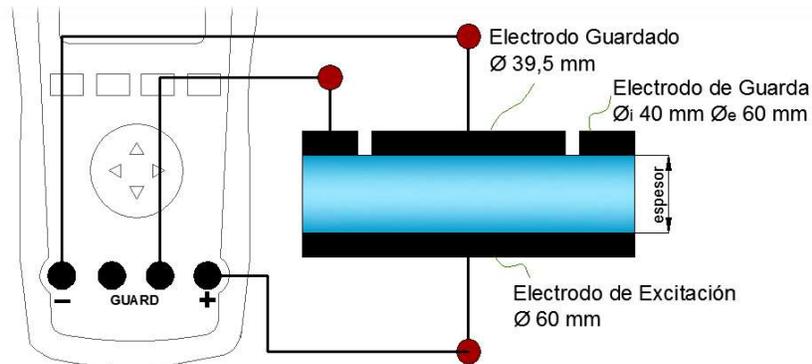


Figura 2. Montaje experimental para medir la constante dieléctrica.

$$\epsilon'_m = \frac{d C_p}{\epsilon_0 A} \quad (7)$$

Donde ϵ'_m es la constante dieléctrica del material, d es el espesor del material, C_p es la capacitancia medida con el equipo, A es el área de la superficie del electrodo guardado y $\epsilon_0 = 8,854188 \times 10^{-12} F/m$ es la permitividad eléctrica del vacío.

Para determinar el espesor d de cada muestra, se usó un micrómetro Mitutoyo M120-25 con 0,001 mm de resolución, tomando medidas en 5 puntos diferentes para cada muestra y promediándolas. Las medidas de permitividad se tomaron dos veces para cada muestra y los resultados se esquematizan en la Figura 3. Las medidas fueron tomadas a temperatura ambiente (26 °C).

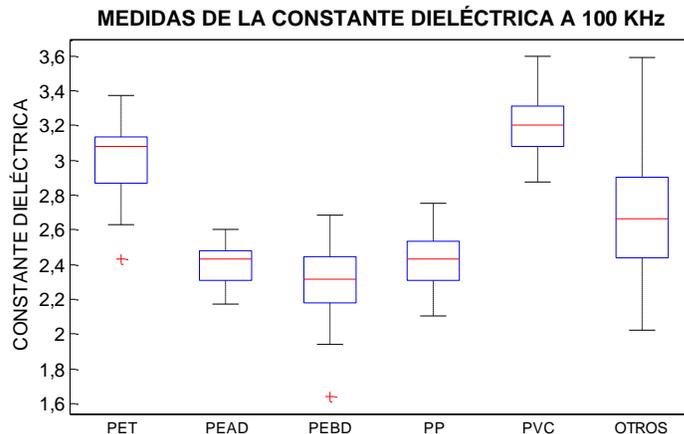


Figura 3. Diagrama de cajas para la constante dieléctrica de diferentes materiales a 100 KHz.

2.2 Simulación

Para la simulación, se tomó la forma de uno de los recipientes recolectados y se asumió que este es una combinación de reflectores tipo punto en posiciones fijas. Tomando como referencia el GPR usado en [4], cuya detectabilidad mínima de -40 dB, se realizó en Matlab una simulación de la respuesta del objeto teniendo en cuenta el contraste entre la constante dieléctrica de éste y la del suelo (ecuación (2)), la atenuación del suelo y las reflexiones producidas en la interfaz entre el aire y el suelo. Los resultados obtenidos para los diferentes materiales fueron muy similares,

las diferencias en las constantes dieléctricas no son significativas, siendo el contenido volumétrico de agua el factor más determinante. En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos para diferentes profundidades del objeto fabricado en PET y diferentes valores de Θ .

3 CONCLUSIONES

Las constantes dieléctricas de los diferentes materiales plásticos usados en la fabricación de AEI son muy similares entre sí, en comparación con la del suelo, que puede variar de 9,5 a 44, según varía el contenido volumétrico de agua Θ . Este último es el factor que determina la amplitud de la señal que se percibe del objeto, la cual disminuye al aumentar Θ debido a que con el aumento en el contenido de agua del suelo, aumenta el factor de atenuación α , y este aumento se ve aún más acentuado por el hecho de que se trata de suelos ferrosos con alta permeabilidad magnética μ . En suelos húmedos, las minas a más de 20 cm de profundidad no podrían detectarse. Para tener un panorama más completo haría falta integrar el efecto de las heterogeneidades del suelo, que generan reflexiones secundarias, disminuyendo la detectabilidad de las minas.

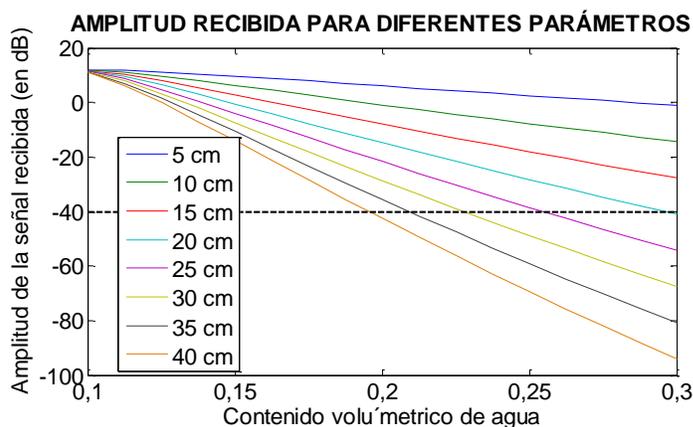


Figura 4. Amplitud de la señal de un objeto de PET para diferentes profundidades y contenido volumétrico de agua en el suelo.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Noticias oriente antioqueño, "Desde montañas de El Retiro, civiles reciben entrenamiento para la remoción de minas antipersona", [Página Web], Antioquia, 2013, <http://noticiasorientantioqueno.wordpress.com/2013/01/26/desde-montanas-de-el-retiro-civiles-reciben-entrenamiento-para-la-remocion-de-minas-antipersona/>
2. Scheers, B. "Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar with Application to the Detection of Anti Personnel Landmines", Doctoral Thesis, Université Catholique de Louvain, Laboratoire D'hyperfréquences, Brussels, 2001.
3. Gurbuz, C. A., McClellan, J. H. and Scott, W. R., "Compressive sensing of underground structures using GPR", Digital Signal Processing, Vol. 22, No. 1, pp. 66–73, 2012.

4. Sato, M. "Chapter 2: Principles of Mine Detection by Ground-penetrating Radar", in Anti-personnel landmine detection for humanitarian demining, London, Ed. Springer London, 2009.
5. Jol, H. M. "Ground Penetrating Radar: Theory and Applications", 1st ed., Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 2009.
6. A. EFE, "Colombia, segundo país con mayor número de víctimas de minas", *Periódico el País*, Cali, Colombia, p. Sección Judicial, 24-Nov-2011.
7. Lopera, O. and Milisavljevic, N., "Prediction of the effects of soil and target properties on the antipersonnel landmine detection performance of ground-penetrating radar: a Colombian case study", *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 63, No. 1, pp. 13–23, 2007.
8. Peplinski, N. P., Ulaby, F. T. and Dobson, M. C., "Dielectric properties of soils in the 0.3 - 1.3 GHz range", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, No. 1, pp. 803–807, 1995.