

**GUÍA PRÁCTICA PARA LA DETECCIÓN DE REDES DE SERVICIOS
PÚBLICOS MEDIANTE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE GSSI SIR
3000 Y EL SOFTWARE RADAN 7.**

**RICARDO MEZA DELGADO
YENY JOHANA ROJAS-SUAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**GUÍA PRÁCTICA PARA LA DETECCIÓN DE REDES DE SERVICIOS
PÚBLICOS MEDIANTE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE GSSI SIR
3000 Y EL SOFTWARE RADAN 7.**

**RICARDO MEZA DELGADO
YENY JOHANA ROJAS-SUAREZ**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director:
JHON JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ
PhD. Civil and Coastal Engineering**

**Codirector:
HELMER CORDERO REBOLLEDO
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO CONCEPTUAL	18
1.1 CATASTRO DE REDES	18
1.2 RADAR	19
1.3 RADAN	19
2. METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS MEDIANTE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE GSSI SIR 3000 Y EL SOFTWARE RADAN 7	21
2.1.1 Revisión bibliográfica	22
2.1.1.1 Fundamentos de radar de penetración terrestre	22
2.1.1.2 Radar de penetracion terrestre SIR-3000	28
2.1.1.3 Componente y ensamblado del GPR SIR-3000.....	30
2.1.1.4 Opciones de configuración del GPR SIR-3000	33
2.1.1.5 Procedimiento y fundamentos para la prospección del terreno	36
2.1.1.6 Visualizacion e interpretación	40
2.1.1.7 RADAN 7	40
2.1.2 Analizar información existente	43
2.1.3 Casos de estudio	44
2.2 FASE 2: METODOLOGÍA.....	47
2.2.1 Análisis del mapa de redes	48
2.2.2.1 Configuración del GPR SIR 3000	50
2.2.3 Recolección de imágenes.....	50
2.2.4 Pasos básicos para el procesamiento con GPR.....	51
2.2.4.1 Tiempo cero (time zero)	52
2.2.4.2 Eliminar fondo (background removal)	53

2.2.4.3 Filtros (Fir Filter).....	54
2.2.4.4 Profundidad Máxima (MAX DEPTH).....	55
2.2.4.5 Migración (Migration)	56
2.2.5 Interpretación de resultados.....	57
2.2.5.1 Tubería de acueducto	57
2.2.5.2 Tubería de alcantarillado.....	61
3. CONCLUSIONES	66
4. RECOMENDACIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS.....	73

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1: Método invasivo vs método no invasivo para el catastro de redes...	18
Ilustración 2: Funcionamiento de GPR. Fuente: GPR – Subsurface Scanning and Imaging.	19
Ilustración 3: Interfaz Radan 7.	20
Ilustración 4: Diagrama de flujo para la elaboración de una guía para la detección de redes.	21
Ilustración 5: Captura de imágenes con prospección GPR.....	24
Ilustración 6: Captura de imágenes con prospección GPR.....	24
Ilustración 7: Reflexión especular.	26
Ilustración 8. Refracción.	27
Ilustración 9. Resonancia.....	27
Ilustración 10: Resonancia.....	28
Ilustración 11: Parte frontal de la unidad de control SIR 3000	30
Ilustración 12: Puertos de la unidad de control SIR 3000	30
Ilustración 13. Cable de control antena 400 MHz.	31
Ilustración 14: Baterías.	31
Ilustración 15: Antena de 400 MHz.	31
Ilustración 16: Carretilla de prospección.	32
Ilustración 17: Odómetro.....	32
Ilustración 18. Cable para transferir datos a un PC via conexión USB.	32
Ilustración 19: Pantalla SIR 3000 señalando árbol de selección para la configuración, pantalla central con exploraciones del subsuelo y el osciloscopio.	38
Ilustración 20: Verificación de información en campo.	43
Ilustración 21: Características de las tuberías empleadas en los ensayos	45
Ilustración 22: Tanque usado en el ensayo con sus dimensiones	45

Ilustración 23: Interpretación de la toma de datos.	46
Ilustración 24: Grilla y procesamiento de los datos.	47
Ilustración 25: Mapa del campus universitario con redes de acueducto y alcantarillado.	48
Ilustración 26: Plano del campus con red de acueducto señalando el lugar donde se llevó a cabo la medición.	49
Ilustración 27: Plano del campus con red de alcantarillado señalando el lugar donde se llevó a cabo la medición.	49
Ilustración 28: Calibración GPR SIR 3000	50
Ilustración 29: Medición con flexómetro de la red de acueducto	51
Ilustración 30: Grilla para la captura de imágenes	51
Ilustración 31: Se puede ver la comparación de una imagen cuando se le aplica el tiempo cero y una imagen sin ningún procesamiento. Imagen en dirección a la tubería.	53
Ilustración 32. Comparación del filtro para eliminar el fondo.	54
Ilustración 33: Comparación de la aplicación del filtro objetivo automático.	55
Ilustración 34: Aplicación del filtro profundidad máxima.	55
Ilustración 35. Funcionamiento del georradar	56
Ilustración 36: Aplicación del filtro migración.	57
Ilustración 37: Grilla para la captura de los radargramas. En color rojo se puede ver la tubería, las flechas indican la dirección en que fueron tomadas las imágenes.	58
Ilustración 38: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 8.	58
Ilustración 39: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 11.	59
Ilustración 40: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 8.	60
Ilustración 41: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 11.	61

Ilustración 42: Grilla para la captura de los radargramas. En color rojo se puede ver la tubería, las flechas indican la dirección en que fueron tomadas las imágenes.	62
Ilustración 43: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 8.	62
Ilustración 44: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 11. Fu	63
Ilustración 45: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 8.	64
Ilustración 46: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 11.	65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Constante dieléctrica según el tipo de material, tomado de GSSI (2011).	25
Tabla 2. Menú del comando migración	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Configuración en campo GPR SIR 3000	73
Anexo B: Configuración en oficina RADAN 7	74
Anexo C: Planos de redes del campus universitario	75
Anexo D: RADARGRAMAS	77

RESUMEN

Título: Guía práctica para la detección de redes de servicios públicos mediante radar de penetración terrestre GSSI SIR 3000 y el software RADAN 7..*

Autores: Ricardo Meza Delgado, Yeny Johana Rojas-Suarez **

Palabras Clave: Catastro de redes; radar; GPR; RADAN.

El contar con un registro de catastro de redes que contenga la identificación de todas las características de estas, como ubicación y especificaciones técnicas son de gran importancia en la planeación, administración, análisis y evaluación de su estado, lo cual ayuda en la toma de decisiones futuras que involucren algún tipo de mantenimiento o reforma en el lugar, por tanto, se presentan los lineamientos necesarios para llevar a cabo una medición en campo con el radar de penetración GSSI SIR 3000 y así poder detallar el procesamiento de la información capturada. En búsqueda de mejorar la eficiencia en la detección de redes de servicios públicos con la ayuda del GPR y el programa RADAN 7, se ideó una metodología que sirviera de ayuda para la interpretación de las imágenes capturadas en campo, en la cual se presenta una guía con el procedimiento utilizado y los resultados obtenidos. Para llevar a cabo cada una de las mediciones se debe contar con un manejo básico de los equipos y programas a usar, puesto que de ello depende cada una de las interpretaciones que se le dé a los radargramas obtenidos y es necesario realizar un apique o levantamiento de tapas, ya sea el caso, para verificar la información y hacer ajustes que ayuden a obtener un resultado más eficiente.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez PhD. Civil and Coastal Engineering Codirector: Helmer Cordero Rebolledo Ingeniero civil

ABSTRACT

Title: Practical guide for the detection of networks of public services by means of radar of ground penetration GSSI SIR 3000 and the software RADAN 7*

Authors: Ricardo Meza Delgado, Yeny Johana Rojas-Suarez **

Keywords: Networks cadastre; Radar; software; RADAN; version 2017.

Having a registry of the cadastre of networks that contains the identification of all the characteristics of these, such as location and technical specifications are of great importance in the planning, administration, analysis and evaluation of your state, which helps in the decision making future that involve some kind of maintenance or reform in the place, therefore, the necessary guidelines are presented to carry out a field measurement with the GSSI SIR 3000 penetration radar and thus be able to detail the processing of the captured information. In order to improve efficiency in the detection of public service networks with the help of the GPR and the RADAN 7 program, a methodology was designed to help interpret the images captured in the field, in which a guide is presented. with the procedure used and the results obtained. To carry out each of the measurements, you must have a basic management of the equipment and programs to be used, since each of the interpretations that we give to the obtained radargrams depends on it, and it is necessary to carry out an apique or lifting of covers, or the case, to verify the information and make adjustments that help to obtain a more efficient result..

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez PhD. Civil and Coastal Engineering Codirector: Helmer Cordero Rebolledo Ingeniero civil

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayoría de las ciudades en el mundo presentan un crecimiento constante en la población que las habita, de acuerdo con datos del banco mundial, en Colombia más del 75% de los habitantes residen en áreas urbanas¹. Con la densificación de las urbes es necesario realizar un buen trabajo de planeación y administración del territorio en temas como la infraestructura, necesaria para garantizar un pleno desarrollo de las comunidades. Uno de los elementos que componen la infraestructura está relacionado con las redes de servicios públicos, en donde lo fundamental para la planeación, administración, análisis y evaluación de su estado consiste en contar con un registro completo que incluya información veraz de características como, la ubicación y especificaciones técnicas de los materiales que las componen. A este tipo de archivos comúnmente se le conoce como catastro de redes.

La presente investigación se refiere al uso del georradar (también conocido como radar de penetración terrestre, o GPR según sus iniciales en inglés) y el software RADAN 7 como método eficaz en la inspección no invasiva para la identificación de estructuras enterradas, el caso de estudio son redes de servicio público dentro del campus de la Universidad Industrial de Santander. El georradar basa su funcionamiento en ondas electromagnéticas moduladas en un medio, de manera que tanto la emisión como la recepción tienen lugar desde la superficie. Las ondas retornadas provienen de su reflexión en el subsuelo, producida por cambios en las propiedades eléctricas del medio (constante dieléctrica), el tiempo de vuelo indica la profundidad a la que ha llegado la señal y los cambios en la amplitud de la

¹ B. MUNDIAL, “Poblacion urbana.” [en línea]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>.

señal recibida dependen de los elementos que haya encontrado en su camino y que alteren su reflexión, de hecho, un elemento enterrado origina en la reflexión de la señal electromagnética una forma característica similar a una hipérbola.

La característica principal que conlleva a la realización de la presente investigación se debe a que el método tradicional para llevar a cabo un catastro de redes es invasivo, lo que quiere decir que es necesario hacer un apique hasta encontrar la red de servicios buscada, una alternativa a los métodos tradicionales, son los métodos no invasivos. Estos nuevos procedimientos se han venido posicionando como una solución para el levantamiento de catastro de redes pues ofrecen ahorro en tiempo, dinero y una alta confiabilidad a la hora de detectar redes de servicios públicos². Con estas nuevas tecnologías es posible actualizar el catastro de una ciudad o también pueden ser usadas para la detección rápida de redes presentes en el área de una construcción y de esta forma evitar posibles retrasos en la ejecución de la obra y sobrecostos por incidentes debido a la falta de información en la ubicación y referencia de los sistemas de redes.

La investigación se realizó con el interés académico de conocer aspectos a tener en cuenta en la implementación del georradar para la localización de redes con sus especificaciones técnicas, para ello se hizo una exhaustiva recopilación de información que sirve de soporte para generar un comparativo en el uso del georradar bajo diferentes condiciones.

El trabajo llevado a cabo fue la recopilación de información en la cual se presentan diferentes casos de estudio que permitieron dar a conocer aspectos a tener en cuenta en el uso del georradar, alcance del mismo y posibles problemáticas que se pueden evidenciar en campo. Teniendo ya una amplia información, se procede a implementar físicamente el uso del georradar y llevar a cabo mediciones que

² DIAZ J. S., "Georradar."

permitan verificar la eficiencia de este complementándolo con el programa Radan 7 que sirve de apoyo para la interpretación de imágenes. Teniendo analizada la información recopilada tanto bibliográfica como en campo se lleva a cabo el procedimiento detallado a seguir para el tratamiento de la información capturada en campo con el radar de penetración terrestre GSSI 3000, buscando mejorar la eficiencia en la detección de redes de servicios públicos con el software RADAN 7.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 CATASTRO DE REDES

El catastro técnico de redes constituye uno de los requisitos fundamentales para realizar una eficiente operación y mantenimiento de las redes tanto de agua potable como de alcantarillado sanitario³. Este permite contar con un dato preciso de la ubicación de cada uno de los sistemas de agua, hasta el punto de poder realizar una radiografía actualizada de su estado, lo cual es de gran ayuda, ya que, brinda pautas para llevar a cabo cualquier operación. Con la creación de nuevos métodos no invasivos, se ha logrado dar una mejora y avance a este procedimiento.

Ilustración 1: Método invasivo vs método no invasivo para el catastro de redes.



Fuente GORDILLO H. and ANGELA S., Estimación de los beneficios, en términos técnicos y económicos, cuando se adquiere cartografía del subsuelo. Bogotá, Colombia, 2015.

ESPINOSA L., GORDILLO H., and NOVOA M. S., “Revista de Topografía Azimut,” vol. 8, no. 8, pp. 63–79, 2017.

³ ERSAP, “Procedimientos y buenas prácticas en Catastro de Redes de agua potable y Redes de alcantarillado,” 2007

1.2 RADAR

El ground penetration radar (GPR, por su sigla en inglés) es un instrumento que emite ondas electromagnéticas que pasan a través del subsuelo y que se reflejan al encuentro de los diferentes medios en este. Dado que las ondas reflejadas tienen la información del medio que atraviesa su interpretación, es posible inferir las características del subsuelo y de los elementos que allí se encuentren. Por tanto, es una técnica no invasiva que utiliza ondas electromagnéticas para determinar superficies reflectoras en el interior de los medios⁴.

Ilustración 2: Funcionamiento de GPR. Fuente: GPR – Subsurface Scanning and Imaging.



Fuente: PRIME F. SOLUTIONS C., “GPR – Subsurface Scanning and Imaging.” [en línea]. Disponible en: <https://www.fprimec.com/gpr-subsurface-scanning/>.

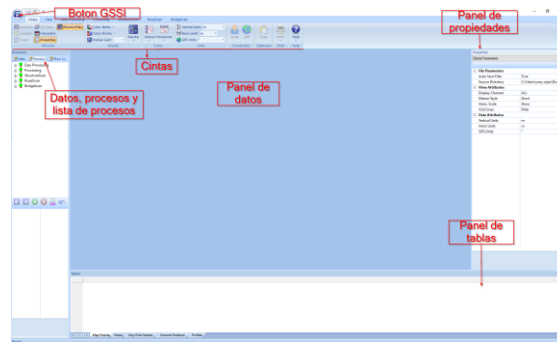
1.3 RADAN

RADAN es el software de pos-procesamiento más avanzado de GSSI. Con su diseño modular, este programa permite a los usuarios seleccionar las funciones de procesamiento que mejor se adapten a sus necesidades profesionales. RADAN

⁴ ESPINOSA L., GORDILLO H., and NOVOA M. S., “Revista de Topografía Azimut,” vol. 8, no. 8, pp. 63–79, 2017

está basado en Windows, proporcionando un entorno familiar y fácil de usar para todos los niveles de experiencia⁵.

Ilustración 3: Interfaz Radan 7.

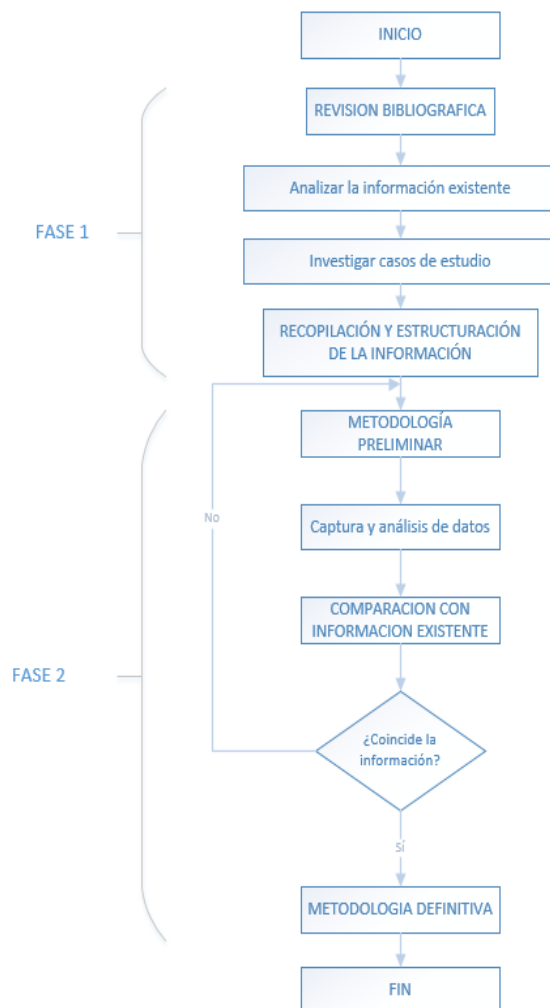


⁵ GSSI, “GSSI

2. METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS MEDIANTE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE GSSI SIR 3000 Y EL SOFTWARE RADAN 7

La metodología propuesta para la elaboración de una guía para la detección de redes de servicios públicos se presenta a continuación:

Ilustración 4: Diagrama de flujo para la elaboración de una guía para la detección de redes.



2.1 FASE UNO: ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Esta fase tuvo como principal objetivo llevar a cabo una revisión bibliográfica que pudiera proporcionar información relevante a tener en cuenta en la implementación de la metodología para la creación de la guía de la detección de redes.

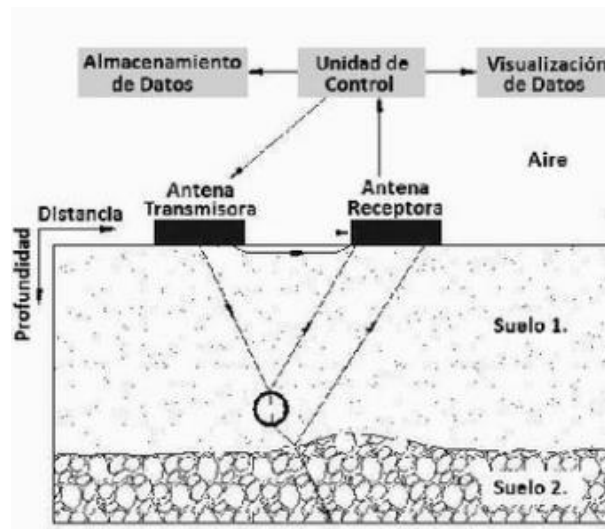
2.1.1 Revisión bibliográfica Esta investigación tiene como fin implementar el uso del georradar en la detección de redes, por tanto, se describen los fundamentos necesarios para saber o entender cómo trabaja y que tan eficiente es el método que se va a utilizar.

2.1.1.1 Fundamentos de radar de penetración terrestre El método de prospección con GPR, se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos desde la superficie del suelo, que se propagan en el mismo y se reflejan en las discontinuidades que haya a su paso. La señal reflejada alcanza la superficie, donde una antena receptora la detecta, registrando su tiempo de llegada y su amplitud. Cada incremento de amplitud observado en el registro del perfil indica la existencia de una superficie reflectora que, en caso de ser discreta, puede estar asociada a la existencia de un elemento embebido en un entorno aproximadamente homogéneo, como es el caso de un servicio urbano enterrado⁶. Las ondas retornadas provienen de su reflexión en el subsuelo. En medios totalmente naturales, dicha reflexión se debe principalmente a variaciones en el contenido en agua, pero también a variaciones del contenido en materia orgánica. Por otra parte, en medios donde ha intervenido el hombre, las reflexiones se deben principalmente a los cambios impuestos por la presencia de materiales constructivos o por alteraciones del medio natural (por ejemplo, excavaciones). Los resultados de la prospección geofísica por georradar dependen de las frecuencias de las antenas utilizadas. Los resultados

⁶ NAVIGATION S. and ROUTE N. S., "Uso de la prospección geofísica mediante georradar para el levantamiento topográfico de redes de servicios urbanos Autores:"

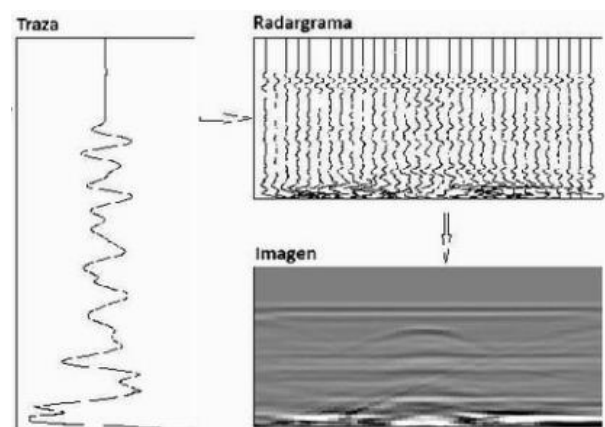
que se presentan en este trabajo se han obtenido utilizando antenas con frecuencias centrales de 400 MHz. Así, para un mismo emplazamiento sometido a estudio, existe una relación entre la frecuencia empleada y los resultados que se pueden obtener: a mayor frecuencia, mejor resolución, pero menor profundidad alcanzada. Por ello, la elección de las antenas para cada caso deberá realizarse en función de los objetivos concretos a alcanzar, pero es normal combinar los resultados obtenidos con antenas de varias frecuencias. La prospección por georradar registra las reflexiones producidas en el subsuelo y provocadas por cambios en la constante dieléctrica del medio. En la prospección de estructuras de cimentación, el material no natural de presencia más frecuente es el hormigón. La constante dieléctrica del hormigón se encuentra entre 6 y 8, mientras que los suelos arcillosos pueden variar entre 3 y 15; además, cuanto más húmedo está el suelo, mayor será el valor de su constante dieléctrica y menor su velocidad de propagación. Finalmente, cabe añadir que los resultados brutos obtenidos en una campaña de prospección necesitan ser procesados, eliminándose ruido, ecos y/o reverberaciones, y su adecuada interpretación precisa del conocimiento de las características geológicas del sustrato.

Ilustración 5: Captura de imágenes con prospección GPR



Fuente: AYALA-CABRERA D., GMBH I., and HERRERA M., Reconocimiento de patrones para la localización y caracterización de elementos plásticos de los sistemas de abastecimiento de agua mediante GPR, no. July 2016. 2013

Ilustración 6: Captura de imágenes con prospección GPR



Fuente: AYALA-CABRERA D., GMBH I., and HERRERA M., Reconocimiento de patrones para la localización y caracterización de elementos plásticos de los sistemas de abastecimiento de agua mediante GPR, no. July 2016. 2013

La constante dieléctrica ya mencionada depende del material con el que se esté trabajando, a continuación, se presenta la información de ello.

Tabla 1. Constante dieléctrica según el tipo de material, tomado de GSSI (2011).

	Dieléctrico	Tipo de material
TIPO 1	4	Arena seca, grava seca
TIPO 2	8	Arena o grava húmeda, sedimento seco
TIPO 3	16	Campos agrícolas, sedimento arenoso, arena mojada
TIPO 4	32	Condiciones húmedas, arcilla

La unidad de medida del tiempo de propagación de una onda electromagnética es el nanosegundo $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ⁷. Una onda electromagnética se desplaza en el aire a una velocidad de 0.3 m/ns, pero cuando cambia de medio de propagación, también cambia su velocidad como se muestra a continuación:

Ecuación 1: Formula para la velocidad de propagación en el medio.

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{Er}}$$

Fuente: utilización del Georradar SIR-3000 para la detección de fugas en tuberías enterradas JUAN DAVID R., “Utilización del Georradar SIR-3000 para la detección de fugas en tuberías enterradas,” Bucaramanga, Colombia, 2014

Siendo:

V_m = Velocidad de propagación en el medio.

C = Velocidad de la onda en el aire.

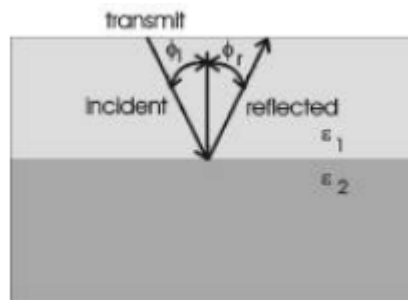
Er = Permitividad (constante dieléctrica) del medio (este valor varía desde 1 para el aire hasta 81 para el agua).

⁷ AYALA-CABRERA D., GMBH I., and HERRERA M., *Reconocimiento de patrones para la localización y caracterización de elementos plásticos de los sistemas de abastecimiento de agua mediante gpr*, no. July 2016. 2013

Existen cuatro tipos de dispersión en la interfaz cuando el frente de onda que viaja a través de un medio encuentra un objeto con diferente permitividad, como lo son reflexión especular, refracción, resonancia y difracción⁸.

- Reflexión especular: El ángulo formado con la onda incidente se refleja exactamente igual con el ángulo que forma la onda reflectante.

Ilustración 7: Reflexión especular.

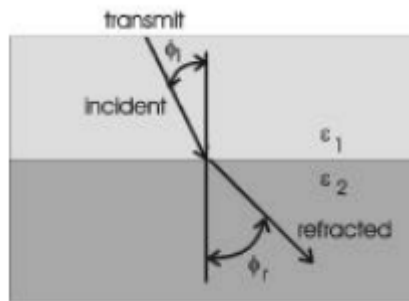


Fuente: Ground Penetrating Radar Fundamentals DANIELS J. J., “Fundamentals of Ground Penetrating Radar,” Eegs, no. January 2000, pp. 62–142, 1989.

- Refracción: La forma en cómo se dispersa la onda en el medio depende de la rugosidad de la superficie y el contraste en el dieléctrico entre el medio y el objeto enterrado.

⁸ JUAN DAVID R., “Utilizacion del Georradar SIR-3000 para la deteccion de fugas en tuberias enterradas,” Bucaramanga, Colombia, 2014

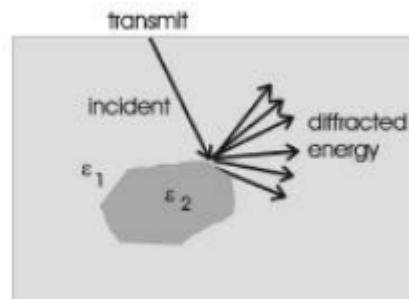
Ilustración 8. Refracción.



Fuente: Ground Penetrating Radar Fundamentals DANIELS J. J., “Fundamentals of Ground Penetrating Radar,” Eegs, no. January 2000, pp. 62–142, 1989.

- Difracción: Fenómeno que consiste en desviar las ondas al momento en que estas localicen un obstáculo o elemento dado.

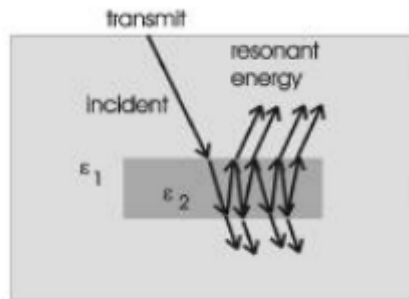
Ilustración 9. Resonancia.



Fuente: Ground Penetrating Radar Fundamentals DANIELS J. J., “Fundamentals of Ground Penetrating Radar,” Eegs, no. January 2000, pp. 62–142, 1989.

- Resonancia: Sucede cuando la onda incide en un objeto cerrado y esta rebota entre los bordes del mismo. Parte de la energía se refracta al medio o la otra se refleja dentro del objeto.

Ilustración 10: Resonancia.



Fuente: Ground Penetrating Radar Fundamentals DANIELS J. J., “Fundamentals of Ground Penetrating Radar,” Eegs, no. January 2000, pp. 62–142, 1989.

El GPR SIR-3000 se basa en la reflexión y refracción de las ondas electromagnéticas para la inspección del subsuelo. Por otro lado, la resonancia y la difracción de las ondas son fenómenos corregidos por medios de software de tratamiento de señales como lo es el RADAN 7.

2.1.1.2 Radar de penetracion terrestre SIR-3000 El SIR-3000 ha sido la opción número uno de la industria en cuanto a precisión y versatilidad de datos desde su lanzamiento en 2002. Es una herramienta desarrollada para ahorrar tiempo, dinero e incluso vidas. Esta unidad de control pequeña y liviana está diseñada para la operación de un solo usuario. El SIR 3000 proporciona las características y la flexibilidad esenciales que requieren los usuarios experimentados de GPR, así como las interfaces de usuario simplificadas y específicas de la aplicación para usuarios novatos de GPR.

El SIR-3000 incorpora un procesamiento avanzado de señales y una capacidad de visualización de imágenes 3D en campo.

Los usos típicos del SIR-3000 incluyen:

- Inspección del concreto
- Localización de utilidades
- Investigación Geológica

- Arqueología
- Forense
- Inspección del tablero de puentes
- Minería
- Análisis de la vegetación⁹

Se observa que, a menor frecuencia, mayor será la profundidad de penetración. Pero las antenas de mayor frecuencia ofrecen un mejor nivel de detalle. La máxima distancia de inspección también depende del material que se esté analizando. Medios con alta conductividad pueden limitar la profundidad y efectividad del GPR, un ejemplo de este tipo de material serían los suelos arcillosos saturados o el concreto sin curar.

Muchas veces las antenas de frecuencias bajas, como las de 200 MHz y 400 MHz, no capturan muy bien los objetivos cercanos a la superficie. Este intervalo de poca precisión recibe el nombre de zona borrosa y depende de cada antena. Como se mencionó anteriormente, a mayor frecuencia, mayor nivel de detalle y resolución.

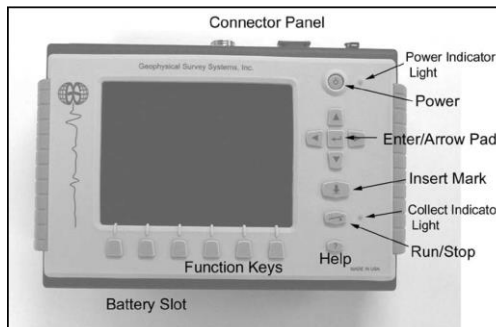
Finalmente, el alcance (rango) es la ventana de tiempo en que el SIR-3000 grabará las señales reflejadas. La profundidad máxima de inspección es proporcional al alcance porque una ventana de tiempo más prolongada permite que la antena reciba la energía reflejada desde mayor profundidad. Cabe recordar que el alcance está compuesto de un tiempo de recorrido bilateral, así que un alcance de 50 ns significa que el reflector más profundo es de 25 ns de profundidad y también, un mayor alcance requerirá de un mayor número de muestras.

⁹ GSSI, "GSSI."

2.1.1.3 Componente y ensamblado del GPR SIR-3000 A continuación se presentan los componentes del Georradar SIR-3000 necesarios para la detección de tuberías.

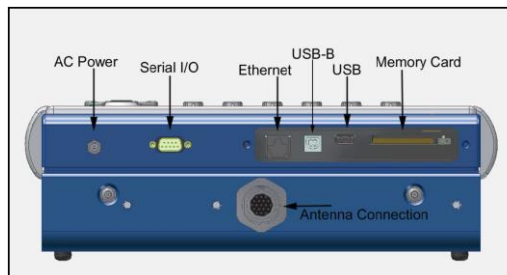
- Unidad de control SIR-3000

Ilustración 11: Parte frontal de la unidad de control SIR 3000



Fuente: SIR System-3000 Manual SYTEMS G. S., SIR System-3000 Manual. 2009

Ilustración 12: Puertos de la unidad de control SIR 3000



Fuente: SIR System-3000 Manual SYTEMS G. S., SIR System-3000 Manual. 2009

- Cable de control antena 400 MHz

Ilustración 13. Cable de control antena 400 MHz.



- Baterías

Ilustración 14: Baterías.



- Antena de 400 MHz

Ilustración 15: Antena de 400 MHz.



- Carretilla de prospeccion modelo 623

Ilustración 16: Carretilla de prospección.



- Odometro

Ilustración 17: Odómetro.



- Cable para transferir datos a un PC via conexión USB

Ilustración 18. Cable para transferir datos a un PC via conexión USB.



2.1.1.4 Opciones de configuración del GPR SIR-3000 Bajo el menú de COLLECT, hay submenús principales donde se configura la forma y los parámetros de recopilación del SIR-3000

a. RADAR

- **ANTENA:** Aquí se ingresa la frecuencia central de la antena con la cual realizara la inspección.
- **VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN (T_RATE):** Es la habilidad de la antena para recopilar datos en menor tiempo. El valor máximo de este parámetro es de 100KHz.
- **MODO (MODE).** Se selecciona la manera cómo serán seleccionados los datos: por puntos, distancia o tiempo. En este modo se registra una exploración cada vez que se oprime la tecla "Run/Stop". El modo de recopilación recomendado por su precisión es la recopilación por distancia que se realiza con un odómetro. El sistema graba cierta cantidad de exploraciones por unidad de distancia recorrida.
- **GPS:** Permite activar o desactivar la conexión con un GPS.

b. EXPLORACIÓN (SCAN)

- **MUESTRAS (SAMPLES):** Cada curva de prospección (rastros) está compuesto por un número fijo de puntos de datos individuales (muestras). Mientras más muestras recopile, más suave será el rastro y la resolución vertical será de mejor calidad. Este parámetro puede tener un valor de 256, 512, 1024, 2048, 4098 o 8192 muestras por exploración. Pero a medida que aumenta la cantidad de muestras, la velocidad máxima de exploración baja y el tamaño del archivo

aumenta. Es por ello por lo que el fabricante recomienda una relación de 512 o 1024 muestras por exploración para la mayoría de las aplicaciones, excepto en las aplicaciones geológicas profundas o para el grosor del hielo polar, donde se requiere un mayor número de muestras por exploración

- **FORMATO (FORMAT):** Los datos pueden ser recopilados en formato de 8-bit o de 16-bit. Se recomienda usar el formato de 16-bit en la mayoría de las aplicaciones porque tiene un espectro dinámico mayor, o sea, mayor información en los datos. Pero, son el doble de voluminosos en términos de almacenamientos que los de 8-bit.
- **ALCANCE (RANGE):** Como se mencionó anteriormente, el alcance es la ventana de tiempo en que el SIR-3000 grabará las señales reflejadas. La profundidad máxima de inspección es proporcional al alcance porque una ventana de tiempo más prolongada permite que la antena reciba la energía reflejada desde mayor profundidad. Cabe recordar que el alcance está compuesto de un tiempo de recorrido bilateral, así que un alcance de 50 ns significa que el reflector más profundo es de 25 ns de profundidad y también, un mayor alcance requerirá de un mayor número de muestras por exploración.
- **DIELECTRICO (DIEL):** Hace referencia a la permitividad del material (constante dieléctrica) la cual refleja la velocidad en que la energía del radar se desplaza dentro del material. Se ingresa el valor del dieléctrico del material que se está explorando y obtener un cálculo de la profundidad dentro del terreno. Mientras más alto sean los valores dieléctricos, más lentos será el tiempo de recorrido de la onda y la profundidad de penetración será menor. Se recomienda realizar las prospecciones en un material seco porque el agua tiende a aumentar la constante dieléctrica de éste.
- **VELOCIDAD (RATE):** Aquí es donde se configura la cantidad de exploraciones que se almacenarán cada segundo en el modo de recopilación por tiempo. Si se

está en el modo de recopilación por distancia con un odómetro, este parámetro deberla fijarse en un valor alto

- **EXPLORACIONES POR UNIDAD (SCN/UNIT):** Representa el número de exploraciones por unidad de distancia horizontal, o sea, el espacio entre exploraciones cuando se está usando el modo de recopilación por distancia con el odómetro. Tener un espacio menor entre exploraciones produce datos en mayor resolución, pero archivos de mayor tamaño. Cabe resaltar que el sistema está configurando en pies ingleses en lugar de unidades métricas, así que las unidades de este parámetro serán exploraciones/pie. Se recomienda que las Atenas de frecuencia bajas, como la de 400 MHz, trabajen con una densidad de exploración entre 12 a 24 exploraciones/pie

c. AUMENTO (GAIN):

Es el aumento artificial de la señal para poder contrarrestar los efectos naturales de atenuación. A medida que la onda se desplaza dentro del terreno, parte de ésta se refleja, otra se absorbe y otra continúa desplazándose hacia abajo. Según la onda alcanza mayor profundidad se vuelve más débil, es por ello que se aplica un aumento de la amplitud para hacer visibles las variaciones sutiles en los datos más débiles.

- **AUTO/MANUAL:** Podrá ingresar los puntos de aumento (POINTS) de forma manual o automática. Se pueden establecer máximo 5 puntos equidistantes a lo largo del rastro y en cada uno añadir o restar valores de aumento a la señal.

d. POSICIÓN (POSITION):

Este menú controla la posición del Tiempo Cero (Time-Zero) que es el punto donde ocurre la primera reflexión donde la onda ya se refracta dentro del terreno y comienza la exploración.

- **AUTO/MANUAL:** La ubicación del Tiempo Cero puede hacerse de forma manual o automática. Se recomienda que el sistema defina el Tiempo Cero para un número de muestras menor a 4098.
- **DESFASE (OFFSET):** Este parámetro describe el desfase temporal (en ns) que resulta de cuando el SIR-3000 genera la pulsación dentro de la unidad de control hasta la transmisión desde la antena.
- **SUPERFICIE (SURFACE):** Es una opción de visualización que permite "cortar" de manera visual la parte plana de la onda directa y mostrar la exploración desde el primer objetivo reflejado que sería la superficie terrestre.

e. FILTROS (FILTERS)

Mediante el uso de este submenú, se pueden fijar los filtros de recopilación de datos para eliminar interferencias o suavizar ruidos y muchos de ellos son específicos para cada antena. Los modos prefijados del SIR-3000 tienen fijados de manera automática estos valores según la antena seleccionada en el submenú RADAR^{10 11}.

2.1.1.5 Procedimiento y fundamentos para la prospección del terreno Una vez el sistema esté encendido, se pueden cambiar las unidades entre métricas e

¹⁰ JUAN DAVID R. Op. Cit.

¹¹ SYTEMS G. S., *SIR System-3000 Manual*. 2009

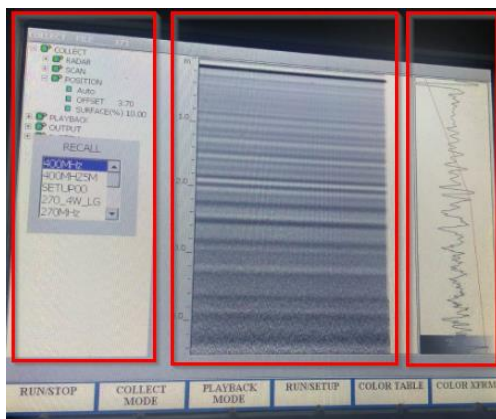
inglesas oprimiendo la tecla MARK. En esta pantalla inicial se podrá escoger la aplicación a trabajar:

- **TERRASIRCH:** Permite tener control total de todos los parámetros de recopilación y es el método más versátil de prospección, utilizable para todas las aplicaciones de GPR.
- **CONCRETE SCAN:** Está configurado para exploraciones rápidas de concreto. Se puede usar este modo para ubicar elementos estructurales superficiales en concreto y para marcar su ubicación directamente en la superficie de prospección. Funciona con las antenas de 2.6 GHz, 1.6 GHz, 1.5 GHz, 1GHz o 900 MHz.
- **STRUCTURE SCAN:** Éste modo se usa para recopilar datos 3D en resolución muy alta sobre una losa o pared de concreto con antenas de 2.6 GHz 1.6GHz, 1.5 GHz o 1GHz. El sistema producirá un cubo de datos 3D que se puede ver a plena vista a distintas profundidades para poder anotar ubicaciones claras de los objetos encontrados.
- **UTILITY SCAN:** Está configurado para ubicar tuberías en suelos bajo losas de concreto o asfalto. lo que resulta muy útil antes de realizar obras de excavación Este modo puede usado con las antenas de 270 MHz, 400 MHz y 900 MHz.
- **GEOLOGY SCAN:** Esta opción está optimizada para la realización de perfiles 2D de elementos geológicos superficiales, como el lecho rocoso alto, lecho de sedimentos mantos freáticos, etc. También es útil para realizar perfiles arqueológicos. Funciona con antenas de 400 MHz, 270 MHz, 200 MHz y 100 MHz, aunque solo las de 400 y 270 MHz son lo suficientemente pequeños para movilizarlos en la carretilla de prospección.

- **QUICK 3D:** Está configurado para realizar levantamientos de mallas para la visualización tridimensional, también, realiza de manera automática el ensamble de los perfiles y así genera los cubos tridimensionales y la modelación de las vistas en planta.

Se oprime el botón debajo del Utility Scan y así se ingresa a esta aplicación. La pantalla de este modo está dividida en tres partes: la división izquierda muestra el árbol de selección de parámetros que es donde se da configuración a la recopilación de datos; la sección central será la pantalla central que proyectará las exploraciones del subsuelo; finalmente, en la división derecha está el osciloscopio, que muestra el rastro de las ondas recibidas a lo largo del tiempo de penetración de la onda, y la línea roja representa el aumento (GAIN) artificial de la señal.¹²

Ilustración 19: Pantalla SIR 3000 señalando árbol de selección para la configuración, pantalla central con exploraciones del subsuelo y el osciloscopio.



¹² JUAN DAVID R. Op. Cit.

La prospección geofísica con georradar (Ground Penetrating Radar o GPR) es una tecnología que permite caracterizar perfectamente el subsuelo y las estructuras existentes en él, de forma eficaz, precisa y con un impacto mínimo¹³.

Es un método de prospección geofísico basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. “Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, es decir, de la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética”.

A partir de estos tres parámetros se pueden establecer los rasgos eléctricos de los materiales, lo que conduce a conocer el tipo de material dispuesto, actualmente los softwares tabulan la información y la comparan con bases de datos existentes que relacionan la correspondencia de posibles materiales.

Además, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas depende de las características eléctricas del medio, estos factores nos permiten determinar la profundidad del material evaluado.

- **CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA:** La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad (o de la aptitud) de un material para dejar pasar (o dejar circular) libremente la corriente eléctrica. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material.”
- **PERMITIVIDAD DIELECTRICA:** “La permitividad (llamada también constante dieléctrica) es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. La permitividad está determinada por la tendencia

¹³ BERECIARTUA-PÉREZ A., “Localización e identificación de activos soterrados mediante georradar y procesamiento de imagen,” vol. 86, pp. 438–448, 2011

de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material. Está directamente relacionada con la susceptibilidad eléctrica.”

En el subsuelo la constante dieléctrica depende de: El volumen y geometría de los poros, El contenido de humedad, la composición de las partículas, la presencia de sales en el agua y la presencia de líquidos orgánicos en los poros.

- **PERMEABILIDAD MAGNÉTICA:** “Es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material.” ¹⁴

2.1.1.6 Visualización e interpretación Para llevar a cabo una visualización de los datos y una mejor interpretación de las imágenes recopiladas con la ayuda del GPR SIR-3000, se hace necesario la implementación del programa Radan 7, puesto que este ayudara a dar claridad y forma a la información relevante para el caso. Todo su funcionamiento se explicará en el capítulo de Radan 7.

2.1.1.7 RADAN 7 RADAN 7 es un software desarrollado por el grupo GSSI para el post-procesamiento de las imágenes generadas por un GPR. Este programa permite modificar, depurar y preparar para la presentación los perfiles bidimensionales, así como generar visualizaciones tridimensionales. La interfaz de RADAN 7 ofrece modos generales para el procesamiento de los datos, del cual para el método de trabajo se optó por el básico, de fácil entendimiento y con buenos resultados a la hora de la visualización¹⁵.

¹⁴ GORDILLO H. and ANGELA S., *Estimación de los beneficios, en términos técnicos y económicos, cuando se adquiere cartografía del subsuelo*. Bogota, Colombia, 2015

¹⁵ WARRANTIES D. A. L. L. et al., “Limited Warranty , Limitations of Liability and Restrictions.”

a. PROCESAMIENTO BÁSICO:

- **TIEMPO CERO (TIME ZERO):** A veces es necesario ajustar verticalmente la posición del perfil (ajustar el tiempo cero). Se sugiere ubicar el comienzo del perfil donde está el primer pico positivo de la onda directa (rastros) y considerar que ahí donde ocurrió la reflexión sobre la superficie del terreno. La correcta ubicación del punto cero dará una mayor precisión en los cálculos de profundidad.
- **REMOCIÓN DE FONDO (BACKGROUND REMOVAL):** Éste filtro es la mejor manera para remover las bandas de ruido por resonancia, los objetos de baja frecuencia y la resonancia de la antena. Se pueden remover en intervalos de exploraciones (Scan Range) o simplemente aplicar el filtro a todo el perfil (Full Pass). El inconveniente radica en que se puede filtrar información importante en vez de ruido.
- **PROBAR/APLICAR FILTROS: (TEST/APPLY FILTERS):** Esta opción permite aplicar filtros a los datos. Escoger el filtro indicado es un proceso de prueba y error. Se explican los diferentes tipos de filtros en la sección de Procesamiento.
- **MIGRACIÓN (MIGRATION):** La antena del radar transmite energía en un patrón de rayo ancho para detectar los objetos a varios pies de profundidad. En consecuencia, los objetos de dimensiones finitas pueden mostrarse como reflexiones hiperbólicas en los perfiles a medida que la antena detecta un objeto a la distancia y se desplaza sobre éste. Los objetos más profundos pueden ser ocultados por otros más superficiales dada la interferencia de dichas hipérbolas. Las superficies detectadas también pueden causar reflexiones difractadas de energía. Esta energía difractada puede ocultar o interferir con otras reflexiones de interés y causar una malinterpretación del tamaño y la geometría de los objetos enterrados. La geometría aparente de las capas de inmersión es una

ilusión y necesita ser corregida en muchos casos. El proceso de migración es una técnica que mueve las reflexiones difractadas a su verdadera posición y deshace las difracciones hiperbólicas. RADAN7 ofrece dos métodos de migración: Kirchhoff y Sumatoria Hiperbólica. La Sumatoria Hiperbólica es un método más rápido, pero menos preciso que el método Kirchhoff. La Sumatoria Hiperbólica (Hyperbolic Summation) Suma los datos a lo largo de una hipérbola y sitúa el valor promedio en el vértice de la misma este proceso se repite en todos los vértices. En Kirchhoff se hace un proceso similar al de la Sumatoria Hiperbólica. Sin embargo, se aplica un factor correctivo al resultado promedio, basado en el Angulo de incidencia y la distancia de la hipérbola. También, aplica un filtro para compensar el proceso de suma. Este filtro mejora la resolución haciendo énfasis en las altas frecuencias y aplicando un corrector de fase.

De esta opción se despliega el siguiente menú:

Tabla 2. Menú del comando migración

Migration	
Method	Kirchhoff
Velocity (Top Layer)	0.063
Dielectric	22.38
Time (ns)	29.7
Width	63
Gain	4
Bistatic Offset	0
Load Vel. File	
Min Plot Velocity	0.01
Min Plot Velocity	0.29

Fuente: RADAN 7

Velocidad (velocity), es la **velocidad** a la cual el pulso del radar viaja a través del suelo. la velocidad relativa es la relación entre la longitud del objeto en el eje de la distancia (en número de exploraciones sobre metro) y la longitud en el eje del tiempo

en la pantalla (número de muestras por metro). Ancho (width), está expresado en número de exploraciones y es usado para sumar a lo largo del perfil. entre mayor sea el valor del ancho, mayor será la precisión de los resultados, pero si es demasiado alto incurrirá en un deterioro de los mismos, es por ello que se sugiere un valor de ancho igual al número de hipérbolas en el perfil. Aumento (gain), es usado para incrementar la amplitud de los datos después de la migración, dado que éste último proceso tiende a disminuir la amplitud de la señal del radar. Usualmente se fija en valores entre 1.5 y 5.

- **MAX DEPTH:** Esta función analiza el ruido y la pérdida de señal (atenuación) de exploración a exploración y brinda un estimado de la profundidad efectiva de penetración de la onda¹⁶.

2.1.2 Analizar información existente Cuando se empieza a trabajar para hacer la ubicación de redes de determinado lugar para llevar a cabo un procedimiento, lo primero que se investiga es información previa que pueda servir de guía para empezar a hacer las respectivas mediciones. Para el caso de estudio trabajado se hicieron mediciones en el campus de la Universidad Industrial de Santander, en el cual con la ayuda del grupo de investigación Geomática se obtuvieron planos que referenciaban las redes de acueducto y alcantarillado. El proceso a seguir, empleo realizar la verificación en diferentes puntos para hacer una corroboración de la información y confiabilidad en el uso del georradar de penetración para la inspección de redes.

Ilustración 20: Verificación de información en campo.

¹⁶ Ibíd.



Se contó con el radar de penetración terrestre GSSI SIR 3000 y el software Radan 7, como herramientas de apoyo para llevar a cabo la detección de redes, se hizo la lectura de sus respectivos manuales para el buen uso de estos y lograr una contextualización del funcionamiento y alcance de estos.

Ver anexos de planos.

2.1.3 Casos de estudio En la recopilación de información se encontraron diferentes casos de estudio que fueron de gran importancia para determinar o darle rumbo a una metodología definitiva, la cual sirvió para la captura de imágenes y comparación con la información existente.

- **CASO 1**

Se llevó a cabo la adquisición de imágenes con GPR con cuatro tuberías de materiales diferentes y diámetros similares, esto con el fin de que sean comparables los resultados.

Ilustración 21: Características de las tuberías empleadas en los ensayos

Material		Diámetro externo (d) (mm)	Longitud de tubería (l) (mm)
	Policloruro de vinilo (PVC)	110	500
	Polietileno (PE)	90	480
	Asbesto-cemento* (AC)	96	210
	Fundición Dúctil (Fund)	98	270

Fuente: MINERA P., “Uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera.” 2007

Las tuberías seleccionadas fueron enterradas una a una y por separado, dentro de un tanque. Se hizo la medición mediante un mallado, el cual hace referencia a cada una de las imágenes capturadas.

Ilustración 22: Tanque usado en el ensayo con sus dimensiones



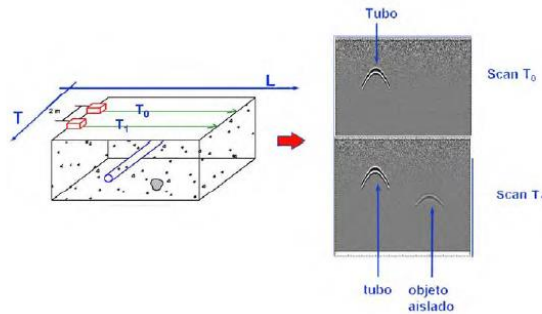
Tomado de “Reconocimiento de patrones para la identificación de tuberías enterradas en sistemas de abastecimiento de agua a partir de imágenes de GPR” MINERA P., “Uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera.” 2007

- CASO 2

La metodología empleada consistió en hacer un mallado en dirección x y y con una separación de 2m usando las antenas de 200 y 600 MHz en modo monoestático (transmisor y receptor en el mismo lugar). Esto lo realizaron con la intención de que la antena de 200 MHz garantizara mayor profundidad y la de 600 MHz para

detección de tuberías más superficiales, además de poder correlacionar las señales obtenidas.

Ilustración 23: Interpretación de la toma de datos.



Fuente: uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas MINERA P., “Uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera.,” 2007

Para la interpretación de tuberías se realizó una correlación lateral de anomalías o difracciones entre secciones contiguas de manera de despistar cualquier objeto aislado de tamaño similar que pueda producir una anomalía parecida a aquella generada por la tubería¹⁷.

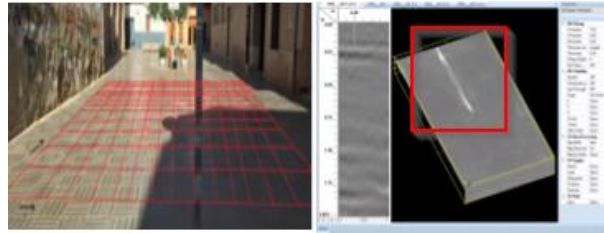
- CASO 3

Se definió un rectángulo y se creó una grilla para pasar el georradar a lo largo del eje X y Y, cada pasada como resultado es un perfil y se obtuvieron 29 perfiles. Se procesaron dichos perfiles en el programa informático RADAN 7 que permitirá ver todos los perfiles en conjunto y analizar los posibles objetos¹⁸.

¹⁷ MINERA P., “Uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera.,” 2007

¹⁸ VALENCIA C. D. E., “Proyecto de fin de grado,” 2016.

Ilustración 24: Grilla y procesamiento de los datos.



Fuente: Estudio del subsuelo mediante técnicas de prospección geofísica.

En la imagen se puede evidenciar como la tubería marca su recorrido y le da forma en el registro 3D.

2.2 FASE 2: METODOLOGÍA

Existen diferentes técnicas de procesamiento y análisis GPR, como procesamiento fácil o básicos hasta procesamiento avanzados, es decisión de cada usuario escoger dicha técnica por su nivel de conocimiento en temas con georradar; por medio del software RADAN 7 se busca mejorar la calidad de los datos, para lograr una fácil interpretación. En la metodología práctica, se escoge la etapa de procesamiento fácil o básico debido a que para iniciar se empieza por la fase de aprendizaje, sin embargo, la literatura no exige que procedimiento de análisis utilizar, por ello con el procedimiento básico se obtendrá buenos resultados.

El objetivo de los métodos de procesamiento de señal es extraer información de esta y que ayude a caracterizar las propiedades físicas y naturales del subsuelo, por ello no significa que realizar pasos de procesamiento sofisticado se conseguirá una mejor imagen, estos métodos introducen sesgos que dependen del usuario en el proceso.

Luego de una capacitación sobre el uso del georradar y con la ayuda de un mapa de redes de la zona en donde se hizo el estudio, se procedió a hacer el levantamiento de las redes con la ayuda del GPR SIR 3000 y una antena de 400 MHz.

2.2.1 Análisis del mapa de redes En la imagen se evidencia la información existente de las redes de acueducto y alcantarillado dentro del campus universitario. Ver anexo 3.

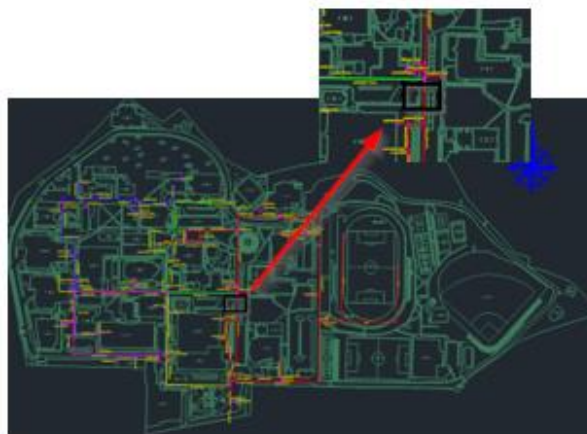
Ilustración 25: Mapa del campus universitario con redes de acueducto y alcantarillado



Zonas en las que se llevaron a cabo las mediciones:

- RED DE ALCANTARILLADO

Ilustración 26: Plano del campus con red de acueducto señalando el lugar donde se llevó a cabo la medición.



- RED DE ACUEDUCTO

Ilustración 27: Plano del campus con red de alcantarillado señalando el lugar donde se llevó a cabo la medición.



2.2.2.1 Configuración del GPR SIR 3000 Se deben seguir unos pasos sencillos a la hora de configurar el GPR SIR 3000 después de que el sistema este encendido. Ver anexo 1.

Ilustración 28: Calibración GPR SIR 3000



- Cuando el sistema arranque, se debe oprimir la tecla de función UTILITY SCAN
- En la pestaña SYSTEM>SETUP>RECALL, se debe hacer la configuración pertinente de acuerdo con la antena que se vaya a usar.
- Calibración del odómetro, hay que cerciorarse que “MODE” está fijado en DISTANCIA.
- En COLLECT>RADAR verificar que se esté trabajando con la antena adecuada.
- En COLLECT>SCAN se debe ajustar el dieléctrico, la profundidad y el tipo de suelo, todo de acuerdo con el lugar en donde se obtendrán los radargramas.
- RUN/SETUP para finalizar y hacer la toma y registro del radargrama.

2.2.3 Recolección de imágenes Para facilitar la exactitud de la medición se ubicaron lugares en donde fuese posible hacer el levantamiento de las tapas y con ayuda de un flexómetro tomar la profundidad y el diámetro de las tuberías para luego hacer un comparativo.

Ilustración 29: Medición con flexómetro de la red de acueducto



Para hacer la captura de imágenes se optó por la elaboración de una grilla y así hacer la recolección tanto en dirección a la tubería como transversalmente.

Ilustración 30: Grilla para la captura de imágenes



Como ya se mencionó, para hacer la captura de imágenes es necesario hacer la calibración del GPR SIR 3000 teniendo en cuenta que vamos a capturar y el lugar en el que lo vamos a hacer.

2.2.4 Pasos básicos para el procesamiento con GPR. Por lo general, estos se aplican directamente a los datos sin procesar (a menudo automáticamente) sin la necesidad de información adicional del subsuelo, se aplican a la mayoría de los modos de recopilación, toman la forma de edición de seguimiento, filtrado o corrección de datos e introducen un sesgo mínimo del operador en los datos.

Los radargramas sin procesar dan una interpretación cualitativa, como la evidencia de una respuesta homogénea, la presencia de irregularidades representadas por objetos reflectores y discontinuidades del suelo, sin embargo, es necesario realizar una edición y procesamiento de datos que comprende varios pasos con el objetivo de enfatizar las irregularidades, definir la tubería y encontrar su ubicación; el procesamiento y la edición ha sido realizada con el software RADAN 7.

Los radargramas se encuentran ubicados en la memoria interna del GPR SIR 3000 y para su respectivo procesamiento se debe hacer el traslado de las capturas a un equipo que cuente con el programa a usar, RADAN 7. El modo de transferencia de archivos se hizo con la ayuda de un cable de entrada al PC y al GPR. Luego de tener lista la conexión se configura el GPR SIR 3000 con la siguiente ruta OUTPUT/TRANSFER y escoger la opción PC, luego de esto se abre la tarjeta de almacenamiento del GPR en el PC y se procede a hacer la respectiva búsqueda y copia de los archivos.

Con la información de los radargramas ya descargada y la instalación de RADAN 7 en el equipo, se abre el programa y en el botón GSSI se da la opción de abrir para ver las capturas. Por cada imagen que se abra se contara con una pestaña diferente para su respectiva edición.

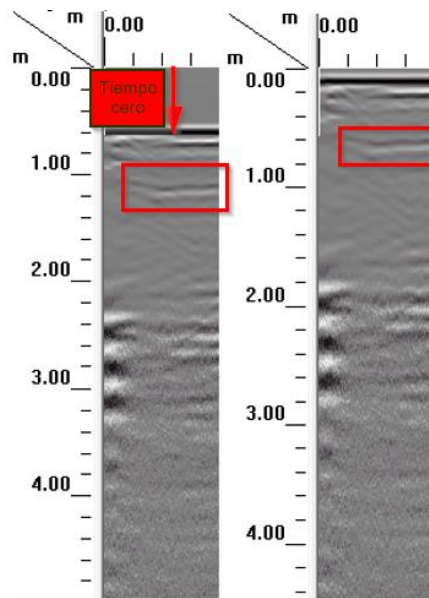
En la práctica los siguientes pasos se requieren antes de poder hacer una interpretación básica de la información capturada. Ver anexo 2.

2.2.4.1 Tiempo cero (time zero) Es producido por la deriva térmica, inestabilidad electrónica pueden causar saltos en el primer tiempo de llegada de la señal (generalmente denominado punto de tiempo cero).

En la imagen se puede ver que de tiempo cero hay alrededor de 60 cm lo que hace que la tubería se encuentre a una profundidad de 1.20 m, mientras que corrigiendo

esto aparece a una profundidad de 80 cm, lo cual coincide con la medición hecha con el flexómetro que arrojo entre 70 cm y 80 cm. Esta medición se hizo para la tubería de alcantarillado de material gres.

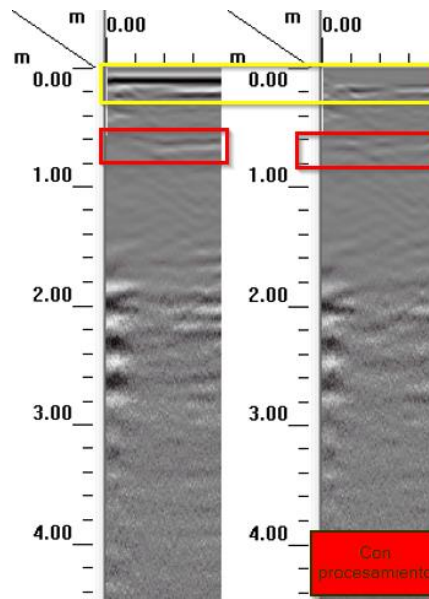
Ilustración 31: Se puede ver la comparación de una imagen cuando se le aplica el tiempo cero y una imagen sin ningún procesamiento. Imagen en dirección a la tubería.



2.2.4.2 Eliminar fondo (background removal) Elimina el ruido de fondo y es bueno para el sonido de la antena. Es un filtro muy útil para eliminar el "sonido" en los datos, pero puede eliminar los reflectores continuos y planos. El uso judicial de los filtros de eliminación de fondo es un paso clave en el procesamiento e interpretación de los datos de GPR.

En la primera imagen no está aplicado el filtro, mientras que en la segunda si y se puede evidenciar como desaparece el ruido causado en el momento en el cual la señal empieza a entrar en el terreno. Además, que la forma de la tubería se desvanece un poco y se muestra a una profundidad entre 60 cm y 80 cm.

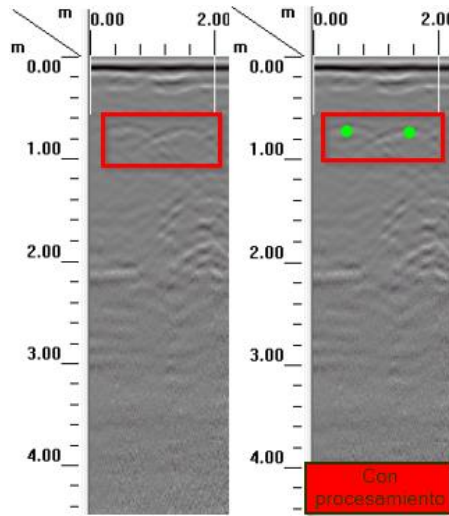
Ilustración 32. Comparación del filtro para eliminar el fondo.



2.2.4.3 Filtros (Fir Filter) Los filtros se aplican generalmente a los datos para eliminar el ruido cultural (es decir, inducido por el hombre) o del sistema y mejorar la calidad visual de los datos. Los filtros simples a menudo son muy efectivos para eliminar el ruido de alta/baja frecuencia, mientras que los métodos sofisticados son más apropiados para problemas específicos (por ejemplo, exceso de ruido o picos de ruido). Sin embargo, los filtros complejos pueden no ser siempre necesarios, introducen elementos de sesgo sobre la señal. En la práctica casi siempre se requiere alguna forma de filtrado y los métodos simples a menudo son los más efectivos.

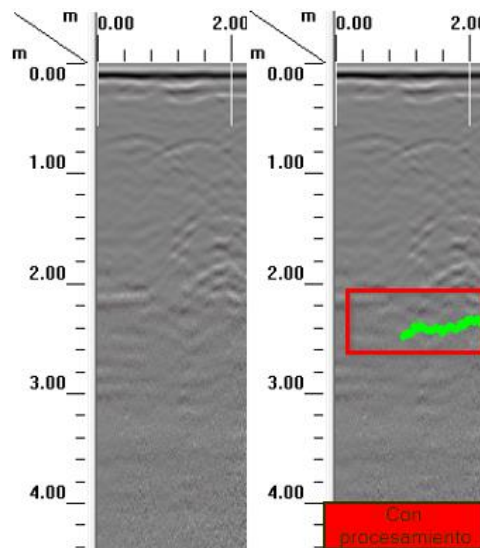
En la imagen con procesamiento se puede evidenciar dos puntos verdes que resaltan que posiblemente allí hay algún elemento de importancia y efectivamente es el lugar en donde se encuentran dos tuberías de alcantarillado que vierten en un mismo punto. A una profundidad aproximadamente de 70 cm.

Ilustración 33: Comparación de la aplicación del filtro objetivo automático.



2.2.4.4 Profundidad Máxima (MAX DEPTH) Es una función donde el programa analiza el ruido y la pérdida de la señal y estima una profundidad de penetración efectiva. Este límite se traza mediante una línea verde en el radargrama.

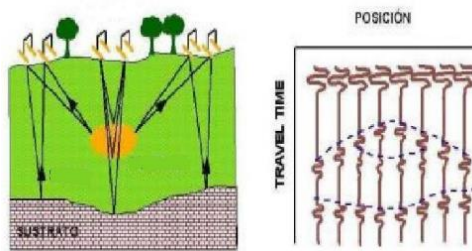
Ilustración 34: Aplicación del filtro profundidad máxima.



2.2.4.5 Migración (Migration) La migración se utiliza generalmente para mejorar la resolución de la sección y desarrollar imágenes más realistas del subsuelo y es, posiblemente, la más controvertida de las técnicas de procesamiento de GPR.

Los objetos encontrados por el georradar en los radargramas aparecen como hipérbolas. Esto se debe a que cuando el georradar está en movimiento y el objeto está delante, la onda tarda más en viajar hasta el objeto y regresar que cuando la antena está sobre su vertical. Lo mismo sucede cuando la antena se aleja. En la siguiente imagen se puede ver este efecto:

Ilustración 35. Funcionamiento del georradar



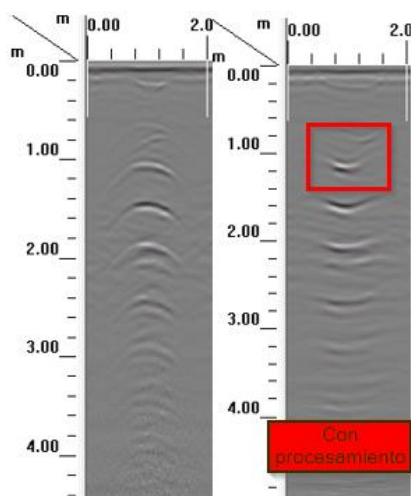
Fuente: SUÁREZ M., “Estudio del subsuelo mediante técnicas de prospección geofísica,” 2016.

El proceso de migración consiste en anular este efecto y para colapsar las hipérbolas transformando los datos registrados a datos con las anomalías del subsuelo localizadas en su posición correcta. El programa nos ofrece dos métodos diferentes de migración: Kirchhoff y suma hiperbólica.

- **SUMA HIPERBÓLICA:** El programa hace una suma a lo largo de cada hipérbola y coloca en sus ápices respectivos las medias resultantes.
- **KIRCHHOFF:** Es un método parecido al anterior, pero a su vez más preciso y más lento. Este método utiliza las ecuaciones de la hipérbola. Sumando las

amplitudes de los registros de la hipérbola coloca el resultado en el vértice. Este método tiene en cuenta la fase¹⁹.

Ilustración 36: Aplicación del filtro migración.



2.2.5 Interpretación de resultados Se realizaron medidas tanto transversales como longitudinales a la tubería de acueducto y alcantarillado con material de gres.

2.2.5.1 Tubería de acueducto Se sabía que la tubería de acueducto se encontraba a una profundidad entre 0.6 m y 0.7 m y contaba con un diámetro alrededor de los 0.3 m. Se optó por hacer una grilla para hacer las mediciones y variar el dieléctrico entre 8 y 11. Los ejes en los radargramas hacen referencia a la distancia recorrida horizontalmente por la antena y la profundidad a la que fue detectado el objeto, X y Y respectivamente. Se recomienda ver los anexos para mejor visualización de los radargramas.

¹⁹ SUÁREZ M., “Estudio del subsuelo mediante técnicas de prospección geofísica.” 2016.

Ilustración 37: Grilla para la captura de los radargramas. En color rojo se puede ver la tubería, las flechas indican la dirección en que fueron tomadas las imágenes.

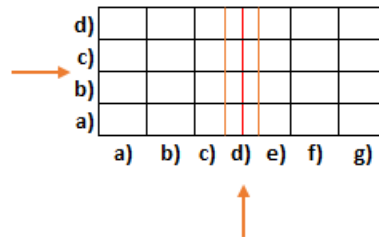
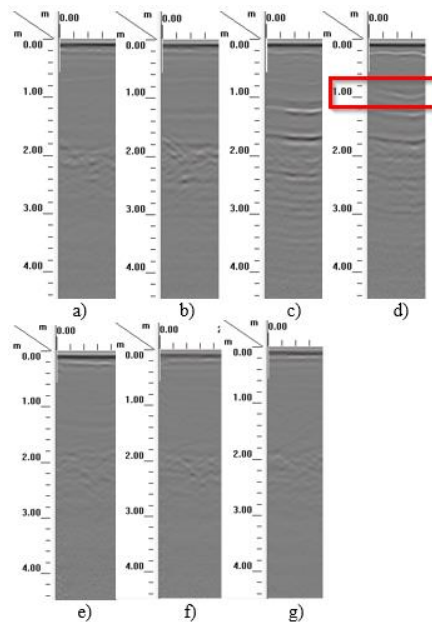
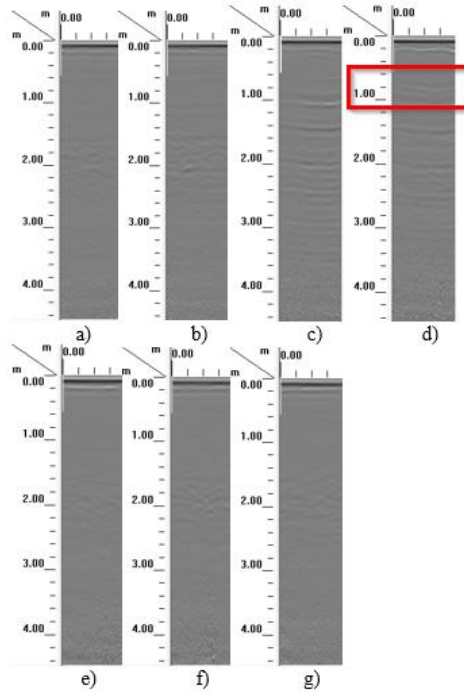


Ilustración 38: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 8.



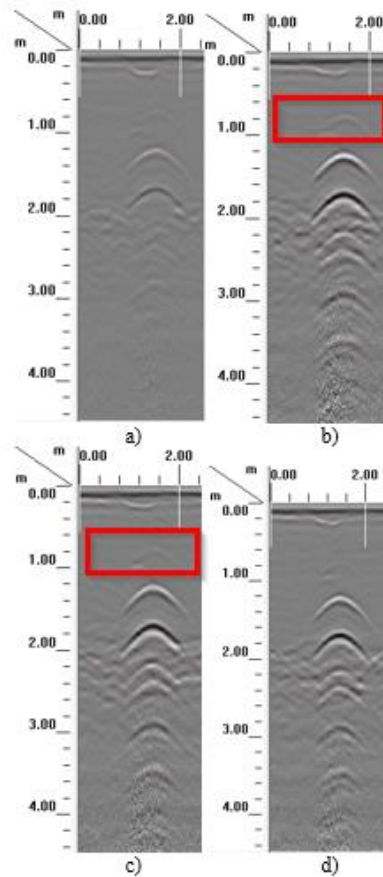
Se puede observar la tubería a una profundidad entre 0.8 m y 1.0 m de profundidad, esto lo ubicamos en la imagen d), puesto que según la grilla es el lugar en donde está ubicada la tubería.

Ilustración 39: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 11.



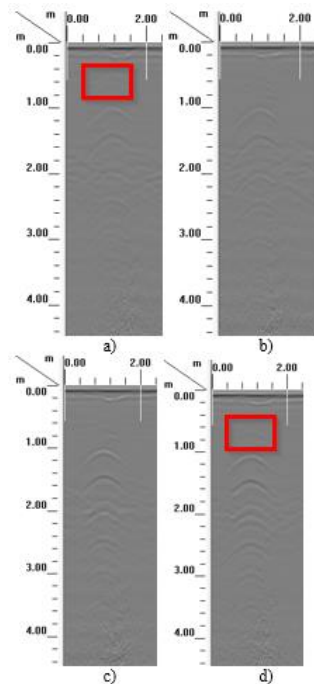
Al realizar la comparación con los dieléctricos debido a que estos influyen para determinar la profundidad de la tubería. Con el dieléctrico de 11 se logra ver en la imagen d) como la tubería se muestra a una profundidad entre 0.6 m y 0.8 m, lo cual es bastante aproximado a la medida tomada con el flexómetro. El tema del dieléctrico va directamente relacionado con el tipo de suelo que se esté trabajando.

Ilustración 40: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 8.



Se puede ver como la hipérbola se empieza a formar a una profundidad de 0.8 m. Debido a que esta imagen fue tomada transversal a la tubería, se puede evidenciar que representa la tubería en forma de hipérbola. Se toma como referencia la primera hipérbola que se forma debido a que las otras que se ven a más profundidad pueden ser producidas por ecos de la tubería principal de la cual se está tomando la medida.

Ilustración 41: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de acueducto con un dieléctrico de 11.



Con dieléctrico de 11 se evidencia la tubería a una profundidad entre 0.6 m y 0.8 m, un dato más aproximado a lo real. Se puede ver que la imagen se vuelve menos clara debido al cambio del dieléctrico.

2.2.5.2 Tubería de alcantarillado Se sabía que la tubería de alcantarillado se encontraba a una profundidad entre 0.7 m y 0.8 m y contaba con un diámetro alrededor de los 0.3 m. Se optó por hacer una grilla para hacer las mediciones y variar el dieléctrico entre 8 y 11. Se recomienda ver los anexos para mejor visualización de los radargramas.

Ilustración 42: Grilla para la captura de los radargramas. En color rojo se puede ver la tubería, las flechas indican la dirección en que fueron tomadas las imágenes.

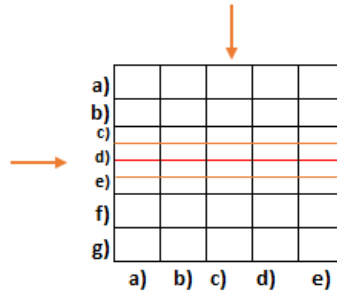
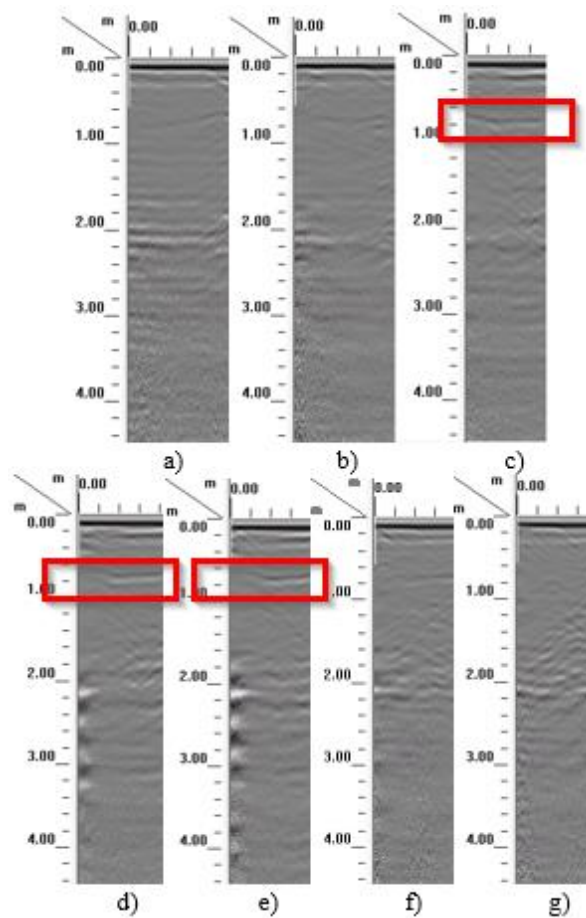
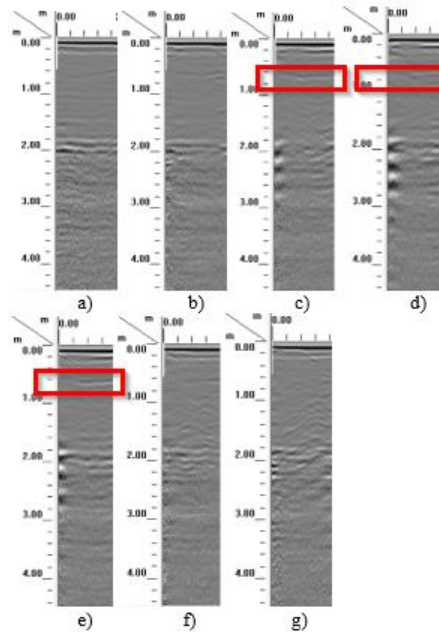


Ilustración 43: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 8.



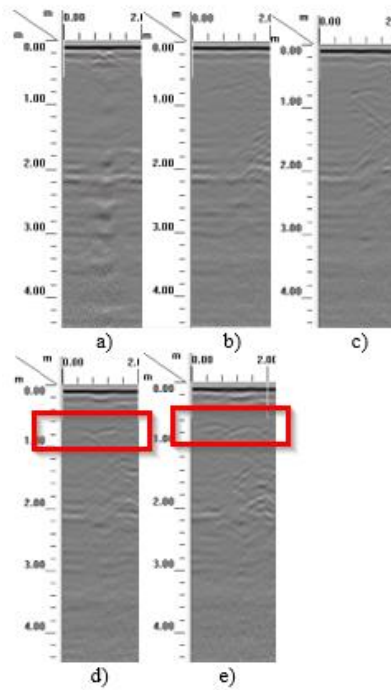
Se puede observar la tubería a una profundidad de 0.8 m con un dieléctrico de 8. Ubicamos esto en las imágenes c), d) y e) debido a que allí es el lugar en el que se localizaba la tubería según la grilla.

Ilustración 44: Imágenes capturadas longitudinalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 11. Fu



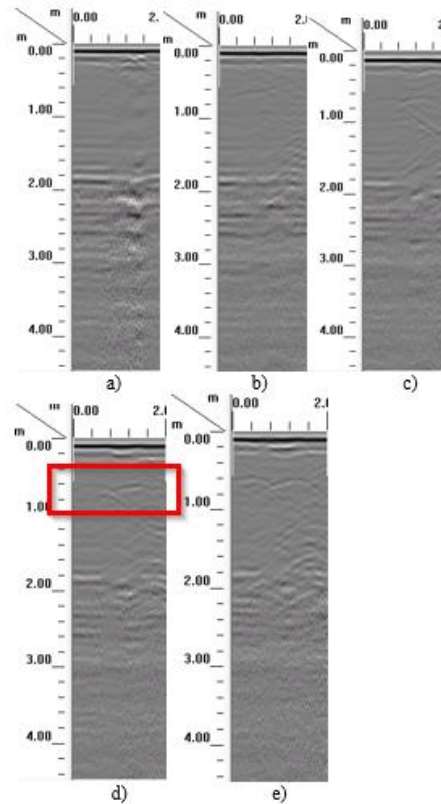
Se observa la tubería a una profundidad entre 0.7 m y 0.8 m con el dieléctrico de 11.

Ilustración 45: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 8.



En las imágenes d) y e) se puede ver la aparición de dos hipérbolas a una profundidad entre 0.7 m y 0.8 m, esto debido a que allí se encontraban dos tuberías de alcantarillado que entregaban en un mismo punto.

Ilustración 46: Imágenes capturadas transversalmente a la tubería de alcantarillado con un dieléctrico de 11.



En la imagen d) se puede ver la aparición de dos hipérbolas a una profundidad entre 0.6 m y 0.8 m con un dieléctrico de 11. A medida que se tomaba la captura de los radargramas más alejados de la tapa de alcantarillado, se podía empezar a ver mejor la representación de la hipérbola, esto debido a que el material de la tapa de alcantarillado causaba fuerte interferencia en la toma de las imágenes.

La implementación de una grilla como ayuda para hacer la captura de imágenes fue la metodología escogida y arrojó resultados bastante aproximados a los medidos, por tanto, fue la metodología definitiva a usar.

3. CONCLUSIONES

Se utilizaron dos procedimientos de variación para definir el valor de la constante dieléctrica para la red de acueducto y alcantarillado, y así conocer con exactitud su ubicación. Los valores utilizados para la investigación fueron para la constante dieléctrica de 8 y 11, el primero recomendado por la el tipo de suelo del campus universitario y el segundo por variaciones en el georradar arrojando las mejores aproximaciones en el análisis cualitativo de la tubería analizada. Por ello es importante resaltar que para futuras exploraciones en el campus universitario, usar el valor de 11 para el parámetro del dieléctrico en la configuración del georradar.

La prospección geofísica mediante georradar SIR-3000 es una ventaja en la actualidad porque permite ir más allá de las básicas comprobaciones mediante apiques y abarcar de forma inmediata y no invasiva el levantamiento de redes de servicios públicos enterrados y así agrupar una gran base de datos para la creación o actualización de catastro de redes que contenga la identificación de todas las características de estas, como ubicación y especificaciones técnicas, son de gran importancia en la planeación, administración, análisis y evaluación de su estado, lo cual ayuda en la toma de decisiones

La interpretación de los perfiles tomados en el campus universitario es un poco aproximada porque no da lugar a conceptos precisos de las dimensiones de las tuberías enterradas pero da un alto valor de fiabilidad de su localización de los datos reales, ya que depende en gran medida del tipo de material y de la información disponible; Por otra parte las tuberías suelen poseer un rango variable de la constante dieléctrica y la presencia de humedad en el subsuelo introduce sesgos en la captación de la información.

El procesamiento básico con georradar utilizando el software Radan 7 por medio el paso de máxima profundidad analiza el ruido, la pérdida de la señal y estima una profundidad de penetración efectiva. Este límite se traza mediante una línea verde en el radargrama y evidencia que después de los 2 metros de profundidad hay anomalías y es difícil identificar las hipérbolas que significan la reflexión de alguna tubería u objeto enterrado utilizando la antena de 400 MHz.

Los radargramas obtenidos por el equipo de georradar SIR-3000 se muestran un poco debilitados o con reverberaciones producidas por la absorción del medio y es necesario aplicar un procesamiento básico por medio del software RADAN 7, para eliminar ruidos, errores e información que no permita identificar las tuberías, obteniendo la filtración de los datos y con ello se ha demostrado que realizando dichos pasos básicos se consigue visualizar las hipérbolas más claramente, facilitando de manera automática la identificación de la tubería.

En general el manejo del georradar SIR-3000 es muy intuitivo y debe realizarse una capacitación antes de iniciar su uso, para conocer su funcionamiento y no cometer errores en las toma de datos, pero es muy fácil su manejo, lo cual para personal sin conocimiento elevado en geofísica, tratamiento e interpretación de la señal etc., permite utilizar el dispositivo, porque solo se necesita calibrar los datos de entrada y de allí el mismo sistema se encarga de realizar automáticamente el procesamiento de los datos y muestra al usuario por medio de una pantalla las tuberías identificadas en el subsuelo.

La guía propuesta para la identificación de activos enterrados por medio del georradar SIR-3000 se propusieron por medio de casos de estudio que se han realizado, arrojando los mejores resultados al pasar por una grilla el georradar por cada uno de sus ejes, encontrando una relación fiable y aproximada con los datos tomados al levantar las tapas de acueducto y alcantarillado lo cual nos permite llevarla a nivel macro en la actualización de los catastros de redes, aumentando la

precisión de la localización, reduciendo gastos económicos, tiempos de ejecución de obras; lo anterior dirigido a dar solución al logro de objetivos estratégicos en las de las actividades de localización de activos enterrados u otros activos de valor para la prestación del servicio de acueducto y la implementación nuevas tecnologías.

4. RECOMENDACIONES

El valor de la constante dieléctrica depende del tipo de suelo en el que se esté realizando la exploración y es muy importante para conocer la ubicación exacta o aproximada de las tuberías a analizar.

La aplicación de los pasos del procesamiento básico con el software RADAN 7 a los perfiles de reflexión o radargramas, puede hacer perder información y disminuir la capacidad de discriminación cuando existen elementos con contrastes altos de la permisividad dieléctrica.

El único parámetro en el procesamiento básico que no es necesario en la identificación de las hipérbolas en los radargramas es el de migración debido a que al utilizarlo distorsiona la forma de la hipérbola, no realiza ningún otro cambio, ni aporta información relevante para la identificación de las características de la tubería.

Al iniciar la captura de los datos con el georradar SIR-3000, no pasar el equipo por las tapas metálicas del acueducto, alcantarillado o sobre charcos de agua porque se producen reflexiones muy fuertes y se introduce ruido a la señal, generando distorsiones en la representación de la hipérbola y ocasionando daños al equipo.

Calibrar el georradar SIR-3000 una vez sea utilizado y procurar utilizar los parámetros de entrada de acuerdo al suelo y a la antena sobre los cuales se esté trabajando para no cometer errores en el levantamiento de los radargramas.

Para la visualización de los radargramas se puede observar que con el dieléctrico de valor de 8, los perfiles capturados se evidencia un mejor contraste sin embargo

la localización de la tubería no es exacta; Por el contrario con el dieléctrico de 11 la localización de la tubería es aproximadamente exacta, pero se baja el contraste al aumentarlo. Para una mejor interpretación de los datos, utilizar ambos valores de dieléctrico porque es importante la visualización de la tubería, como su profundidad.

La información presentada en este trabajo sirve para dar inicio a futuras actualizaciones del catastro de redes dentro del campus universitario, debido a que se detectaron tuberías que no están presentes dentro de los planos que posee la universidad.

BIBLIOGRAFÍA

AYALA-CABRERA D., GMBH I., and HERRERA M., Reconocimiento de patrones para la localización y caracterización de elementos plásticos de los sistemas de abastecimiento de agua mediante GPR, no. July 2016. 2013.

BERECIARTUA-PÉREZ A., “Localización e identificación de activos soterrados mediante georradar y procesamiento de imagen,” vol. 86, pp. 438–448, 2011.

DANIELS J. J., “Fundamentals of Ground Penetrating Radar,” Eegs, no. January 2000, pp. 62–142, 1989.

DIAZ J. S., “Georradar.” Colombia 2013

ERSAP, “Procedimientos y buenas prácticas en Catastro de Redes de agua potable y Redes de alcantarillado,” Tegucigalpa 2007.

ESPINOSA L., GORDILLO H., and NOVOA M. S., “Revista de Topografía Azimut,” vol. 8, no. 8, pp. 63–79, 2017.

GORDILLO H. and ANGELA S., Estimación de los beneficios, en términos técnicos y económicos, cuando se adquiere cartografía del subsuelo. Bogota, Colombia, 2015.

GSSI, “GSSI” 2018 [on line] available <https://www.geophysical.com/>

GSSI, “SOFTWARE RADAN 7,” 2018 [on line] available: <https://www.geophysical.com/software>

JUAN DAVID R., “Utilizacion del Georradar SIR-3000 para la deteccion de fugas en tuberias enterradas,” Bucaramanga, Colombia, 2014.

MINERA P., “Uso del georradar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacios en zonas urbanas y aplicacion de los perfiles de resistividad y polarizacion inducida en prospeccion minera.,” 2007.

MUNDIAL B., “Poblacion urbana.” [en línea]. disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>.

NAVIGATION S. and ROUTE N. S., “Uso de la prospección geofísica mediante georradar para el levantamiento topográfico de redes de servicios urbanos Autores:”

PRIME F. SOLUTIONS C., “GPR – Subsurface Scanning and Imaging.” [en línea]. disponible en: <https://www.fprimec.com/gpr-subsurface-scanning/>.

SUÁREZ M., “Estudio del subsuelo mediante técnicas de prospección geofísica.,” 2016.

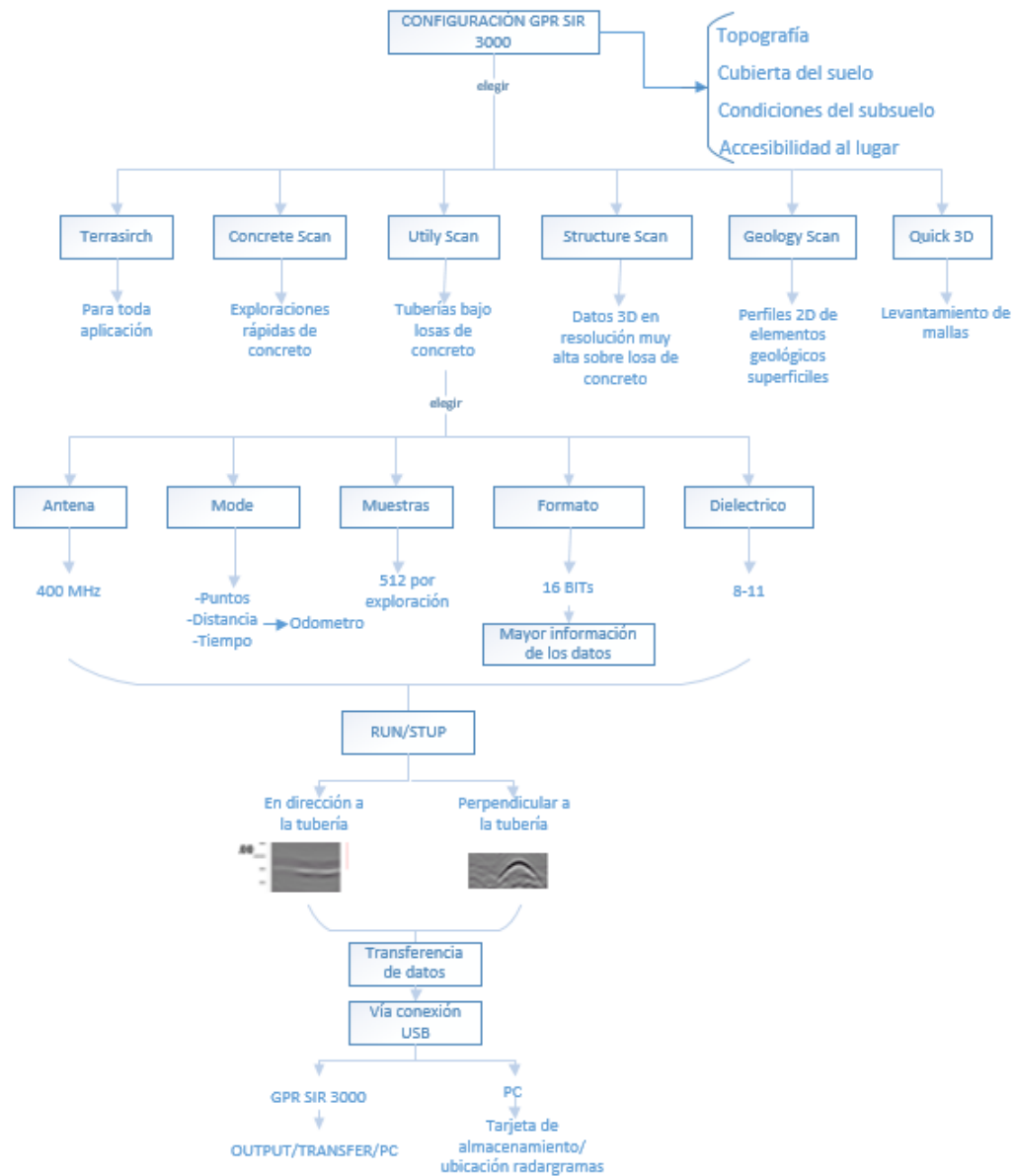
SYTEMS G. S., SIR System-3000 Manual. Estados Unidos 2009.

VALENCIA C. D. E., “Proyecto de fin de grado,” 2016.

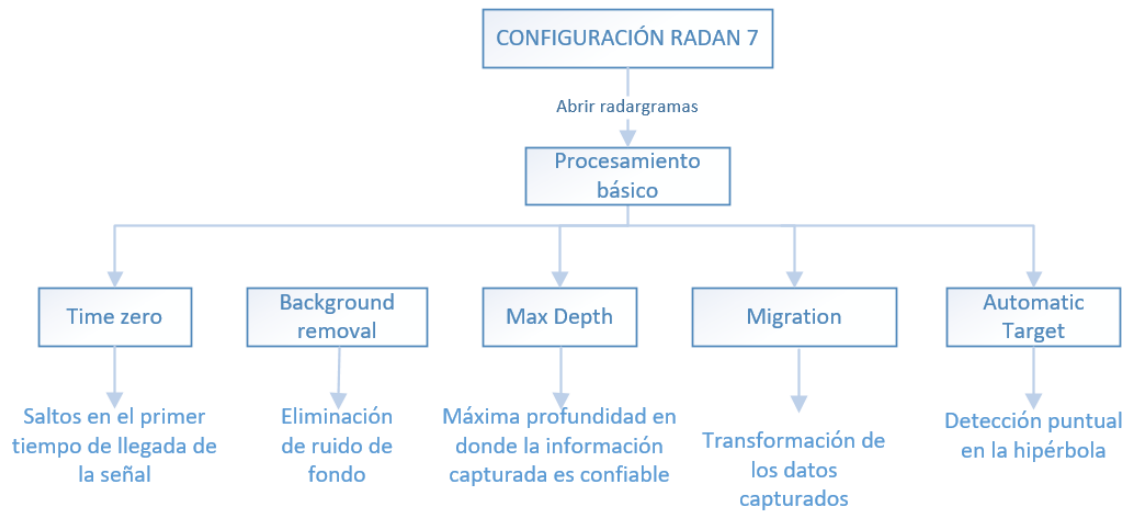
WARRANTIES D. A. L. L. et al., “Limited Warranty , Limitations of Liability and Restrictions.”

ANEXOS

Anexo A: Configuración en campo GPR SIR 3000

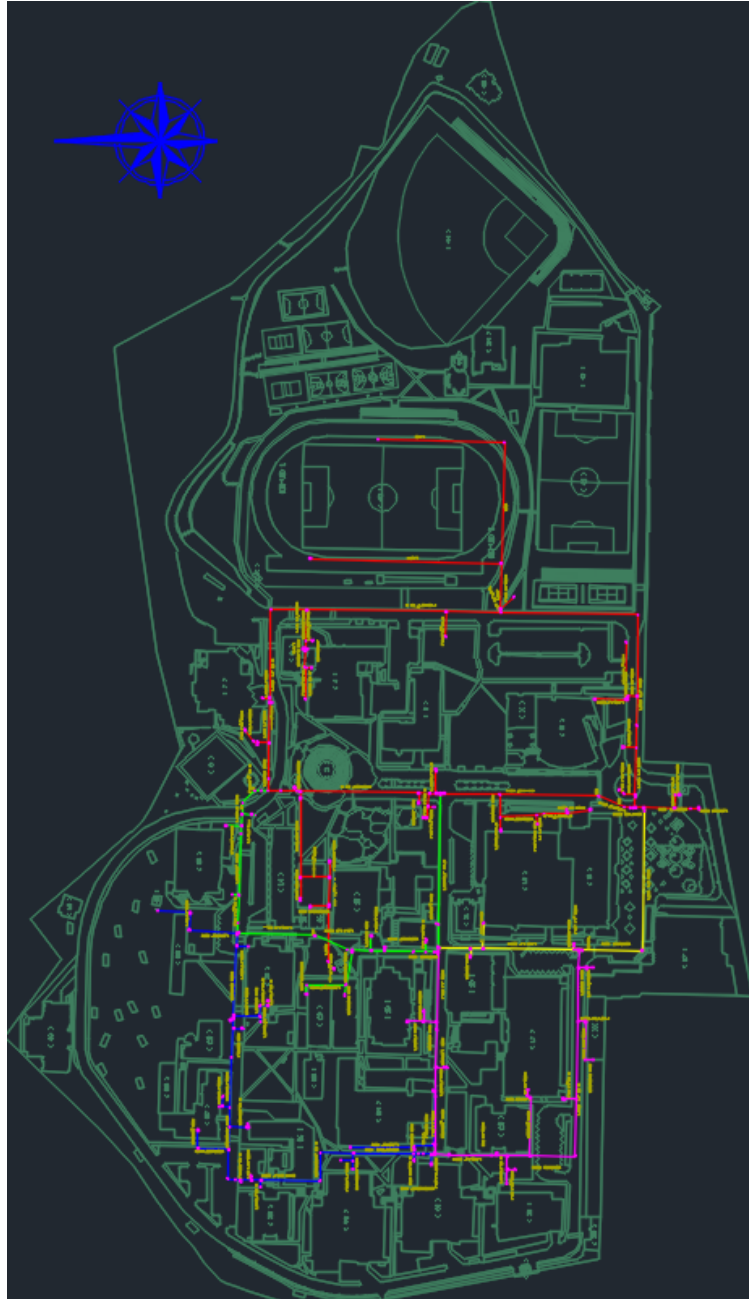


Anexo B: Configuración en oficina RADAN 7



Anexo C: Planos de redes del campus universitario

Plano con red de acueducto

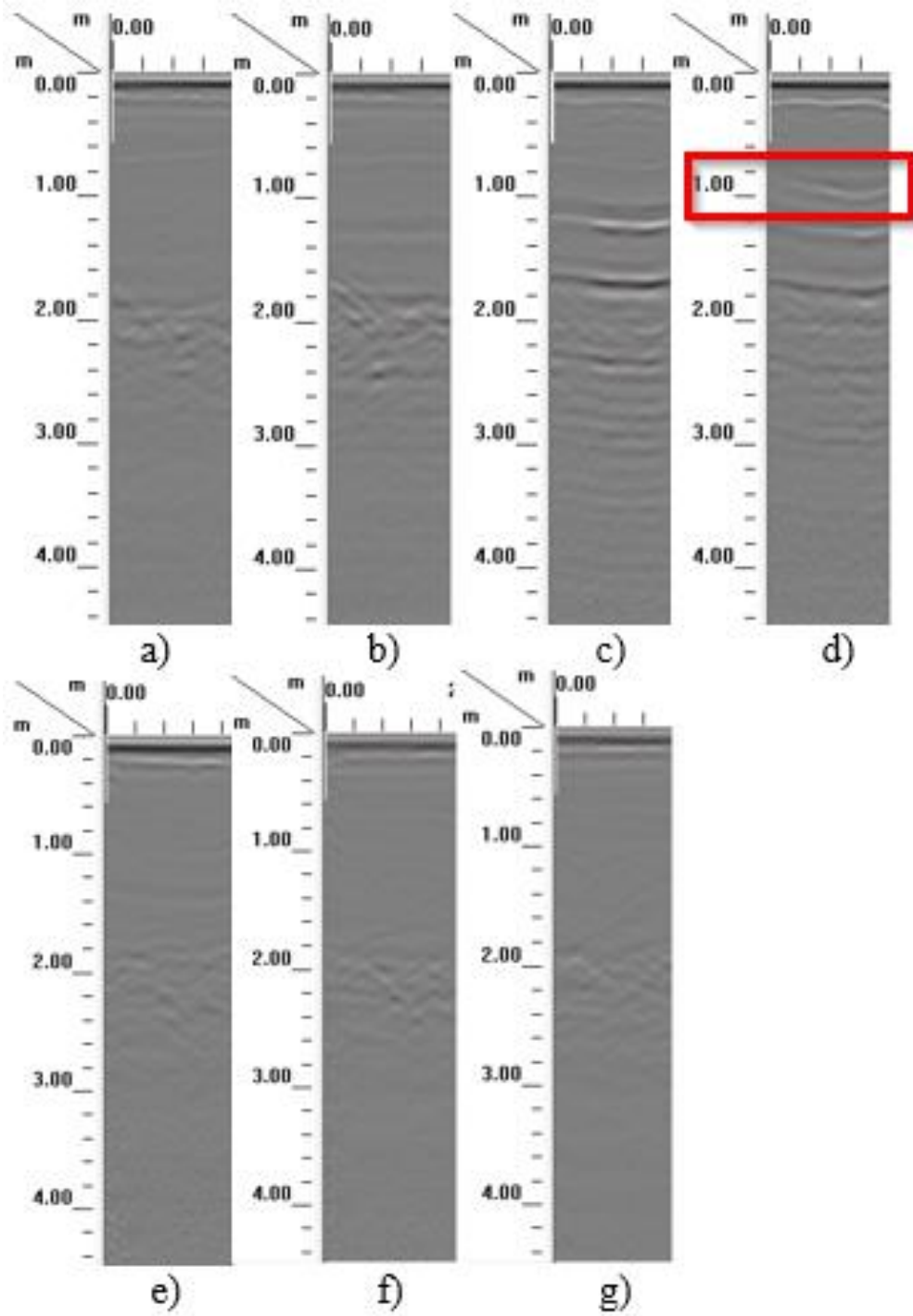


Plano con red de alcantarillado

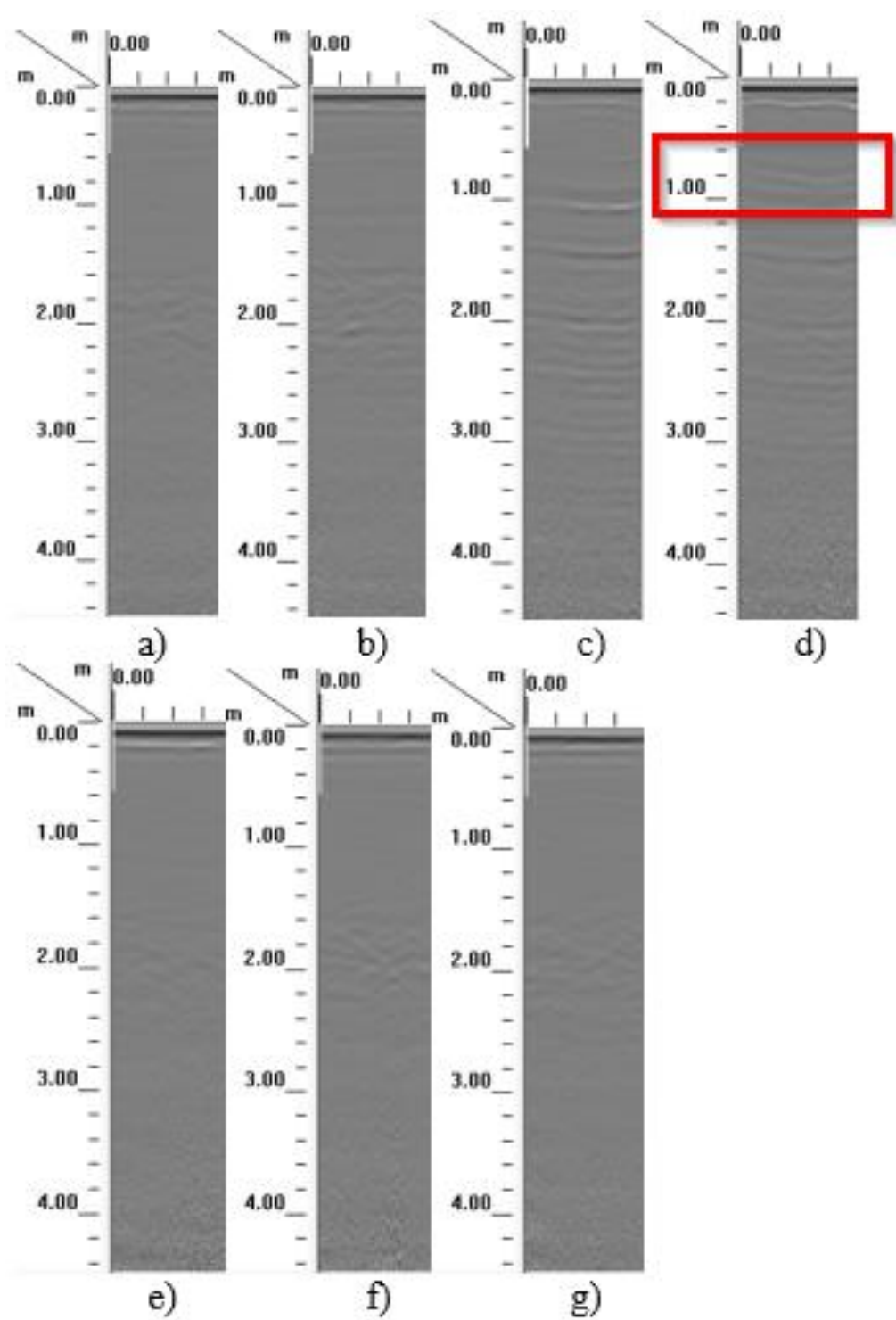


Anexo D: RADARGRAMAS

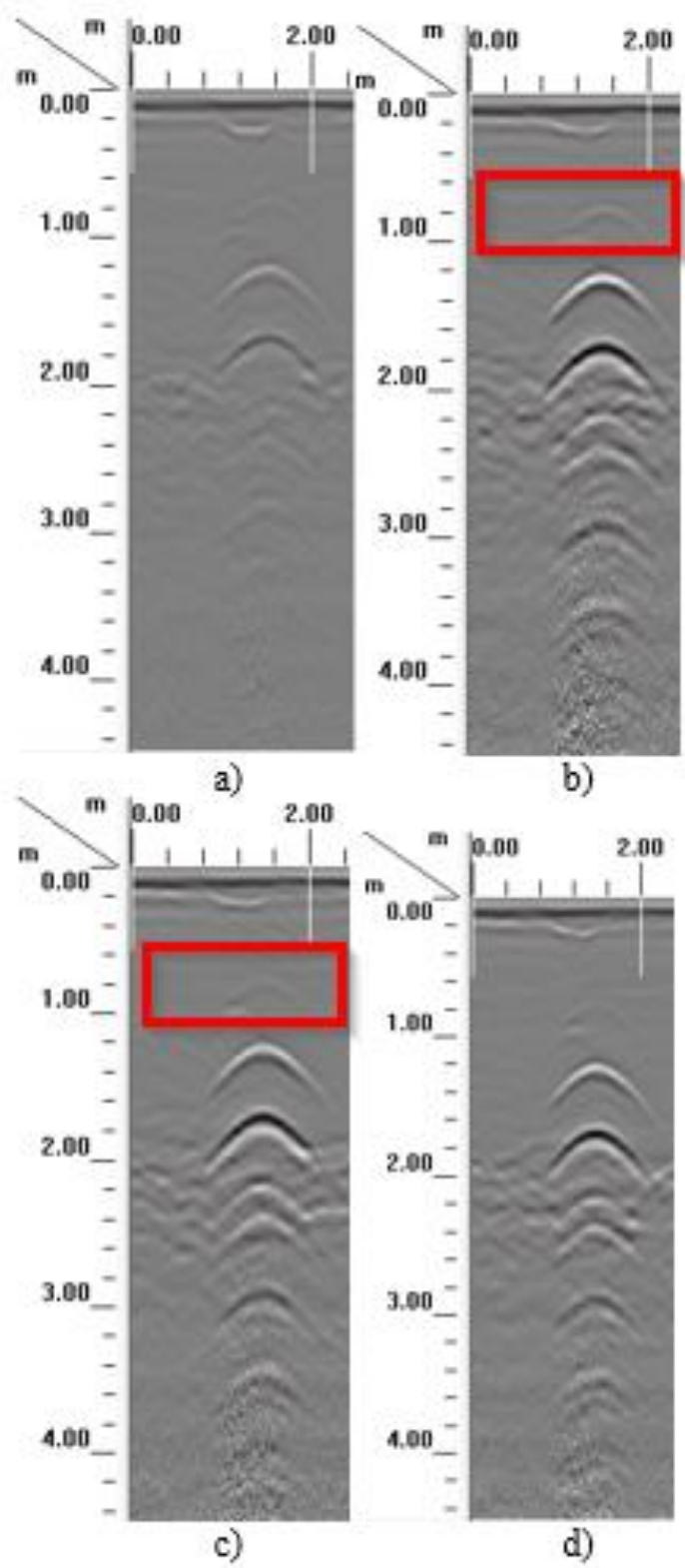
Visualización de ilustración 38.



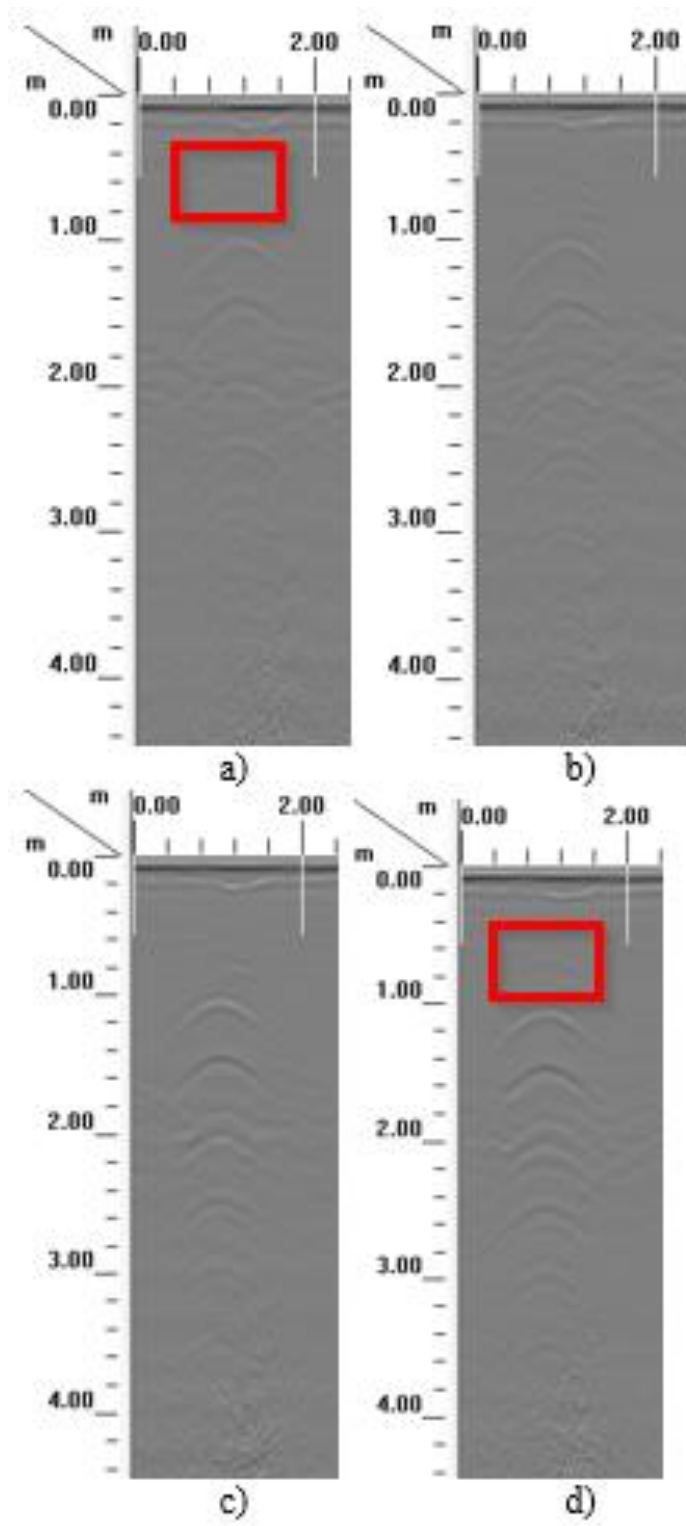
Visualizacion de ilustración 39.



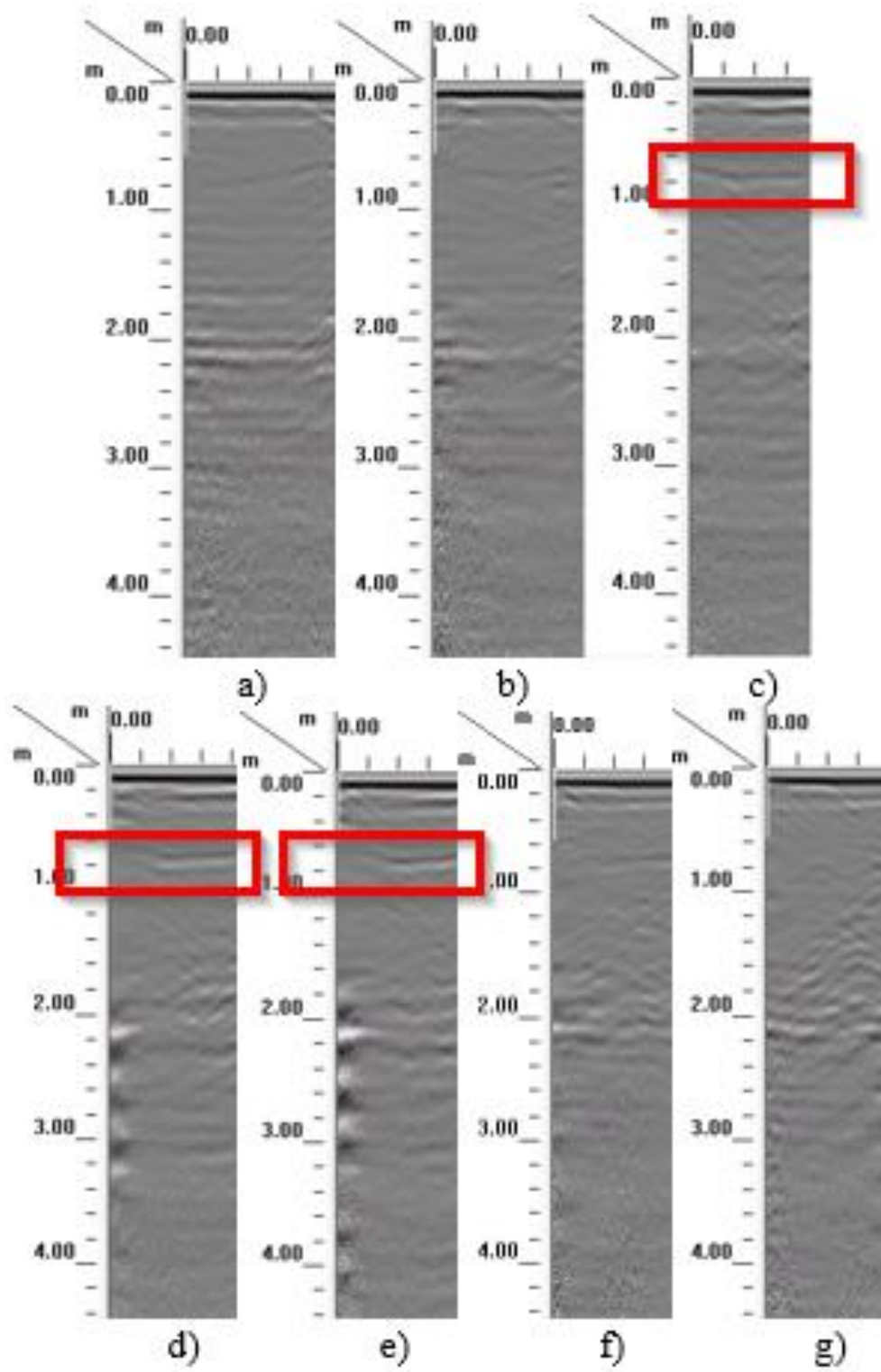
Visualizacion de ilustración 40.



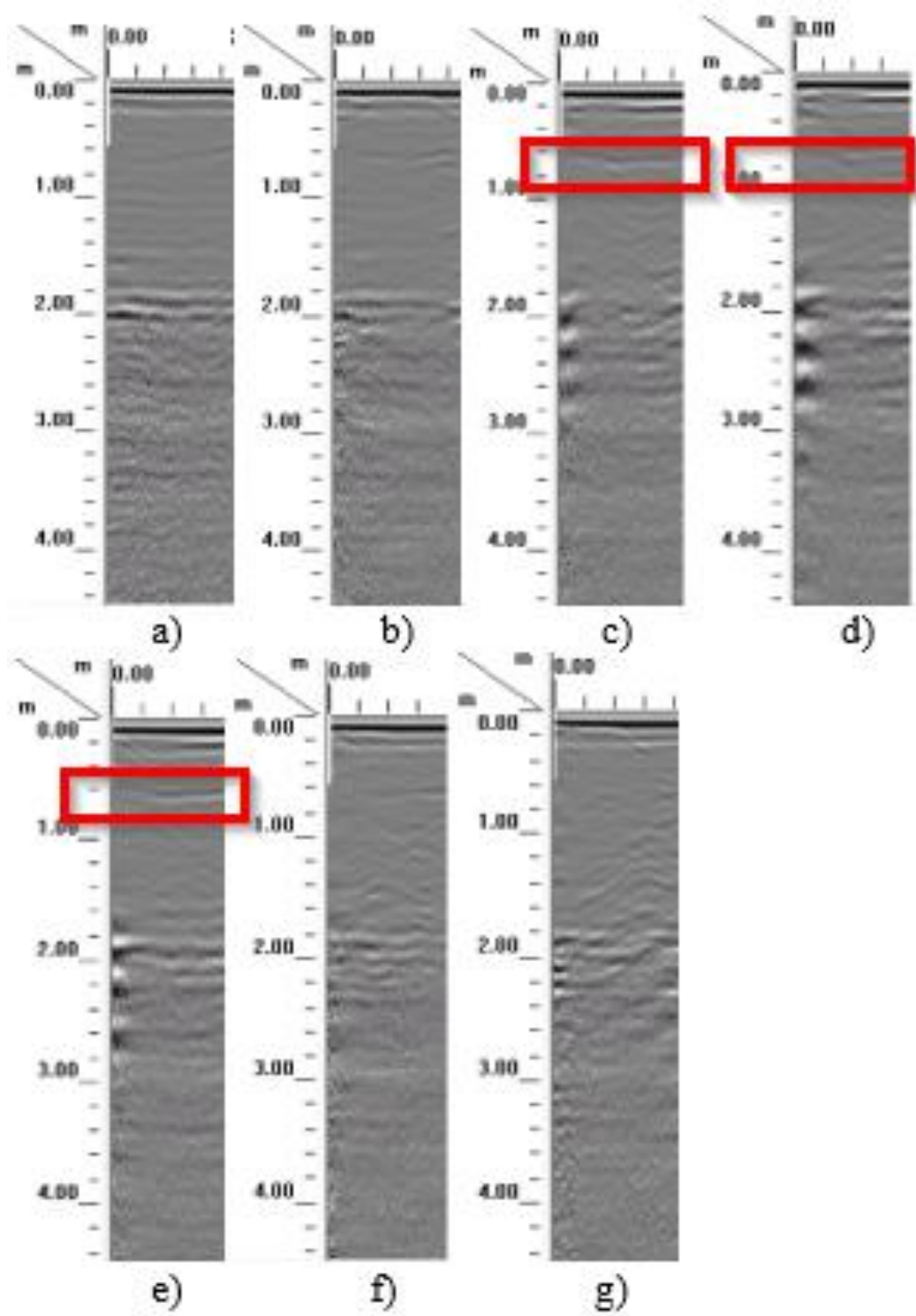
Visualización de ilustración 41.



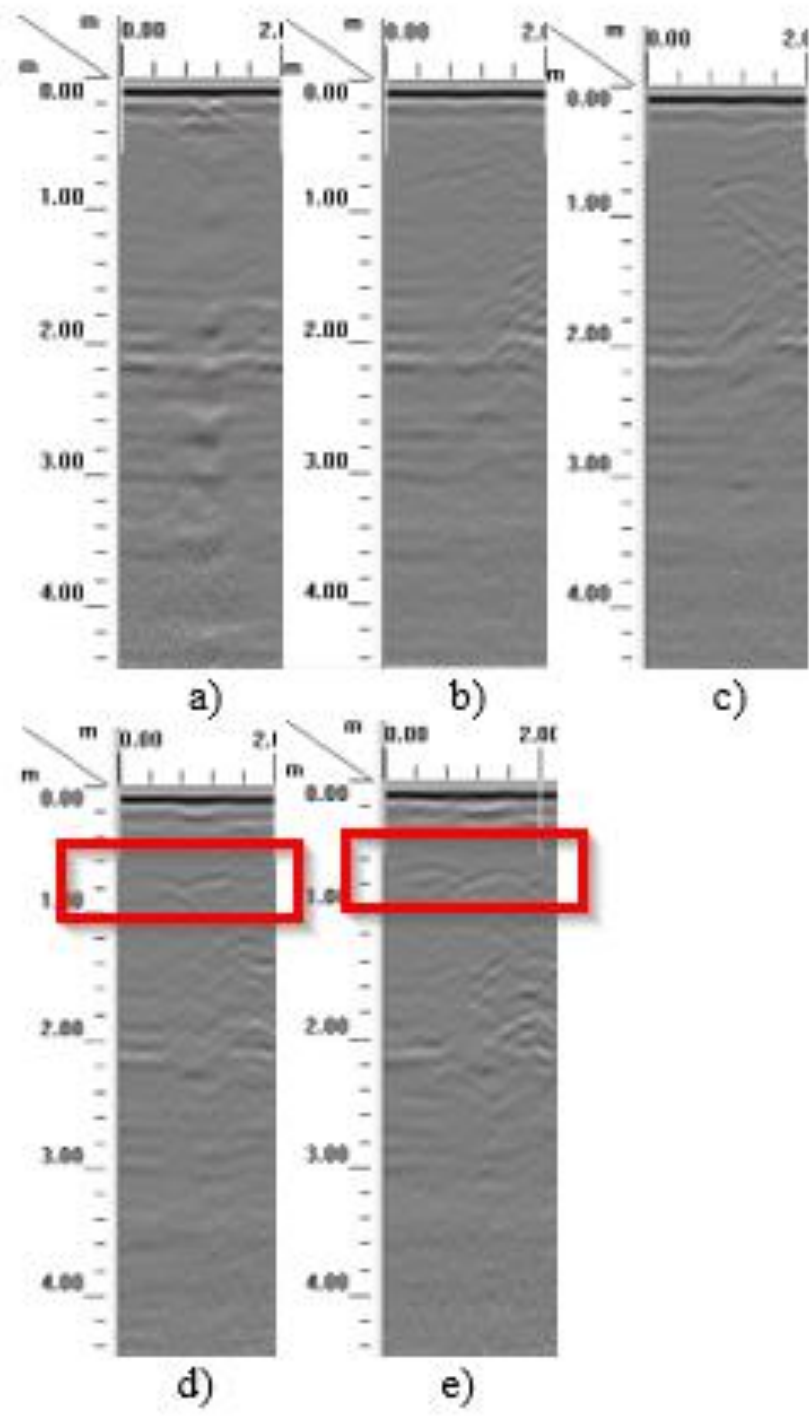
Visualización de ilustración 43.



Visualizacion de ilustración 44.



Visualizacion de ilustración 45.



Visualización de ilustración 46.

