



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Civil

**USO DE TECNOLOGIA GPR PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE TUBERIAS DE  
SERVICIO EN PAVIMENTOS URBANOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

**JORGE IGNACIO AUGUSTO WATSON HERNANDEZ**

PROFESOR GUÍA:  
**JAIME TELLEZ TELLEZ.**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
YOLANDA ALBERTO HERNANDEZ  
CARLOS MOYA SAAVEDRA.  
JOEL ANTONIO PRIETO VILLARREAL.

SANTIAGO DE CHILE  
**2022**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TITULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: JORGE IGNACIO AUGUSTO  
WATSON HERNANDEZ  
FECHA: 2022  
PROFESOR GUÍA: JAIME TELLEZ TELLEZ**

**USO DE TECNOLOGIA GPR PARA DETECCIÓN TEMPRANA DE TUBERIAS DE  
SERVICIO EN PAVIMENTOS URBANOS**

La dinámica actual en la zona urbana dentro de la región Metropolitana demanda la renovación, mantención o proyección de pavimentos, esto debido al incremento en la densidad demográfica de la región.

En el proceso de ejecución de estas obras existe la posibilidad de dañar el trazado de ductos y tuberías de servicio presentes, lo cual repercute en costos, dificultades para la comunidad y pérdida de recursos.

Para una correcta ejecución de los pavimentos dada la dinámica urbana actual, es necesario contar con instrumentos y tecnología capaz de detectar el trazado de ductos y tuberías de servicio. Por ello se propone el uso de tecnología GPR (Ground Radar Penetration), la cual es una solución no destructiva que permite la localización horizontal y vertical del trazado de servicios de forma previa a la ejecución.

Dicha tecnología se basa en el comportamiento, propagación e interacción de las ondas electromagnéticas con el subsuelo. Las bases teóricas y prácticas permiten un correcto desempeño en las campañas de medición, exponiendo su correcto uso y los factores que alteran y/o atenúan la profundidad de penetración y resolución del frente de ondas magnéticas.

La metodología presentada, compara la efectividad técnica entre un equipo que se base en dicha tecnología, correspondiente al georadar y un geófono para la detección de arranques domiciliarios de agua potable en la zona de estudio.

A su vez, verificar la factibilidad económica de implementación de dicha tecnología mediante flujo de cajas para diferentes métodos, es decir, la compra, arriendo y prestación de servicios externos de un georadar en el contexto del mercado chileno. Asociando su impacto económico a la magnitud de la obra mediante los presupuestos oficiales declarados por parte de Serviu.

Llegando a concluir que la tecnología GPR es altamente superior a otras tecnologías de detección en pavimentos. Presentando desviaciones de medición comparativamente menores a las del geófono y una implementación en obra más practica y eficaz. En términos económicos, su implementación es factible representando un costo admisible a la magnitud de la obra, sin perjuicio de ello, se debe estudiar y analizar cada caso de forma particular.

Es por ello por lo que la implementación de esta solución representa un aporte a la pavimentación urbana en el contexto de la problemática actual del país.

**A mi familia,  
profesores, maestros  
y amigos.**

## Agradecimientos

Quisiera agradecer primeramente agradecer a mis profesores los cuales marcaron de alguna forma mi desarrollo como estudiante y profesional, dentro de los que destaco primeramente a mi profesor guía Jaime Tellez, por confiar en mi como su alumno y aceptar el tema que le propuse a desarrollar. De igual forma a los profesores miembros de la comisión, a la profesora Yolanda Alberto quien fue una impulsora en mis primeros años dentro del departamento de Civil y quien hizo que me aferrara y me gustará la especialidad además de fomentar mis conocimientos en el área de la geotecnia, los cuales hoy me son de mucha utilidad en el campo laboral. Al profesor Carlos Moya, con el cual tuve la oportunidad de cursar y ser ayudante en el curso de diseño vial, el cual fomento mis conocimientos y deseos por el área de la pavimentación y estructura urbana. Y finalmente Joel Prieto, quien con el profesor Jaime Tellez curse mi último ramo en la universidad dedicado plenamente al nicho de mi gusto y dedicación, pudiendo aprender lo máximo posible del área. Muchas gracias al equipo docente detrás, no pude haber tenido mejores profesores y guías en esta última etapa universitaria.

Agradezco por todo el apoyo en este proceso a toda la empresa Mavimix, quienes me aceptaron durante mis prácticas profesionales, donde actualmente trabajo y aprendo respecto al mundo de la pavimentación. En particular, quisiera agradecer a Pablo Meneses, quien ha sido mi tutor tanto en mis practicas como en la actualidad, permitiéndome vincular mis conocimientos con el mundo laboral, gracias por la paciencia, por todo el apoyo y permitirme aprender cada día algo nuevo sobre la ingeniería civil.

Agradecer a todos mis maestros y compañeros de karate de mi dojo, quienes me guiaron y apoyaron desde tiempos remotos y ayudaron a forjar la persona quien soy y que pudo lograr esto.

El mayor agradecimiento se los debo a mi familia y amigos, por su apoyo incondicional y por creer en mi hasta el final, sin ellos nunca lo hubiese logrado. Tanto los que están hoy conmigo como los que no, espero estén orgullosos de este logro puesto que es gracias a ustedes y por ustedes.

Y mención especial a mis amigos más cercanos de la universidad, compañeros de batallas interminables, sin ellos y su apoyo nunca se hubiese logrado. Pasamos por muchas dificultades, ramos reprobados, tareas y trabajos a última hora, pero incluso con ello pudimos llegar al final de la carrera, lo logramos y siempre estaré agradecido con ustedes.

En fin, gracias a todas y cada una de las personas que dejaron su grano de arena en mi vida y que dieron pie para poder finalizar esta etapa, ¡muchas gracias!

## Tabla de Contenido

1.- Introducción .....	1
1.1.- Contexto y motivación .....	1
1.2.- Objetivos .....	3
1.2.1.- Objetivo general .....	3
1.2.2.- Objetivos específicos .....	3
2.- Fundamentos .....	4
2.1.- Principios y bases.....	4
2.2.- Propiedades eléctricas y magnéticas .....	5
2.3.- Propagación de ondas electromagnéticas .....	6
2.3.1.- Atenuación de la señal .....	6
2.3.2.- Resolución de la señal .....	10
2.3.3.- Profundidad de penetración .....	14
3.- Aplicación en obra.....	24
3.1.- Instrumentos .....	24
3.2.- Metodología de medición.....	26
4.- Confiabilidad de los datos.....	30
4.1.- Zona de estudio.....	30
4.2.- Comparación técnica y económica entre equipos.....	32
4.3.- Resultados e interpretación experimentales proyecto DOBCO .....	34
4.4.- Resultados e interpretación experimentales uso del geófono.....	37
5.- Análisis de Costos .....	42
5.1.- Cotizaciones en el mercado chileno.....	42
5.1.1.- Compra del equipo .....	42
5.1.2.- Arriendo del instrumento .....	43
5.1.3.- Servicio externo.....	43
5.2.- Análisis de costos directos e indirectos por rupturas en tuberías de servicio.....	45
5.3.- Análisis de costos y determinación rango de factibilidad .....	46
6.- Conclusiones .....	52
7.- Bibliografía .....	54
ANEXOS .....	56
Flujo de cajas .....	56

## Índice de Tablas

Tabla I: Constante dieléctrica relativa de los materiales. ....	9
Tabla II: Recomendaciones de elección de antena en base a los parámetros del suelo. ....	27
Tabla III: Cartilla de diseño Pavimentos de Hormigón disponible en el Manual de Pavimentación. ....	31
Tabla IV: Análisis longitudinal calle Zenteno. ....	34
Tabla V: Arranques detectados. ....	34
Tabla VI: Análisis transversal calle Zenteno. ....	34
Tabla VII: Arranques detectados. ....	37
Tabla VIII: UF a considerar. ....	42
Tabla IX: Presentación de precios compra de equipo en mercado chileno. ....	42
Tabla X: Presentación de precios arriendo de equipo en mercado chileno. ....	43
Tabla XI: Presentación de cotización servicio de equipo en mercado chileno. ....	44
Tabla XII: Resumen flujos en UF. ....	48
Tabla XIII: Tasa de descuento flujo de cajas. ....	48
Tabla XIV: Valores Actuales Netos [UF] caso mínimo para los diferentes métodos de aplicación. ....	48
Tabla XV: Valores Actuales Netos [UF] caso promedio para los diferentes métodos de aplicación. ....	48
Tabla XVI: Valores Actuales Netos [UF] caso máximo para los diferentes métodos de aplicación. ....	48
Tabla XVII: Porcentaje de implementación presupuesto máximo por categoría para los diferentes métodos de aplicación. ....	50
Tabla XVIII: Porcentaje de implementación presupuesto mínimo por categoría para los diferentes métodos de aplicación. ....	51
Tabla XIX: Variación porcentual de implementación por categoría para los diferentes métodos de aplicación. ....	51
Tabla XX: Flujo de caja para compra de equipo y escenario de costos mínimos. ....	56
Tabla XXI: Flujo de caja para arriendo del equipo y escenario de costos mínimos. ....	57
Tabla XXII: Flujo de caja para contratación de servicio externo y escenario de costos mínimos. ....	57
Tabla XXIII: Flujo de caja para compra de equipo y escenario de costos promedio. ....	58
Tabla XXIV: Flujo de caja para arriendo del equipo y escenario de costos promedio. ....	58
Tabla XXV: Flujo de caja para contratación de servicio externo y escenario de costos promedio. ....	59

Tabla XXVI: Flujo de caja para compra de equipo y escenario de costos máximos. ....	59
Tabla XXVII: Flujo de caja para arriendo del equipo y escenario de costos máximos. ....	60
Tabla XXVIII: Flujo de caja para contratación de servicio externo y escenario de costos máximos. ....	60

## Índice de Figuras

Figura 1: Esquema que muestra el cálculo definido por Conyers y Goodman (1997).....	13
Figura 2: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medio de conductividad alta. ....	15
Figura 3: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medio de conductividad media. ....	16
Figura 4: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medio de conductividad baja. ....	16
Figura 5: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medios muy resistivos. ....	17
Figura 6: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad alta. ....	17
Figura 7: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad media.....	18
Figura 8: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad baja.....	18
Figura 9: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad medios resistivos. ....	19
Figura 10: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medio de conductividad baja. ....	20
Figura 11: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medio de conductividad media. ....	20
Figura 12: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medio de conductividad baja. ....	21
Figura 13: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medios resistentes. ....	21
Figura 14: Relación de conductividad y permitividad dieléctrica tal que la aproximación cumple $P=1$ para diferentes frecuencias. ....	22
Figura 15: Modelo estándar de GPR recomendado.....	24
Figura 16: Partes equipo georadar.....	25
Figura 17: Dimensiones equipo georadar. ....	26

Figura 18: Trazado a realizar con equipo georadar para recolección de datos. ....	28
Figura 19: Identificación de elementos puntuales (imagen de la derecha, casos A, B y C) y elementos lineales (imagen de la izquierda). ....	29
Figura 20: Recolección de datos con equipo georadar. ....	29
Figura 21: Ubicación del sector de estudio. ....	30
Figura 22: Extracto plan regulador comunal de Santiago. ....	31
Figura 23: Paquetes estructurales tipo del sector de estudio. ....	32
Figura 24: Características geófono de acuerdo con ficha técnica. ....	33
Figura 25: Geófono de acuerdo con ficha técnica. ....	33
Figura 26: Extracto radar grama en análisis longitudinal calle Zenteno. ....	35
Figura 27: Arranque 1 calle Zenteno detección con geófono. ....	38
Figura 28: Arranque 2 calle Zenteno detección con geófono. ....	38
Figura 29: Arranque 3 calle Zenteno detección con geófono. ....	39
Figura 30: Arranque 4 calle Zenteno detección con geófono. ....	39
Figura 31: Arranque 5 calle Zenteno detección con geófono. ....	40
Figura 32: Ejemplo plano entrega final GeoRed SA. ....	44
Figura 33: Extracto DS127, Registros y categorías de contratistas Minvu. ....	50



# **1.- Introducción**

## **1.1.- Contexto y motivación**

La ley General de Urbanismo y Construcciones establece que, el propietario del predio debe hacerse cargo de la pavimentación de las calles y pasajes, las plantaciones y obras de ornato, las sanitarias y energéticas, con sus obras de alimentación y desagüe de aguas servidas y aguas lluvias junto con las obras de defensa y servicio de terreno. En el caso de la pavimentación urbana conforme establece la ley N°8.946 sobre la Pavimentación Comunal, la aprobación de los proyectos así como la inspección, recepción y certificación de éstos le corresponde en el caso general a los Servicios de Vivienda y Urbanización (Serviu), la excepción la constituyen las obras de pavimentación en el territorio de la Ilustre Municipalidad de Santiago y la ejecución de calzadas en caminos públicos que le corresponden al Ministerio de Obras Públicas dichas tareas.

El crecimiento demográfico es una situación presente en el ámbito urbano actual, produciendo que se requieran una mayor cantidad de obras habitacionales urbanas. La SEREMI de Desarrollo Social y Familia Metropolitana estima que la variación anual en la región metropolitana es de 1,0% anual, es decir de aproximadamente 75 mil habitantes se suman a la región por año.

El INE (Instituto Nacional de Estadísticas) publicó que durante el primer trimestre del 2019 se georreferencia una cantidad de 7.199 permisos de edificación, en donde la región metropolitana acumula el 45.4% de las unidades a edificar.

Por lo tanto, en base al crecimiento demográfico y la demanda de obras habitacionales urbanas es necesario tener un sistema confiable que permita una correcta urbanización de los frentes prediales, correspondientes a la ejecución de aceras y calzadas.

Por su parte, la dinámica de las ciudades ya urbanizadas demanda la ampliación, renovación y conservación de las redes subterráneas de infraestructura de servicios, redes que se emplazan bajo calzadas ya sea de forma transversal o longitudinal a éstas. En ese contexto, contar con herramientas efectivas y de bajo costo para la detección de redes resulta de gran importancia cada vez que se requiere proyectar, renovar o conservar los pavimentos urbanos. Se propone un método de detección no destructiva, con tecnología GPR (Ground Radar Penetration) la cual permite ubicar espacialmente dichos elementos evitando roturas imprevistas.

Fallas en las redes conllevan graves problemas para los ciudadanos y la infraestructura aledaña a dichos puntos, dado que su reparación implica una intervención en la zona además de un gasto para la empresa proveedora del servicio (cabe decir que el 74% del agua no facturada corresponde a la pérdida por rotura de cañerías, según lo informa CIPER) como para el contratista del proyecto (producto de multas).

Para llevar esto a contexto, la SISS (Super intendencia de Servicios Sanitarios) declara que la red de agua potable en la Región Metropolitana tiene más de 15.260 km y registró una cantidad de 8.200 roturas de cañerías en el año 2015. Además, su reposición y mantención por parte de

Aguas Andinas es 0.22% en el año 2014 de la red de agua, deduciendo que el seguimiento de trazados es considerablemente menor con respecto a la red principal. Donde si bien, la cantidad de roturas no son exclusivas del proceso constructivo en pavimentos nos permite tener un orden de magnitud.

Para poder ajustar y determinar esta magnitud se consultará en la empresa Constructora Mavimix, dedicada a la pavimentación urbana y tratamiento de Aguas Lluvias (AALL) en la región metropolitana, cuya categoría en obras viales es B1-2 en el registro de contratistas del Minvu, donde realice la práctica profesional y trabajando actualmente.

En donde se concluye que en aproximadamente un 20-25% de las obras presentan al menos una rotura de tuberías de servicios.

He de destacar también que el presente estudio se realiza en la región metropolitana y basado en las normas de construcción de la región, sin embargo, las diferencias presentes en otras regiones no son de gran magnitud, por lo cual el estudio se podría aplicar en ciudades fuera de la región metropolitana.

Por lo cual en base a esta necesidad se llevará el estudio de la parte teórica en que se basa la tecnología GPR y se comparará con la exposición de resultados de terreno, con el fin de concluir si es confiable dicha información y de ser así ver la factibilidad de su implementación en los procesos de urbanización.

## **1.2.- Objetivos**

### **1.2.1.- Objetivo general**

- El objetivo general del presente trabajo de título es presentar las bases e implementación de la solución del uso de tecnología GPR para la detección de redes subterráneas de conducción de aguas lluvias, agua potable y aguas servidas, en particular en pavimentación urbana y la detección de tuberías de servicio.

### **1.2.2.- Objetivos específicos**

- Presentar antecedentes que respalden la problemática planteada del informe.
- Presentar y determinar la base teórica de la tecnología GPR.
- Presentar el uso de la tecnología GPR en terreno.
- Comparar lo expuesto teóricamente con datos de terreno proporcionados de forma externa con dos equipos diferentes.
- Realizar un análisis de costos para la implementación de la solución propuesta en diferentes términos comerciales (compra, arriendo o préstamo de servicios).
- Determinar un rango en términos de costos en el cual es rentable implementar esta tecnología.
- Concluir si es un aporte o no a la problemática el uso de esta tecnología.

## 2.- Fundamentos

### 2.1.- Principios y bases

La tecnología GPR se basa en el análisis de ondas electromagnéticas, donde mediante el equipo y software permiten la emisión, recepción e interpretación de dichas ondas mediante las diferencias en los tiempos entre pulsos.

Dichos tiempos quedan definidos por el estado del subsuelo y los elementos con los cuales se encuentra en su propagación, donde se diferencian principalmente dado los cambios en las características dieléctricas, eléctricas y magnéticas del subsuelo y de los materiales a rastrear, en nuestro caso las tuberías de servicio.

Estos cambios en las propiedades son las que permiten a estos equipos diferenciar elementos y capas en el subsuelo, permitiendo un análisis previo y no destructivo del sector a trabajar, reduciendo las probabilidades de una rotura en tuberías de servicios producto de los trabajos. En este capítulo se tratará los principales aspectos teóricos que permitan aproximar el funcionamiento de la tecnología GPR, permitiendo entender los principios y bases que lo rigen.

Destacamos que la base fundamental del funcionamiento detrás de la tecnología GPR es lo correspondiente a las leyes de Maxwell.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} + \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times \vec{H} - \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= 0\end{aligned}$$

Donde mediante su manipulación se logra obtener las ecuaciones vectoriales de D'Alembert o ecuaciones de ondas, correspondiente a las siguientes:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}$$

Donde dichas ecuaciones trabajan con el campo eléctrico y magnético presente, es de estas junto con las propiedades de los materiales y la propagación de las ondas las que permiten describir a grandes rasgos el modelamiento del sistema GPR.

El comportamiento de las ondas es lo que permite la descripción y mediante la interpretación de dicho comportamiento se puede detectar elementos del subsuelo.

## 2.2.- Propiedades eléctricas y magnéticas

Las propiedades eléctricas y magnéticas del medio junto con la diferencia entre las fases de este son lo que permiten a la tecnología GPR la caracterización del subsuelo, por lo cual es de suma importancia conocer cuáles son los parámetros que presentan una mayor relevancia a la hora de ejemplificar un modelo teórico de su funcionamiento.

Destacamos los parámetros que son asociados a lo mencionado anteriormente, es decir los que están ligados con el campo eléctrico y magnético, entre ellas está permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ), permeabilidad dieléctrica ( $\mu$ ), conductividad dieléctrica ( $\sigma$ ) y la frecuencia ( $\omega$ ).

Estos son parámetros característicos de los medios a analizar ( $\epsilon$ ,  $\mu$  y  $\sigma$ ) y los que emite el equipo ( $\omega$ ), los cuales alteran las características de investigación y sondaje en el subsuelo, modificando la propagación de las ondas electromagnéticas.

Debemos tener en cuenta que los parámetros de permitividad, permeabilidad y conductividad dieléctrica poseen un carácter complejo que depende de la frecuencia del pulso, complicando el análisis de los medios. Es por ello por lo que tomaremos los casos extremos, es decir, dieléctricos y conductores. Estos corresponden respectivamente a elementos con grandes y pequeñas pérdidas de energía los cuales se describirán en capítulos posteriores.

Los elementos de mayor importancia a estudiar y comprender en la prospección del subsuelo es la atenuación y resolución de la señal que permite el equipo dado el sector de análisis. Primeramente, debemos definir la velocidad de propagación de las ondas en el medio, la que depende de los parámetros mencionados.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

Con  $c$  la velocidad de la luz en el vacío,  $\epsilon_r$  la permitividad dieléctrica relativa del medio y  $\mu_r$  la permeabilidad dieléctrica relativa del medio.

Pudiendo reescribirse en función de un factor de pérdidas, la cual define un punto en el cual separar los medios de grandes y pequeñas pérdidas dado un pulso particular de ondas. Este parámetro está en función de características del medio, permitividad y conductividad dieléctrica, como de las características del equipo, frecuencia del pulso de ondas.

Quedando definido por:

$$P = \frac{\sigma_r}{\omega \cdot \epsilon_r}$$

Siendo  $\omega$  es la frecuencia angular del equipo, definido por  $\omega = 2\pi \cdot f$ ,  $\epsilon_r$  la permitividad dieléctrica relativa del medio y  $\sigma_r$  la conductividad dieléctrica relativa del medio.

Donde la velocidad de propagación:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2}\right) \left[(1 + P^2)^{\frac{1}{2}} + 1\right]}}$$

Donde  $P$  es el factor de pérdidas definido anteriormente,  $\epsilon_r$  la permitividad dieléctrica del medio,  $\mu_r$  la permeabilidad dieléctrica del medio y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío.

Se concluye que la velocidad en el medio con la cual se propaga la onda depende tanto de las propiedades del medio como de la frecuencia escogida por el equipo.

## **2.3.- Propagación de ondas electromagnéticas**

Dado que la tecnología GPR posee un carácter similar a la presente en la refracción sísmica, pero en una escala local, dado que pasa de una prospección de profundidades de 200 o más metros a una menor de 10 metros, pero con una mayor resolución. En base a ello es importante identificar y conocer los elementos que afecten la atenuación y resolución de la señal captada por el equipo, con el fin de poder lograr esta escala local de forma eficiente.

La propagación de las ondas electromagnéticas por el medio depende de los parámetros mencionados con anterioridad, de los cuales es posible estimar según las características del material, los cuales se encuentran estudiados en su mayoría. Así también determinar y ajustar una vez conocidos de forma aproximada el comportamiento y parámetros del medio la frecuencia a la cual se emite el pulso de ondas por parte del equipo logrando las necesidades del proyecto.

Para lograr dicho objetivo en obra es importante reconocer como es afectada la intensidad y trayectoria del pulso de ondas electromagnéticas. Para ello veremos cómo se ve atenúa la señal, así como ve afectada la resolución de la señal.

### **2.3.1.- Atenuación de la señal**

Está hace hincapié en la energía que va perdiendo la señal a medida que recorre el medio hasta la recepción por parte del mismo equipo. Producto de diferentes motivos, sin embargo, estos se pueden clasificar en pérdidas de energía por la expansión geométrica del frente de ondas y los fenómenos de absorción.

Donde podemos distinguir que la expansión geométrica del frente de ondas corresponde a la forma en que se propaga el frente desde el equipo hacia el medio. Mientras que las pérdidas por absorción corresponden a cambios internos que se producen en el medio por el paso del frente de ondas.

#### **1.- Atenuación por expansión geométrica**

El georadar posee un frente de ondas que se dispersa al medio desde la antena en forma cónica donde el ángulo cambia desde los 45° hasta los 90° desde el semieje menor hasta el semieje mayor.

El semieje mayor corresponde al eje en el cual se desplaza el equipo georadar, además en el caso particular en el que se considera un medio homogéneo y sin pérdidas por absorción, se puede demostrar que la energía que percibe el receptor es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida en la dirección del semieje mayor. Lo cual se demuestra dado el comportamiento similar que posee la tecnología GPR con la sísmica.

Donde la intensidad de la onda se puede cuantificar, tomando el caso esférico con su centro en la antena de emisión del pulso de ondas, para dos distancias diferentes del origen, determinando las siguientes relaciones.

$$I_1 = \frac{E}{4 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot t} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r_1^2}$$

$$I_2 = \frac{E}{4 \cdot \pi \cdot r_2^2 \cdot t} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r_2^2}$$

La intensidad  $I$  que se percibe en cada punto, puede ser expresada en función de la potencia de la onda  $P$  y los radios  $r_1$  y  $r_2$  respectivamente. Donde su relación entre ellas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Siendo este un problema único de la geometría del equipo, determinando que el frente de ondas electromagnéticas va perdiendo energía a medida que el objeto se encuentre más lejano al foco. Esta da indicio a que el equipo georadar debe poseer la antena emisora y receptora a una distancia adecuada tal que la pérdida de energía no sea significativa para caer en errores de medición.

Sin embargo, las propiedades del medio no son homogéneas y van cambiando a medida que el frente de ondas lo recorre, la velocidad de propagación es alterada, como se presentó anteriormente está depende de los parámetros del subsuelo. Es por ello que la atenuación geométrica cambia en cada punto de la trayectoria, su variación fue estudiada en diferentes simulaciones sísmicas, cuyo comportamiento es similar al planteado por la tecnología GPR, en particular son Cai y McMechan (1995) quienes plantean una ecuación tras integrar en cada punto de la trayectoria de las ondas electromagnéticas, determinan una ecuación que permite estimar el factor de atenuación de la onda para medios no homogéneos e idealizados como en el caso anterior.

Cuyo resultado es expresado en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{S \cdot D_s \cdot D_r \cdot R}{G_i \cdot G_o} \cdot \prod_j T_j e^{-\alpha_j l_j}$$

Donde  $A$  es la amplitud asociada a cada rayo del frente de ondas depende de la amplitud de la fuente ( $S$ ), los periodos de la fuente y receptor para un patrón de radiación de dipolo eléctrico horizontal ( $D_s$  y  $D_r$ ), la reflexión de onda plana ( $R$ ), coeficientes de transmisión ( $T$ ), tanto

dentro del plano ( $G_i$ ) como fuera del plano ( $G_o$ ). Donde además tenemos el largo del segmento de onda ( $l_j$ ) y el coeficiente de atenuación del segmento de onda ( $\alpha_j$ ) que nos permite saber en cuanto se redujo la energía de forma más precisa, dado que representa de forma empírica el medio y no de forma teórica como se señaló en casos anteriores.

## **2.- Atenuación por absorción de energía**

Estas atenuaciones hacen referencia a como el frente de ondas electromagnéticas pierde energía en su trayectoria debido a la interacción de la onda con el medio.

Una de las primeras causas de pérdida de energía por dicha interacción es la conversión a calor, es decir, parte de la energía que emite la onda electromagnética se convierte en calor al interactuar con el medio.

Esto es producto del cambio en la orientación de las moléculas del medio, presentándose tres situaciones dependiendo de la frecuencia emitida. Corresponden a la polarización de las moléculas de agua para frecuencias cuyo ancho de banda corresponda a la banda de microondas y radio, la polarización iónica para anchos de banda infrarrojos y por último la polarización electrónica para anchos de banda ultravioletas.

Produciendo el fenómeno de polarización por orientación de moléculas, en donde las moléculas del material tienden a una orientación la cual las cargas de éste se desplazan, las negativas se trasladan intentando alejarse de las positivas en función de la dirección en que la onda electromagnética produce su campo eléctrico.

Estas polarizaciones causan que la permitividad dieléctrica, la cual como se mencionó es compleja, su parte real disminuya y su parte compleja aumente. La disminución de la parte real causa que la capacidad de separación para cargas opuestas dentro del mismo material sea menor, es decir, la capacidad de polarización del material sea mayor. Mientras que el aumento de la parte compleja produce un aumento en el ángulo de desfase de dichas pérdidas producto de la polarización del material.

Se debe tener en cuenta que los materiales presentes en el subsuelo, por lo general, no poseen una capacidad de polarización muy baja producto de su baja permitividad dieléctrica. No así el agua que puede estar presente en el subsuelo, cuya capacidad de polarización es elevada ya que se posee una permitividad dieléctrica mayor.



Tabla I: Constante dieléctrica relativa de los materiales.

Minerales, rocas y fluidos	Constante dieléctrica relativa (relativa al vacío) [-]
Anhidrita	6,35
Yeso	4,16
Arenisca	4,65
Dolomita	6,8
Caliza	7,5 a 9,2
Lutita	5 a 25
Coloides secos	5,76
Petróleo	2,0 a 4,0
Gas	1,0
Agua dulce	78,3
Agua	56 a 80

De la tabla anterior, se puede ratificar que los minerales rocosos que se pueden encontrar generalmente en las capas del subsuelo, a pesar de ser de una región diferente, donde se observa que poseen una constante muy inferior en comparación de la del agua.

Por lo cual el agua presente en el subsuelo altera la polarización del medio. Es por ello que en los sectores donde se prospecta que la humedad del medio es menor, deberían presentar una pérdida de energía inferior que en sectores de alta humedad.

Este es el uno de los primeros condicionantes en obra que se presentaran, es decir, la humedad de la zona la cual reduce la energía del frente de ondas atenuando la señal.

Otro fenómeno presente es el de dispersión de energía o “scattering”, el cual es producto de la dispersión aleatoria de la energía emitida por el frente de ondas tras su encuentro con algún elemento del subsuelo.

Corresponde a casos en donde la onda electromagnética incide en elementos cuyas dimensiones son coincidentes al orden de la longitud de onda o inferiores a está. Causando que la onda electromagnética emitida una vez altera su recorrido dada la colisión con dicho elemento pierda amplitud, generando distorsión en el georadar el cual debe ser interpretado como tal o verificado.

En general, este fenómeno ocurre cuando el equipo es ajustado a frecuencias altas, puesto que:

$$c = v \cdot \lambda$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $v$  es la frecuencia y  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda.

Donde a mayor frecuencia la longitud de onda disminuye, en algunos casos llegando a coincidir con órdenes de magnitud de centímetros. Llevando a errores en la medición puesto que puede coincidir con elementos propios del subsuelo y no con el objetivo señalado para la prospección, el cual es la detección de tuberías de servicio.

Sin perjuicio de lo anterior, limitar la frecuencia es una medida para controlar dicho fenómeno, sin embargo, se debe tener el cuidado con la profundidad de penetración. Está depende de la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio y como se vio, está a su vez depende de la frecuencia.

Por ello se debe tener en cuenta la profundidad de penetración requerida para el proyecto y poder interpretar los ruidos de la dispersión energética de la onda.

### **2.3.2.- Resolución de la señal**

Para conocer la resolución de la señal recibida por el equipo, se debe tener en cuenta que está se define como la capacidad del equipo de identificar elementos en el subsuelo con la mayor precisión posible independiente de su tamaño.

Para ello se debe separar la resolución en sus componentes vertical y horizontal, correspondientes a la capacidad de determinar el espesor y la distancia mínima entre dos elementos, de forma paralela a la superficie, tal que puedan ser registrados como elementos separados y distinguibles.

#### **1.- Resolución vertical**

Está es aquella que permite determinar los espesores de los elementos del subsuelo, pudiendo además distinguir la distancia vertical entre elementos tal que puedan ser registrados como elementos separados.

Se debe definir los parámetros de los cuales depende la resolución vertical, los que corresponden a la frecuencia a la cual se emite el frente de ondas electromagnéticas y la duración del pulso de ondas.

Con ello podemos definir la anchura de banda, la cual nos permitirá determinar la resolución vertical posteriormente.

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f}$$

Donde  $\Delta t$  corresponde a la anchura de banda y  $\Delta f$  la duración del pulso de ondas.

Con la anchura de banda definida se logra determinar otro parámetro de la resolución vertical, el cual nos da una medida limite en la que será posible identificar de forma separada dos elementos a una cierta distancia vertical entre ellos. Esté se obtiene como el cociente de la velocidad de propagación de onda en el medio y la anchura de banda que definimos.

$$Rv = \frac{v}{\Delta t}$$

Donde  $Rv$  es la resolución vertical,  $v$  es la velocidad de propagación en el medio y  $\Delta t$  la anchura de banda.

La resolución vertical ( $R_v$ ) permite tener la distancia mínima a la cual es posible distinguir dos señales en dirección vertical tal que el equipo no produzca un acoplamiento de dichas señales. Permitiendo identificar los elementos de forma separada y no un conjunto. Para ello, la distancia de separación debe ser igual o mayor a la obtenida en la resolución vertical ( $R_v$ ).

Sin embargo, podemos notar que esta resolución vertical obtenida es teórica, puesto que es un cálculo simplificado e idóneo, dado que se asume que la velocidad de propagación es única y la forma del frente de ondas ideal tal que permite estas simplificaciones. Esto permite tener una estimación a la hora de escoger una frecuencia del equipo para el sector de análisis y no caer en errores de resolución.

La resolución vertical aumenta a medida que la velocidad de propagación es menor, dado que a un menor valor de resolución vertical mayor es la capacidad de identificar elementos como individuales.

Otra forma de aumentar la resolución es disminuir la duración del pulso de ondas ( $\Delta f$ ), sin embargo, debemos recordar lo relacionado con la profundidad de penetración que se poseerá producto de este cambio. Una disminución en el pulso de ondas genera un aumento en la frecuencia del frente de ondas y una disminución en su penetración, otro parámetro relevante el cual será explicada posteriormente.

## **2.- Resolución horizontal**

De forma análoga a la resolución vertical, la resolución horizontal define la capacidad del equipo de resolver la geometría en planta de elementos en el subsuelo.

De forma similar a la anterior, esta queda definida por el cociente de la anchura de banda y la velocidad de propagación, pero de forma adicional dependerá de la forma del frente de ondas que es emitido al subsuelo, de la sección efectiva que es recibida del frente de ondas y de la profundidad del elemento a detectar.

Dentro de los elementos detectados cabe destacar que los que son controlables son los referentes a la antena, como lo es la anchura de banda. No así aquellos que dependen de la respuesta del suelo, como lo es la velocidad de propagación y la sección efectiva del frente de ondas.

El primer elemento que reconocer es como afecta la geometría del frente de luz a la hora de detectar elementos en el subsuelo, para ello es importante tener conocimiento el termino de “Primera zona de Fresnel” la cual define la distancia mínima que bajo las características determinadas del equipo se pueden detectar de forma separada.

Esta dependerá de la frecuencia de la antena y la distancia entre el objeto y la antena como tal, y queda definida:

$$d_1 = \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + r_0 \cdot \lambda}$$

Donde  $d_1$  es la distancia mínima detectable por el equipo definido por la primera zona de Fresnel,  $\lambda$  es la frecuencia a la cual la antena emite el frente de ondas y  $r_0$  es la distancia horizontal entre el elemento a detectar y la antena.

Esto quiere decir que, en un principio, los elementos cuya longitud en planta sean menores a la definida por la primera zona de Fresnel no serán detectables por parte del equipo.

Sin embargo, esta dimensión que define la resolución horizontal es variado, puesto que la dificultad de expresar exactamente el comportamiento de la onda es elevado dada las condiciones particulares del terreno. Es por ello por lo que autores definen expresiones simplificadas como la anterior para la simplificación y funcionalidad de aplicación en obra.

Reynolds (1997), el cual determina que la resolución horizontal a esperar que posee el equipo queda inversamente proporcional a la raíz cuadrada del factor de atenuación. En donde el factor de atenuación queda definido por la parte real de la constante de propagación de la onda.

$$\gamma = \sqrt{\omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon - j \cdot \omega \cdot \mu \cdot \sigma} = \alpha - j\beta$$

Donde  $\gamma$  es el número de onda,  $\omega$  la frecuencia de la antena,  $\mu$ ,  $\sigma$  y  $\varepsilon$  parámetros del subsuelo complejos que definen la permeabilidad, conductividad y permitividad compleja correspondientemente. Pudiendo ser acoplados en  $\alpha$  el factor de atenuación de la onda y  $\beta$  el factor de fase.

En particular, Reynolds (1997), logra concluir que la resolución horizontal esperada del equipo mejora en medios altamente atenuantes, mientras que disminuye en medios transparentes o de baja atenuación. Los medios atenuantes producen una disminución en la distancia mínima detectable mejorando la resolución horizontal, siendo coincidente con lo planteado hasta ahora.

Otro autor que define y proporciona un criterio para la resolución horizontal, es Conyers y Goodman (1997) los cuales mediante el haz del frente de ondas definen en base a geometría y los parámetros del subsuelo la distancia mínima detectable como el radio del frente efectivo. Quedando definido en base al área que impacta el frente de ondas en el subsuelo a la altura del objeto enterrado, como se muestra a continuación.

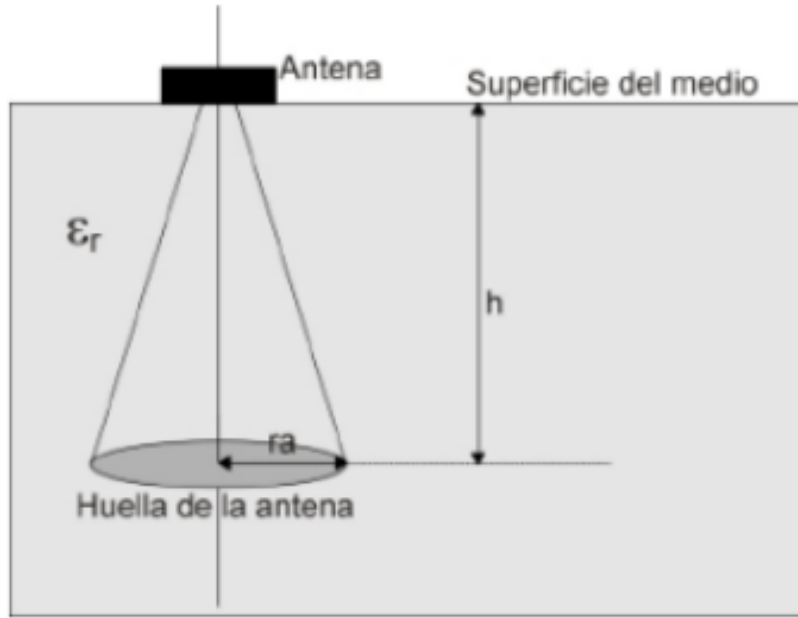


Figura 1: Esquema que muestra el cálculo definido por Conyers y Goodman (1997).

El radio mínimo detectable está definido por:

$$r_a = \frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

Siendo  $r_a$  el radio mínimo detectable,  $\lambda$  la longitud de onda del frente de ondas emitido,  $h$  la altura definida entre la antena y el objeto y  $\epsilon_r$  la permitividad relativa promedio del subsuelo comprendido por la altura  $h$ .

Lorenzo (1994), define la resolución vertical en función del número de trazas que logran alcanzar geoméricamente al objeto provenientes del haz del frente de ondas. Para ello dicha cantidad de trazas debe ser lo suficientemente grande para definir de forma finita los elementos del cuerpo, en donde Lorenzo (1994) define la relación con la consideración que se asume el ángulo del frente de ondas en el movimiento principal de  $45^\circ$ .

$$n_t = t_{r/s} \cdot \frac{2h}{v_a}$$

Donde  $n_t$  es el número de trazas que permite determinar si es detectable el objeto,  $t_{r/s}$  es el número de trazas detectadas por segundo de parte del equipo,  $h$  la separación entre la antena y el objeto y  $v_a$  la velocidad de desplazamiento del equipo en la dirección principal.

El número que define Lorenzo (1994) junto con otros autores es tal que si  $n_t$  es mayor a 20 trazas, la resolución permite la detección de dicho objeto.

He de destacar que  $n_t$  esta en su mayoría definido por parámetros a determinar antes de la toma de datos, siendo  $h$  la única variable que dependerá de la ubicación del ducto y por ende

del sector a medir.

### 2.3.3.- Profundidad de penetración

Uno de los elementos a en cuenta, como se vio anteriormente, es la profundidad de penetración, la cual junto con los factores de atenuación y pérdida de energía permitirán determinar los primeros parámetros estimativos y bases para un correcto desarrollo en obra para los objetivos planteados en cada caso.

Es por ello por lo que tras recabar y analizar datos experimentales es como Turner y Siggins (1994) junto con García (1997) definen en base al comportamiento de las ondas electromagnéticas una forma de determinar preliminarmente la profundidad de penetración, la cual, dentro de su rango de validez, se acerca a la que experimentalmente permite el equipo. Dada la constante de propagación  $\gamma$ , en donde se define el factor de atenuación ( $\alpha$ ) y el factor de fase ( $\beta$ ) que determina la velocidad de fase de la onda. Podemos escribir dichos factores con su dependencia a los parámetros dieléctricos, eléctrico, magnéticos y frecuenciales vistos hasta ahora, quedando de la siguiente forma.

$$\alpha = \omega \cdot \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}) = \frac{\omega}{c} \cdot \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_r \mu_r})$$

$$\beta = \omega \cdot \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}) = \frac{\omega}{c} \cdot \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon_r \mu_r})$$

Particularmente la profundidad de penetración queda definida en función del factor de atenuación ( $\alpha$ ), tomando la expresión anterior y con el uso del algebra se puede expresar:

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

Donde dicha ecuación se caracteriza de depender de los parámetros dieléctricos, eléctricos y magnéticos, pero en función de una frecuencia dada, la cual es la ajustable en obra. Estableciendo que  $\omega = 2\pi f$  con  $f$  la frecuencia de la antena,  $\mu = \mu_r \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right]$  [Henries por metro] la permeabilidad magnética a la frecuencia  $f$ , de forma análoga queda definida la constante dieléctrica  $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right]$  [Faradio por metro].

Antes de entrar al coeficiente de penetración, debemos definir un parámetro que servirá para diferenciar y establecer el rango de validación de la penetración a calcular. Este corresponde al “factor de pérdidas” el cual distingue, en base a sus propiedades físicas, los medios dieléctricos (o de pequeñas pérdidas) de los medios atenuantes (o de grandes pérdidas).

Corresponde a:

$$P = \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} = \operatorname{tg}D$$

En donde  $D$  corresponde al ángulo de desfase de la onda mientras que  $\varepsilon$  y  $\sigma$  la permitividad dieléctrica relativa efectiva y conductividad efectiva del medio respectivamente.

Permitiendo describir el factor de atenuación en función del factor de pérdidas.

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \varepsilon_r}{2} \cdot (\sqrt{1 + P^2} - 1)}$$

Con ello definimos la penetración nominal que tendrá el equipo dada una frecuencia establecida.

$$d = \frac{1}{\alpha}$$

El cual es inversamente proporcional a la atenuación, es decir, medios atenuantes implican una menor profundidad de penetración a la hora de investigar el subsuelo.

En particular, está profundidad de penetración es aquella en la cual la onda electromagnética ha disminuido su amplitud en un factor  $1/\alpha$  que corresponde al 37% de su valor original.

En particular, del Terreny (2001) nos enseña las curvas patrón entre los parámetros del suelo, donde  $d$  es la profundidad de penetración [m],  $\sigma$  la conductividad efectiva del medio [microsiemens por centímetro] y  $\varepsilon_r$  la permitividad efectiva relativa [-].

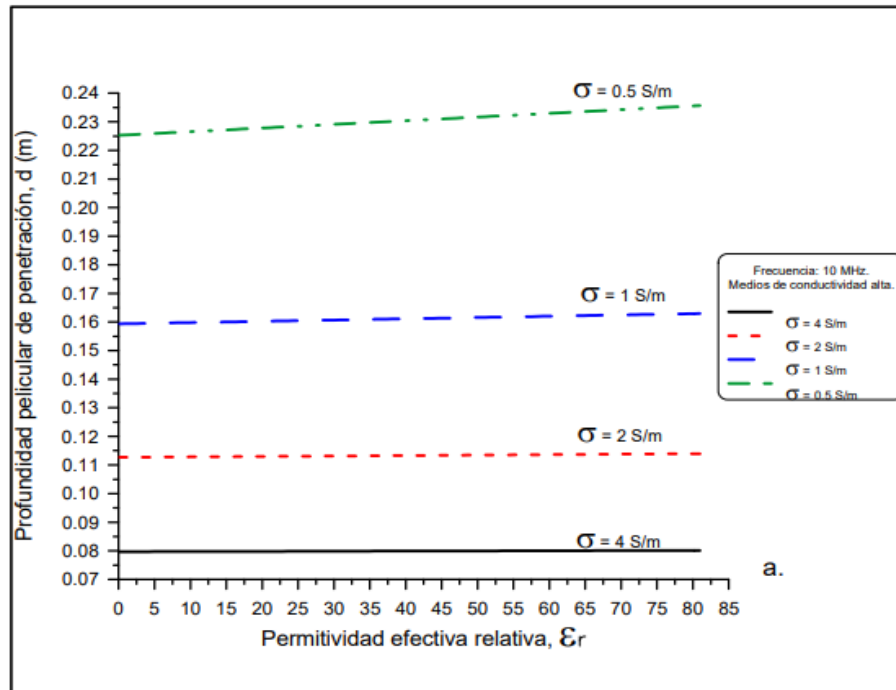


Figura 2: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medio de conductividad alta.

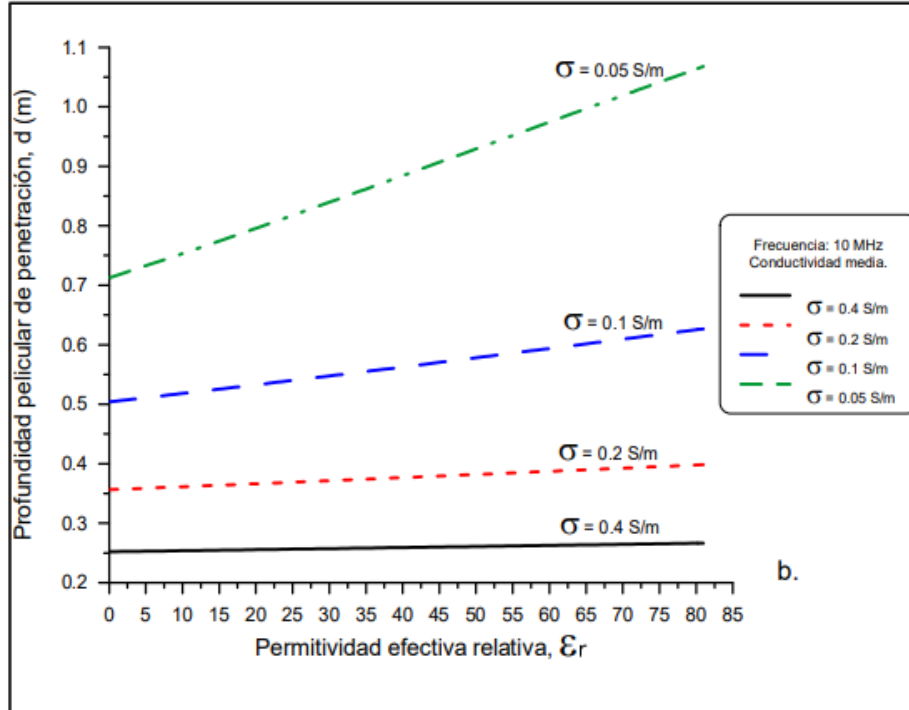


Figura 3: Curvas patrón profundidad – Permittividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medio de conductividad media.

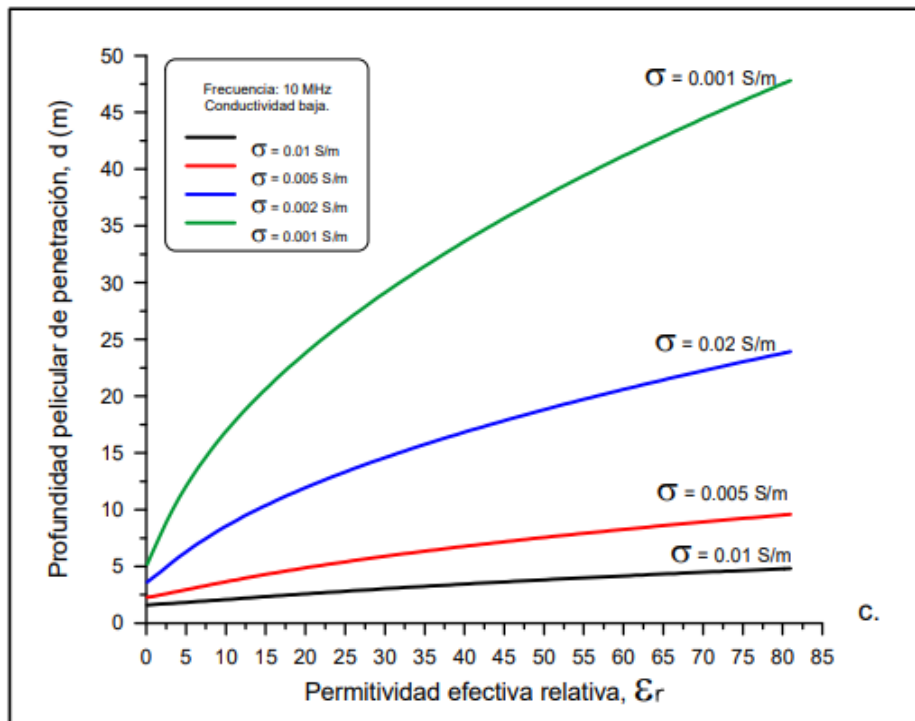


Figura 4: Curvas patrón profundidad – Permittividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medio de conductividad baja.



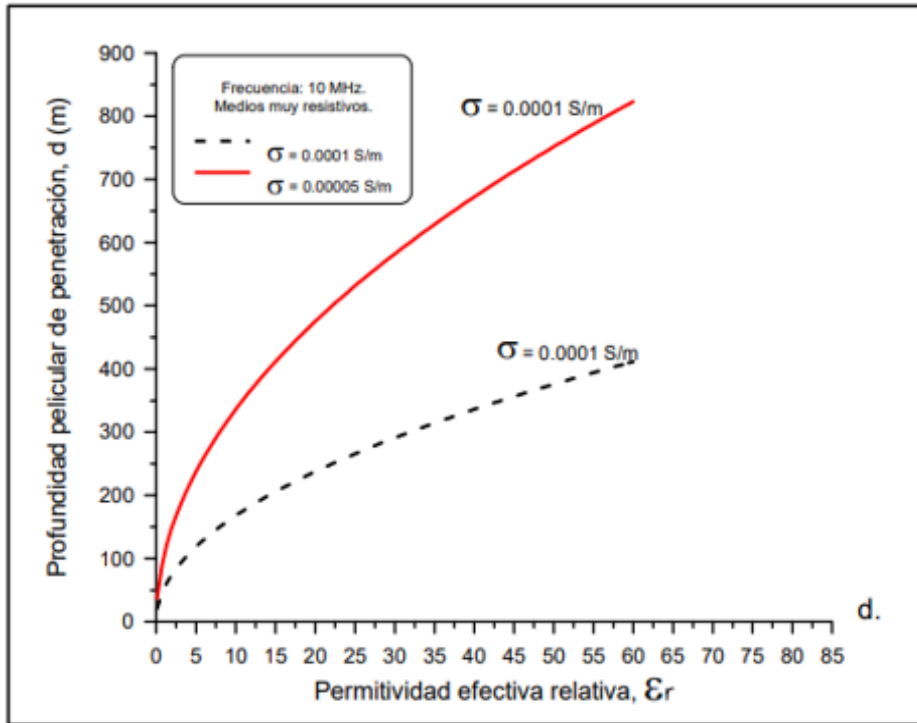


Figura 5: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 10MHz medios muy resistivos.

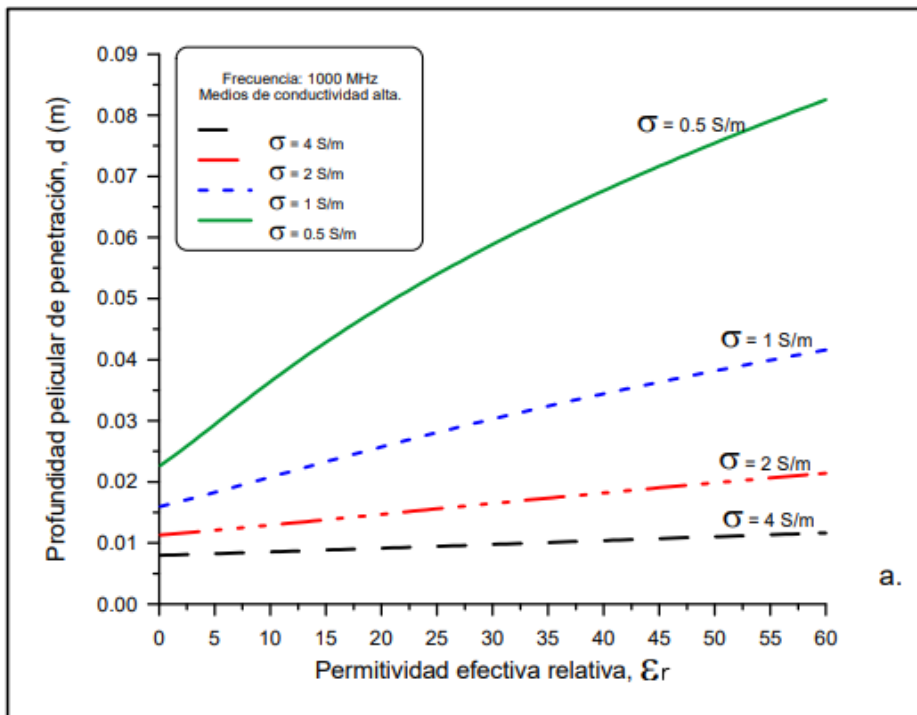


Figura 6: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad alta.

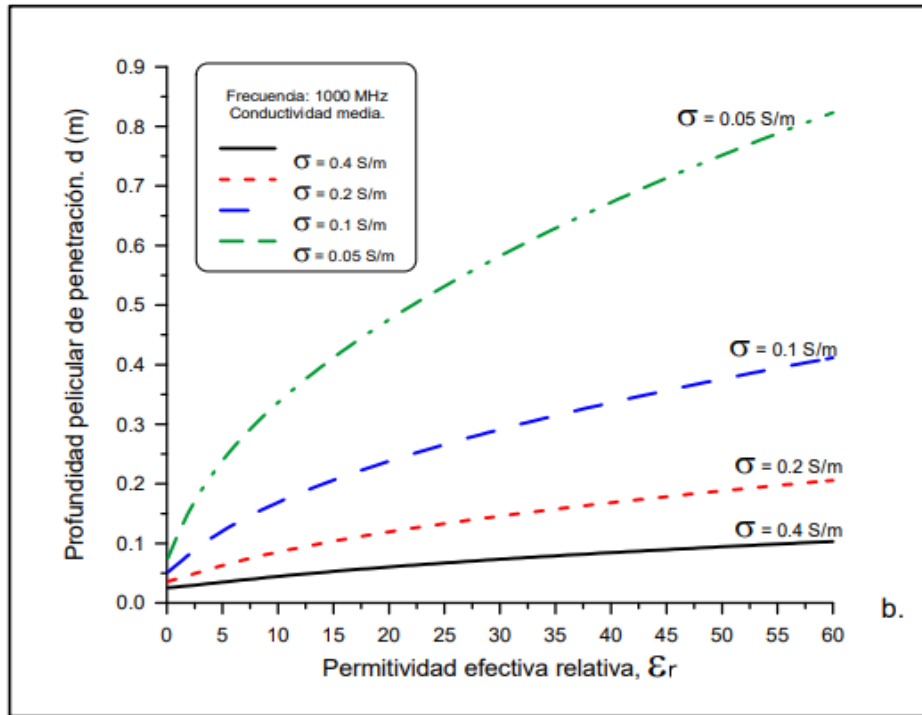


Figura 7: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad media.

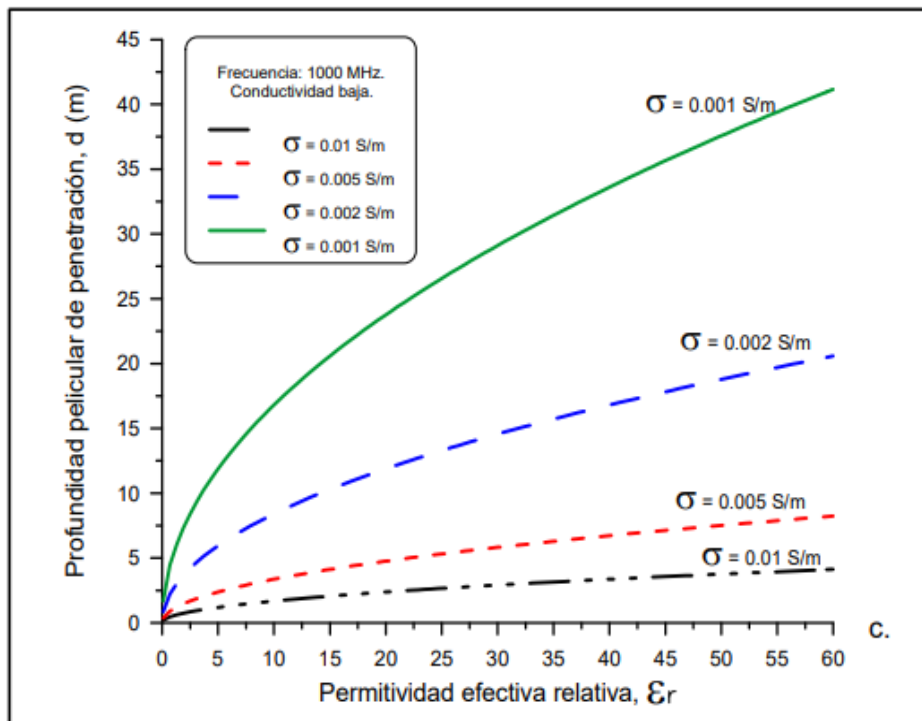


Figura 8: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad baja.

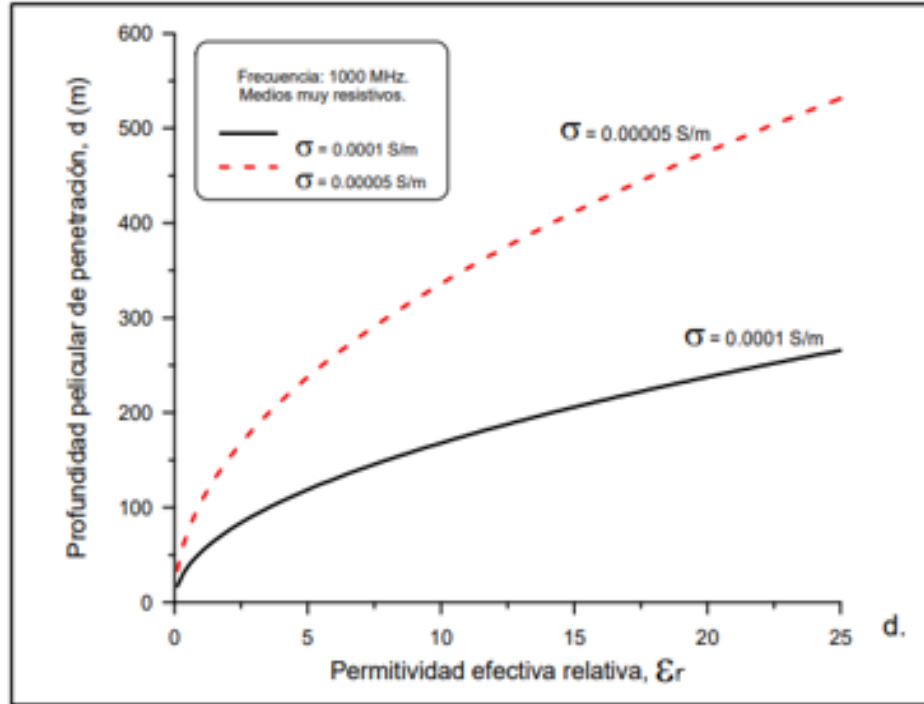


Figura 9: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (sin aproximación) frecuencia de 1GHz medio de conductividad medios resistivos.

Ahora, como se mencionó anteriormente, para el caso en donde el factor de pérdidas cumple la condición:

$$P = tgD \ll 1$$

Se tiene presencia de un medio de bajas pérdidas o dieléctrico, donde el coeficiente de atenuación posee una baja dependencia con respecto a la frecuencia a la cual es configurada la antena del equipo, esto producto que la parte real de la permitividad dieléctrica no posee grandes alteraciones hasta frecuencias elevadas y que están fuera del rango de trabajo del georadar (Sutinen, 1992) mientras que la parte imaginaria del parámetro es aún menor, permitiendo despreciar ciertos elementos y simplificando la expresión de la profundidad de penetración nominal.

$$d = \frac{1}{\alpha} \approx \frac{2}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$$

Esto permite realizar esquemas para determinar en función de los parámetros físicos del subsuelo la profundidad de penetración nominal del equipo, sin embargo, se debe tener la salvedad del rango en el cual es válida la aproximación anterior, puesto que se asume una baja o nula dependencia con la frecuencia de la antena. En caso de ignorar dicho supuesto se incurre en errores importantes que generarán una errónea extracción de datos.

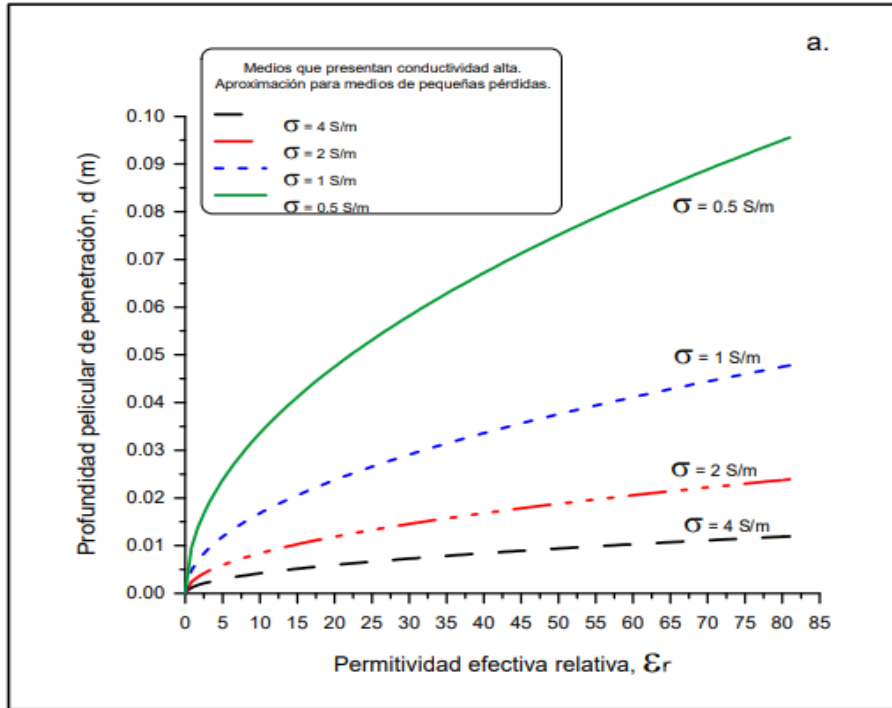


Figura 10: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medio de conductividad baja.

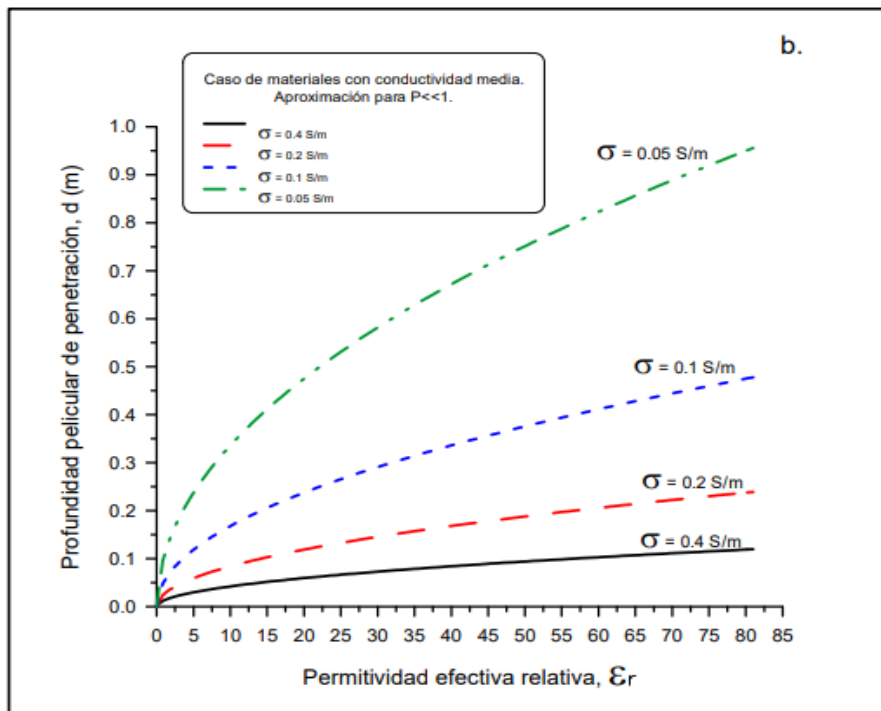


Figura 11: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medio de conductividad media.

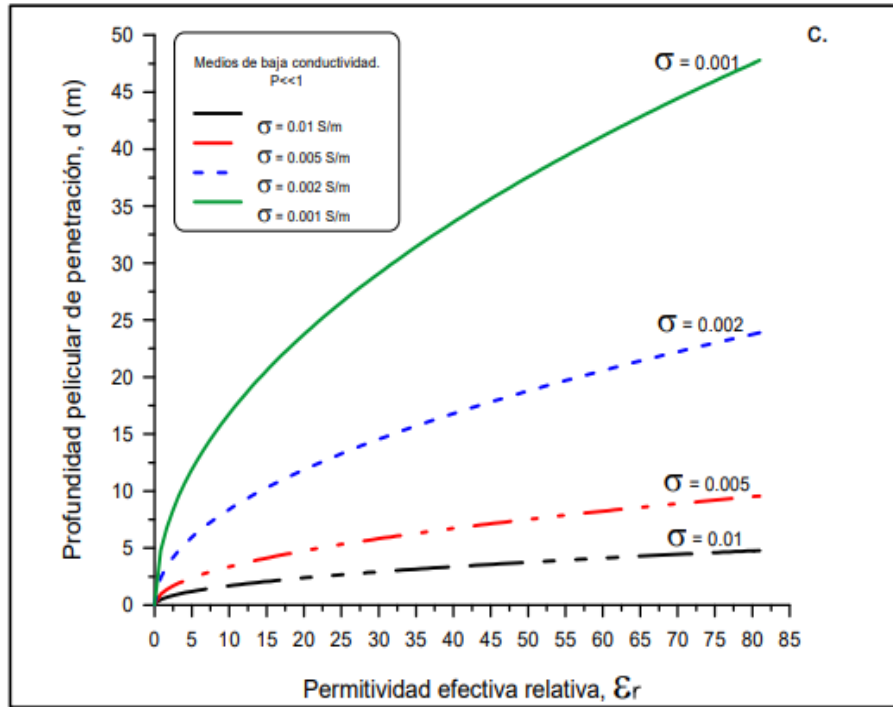


Figura 12: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medio de conductividad baja.

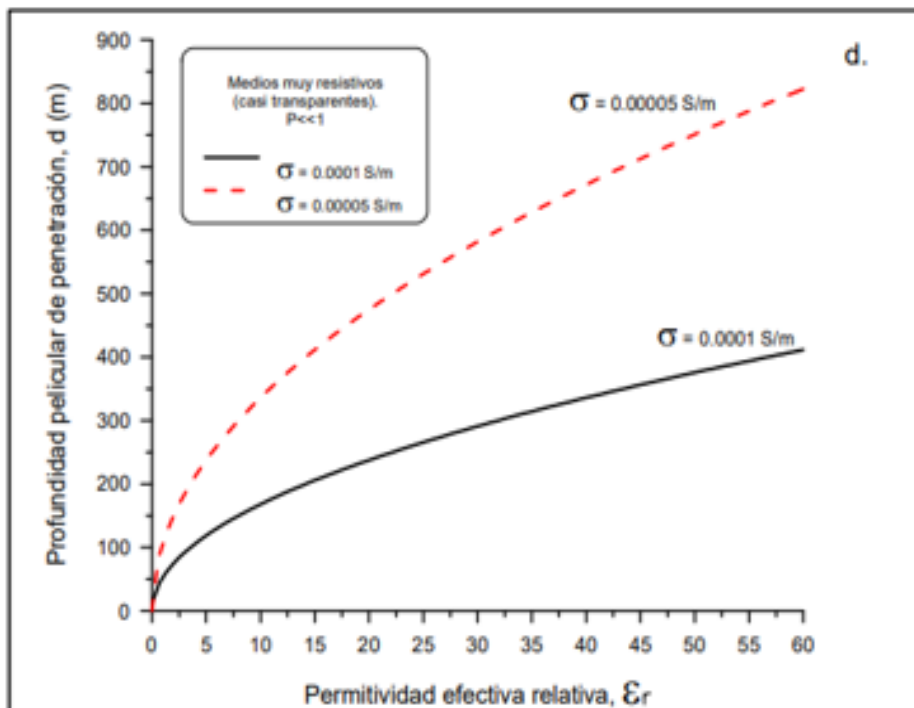


Figura 13: Curvas patrón profundidad – Permitividad dieléctrica caso general (con aproximación) medios resistentes.

Concluyendo que a menor conductividad se posee una mayor profundidad de penetración en el subsuelo. Además, que para un incremento en la permitividad dieléctricas para una misma

conductividad implica un aumento en la profundidad de penetración.

### 1.- Rango y validez de la aproximación en medio dieléctricos

La simplificación aplicada es válida en la condición que el factor de pérdidas sea comparativamente menor a la unidad. En particular Reynolds (1997) acoge esta simplificación y demuestra que es válida si la conductividad del medio estudiado es 0.05 veces la conductividad obtenida para el caso donde el factor de pérdidas es igual a la unidad, permitiendo obtener errores cuya magnitud es despreciable.

Es decir, se analiza la conductividad para el caso crítico:

$$P = tgD = 1$$

En donde se describe por los parámetros:  $\sigma$  la conductividad efectiva del medio [milisiemens por metro] y  $\epsilon_r$  la permitividad efectiva relativa [-].

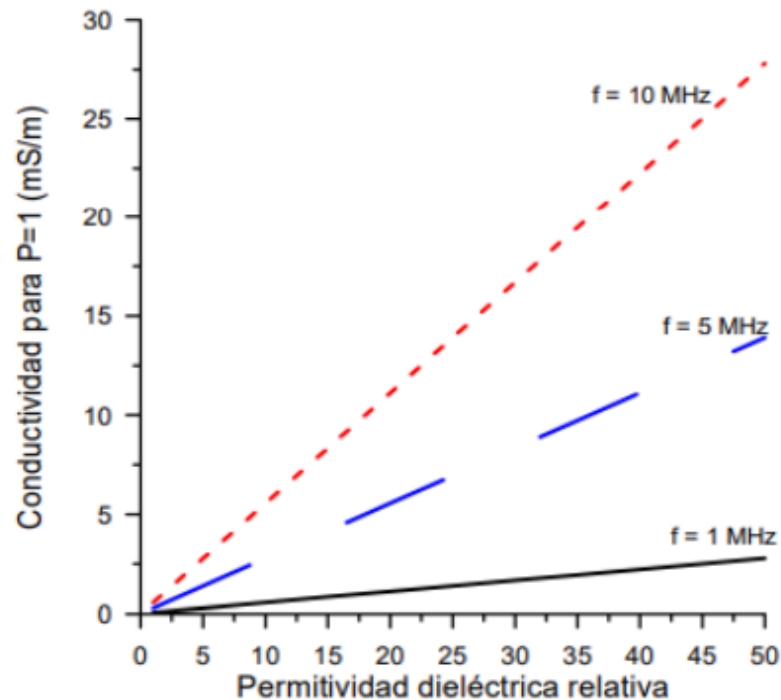


Figura 14: Relación de conductividad y permitividad dieléctrica tal que la aproximación cumple  $P=1$  para diferentes frecuencias.

Obteniendo los parámetros de permitividad dieléctrica y conductividad para una frecuencia dada. Luego esta primera conductividad ( $\sigma_1$ ) que se obtuvo del caso crítico se multiplica por el factor 0.05 y es esta conductividad ( $\sigma_2$ ) la máxima admisible en el medio bajo las condiciones planteadas la simplificación producto de  $P \ll 1$  es válida y sin cometer un error significativo.

$$\sigma_2 = 0.05 \cdot \sigma_1$$

Podemos considerar el siguiente ejemplo:

Se posee las siguientes características iniciales:

- $\varepsilon_r \approx 8 [-]$
- $\mu_r \approx 1 \left[\frac{H}{m}\right]$
- $\sigma_r \approx 0.23 \left[\frac{S}{m}\right]$
- $f = 500 [MHz]$

Se procede a calcular el factor de pérdidas ( $P$ ):

$$P = \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} = 1.034$$

Resultando que no estamos en el rango para poder realizar la simplificación planteada, por lo cual el factor de atenuación y la profundidad de penetración se calcula de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \varepsilon_r}{2} \cdot (\sqrt{1 + P^2} - 1)} = 13.875 \left[\frac{1}{m}\right]$$

Obteniendo:

$$d = \frac{1}{\alpha} = 7.21 [cm]$$

Ahora, si bien no es posible en este caso aplicar la simplificación en base al criterio establecido, lo calcularemos como tal para mostrar el error en el que se incurre en caso de no verificar el factor de pérdidas.

Aplicamos la simplificación:

$$d = \frac{1}{\alpha} \approx \frac{2}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} = 6.53 [cm]$$

Es decir, se obtiene una diferencia de 0.68 [cm] los cuales representan de la profundidad de penetración nominal un error de 9.4%. Por lo cual, si bien el ejemplo anterior es un caso limitado dado que el factor de pérdidas es muy cercano a la unidad, es importante notar que su mal uso implica errores de medición considerables.

Dentro de otros ejemplos que recoge Del Terreny (2001) donde aplica a diferentes medios el cálculo de profundidad de penetración, tanto usando la simplificación como no utilizándola, y compara el error en está, pudo distinguir que dentro del rango de la simplificación se posee errores inferiores al 1% mientras que el mal uso de dicha simplificación, y como se expuso antes, puede obtener errores aproximadamente del 10% hasta el 20%.

### 3.- Aplicación en obra

La correcta aplicación en obra es el punto más importante con lo que respecta al uso de la tecnología GPR, puesto que es lo que permite una correcta recolección de datos. Recordemos que una de las facultades, y que destaca al equipo, es que su procesamiento y muestreo permite la detección de elementos en tiempo real.

Dado que esta recolección de datos en tiempo real es importante conocer cómo se debe ejecutar dicho proceso, tal que no se dejen elementos ocultos del subsuelo fuera de medición o se realice un incorrecto levantamiento del terreno.

Para ello se expondrá las características del equipo, así como también el método de medición y levantamiento del terreno y su procesamiento de datos in situ, llevando posteriormente a una interpretación la cual en este caso corresponde a informes realizados por la empresa DOBCO.

#### 3.1.- Instrumentos

Dentro de la instrumentación se encuentran las partes que componen al equipo en cuestión, primeramente, reconocer que, para el caso de estudio, es decir, la pavimentación urbana en proyectos Serviu y/o MOP el modelo más práctico en nivel funcional es el de forma de “carreta”.



*Figura 15: Modelo estándar de GPR recomendado.*

Donde podemos distinguir en base a las especificaciones técnicas del mismo aparato, 6 unidades centrales, correspondientes a las Antenas, Batería, Sensor de posición de las ruedas y Unidades de control.



1. Computadora portátil: Es el responsable de ejecutar el software de recolección de datos, permitiendo el procesamiento de datos recibidos por la unidad de control.
2. Carro: Estructura principal, la cual facilita el movimiento y transporte de los demás elementos.
3. Antena: Es el transmisor y receptor, puesto que se cuenta con dos unidades, una para cada función correspondientemente. Dichas antenas permiten el escaneo y registro de datos.
4. Batería: Es la fuente de poder permitiendo el uso del equipo y en este caso proporciona 12VCC a la unidad de control.
5. Sensor de posición de las ruedas: Dispositivo identado en la estructura principal, cuya función es medir la distancia recorrida por el equipo.
6. Unidad de control: Correspondiente al centro de información, la cual recibe los datos tanto de la antena como del sensor de posición de las ruedas y los proyecta en la computadora portátil.

Las antenas, a modo general, se pueden agrupar en dos tipos:

- Alta frecuencia: Aproximadamente 700Mhz donde su profundidad de penetración es elevada y posee un buen rendimiento en condiciones óptimas de suelo.
- Baja frecuencia: Aproximadamente 250Mhz donde la profundidad de penetración es menor, sin embargo, produce mejoras significativas en resolución para condiciones deficientes de terreno.

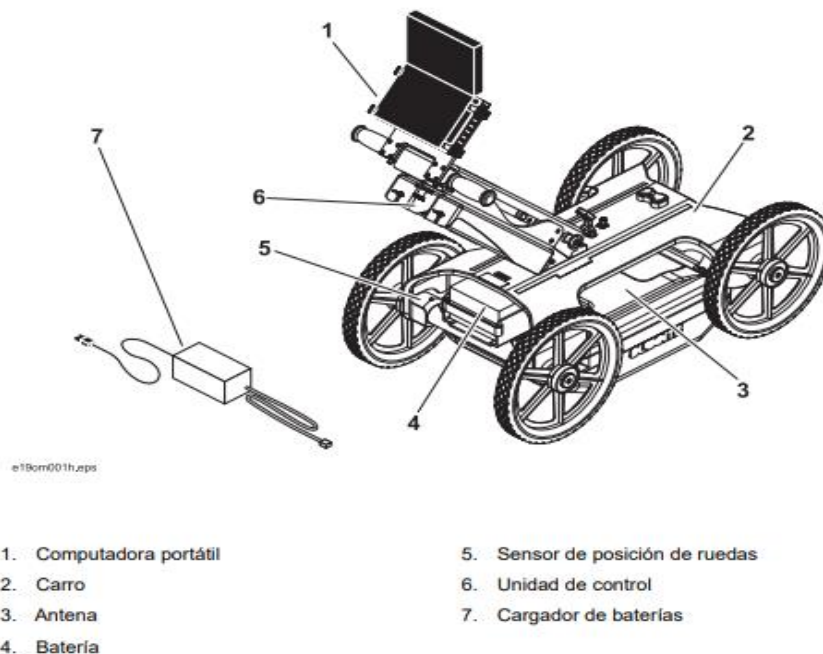
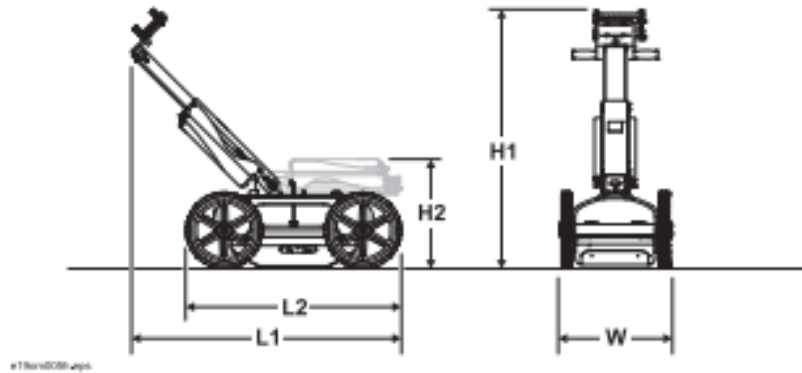


Figura 16: Partes equipo georadar.

He de destacar la facilidad y portabilidad del equipo para este tipo de obras. Puesto que la ejecución de proyectos Serviu y/o MOP en su mayoría es la proyección sobre pavimentos existentes, el terreno a analizar se encuentra parejo y con cotas regulares. Las características que permiten esto, son principalmente las del Carro puesto que éste elemento es el responsable

de la movilidad y transporte de los demás componentes.



Dimensiones		EE. UU.	Métrico
Largo total de la máquina		50.0 pulg	1270 mm
	L1, total, manija completamente extendida, posición de funcionamiento	50.0 pulg	1270 mm
	manija plegada, posición de transporte	40.0 pulg	1016 mm
	L2, base de ruedas (ruedas tamaño 14 pulg)	40.0 pulg	1016 mm
Peso total de la máquina			
	H1, desde el suelo hasta la manija completamente extendida	40.0 pulg	1016 mm
	H2, manija plegada	20.5 pulg	521 mm
	sobre el terreno, cuando el montaje de GPS opcional está instalado (no se muestra)	52.0 pulg	1321 mm
W, ancho		21 pulg	533 mm
Peso, sin la computadora		68.6 lb	31,1 kg

Figura 17: Dimensiones equipo georadar.

### 3.2.- Metodología de medición

Para realizar un correcto escáner del subsuelo presente en el área de trabajo, se debe tener claro la metodología de trabajo.

#### 1.- Condiciones existentes del terreno

Para ello lo primero a determinar, y como bien se vio en el capítulo anterior, son las condiciones preliminares del suelo. Este punto es particularmente importante, puesto que condiciona nuestra elección de frecuencia para la antena, recordando que las condiciones del suelo no se pueden alterar en gran magnitud, pero el conocimiento de sus características permite optimizar la prospección del subsuelo a los objetivos predispuestos para cada campaña de medición.

La condición del suelo cambia dependiendo del material presente, y con ello su profundidad de penetración y resolución. Los cuales se debe tener presente en función de los requerimientos del proyecto.

A modo general, tomando los casos típicos de estudio para equipos georadar podemos clasificar

el tipo de suelo de la siguiente forma, permitiendo estimar la frecuencia y la precaución con respecto a la interpretación de datos.

Tabla II: Recomendaciones de elección de antena en base a los parámetros del suelo.

Condición del suelo	Conductividad	Imágenes de radar	Mejor frecuencia del GPR
tierra seca, granito, piedra caliza, hormigón, asfalto	baja	excelente	alta
agua dulce, hielo de agua dulce, nieve, arena, limo, arcilla seca, basalto, hielo de agua de mar	mediana	regular	alta / baja / doble
arcilla húmeda, esquisto húmedo, agua de mar	alta	pobre	baja

## 2.- Elección de frecuencia para la antena

La frecuencia de la antena quedara condicionada a los objetivos de la campaña de medición, así como también las condiciones del terreno a la hora de recolectar datos.

Sin prejuicio de lo anterior, el georadar, posee la capacidad de tomar datos de forma simultánea a dos frecuencias diferentes. Permitiendo tener un rango de comparación en caso de poseer incertidumbre sobre el terreno a medir.

En general, las prospecciones en las que se utiliza una frecuencia alta es para zonas cuyas condiciones de terreno son óptimas y permiten una mejora significativa en la resolución del equipo, permitiendo tener un mayor detalle, pero a una profundidad menor. Por otro lado, las de baja frecuencia permiten tener una mayor profundidad de penetración haciendo accesibles profundidades que no necesariamente son visibles a altas frecuencias, por lo general producto de malas condiciones de terreno, en cuyo caso disminuye la resolución a cambio de obtener mayor profundidad.

## 3.- Recolección de datos

Está se realiza mediante el escaneo del subsuelo para ello se procede a realizar los siguientes pasos:

1. Iniciar la ventana del software Nuevo proyecto se encuentre abierta.
2. Seleccionar adquisición de datos.
3. Seleccionar el sentido de escaneo y proceder a movilizar el carro para adquirir los datos.
4. Seleccionar en base a lo visto anteriormente, la preferencia de visualización en términos de profundidad y resolución necesarias.
5. Observar los datos obtenidos en el radargrama en búsqueda de objetos enterrados.

La toma de datos debe ser aquella que no deje fuera de observación algún elemento, es por ello que se recomienda el siguiente trazado a modo general para poder cumplir ese objetivo.

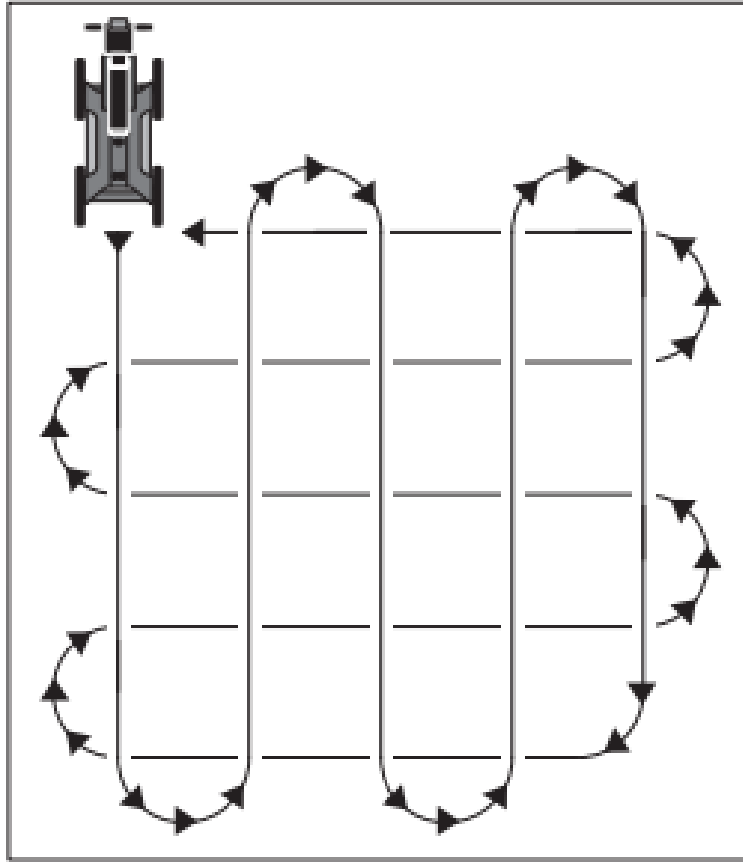


Figura 18: Trazado a realizar con equipo georadar para recolección de datos.

Junto con la observación en el radargrama, mencionado en el punto 5 anterior, se debe ir seleccionando los objetos y elementos detectados en tiempo real, para ello se debe tener en cuenta que podemos agrupar los objetos detectables (en nuestro caso tuberías) en dos grupos:

- **Objetos puntuales:** La experiencia del fabricante es sumamente valiosa identificando estos elementos en el radargrama “Los objetivos puntuales se identifican a medida que la trayectoria del GPR se cruza con una estructura (tubo). En el punto de intersección, los ecos de radar recibidos por el GPR reflejan la forma del objeto a medida que el receptor pasa por encima, generalmente una hipérbola. Se crea la hipérbola porque los ecos de radar provenientes de los lados del tubo tardan más en llegar al receptor que los ecos de la parte superior de la superficie del tubo. Si la antena pasa sobre un tubo o cable en una trayectoria que se cruza, la forma reflejada del tubo o cable enterrado es una hipérbola (A). Los tubos que contienen agua pueden mostrar hipérbolas duplicadas (B) al producirse ecos de radar desde la parte superior del tubo, del agua en el tubo y de la parte inferior del tubo. Si el tubo está enterrado en una zanja con paredes compactadas, los ecos de radar pueden rebotar de las paredes de la zanja, formando una X encima de la hipérbola (C).”
- **Objetos lineales:** Por otro lado, identifican de la siguiente forma “Los objetivos lineales se identifican cuando la trayectoria del GPR corre paralela a la estructura (tubo). La imagen reflejada en el escaneo de radar es una línea recta.”

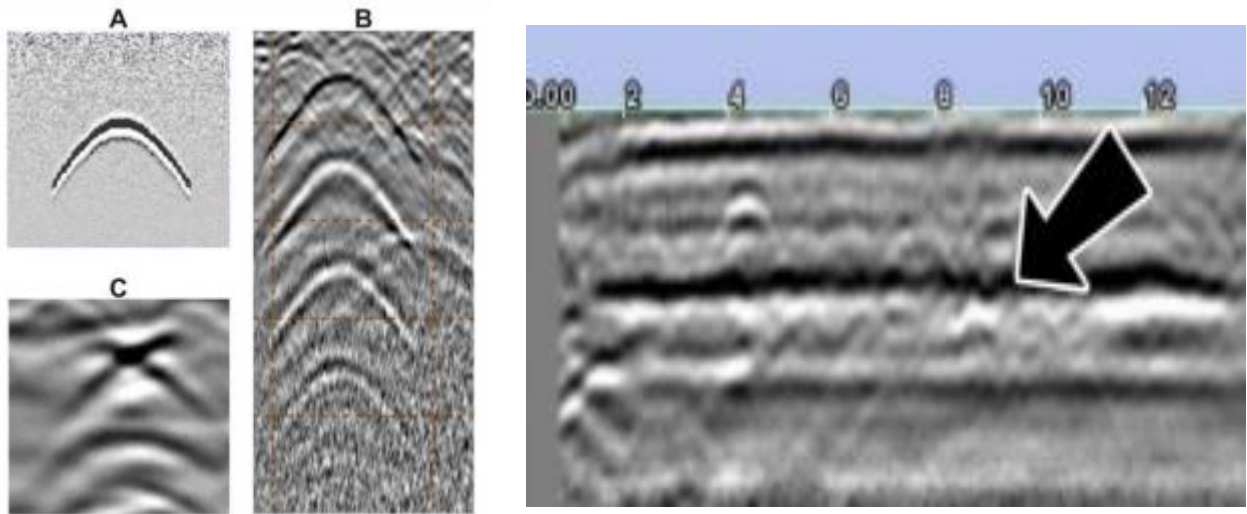


Figura 19: Identificación de elementos puntuales (imagen de la derecha, casos A, B y C) y elementos lineales (imagen de la izquierda).

Ahora conocemos como identificar los elementos principales en el momento de escanear el subsuelo, para poder hacer el levantamiento de la zona se seleccionan los elementos interpretados según lo señalado en el radargrama siguiendo los siguientes pasos:

1. Cuando aparece una hipérbola en el radar, la cual señala la presencia de una tubería en dirección perpendicular, el radar mostrará una línea color amarillo la cual se deberá centrar en la hipérbola mediante el movimiento del carro.
2. Una vez el carro se ubique de tal forma que se cumpla el punto anterior, marcar la posición de la tubería en el suelo.
3. De forma paralela, marcar la hipérbola en el radar.

Con ello nos aseguramos de tener una medición in situ y adicionalmente guardar el registro en el radar para ser consultado posteriormente.

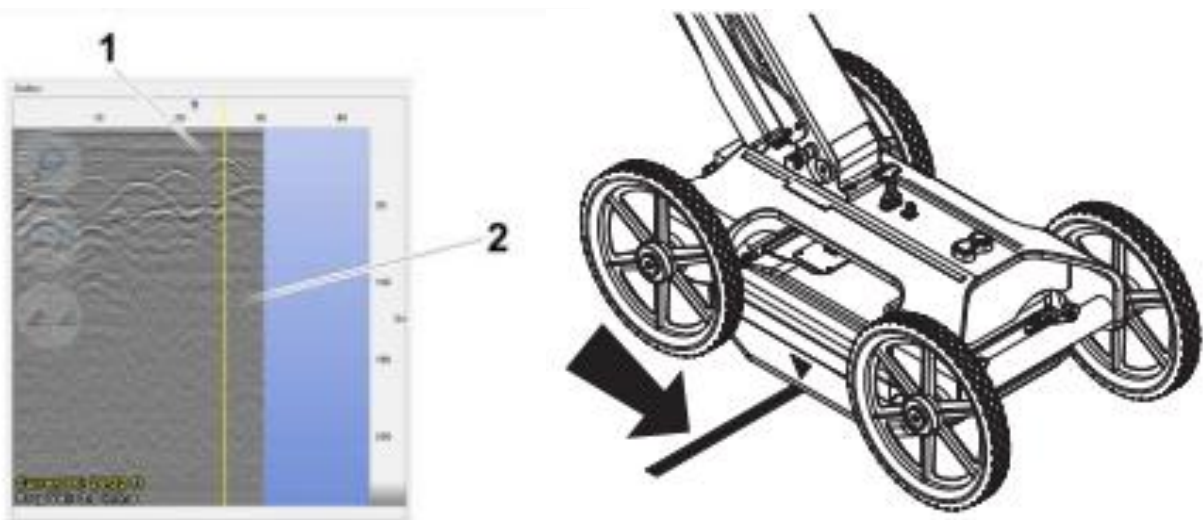


Figura 20: Recolección de datos con equipo georadar.

## 4.- Confiabilidad de los datos

Para poder determinar la factibilidad y precisión de los datos y resultados obtenidos, se compara la detección de tuberías de agua potable perteneciente a Aguas Andinas. Esto se realizará mediante una campaña de medición en la calle Zenteno ubicada en la comuna de Santiago, región Metropolitana. La empresa DOBCO proporciono el informe de presentación de los datos obtenidos en dicha campaña bajo el uso del georadar 2868R cuyas características son similares a las presentadas en el capítulo anterior.

Por otra parte, se utilizará un equipo de prospección el cual permite un escáner del subsuelo de forma similar, pero mediante ondas auditivas. Se utilizará un geófono, este equipo permite la detección de tuberías de agua mediante la amplificación de su sonido.

Se presentará las características de la zona de estudio principales, diferencias y similitudes entre los equipos y los resultados obtenidos por ambos equipos.

### 4.1.- Zona de estudio

El sector de análisis es en la calle Zenteno N°1203, 767, 757, 753 y 751 en la comuna de Santiago, región Metropolitana entre las calles 10 de Julio y Copiapó, el sector corresponde entre ambas líneas oficiales.



Figura 21: Ubicación del sector de estudio.

Según el plan regular metropolitano la vía corresponde está clasificada como Colectora y su ancho mínimo existente es de 15m en el sector norte llegando a calle 10 de Julio donde la vía se ensancha hacia el poniente, pasando de un ancho mínimo 10m a 15m.

30. Zenteno	E	Portada de Guías / Alonso Ovalle	20	Ensanche al oriente
	P	Olivares / Cóndor	20	Apertura
	E	Av. Diez de Julio Huamachuco / Copiapó	15	Ensanche al poniente
	E	Copiapó / Coquimbo	19.7/20	Ensanche al oriente

Figura 22: Extracto plan regulador comunal de Santiago.

Adicionalmente, se aprecia que la zona posee diferentes estructuras y paquetes estructurales, entre los cuales destacamos los correspondientes a calzada y vereda de hormigón y vereda con terminación en baldosa junto con veredón de tierra correspondiente a la zona de paisajismo.

La comuna de Santiago no se encuentra bajo la jurisdicción de Serviu, sin embargo, los paquetes estructurales dependerán del CBR de diseño tomado en el momento de ejecución y el tipo de vía expresado en Ejes Equivalentes (E.E). Sin perjuicio de ello los paquetes estructurales se calculan mediante el método AASHTO con el cual Serviu define los paquetes estructurales en sus cartillas disponibles en el Manual de Pavimentación, las cuales establecen los espesores en función de los parámetros mencionados.

Tabla III: Cartilla de diseño Pavimentos de Hormigón disponible en el Manual de Pavimentación.

TIPO DE VÍA	CAPA	CARACTERISTICAS	CBR SUBRASANTE (%)				
			≤ 3	4-7	8-12	13 - 19	≥ 20
PASAJE T≤50.000EE	LOSA	GRE=G30	140	130	120	120	120
	BASE	CBR ≥ 60	300	150	150	150	150
LOCAL T≤200.000EE	LOSA	GRE=G30	160	140	130	130	130
	BASE	CBR ≥ 60	300	150	150	150	150
SERVICIO T≤1.000.000EE	LOSA	GRE=G30	170	160	150	150	150
	BASE	CBR ≥ 60	300	150	150	150	150
COLECTORA T≤3.000.000EE	LOSA	GRE=G35	190	180	180	180	170
	BASE	CBR ≥ 60	300	200	200	200	150
TRONCAL T≤10.000.000EE	LOSA	GRE=G35	230	220	220	220	210
	BASE	CBR ≥ 60	300	200	200	200	150
EXPRESA T≤20.000.000EE	LOSA	GRE=G35	260	260	250	250	240
	BASE	CBR ≥ 60	300	200	200	200	150

Por lo cual los paquetes disponibles son con el caso más desfavorable de CBR, es decir  $CBR \leq 3\%$  y aplicando el método AASHTO junto con la cartilla anterior:

### Calzada en Hormigón:

- Recapado Asfáltico (tratamiento superficial)  $e=0.04$  m.
- Hormigón G35  $e=0.19$  m.
- Base Estabilizada  $CBR \geq 60\%$   $e=0.30$  m.
- Total:  $0.53$  m.

### Vereda Simple de Hormigón:

- Hormigón G25 e=0.07 m.
- Base Estabilizada CBR $\geq$ 60% e=0.05 m.
- Total: 0.12 m.

### Vereda Simple en Baldosa:

- Baldosa Micro vibrada e=0.04 m.
- Mortero predosificado e=0.04 m.
- Base Estabilizada CBR $\geq$ 60% e=0.05 m.
- Total: 0.13 m.

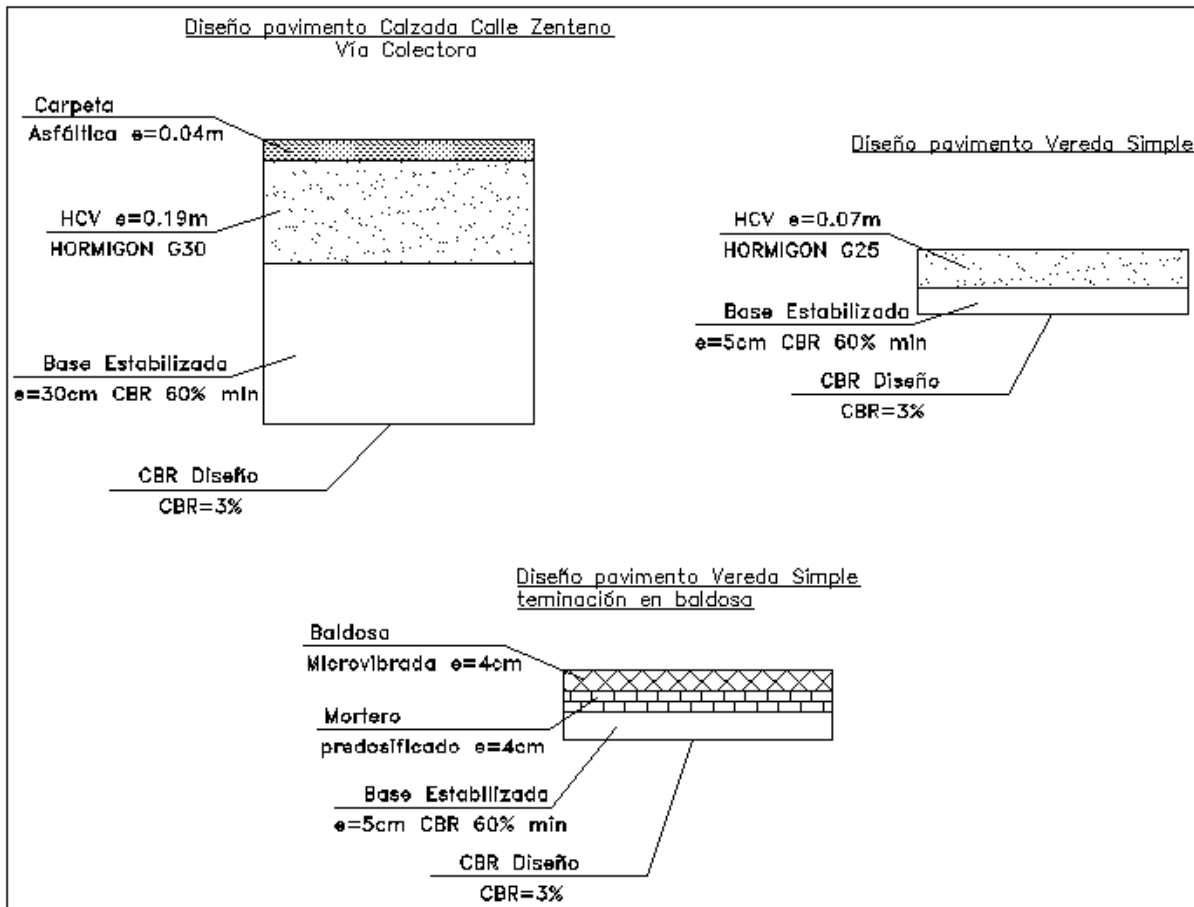


Figura 23: Paquetes estructurales tipo del sector de estudio.

## 4.2.- Comparación técnica y económica entre equipos

El equipo por utilizar con la tecnología GPR y que es el propósito del presente informe es un Georadar 2868R-USA cuyas características son similares a los presentadas en el capítulo anterior.

Por otro lado, el equipo de fácil acceso y que permitirá comparar la precisión, calidad y



factibilidad por contraste es un Geófono, el cual permite detectar únicamente trazados de agua potable, puesto que éste amplifica el sonido de las tuberías permitiendo su detección.

Si bien no posee la misma capacidad que el Georadar, dado que únicamente se puede establecer la localización de redes de agua, sin embargo, permite un punto de comparación.

El Geófono por utilizar corresponde al “HY929 Strengthened High Strength Water Pipe Leakage Meter” el cual es un dispositivo que permite amplificar las ondas de sonido que producen las redes de agua potable y alcantarillado, permitiendo su detección en pavimentos de forma no destructiva.

En términos de peso y tamaño es significativamente menor en comparación al Georadar, sin embargo, las funciones que posee son más limitadas.

### **Specifications.**

**The consumption current: 15 Ma 15mA**

**For battery: lithium battery 3.7V batteries**

**The probe sensitivity: -70Ddb**

**The highest audio magnification: 20000 times 20000X**

**Penetration: Water pipe/cement pipe/steel pipe**

**Answer: 32-euro headphones with 16-euro speakers.**

*Figura 24: Características geófono de acuerdo con ficha técnica.*



*Figura 25: Geófono de acuerdo con ficha técnica.*

En el mercado actual, el valor del equipo es significativamente menor al del Georadar llegando a tener un valor de venta equivalentemente al 0.4%, implicando menores costos de implementación.

### 4.3.- Resultados e interpretación experimentales proyecto DOBCO

Los resultados se expresan mediante el informe entregado por la empresa DOBCO, donde destacamos el equipo a utilizar, procedimiento y como se exponen los datos obtenidos en terreno.

El objetivo de la exploración fue la detección de arranques de agua potable para el frente predial correspondiente. Se utilizó para ello el equipo Georadar 2868R-USA cuyas características son similares a las presentadas en el presente informe.

Para el procedimiento de detección se realizan de acuerdo con lo que, señalado en capítulos anteriores, realizando:

Tabla IV: Análisis longitudinal calle Zenteno.

Descripción	Unidad	Cantidad
Búsqueda de servicios que podrían intervenir en la matriz de agua.	M	76

En donde se lograron identificar en el tramo de aproximadamente 76mL, 5 arranques domiciliarios. Dicho reconocimiento se realizó de sur a norte por la vereda poniente de la calle Zenteno.

Dichos arranques detectados, tienen las siguientes características:

Tabla V: Arranques detectados.

Servicio	Unidad	Profundidad	Distancia relativa de acuerdo con el punto de inicio
Arranque 1	M	0.45	25.8
Arranque 2	M	0.53	39.8
Arranque 3	M	0.48	50.6
Arranque 4	M	0.49	64.8
Arranque 5	M	0.42	66.8

Por otro lado, se realizó un análisis perpendicular al eje de la calle Zenteno, es decir en dirección de poniente a oriente, con barridos de 8.5m separados cada 5m aproximadamente.

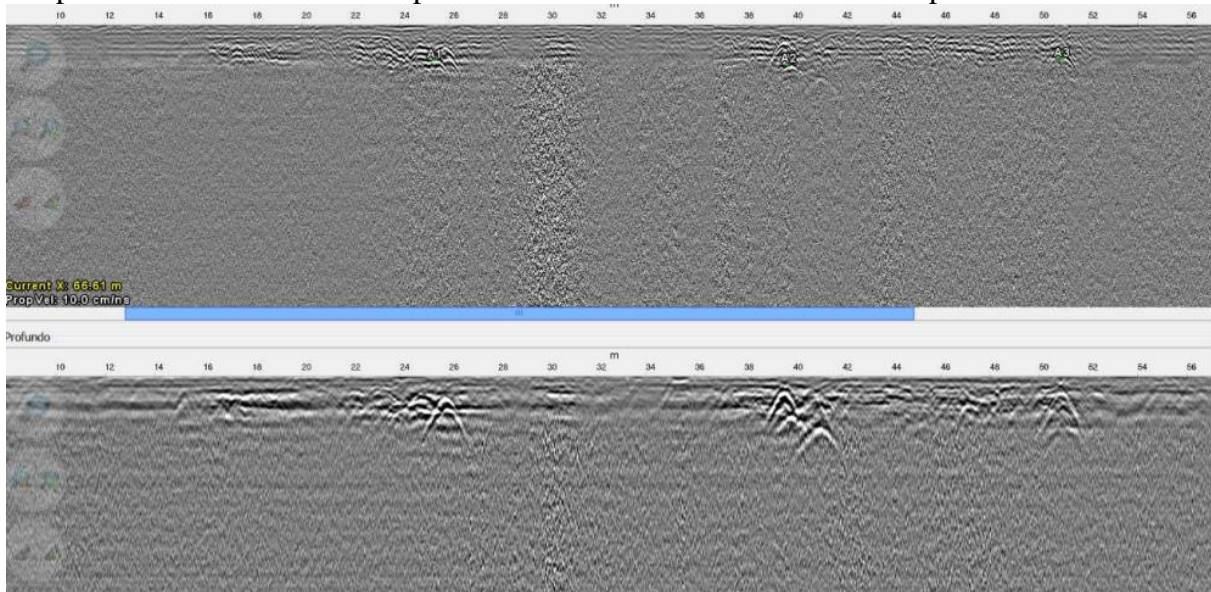
Tabla VI: Análisis transversal calle Zenteno.

Descripción	Cantidad de intervenciones
Búsqueda de servicios en dirección longitudinal a calle Zenteno	15 (76M)

Se realizaron 15 barridos de 8.5m en dirección poniente a oriente, detectando la tubería principal de la cual derivan los arranques domiciliarios, ubicada bajo calzada.

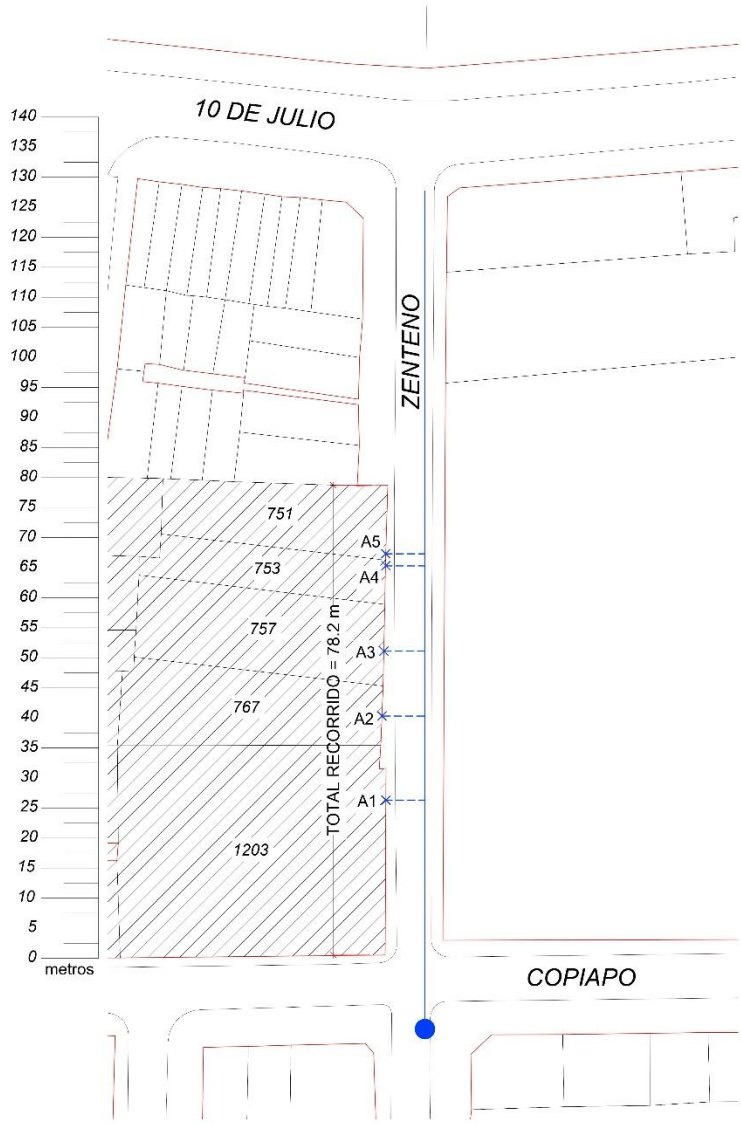
Una muestra de lo expuesto en el radargrama del equipo, del caso de análisis longitudinal donde

se detectan los arranques domiciliarios, es el siguiente donde se exponen los arranques en forma de parábolas tal como se esperaba en base a la información expuesta anteriormente.



*Figura 26: Extracto radar grama en análisis longitudinal calle Zenteno.*

Una vez detectados, estos se representan en planta y altimetría en formato de plano permitiendo su visualización de forma clara y rápida para evitar rupturas de dichos servicios en futuros proyectos de pavimentación en el sector.



ARRANQUE	PK [m]
A1	25.8
A2	39.8
A3	50.6
A4	64.8
A5	66.8

UBICACIÓN DE ARRANQUES

PLANTA DE LEVANTAMIENTO SANITARIO  
ESCALA 1 : 500

SIMBOLOGIA

- Matriz agua potable
- Gas
- Colector alcantarillado
- ▨ Paño construcción
- Arranque domiciliario
- Gas domiciliario
- Unión domiciliaria
- Poliducto telecomunicaciones
- Válvula agua potable
- Línea de edificación

PROYECTO: ESTUDIO SUBSUELO CALLE ZENTENO			
PROP.:		RUT:	
REP. LEGAL:		RUT:	
CONTENIDO: PLANTA DE LEVANTAMIENTO SANITARIO			
VERSION	OBSERVACIONES	CALCULO/DIBUJO	FECHA
A	MODIFICADO PARA REVISOR	P.V./J.	28-12-09
FORM. PAPEL		ESCALA:	LAMINA N°
A2		INDICADAS 00	N° OBRA 36

#### 4.4.- Resultados e interpretación experimentales uso del geófono

El geófono permite la detección de las tuberías de agua potable, servicios sanitarios y de aguas lluvias, mediante la amplificación del sonido que produce su desplazamiento dentro del ducto.

Se puede obtener la representación horizontal de los arranques, sin embargo, no se logra obtener la profundidad a la cual se encuentran los ductos y tuberías.

Para la detección se utilizó la información previa obtenida con el georadar, teniendo en cuenta el punto de referencia pertinente. Se ubico el punto de acuerdo con la distancia relativa con el punto de inicio conocida y realizando mediciones laterales a dicho punto, se obtiene la precisión con el geófono, estableciendo un rango en el cual el sonido del ducto o tubería.

Dichos arranques detectados, tienen las siguientes características:

Tabla VII: Arranques detectados.

Servicio	Unidad	Profundidad	Distancia relativa de acuerdo con el punto de inicio	Variación en distancia entre equipos
Arranque 1	M	0.45	25.8	0.6
Arranque 2	M	0.53	39.8	0.7
Arranque 3	M	0.48	50.6	0.4
Arranque 4	M	0.49	64.8	-
Arranque 5	M	0.42	66.8	0.6

Se debe tener en cuenta que al ser un geófono y que los arranques proyectados no poseen fugas, las cuales facilitan su detección debido al sonido que produce su ruptura, la precisión de las medidas dependerá del usuario del equipo.

Se distingue un error promedio de 0.46 [m] en la medición del geófono. En particular el “Arranque 4” no pudo detectarse en la campaña de medición.

El error y precisión detectada varía en función del usuario y las condiciones del terreno, el geófono al ser un equipo que amplifica el sonido producido por el transporte de líquidos en ductos y tuberías es susceptible al ruido ambiental y sonidos exteriores.

La detección sin el conocimiento previo de la ubicación en planta de los arranques resulta de una dificultad superior. El cambio sonoro detectado por el equipo es mínimo y elementos como el ruido ambiental, sonidos exteriores y la no ruptura de dichos servicios dificultarán la localización sin una información previa.

A continuación, se presentan los resultados, en donde se proyecta el arranque domiciliario de acuerdo con la información previa obtenida por el georadar (color azul), el rango posible de acuerdo con la medición con el geófono (color rojo) y la variación de distancia entre ambos equipos (color verde).

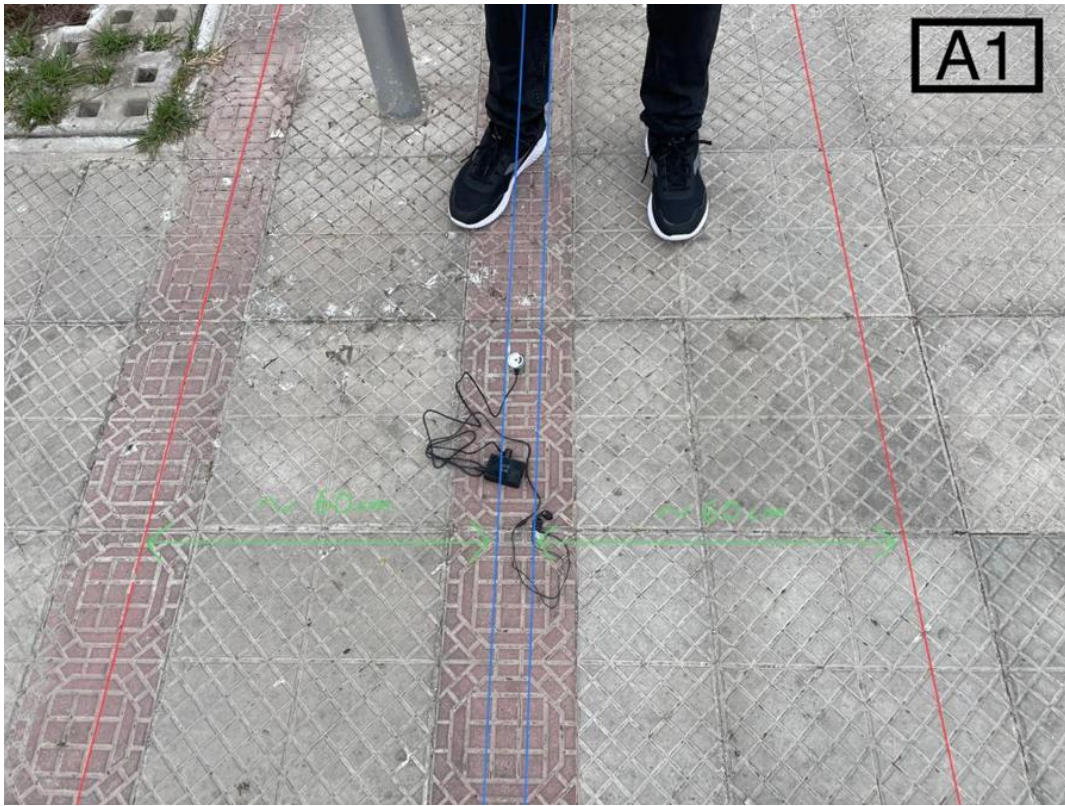


Figura 27: Arranque 1 calle Zenteno detección con geófono.

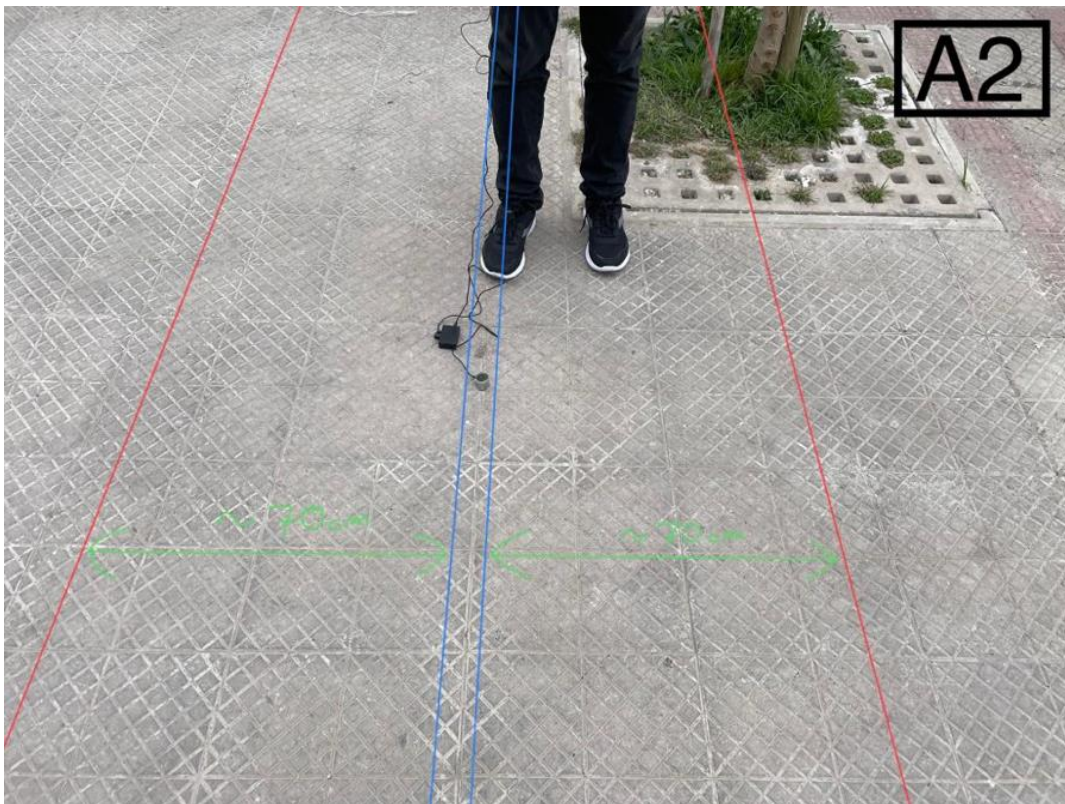
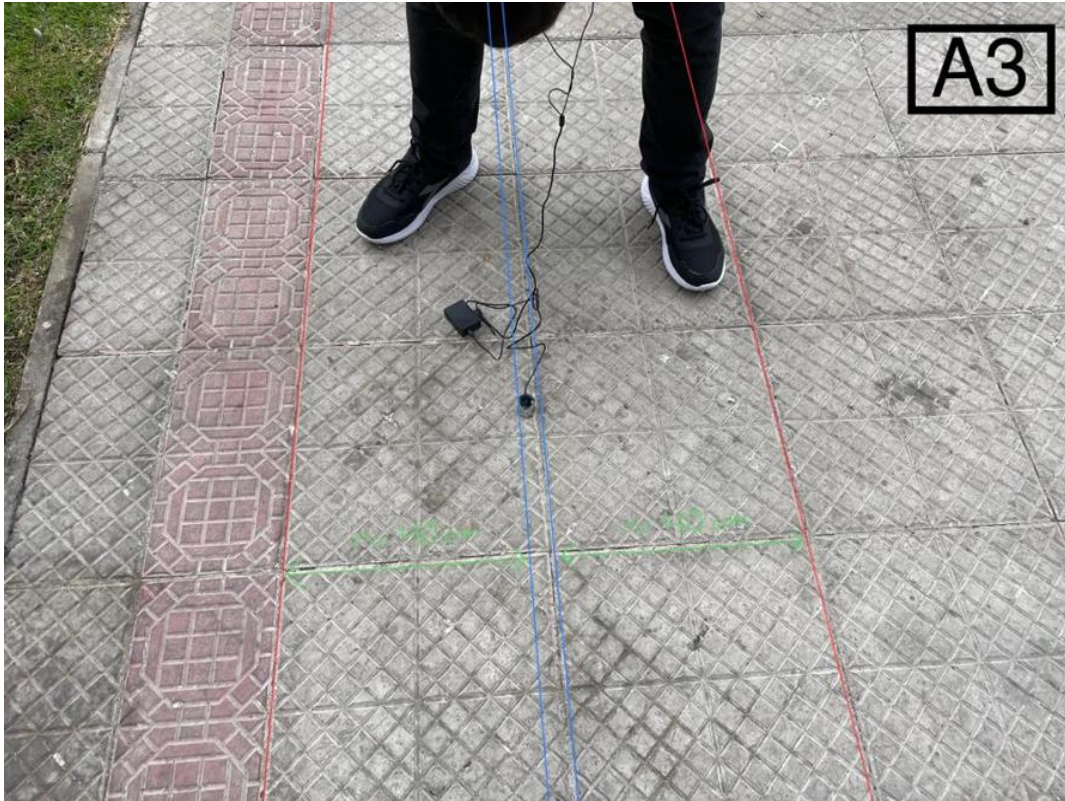
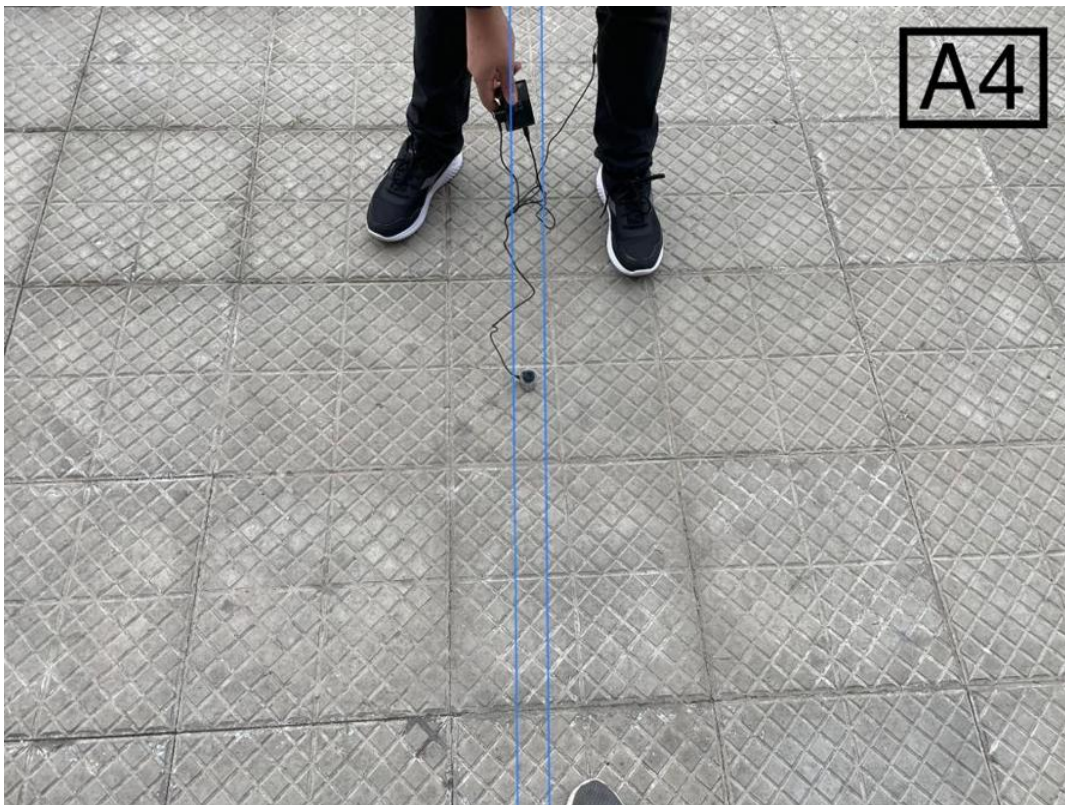


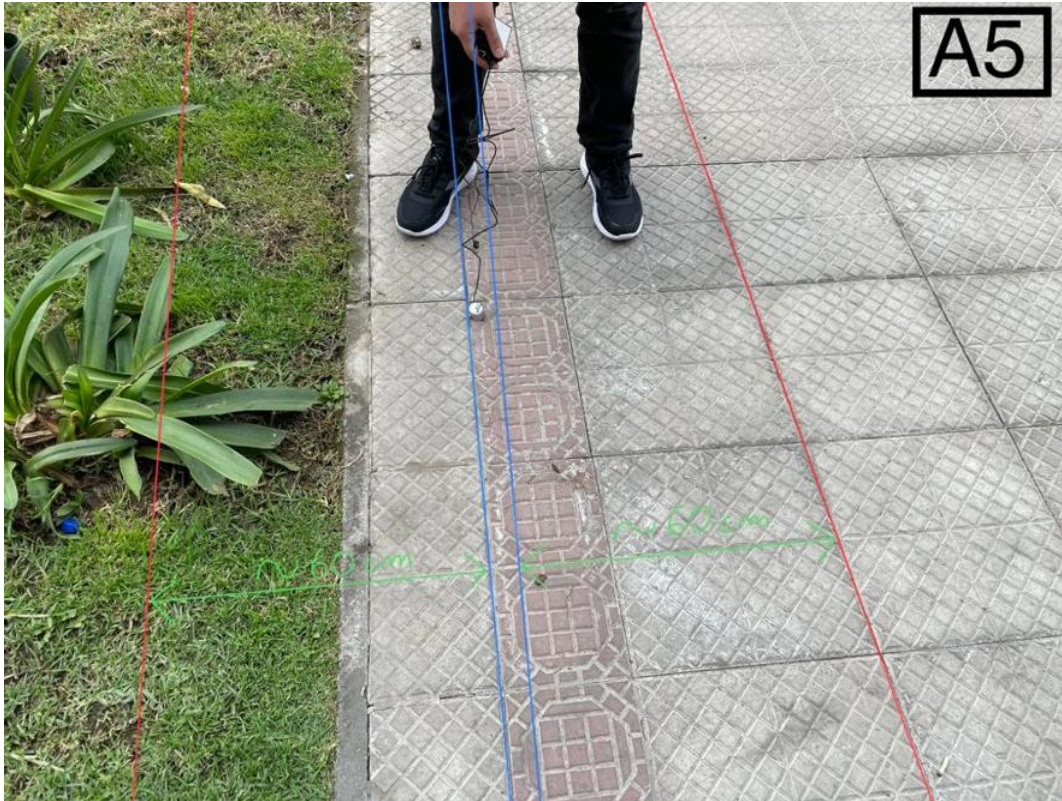
Figura 28: Arranque 2 calle Zenteno detección con geófono.



*Figura 29: Arranque 3 calle Zenteno detección con geófono.*



*Figura 30: Arranque 4 calle Zenteno detección con geófono.*



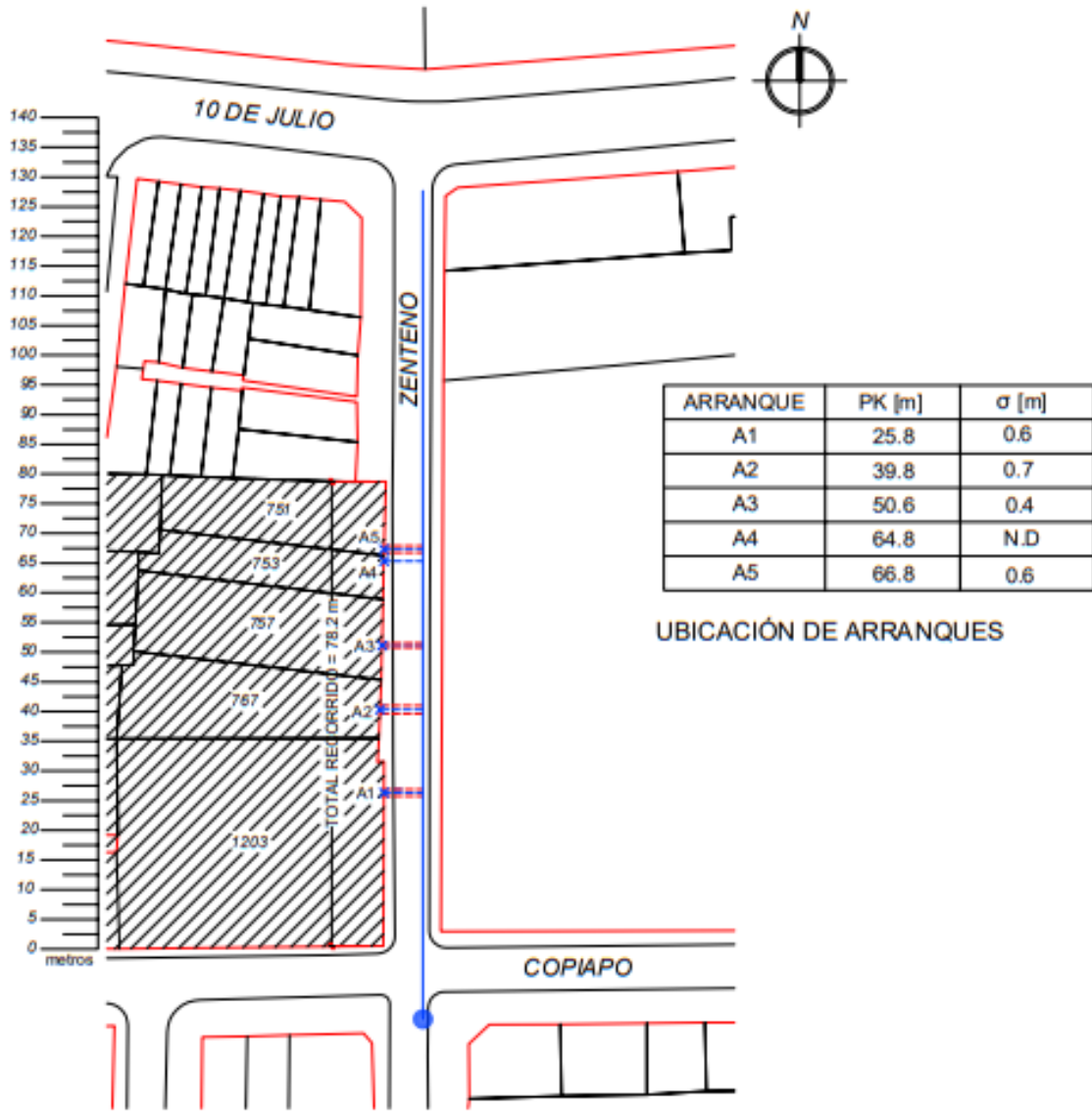
*Figura 31: Arranque 5 calle Zenteno detección con geófono.*

En comparación al Georadar, se presenta un error significativo puesto que el georadar posee una imprecisión horizontal inferior al 3% y vertical entre el 10-30%. El geófono por otro lado, la precisión horizontal varía entre un 400-700% y no es capaz de detectar la profundidad de los ductos.

Se debe tener presente que el geófono sirve únicamente para la detección de ductos y tuberías que transportan líquido, como lo son aguas lluvias, alcantarillado y agua potable. Si bien su impacto económico es de una magnitud significativamente menor, su precisión y la carencia de detección en profundidad nos indica que su utilidad es deficiente.

Para una campaña exitosa, se debe poder detectar con una presión, rapidez y eficacia el trazado de ductos. Al no poder detectar otro tipo de servicios, la falta de determinación de la profundidad y una alta dispersión de la resolución horizontal se puede determinar que la tecnología GPR es comparativamente superior y el geófono para el propósito previsto es deficiente.





UBICACIÓN DE ARRANQUES

PLANTA DE LEVANTAMIENTO SANITARIO

ESCALA 1 : 500

SIMBOLOGIA					
	Matriz agua potable		Arranque domiciliario		Pd ducto telecomunicaciones
	Gas		Gas domiciliario		Válvula agua potable
	Colector alcantarillado		Unión domiciliaria		Línea de edificación
	Patio construcción		Rango detección geofóno		

PROYECTO: ESTUDIO SUBSUELO CALLE ZENTENO			
PROP: [ ]			
RIP LEGAL: [ ]			
CONTENIDO: PLANTA DE LEVANTAMIENTO SANITARIO			
FORMA	ESCALA	LIMITES	M. COPIA
A2	INDICADA	00	36
PEDRO VALENZUELA DE HARAGARE			
TEL: +56 (9) 7565 9465, e-mail: pedrovalenzuela@...			

## 5.- Análisis de Costos

El objetivo de realizar un análisis de costos es determinar la factibilidad de implementación de la tecnología GPR en las obras de pavimentación, verificando su costo-eficiencia de implementación.

Para ello se debe tener en cuenta los costos directo en diferentes formas de uso, es decir, compra, arriendo o mediante la prestación de servicios por parte de un externo. Adicionalmente se debe tener presente los gastos de ahorro en exploración, multas evitadas, entre otros.

Por otro lado, los costos indirectos asociados, como lo son multas referentes a paralización de faenas, tiempos, entre otros.

Para poder realizar este estudio, se considera únicamente el mercado chileno y su disponibilidad actual, en donde se cotizo en sus diferentes modos de uso. Además, con la colaboración de la empresa Mavimix, la cual es una empresa consolidada con más de años de experiencia en el rubro de la pavimentación, la cual nos facilitó datos económicos promedios que permitieron realizar los siguientes análisis.

Adicionalmente, con la finalidad de perdurar y ajustar el presente análisis a los tiempos se trabajará en UF permitiendo un ajuste en el tiempo y en base a la inflación del mercado en dicho momento.

Tabla VIII: UF a considerar.

UF (21/03/2022)	\$31.697,09
-----------------	-------------

### 5.1.- Cotizaciones en el mercado chileno

Podemos distinguir la comparación de precios dependiente del método de implementación, siendo estos compra, arriendo o servicios de empresa externa.

#### 5.1.1.- Compra del equipo

La compra de este instrumento se debe cotizar en empresas extranjeras o en el mercado chileno, en particular para la ocasión del presente informe se considera la cotización en mercado chileno, dando como resultado un precio de equipo presentado a continuación.

Tabla IX: Presentación de precios compra de equipo en mercado chileno.

Equipo	Precio [UF]
Georadar GPR US Radar Modelo Q5C Plus 500 MHz	466,920
Georadar GPR US Radar Modelo Q25C Geophysical Radar System 250 MHz	466,920
Georadar GPR US Radar Modelo Quantum Imager Triple Frequency	788,716

Cabe destacar, que la compra de este instrumento en el mercado chileno es escasa, dado que se

utiliza principalmente como servicio de empresas, en particular la venta de este aparato se realiza mediante el siguiente proveedor.

- MasterDetectorChile®

### 5.1.2.- Arriendo del instrumento

El arriendo del instrumento es una alternativa si bien inicialmente más económica, requiere del conocimiento de uso del instrumento, así como también su correcta interpretación de datos, dado que este último será el que defina la viabilidad tanto en tiempo, costos y resultados de la obra. Para ello se cotizó en empresas especializadas en arriendo de equipos, en particular de la zona metropolitana, obteniendo los siguientes precios:

Tabla X: Presentación de precios arriendo de equipo en mercado chileno.

Equipo	Precio [UF/unidad]
Radar de detección Leica DS2000-4	6,422 [UF/día]
Radar de detección Leica DS2000-4	23,661 [UF/semanal]
Radar de detección Leica DS2000-4	52,055 [UF/mensual]

Donde la empresa de dicho presupuesto de arriendo corresponde a:

- Equipos e Instrumentos Científicos Villner Ltda.

### **Información Importante de Empresa Arrendataria:**

Cabe mencionar las condiciones que establece la empresa arrendadora, las cuales se deben tener presente dado que puede generar un posible impacto económico, destacaremos lo principal. La empresa no responde ante cualquier daño, hurto, robo o mal uso del equipo y dichas faltas serán canceladas por el arrendatario del producto, para ello se deberá dejar una garantía correspondiente a **564,397 UF + IVA** para el arriendo del equipo, la cual se hará efectiva en caso de los hechos mencionados.

Adicionalmente el precio de arriendo incluye capacitación y soporte del equipo.

El equipo no posee GPS integrado, pero dispone de un soporte para dicho aparato, por lo cual la compra de un GPS de rastreo podría ser una opción viable para su seguimiento en caso de robo, además de forma incorporada el equipo posee un bloqueador de movimiento.

### 5.1.3.- Servicio externo

La cotización en este caso dependerá del proyecto, en particular este tiende a ser más caro dado que al llevar a cabo un servicio la empresa a la cual se acude, entrega no solamente la implementación de lo que es el GPR, sino además la entrega de resultados de forma sencilla y legible en términos de planos y no únicamente en obra, además de albergar el costo de los trabajadores y desplazamiento de equipos. Para una prospección de 2[m] en profundidad, considerando una obra de magnitud próxima a los 50[m<sup>2</sup>], se posee el siguiente presupuesto

para una jornada laboral (requisito del servicio para la entrega final de resultados, 4 horas de trabajo y toma de datos y 4 horas en elaboración de informe final junto a planos como máximo).

Tabla XI: Presentación de cotización servicio de equipo en mercado chileno.

Ítem	Precio [UF]
Prospección con Georadar con antena de 400Mhz y Detectores de Líneas.	25,239
Topografía de detalle y registro de perfiles.	5,048
Procesamiento de la data en Laboratorio, calce de los perfiles con el levantamiento topográfico, dibujo de anomalías en los planos y redacción del Informe Final	12,619
Movilización/desmovilización.	1,577
Valor Total Servicio.	44,483

La empresa que entrega dichos servicios es:

- GeoRed SA.

El producto entregable por la empresa corresponde a la ubicación de anomalías y otros elementos artificiales o alteraciones del subsuelo que sean detectadas, las que se entregarán a través de un Informe Técnico con indicación de las metodologías empleadas, imágenes de las áreas y grafica en el plano AutoCAD 2D, además la ubicación de las anomalías detectadas será marcada y geo referenciadas en terreno al momento de ser detectadas, siempre que técnicamente sea posible.

<b>GeoRed S.A.</b>	En los planos que adjuntamos a este Informe Final se ha utilizado la siguiente simbología:
Logo cliente	
<b>ESTUDIO INTERFERENCIAS</b>	<p>Línea seguida por el Georadar en su labor de prospección. IF234, indica que se trata del Archivo 234 y la i que comienza la línea, la f es la finalización de ella.</p> <p>Anomalia Probable. La fuerza de la reflexión obtenida, indica que su existencia es alta.</p> <p>Anomalia Dudosa. La calidad de la reflexión obtenida, nos indica que su existencia es dudosa.</p> <p>Zona cubierta con una estructura (Ej.: hormigón armado).</p>
<b>INTERPRETACIÓN</b>	
<b>400 Mhz</b>	
<b>ESC 1:200</b>	
Fecha: _____ PLANO: _____ Obs: _____	
<b>REFERENCIAS:</b> IFx - IFx → PERFIL GEORADAR — Anomalia Probable — Anomalia Dudosa ■ ESTRUCTURAS	

Por ejemplo: Trozo de plano que muestra dos probables anomalías que a base de información del Cliente, se puede deducir que corresponden a ductos o cañerías.



Figura 32: Ejemplo plano entrega final GeoRed SA.

## 5.2.- Análisis de costos directos e indirectos por rupturas en tuberías de servicio

Para realizar los flujos de cajas asociados a los métodos de implementación del equipo, se debe conocer todos los costos implicados que se tienen, más allá de las cotizaciones del mismo equipo.

Los costos y ahorros ya sean directos e indirectos, se deben considerar a la hora de realizar un flujo de cajas que permita determinar si es factible o no el uso de la tecnología GPR.

### 1.- Costos Directos

Estos son los asociados directamente con el costo de la ruptura de servicio, es decir, las multas por rotura, calicatas, reemplazo de tuberías y gastos del equipo.

Para ello se tendrá como registro de datos, la fuente interna de la empresa Mavimix donde podremos estimar los costos de dichas partidas.

- **Multa por roturas:** Esta se considera para todo tipo de servicio, sin embargo, destacar los servicios de gas, agua potable, telecomunicaciones, electricidad, alcantarillado y riego. Estos son los que comúnmente se encuentran con trazados subterráneos tal que están a una profundidad inferior a la del paquete estructural o en defecto que puedan requerir refuerzo en caso de estar bajo calzada. El valor de la multa está ligado por los gastos que implican a la empresa del servicio como tal, variando desde los 4,732 UF hasta más de 31,549 UF, por servicio. Se consideran 3 roturas de servicio como situación de estudio.
- **Calicata:** Para toda obra de pavimentación, se realiza una calicata de exploración cuyo objetivo es conocer la mecánica del suelo de la obra, sin embargo, se realizan calicatas de exploración en obras donde la presencia de ductos subterráneos es altamente probable. El monto asociado a este trabajo varía entre 1,893 UF hasta 3,786 UF.
- **Reemplazo de ductos:** Producto de la ruptura de un servicio, se debe reemplazar la tubería dañada mediante la proporción del material dañado al servicio correspondiente. Para el caso de ductos y colectores, las tuberías a utilizar varían sin embargo se puede estimar en 0,946 UF/mL. Su valorización total dependerá de la magnitud del daño, sin embargo, estimaremos 6mL, correspondientes al tamaño de venta mínimo.
- **Gastos del equipo:** Estos son los presentados en la sección anterior (5.1) la cual diferirá dependiendo del método de implementación utilizado, para el análisis a realizar se considerarán todos los mencionados, es decir, compra, arriendo y préstamo de servicios por empresa externa.

### 2.- Costos Indirectos

Adicionalmente a los costos directos, podemos detectar costos indirectos productos de la rotura de servicios en el subsuelo presente de la obra, entre ellos identificamos los más relevantes.

- **Retraso en la obra:** La rotura de servicios presente en las obras, produce retrasos e incluso paralizaciones de faenas, la gravedad depende del tipo de servicio que se

intervino. El caso promedio es la paralización de una jornada, es decir, un día y se estima que dicho retraso posee un costo tal que permite evitar entre la pérdida diaria y compensaciones al mandante por un total de 15UF.

- **Personal necesario:** El personal necesario es menor en comparación al requerido para realizar una calicata de exploración, sin embargo, al ser una tecnología de uso no frecuente se requiere de capacitación la cual permite el desarrollo del profesional mediante la acumulación de experiencia. Por lo cual se requerirá de forma inicial un uso adicional del equipo para el aprendizaje del usuario. Hay que destacar que para el uso del equipo se requiere únicamente de una persona.
- **Ahorro en demoliciones:** Una de las funciones que posee el georadar, además de la detección de tuberías de servicio, es determinar el espesor de las capas estructurales del pavimento existente, el cual, si bien posee espesores típicos dada las cartillas establecidas por Serviu, no se puede conocer hasta demoler la zona, por lo cual conocer dichos espesores permiten determinar de forma exacta las demoliciones a realizar en las obras. Este ahorro dependerá del tamaño de la obra, pero para un promedio de obra se considerará 100m<sup>2</sup> y un ahorro de 0.1m de espesor en demoliciones, llegando a un total de 10m<sup>3</sup>.

### **5.3.- Análisis de costos y determinación rango de factibilidad**

Para el análisis de costos se realiza un flujo de cajas con las opciones de uso referentes a la tecnología GPR, en donde además se incluirá los costos tanto directos como indirectos vistos en la sección anterior.

Para ello se debe tener en consideración a modo general los siguientes puntos:

1. Se debe determinar la tasa de descuento u costo de oportunidad para el mercado asociado a las construcciones en el área pública.
2. Se realizará el cálculo en tres diferentes casos, siendo estos correspondientes a los rangos extremos de los valores estimados y el caso promedio.
3. El ahorro en demoliciones, se estimará tanto la demolición como el retiro de escombros para la cantidad mencionada mensual (10m<sup>3</sup>), cuyo costo se estimará en 0,789 UF/m<sup>3</sup>.
4. Se tomará el caso de uso en un periodo de 3 y 5 años, dado que este plazo permite determinar una factibilidad más tangible que en un periodo menor que podría caer en casos puntuales.
5. En caso de multas y costos por retraso, dependerá del servicio dañado variando entre 1 a 3 días.
6. Se considera un uso de 2 veces mensuales el equipo, independiente del método de implementación.

De forma adicional y dependiendo del método de implementación de la tecnología GPR se tendrán consideraciones especiales. Entre las que destacamos:

#### **Compra del equipo:**

1. Se considera la compra más desfavorable, es decir, el de mayor valor dentro de las cotizaciones. Correspondiente a 788,716 UF.

2. La compra no incluirá gastos por aprendizaje del usuario, puesto que el equipo estará permanentemente disponible.
3. Se considera un costo por ser personal especializado con una cuota de 3,155 UF/día.

### **Arriendo del equipo:**

1. Dado su uso rápido y eficaz, se considera que es necesario arrendar el equipo únicamente por jornadas. Considerando un total de dos usos mensuales.
2. Dado que se debe tener un aprendizaje por parte del usuario, se considerará un gasto adicional de cuatro usos cada 6 meses.
3. Adicionalmente, se considera un costo por ser personal especializado con una cuota de 3,155 UF/día.
4. Se considera una probabilidad de robo o hurto del equipo de 10% anual, el cual estará asociado en el flujo de cajas con el valor del equipo planteado por dicha compañía.

### **Servicio externo:**

1. El servicio externo plantea una posibilidad más cómoda dado que el único gasto asociado es el planteado. Este se considerará necesaria dos veces por mes.

Bajo estos supuestos, el primer punto es determinar la tasa de descuento o costo de oportunidad bajo el cual se realizará el flujo de cajas. Para ello aplicaremos CAPM (Capital Asset Pricing Model), en donde:

$$E(r_i) = r_f + \beta(E(r_m) - r_f)$$

Donde  $E(r_i)$  es la tasa de descuento del activo "i",  $r_f$  es la tasa libre de riesgo,  $\beta$  el parámetro de sensibilidad y  $E(r_m)$  el retorno del mercado esperado.

En particular, este último lo podemos obtener del retorno presente en el S&P500 que concentra y refleja el mercado y activos más importantes, permitiendo reflejar el retorno del mercado esperado. El cual según los datos económicos en el periodo 03/2021 – 03/2022 posee un rendimiento anual del 9.35%.

Por otro lado, la tasa libre de riesgo que corresponde, como bien dice el nombre, a la tasa de un activo exento de riesgo, el cual se asemeja a los bonos nacionales emitidos. La tasa de estos elementos los posee el Banco Central (BC) y de forma representativa se considera como plazo los últimos 5 años, teniendo una tasa del 6.11%.

El factor de sensibilidad, más conocido como beta, se puede obtener en base al conjunto de empresas en donde se estima que para el rubro de construcción en el espacio público se tiene  $\beta = 1.5$ .

Obteniendo con dichos datos una tasa de descuento de **10.97%**.

Como se mencionó, se planteará tres escenarios posibles dada la variabilidad de los datos, en donde la multa será la mínima, el caso promedio y la multa máxima posible para la ruptura de

los principales servicios. Teniendo en cuenta ello, se posee los siguientes ahorros (+) y costos (-) de los posibles escenarios.

Tabla XII: Resumen flujos en UF.

<i>Caso</i>	<i>Mínimo [UF]</i>	<i>Promedio [UF]</i>	<i>Máximo [UF]</i>
Multa por ruptura de servicio [mensual]	14,197	54,421	94,646
Elaboración de calicata [2 un/mes]	1,893	2,839	3,786
Reemplazo tuberías por rotura [mensual]	5,679	5,679	5,679
Compra del equipo [única]	788,716	788,716	788,716
Arriendo del equipo [día]	6,422	6,422	6,422
Contratación servicio externo [día]	44,484	44,484	44,484
Multas y/o cargos por retraso [mensual]	15,143	30,287	45,430
Sueldo empleado especializado [día]	3,155	3,155	3,155
Ahorro control de demoliciones [mensual]	7,887	7,887	7,887

Tabla XIII: Tasa de descuento flujo de cajas.

Tasa anual de descuento	10.97%
-------------------------	--------

Para el desarrollo de los flujos de cajas, como se menciona anteriormente, se plantean diferentes escenarios para cada método de implementación (compra, arriendo y prestación de servicio externo), los cuales se desarrollan de acuerdo con lo señalado en Anexos (Flujos de cajas). Donde se obtiene los siguientes resultados.

Tabla XIV: Valores Actuales Netos [UF] caso mínimo para los diferentes métodos de aplicación.

Método de implementación	VAN (3 años)	VAN (5 años)
Compra del equipo	474,064	1.081,589
Arriendo del equipo	483,005	730,672
Contratación de servicio externo	-1.240,349	-1.876,352

Tabla XV: Valores Actuales Netos [UF] caso promedio para los diferentes métodos de aplicación.

Método de implementación	VAN (3 años)	VAN (5 años)
Compra del equipo	2.154,088	3.623,066
Arriendo del equipo	2.163,030	3.272,149
Contratación de servicio externo	439,676	665,125

Tabla XVI: Valores Actuales Netos [UF] caso máximo para los diferentes métodos de aplicación.

Método de implementación	VAN (3 años)	VAN (5 años)
Compra del equipo	3.834,113	6.164,543
Arriendo del equipo	3.843,054	5.813,626
Contratación de servicio externo	2.119,700	3.206,602

Con ello podemos concluir que dado el tiempo de funcionamiento de esta equipo y tecnología



es superior al rango de tiempo establecido, se tiene que la compra del equipo presenta un flujo mayor de ahorro a largo plazo. Mientras que para la compra y arriendo al corto plazo presentan flujos similares.

Por otro lado, la implementación mediante la contratación de servicio externo genera pérdidas para multas inferiores a 56,472UF dado el caso más desfavorable (Flujo mínimo de acuerdo con la Tabla XI), de lo contrario presenta un ahorro.

Por lo cual, en principio, tanto la compra como arriendo del instrumentaría generaría flujos positivos de implementación permitiendo ahorros importantes tanto al corto plazo como al largo plazo.

Para poder comprobar la factibilidad de su implementación se debe ver con respecto a una obra, y no a modo de implementación como se planteó anteriormente. Es por ello, que se debe analizar los gastos particulares y ver cuáles son los flujos que implica, asociándolo al presupuesto oficial de la obra que se expone en los proyectos Serviu.

Dicho presupuesto oficial representa el costo resultante del estudio detallado de la obra efectuado por Serviu dada las cubicaciones, bajo los precios unitarios que dispone representando la opinión oficial del ente por el costo de la obra.

Este presupuesto, no refleja el costo total de la obra, pero dado que esté posee un margen de variación menor con relación al general de las obras, nos permite relacionar los costos de la implementación de la tecnología GPR con el valor de la obra.

Según el DS127, se establece rangos de los presupuestos oficiales a los cuales los contratistas del Minvu pueden acceder a participar de su licitación. El cual se presenta en UF a continuación.

REGISTROS	CATEGORIAS	CAPITAL MININO EN U.F.	MONTO MAXIMO DE CADA OBRA EN U.F.	EXPERIENCIA
GRUPO 1	1°	28.000	Sin limite	60.000 m2
A1 - Viviendas	2°	14.000	56.000	30.000 m2
A2 - Edificios que no constituyen viviendas.	3°	7.000	28.000	15.000 m2
	4°	350	7.000	---
GRUPO 2	1°	16.000	Sin limite	128.000 UF
B1 - Obras viales	2°	8.000	32.000	64.000 UF
B2 - Obras sanitarias	3°	4.000	16.000	32.000 UF
	4°	200	4.000	---
GRUPO 3				
B3 - Obras de electrificación.	1°	10.000	Sin limite	80.000 UF
C1 - Instalaciones sanitarias domiciliarias.	2°	5.000	20.000	40.000 UF
C2 - Instalaciones eléctricas domiciliarias	3°	2.500	10.000	20.000 UF
C3 - a), b), c), d), m), n), p), q) y r)	4°	125	2.500	1.250 UF
GRUPO 4				
	1°	6.000	Sin limite	48.000 UF
C3 - e), f), g), h), i), j), k), l), n) y o)	2°	3.000	12.000	24.000 UF
	3°	1.500	6.000	12.000 UF

Figura 33: Extracto DS127, Registros y categorías de contratistas Minvu.

En particular, el registro a la cual corresponde el presente trabajo es la B1 – Obras viales, presentando 4 diferentes categorías con sus rangos de prepuestos oficiales mínimos y máximos.

Pudiendo calcular los costos de implementación por obra, es directo en el caso del arriendo y la implementación por servicio externo. En cambio, para la compra se debe estimar un plazo de tiempo, el cual será el caso más desfavorable correspondiente a 3 años.

Se establece el porcentaje que implica para cada obra en base al presupuesto oficial y su rango dado las categorías, tanto para el rango mínimo y máximo establecido.

Tabla XVII: Porcentaje de implementación presupuesto máximo por categoría para los diferentes métodos de aplicación.

Precio implementación UF	Categorías			
	1°	2°	3°	4°
21,9088	-	0,068%	0,137%	0,548%
6,4224	-	0,020%	0,040%	0,161%
44,4836	-	0,139%	0,278%	1,112%

Tabla XVIII: Porcentaje de implementación presupuesto mínimo por categoría para los diferentes métodos de aplicación.

Precio implementación	Categorías			
	1°	2°	3°	4°
UF				
21,9088	0,137%	0,274%	0,548%	10,954%
6,4224	0,040%	0,080%	0,161%	3,211%
44,4836	0,278%	0,556%	1,112%	22,242%

Se puede observar que para el tipo de obras correspondiente a 4° Categoría representa un gran porcentaje del presupuesto su implementación, llegando hasta un máximo cercano al 23%. Se debe tener en cuenta que la mayoría de las obras Serviu asociadas a la pavimentación urbana, corresponden a aquellas de producto de la construcción habitacional, que se encuentran en su mayoría dentro de la 4° y 3° categoría.

Dada la fuente interna de solicitudes de Mavimix, que es una empresa consolidada dentro del rubro de la pavimentación con más de 30 años en esté, las obras Serviu asociadas a la urbanización producto de obras habitacionales corresponden en un 94.7% a 4° categoría; 5,3% a 3° categoría, dejando fuera del registro a las 1° y 2° categorías. Puesto que dentro de la región metropolitana obras de dichas magnitudes son escasas y no se posee registro de ellas.

En resumen, si consideramos la información disponible podemos observar que el uso de la tecnología GPR se asocia a un porcentaje del presupuesto oficial, el cual varía según la categoría en las siguientes cantidades y el método de implementación.

Tabla XIX: Variación porcentual de implementación por categoría para los diferentes métodos de aplicación.

Método de implementación	3° Categoría	4° Categoría
Compra	0.137 – 0.548 [%]	0.548 – 10.954 [%]
Arriendo	0.040 – 0.161 [%]	0.161 – 3.211 [%]
Servicio externo	0.278 – 1.112 [%]	1.112 – 22.242 [%]

En donde la variabilidad, en particular para la 4° categoría es muy alta, por lo cual se debe tener en cuenta ello y para obras cuyo presupuesto oficial sea cercano al mínimo no será rentable la implementación en el caso de compra y servicio externo.

Sin embargo, recordando que esto es para el caso generalizado, puesto que como se vio anteriormente si es rentable la implementación de esta tecnología al largo plazo, de acuerdo con los flujos de caja.

Por otra parte, para obras de 4° categoría cuyo presupuesto oficial sea cercano al de 3° categoría la posibilidad de implementación mejora radicalmente, y el porcentaje del presupuesto oficial disminuye exponencialmente.

Por otro lado, el arriendo representa un costo menor comparativamente pudiendo ser implementado sin un análisis de detalle para obras de 4° categoría.

## 6.- Conclusiones

Dado el contexto y dinámica actual que presenta la zona urbana de la región Metropolitana, es importante contar con tecnología que permita un desarrollo en los procesos de renovación, mantención y ejecución de los pavimentos. En ello la tecnología GPR posee las características y facultades necesarias para la detección de ductos y tuberías de servicio de forma eficaz y rápida en tiempo real.

Adicionalmente, dado que el trazado y disposición de ductos es similar a lo largo de Chile, variando junto con las condiciones del subsuelo levemente. Se puede realizar el mismo análisis para diferentes regiones del país bajo las condiciones locales de cada sector.

La tecnología se rige por el comportamiento de las ondas electromagnéticas y su interacción con el medio presente en el subsuelo, permitiendo la detección de las cavidades en este. Como plantea del Terreny (2001) es posible modelar en base a los parámetros del subsuelo y la frecuencia del frente de ondas, la profundidad de penetración y resolución necesarios para cumplir los objetivos de cada campaña de medición.

Donde la metodología planteada expone las condiciones óptimas y desfavorables sobre su uso en faenas, tomando como referencia el Georadar, exponiendo las condiciones del subsuelo, trazado, detección en tiempo real y funcionalidad del equipo.

Sin embargo, se debe verificar y ratificar la eficiencia que presenta el georadar. Es por ello por lo que se comparan resultados obtenidos en el sector de estudio ubicado en la comuna de Santiago, obteniendo los datos pertinentes del trazado de arranques domiciliarios de agua potable con el uso de ambos equipos (georadar y geófono).

Donde se aprecia que el geófono si bien permite la detección de ductos, su precisión es extremadamente baja y no posee la facultad de ubicar verticalmente el trazado de ductos. Por el contrario, el georadar es capaz de trazar espacialmente (horizontal y verticalmente) el trazado de ductos con una alta precisión llegando a errores porcentuales horizontales del 3% y verticales entre 3-10%. Por lo cual la capacidad técnica del georadar es superior a otros equipos de detección no destructivos.

La implementación de la tecnología GPR depende de su factibilidad económica, para ello se desarrolló un análisis de costos directos e indirectos considerando únicamente el mercado chileno. Implementando diferentes métodos de adquisición del georadar, así como distintos escenarios dada la variabilidad de los costos presentes.

Los flujos de cajas elaborados determinan que, dado el contexto del mercado chileno y los costos asociados, la implementación del georadar mediante su compra o arriendo es factible presentando valores netos positivos. Por otra parte, la implementación mediante un servicio externo es inviable para multas superiores a 56,472UF siendo este limite el caso más favorable. Concluyendo que si bien se ratifica su factibilidad de implementación se debe estudiar de forma detallada a la base de datos disponible.

Serviu emite para sus proyectos de pavimentación un “presupuesto oficial” el cual es la valorización del proyecto de pavimentación por parte de la entidad, permitiendo cuantificar el costo de implementación a la magnitud de la obra y la categoría de contratista Minvu como se expuso en el capítulo 5. Donde la mayoría de las obras en la zona urbana son de tercera y cuarta categoría implicando un costo económico de implementación variable y dependiente de su método de obtención (compra, arriendo y préstamo de servicios).

Si bien dicha variabilidad es alta, se determina que para obras de tercera categoría su impacto es menor y factible de implementar. Por otra parte, las obras menores como lo son las de cuarta categoría, el arriendo del equipo es sumamente factible dado que representa un costo máximo del 3% del valor de obra. Mientras que los otros métodos presentan una variabilidad considerable requiriendo un estudio de detalle.

En conclusión, la tecnología GPR la cual es representada en las obras de pavimentación por el georadar es un aporte significativo para la problemática actual presente en la zona urbana de la región Metropolitana. Resuelve técnicamente y con una precisión elevada la detección de ducto y tuberías de forma no destructiva, disminuyendo la probabilidad de roturas en estas. Además, en términos generales es factible su implementación quedando sujeta a la base de datos económicos presente, es decir el centro de costos y datos de cada contratista junto con la magnitud de la obra a ejecutar.

## 7.- Bibliografía

[1] Región Metropolitana de Santiago Análisis de Proyecciones de Población INE Período 2015–2035. (2019, diciembre).

[https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/DOCUMENTO\\_PROYECCIONES\\_DE\\_POBLACION\\_RMS\\_2035.pdf](https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/DOCUMENTO_PROYECCIONES_DE_POBLACION_RMS_2035.pdf)

[2] Ministerio de Obras Públicas y Vías de Comunicación. (1949, 20 octubre). Ley 8946 - Decreto 1122. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=25880>

[3] INE publica la georreferenciación de 7.199 permisos de edificación correspondientes al primer semestre de 2019. (2019, 27 noviembre).

<http://ine.gob.cl/prensa/2019/11/27/ine-publica-la-georreferenciacion-de-7.199-permisos-de-edificacion-correspondientes-al-primer-semestre-de-2019>

[4] Aguas Andinas: rotura en Providencia desnuda graves fallas del modelo de regulación. (2016, 6 agosto). CIPER Chile.

<https://www.ciperchile.cl/2016/06/28/aguas-andinas-rotura-en-providencia-desnuda-graves-fallas-del-modelo-de-regulacion/>

[5] SISS informa aumento de las pérdidas de agua potable en el sector sanitario. (2021, junio). SISS. Superintendencia de Servicios Sanitarios.

<https://www.siss.gob.cl/586/w3-article-19288.html>

[6] Cámara Chilena de la Construcción. (2019, mayo). Informe MACH Macroeconomía y Construcción.

<https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/MACH50-2019.pdf>

[7] Aguas Andinas (2016, junio). Presentación Comisión de Obras Públicas, Transporte y Telecomunicaciones, Antecedentes rotura en Providencia [Diapositiva 2, 3 y 4], Cámara de Diputados.

<https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=65932&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>

[8] Martínez-Sala, R., Mené-Aparicio, J., & Rodríguez-Abad, I. (2017). Aplicación de la técnica del georradar en ingeniería civil: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón | Hormigón y Acero. ELSEVIER.

<https://www.elsevier.es/es-revista-hormigon-acero-394-avance-resumen-aplicacion-tecnica-del-georradar-ingenieria-S0439568917300402>

[9] Underground Awareness. (2015, marzo). 2550GR Manual del operador (2.0). TRANSLATION OF THE ORIGINAL INSTRUCTION.

Material proporcionado por DOBCO

[10] SUBSITE ELECTRONICS. (2017). 2550GR GROUND PENETRATING RADAR. Especificaciones Técnicas.

Material proporcionado por DOBCO

- [11] del Terreny, G. D. D. C. D. P. C. U. I. (2001, 31 octubre). Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. TDX.  
<http://hdl.handle.net/10803/6216>
- [12] Sala, M. R. M. (2020, 11 noviembre). Modelización numérica de la propagación de las ondas electromagnéticas del georradar aplicada al estudio de la penetración del agua en el hormigón endurecido con gprMax. Repositorio Institucional UPV.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/128254>
- [13] Área de Ingeniería Eléctrica. (s.f.). Ondas electromagnéticas. UCO (Universidad de Córdoba). Documentos de curso.  
<http://www.uco.es/>
- [14] GEORED. (2021, enero). Cotización Servicios de prospección subterránea. Cotización solicitada por uso de Georadar.
- [15] Equipos e Instrumentos Científicos Villner. (2021, enero). Opción de arriendo Georadar. Cotización solicitada de arriendo Georadar.
- [16] Maria del Carmen Xocua Posadas. (2016). Descripción de la Herramienta Escáner Dieléctrico. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [17] Ilustre Municipalidad de Santiago (2021, febrero). Texto Refundido, Ordenanza Local Plan regulador Municipal Anteproyecto. Habitación Ltda (1989).
- [18] Banco Central (2022, febrero). Datos estadísticos.  
[https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP\\_TASA\\_INTERES/MN\\_TASA\\_INTERES\\_09/TMS\\_15/T311](https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_TASA_INTERES/MN_TASA_INTERES_09/TMS_15/T311)
- [19] HY929 Strengthened High Strength Water Pipe Leakage Meter (sf). Ficha Técnica Geófono HY929 Strengthened High Strength Water Pipe Leakage Meter.

# ANEXOS

## Flujo de cajas

A continuación, se expone el detalle de los flujos de cajas presentados en el capítulo 5, donde se mantienen los supuestos y escenarios planteados.

Es decir, se plantean los casos en donde los costos de cada partida son mínimos, promedio y máximos de la base de datos disponible, considerando los diferentes métodos de implementación (compra, arriendo y uso de servicio externo). Esto permite establecer rangos de factibilidad como se explica en el capítulo 5 señalando además para dichas cotas los Valores Actuales Netos (VAN) en los periodos de análisis, es decir 3 y 5 años.

### Escenario de costos mínimos:

Tabla XX: Flujo de caja para compra de equipo y escenario de costos mínimos.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	170,363	170,363	170,363	170,363	170,363
Elaboración de calicatas [UF]	45,430	45,430	45,430	45,430	45,430
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Compra equipo [UF]	-788,716	0,000	0,000	0,000	0,000
Multas y/o cargos por retraso [UF]	181,720	181,720	181,720	181,720	181,720
Sueldo empleado especializado [UF]	-75,717	-75,717	-75,717	-75,717	-75,717
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Total [UF]	-304,129	484,587	484,587	484,587	484,587
VAN (3 años) [UF]	474,064				
VAN (5 años) [UF]	1.081,589				



Tabla XXI: Flujo de caja para arriendo del equipo y escenario de costos mínimos.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	170,363	170,363	170,363	170,363	170,363
Elaboración de calicatas [UF]	45,430	45,430	45,430	45,430	45,430
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Arriendo del equipo [UF]	-205,516	-205,516	-205,516	-205,516	-205,516
Multas y/o cargos por retraso [UF]	181,720	181,720	181,720	181,720	181,720
Sueldo empleado especializado [UF]	-100,956	-100,956	-100,956	-100,956	-100,956
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Flujo por probabilidad de robo (10% de costo de reposición) [UF]	-56,283	-56,283	-56,283	-56,283	-56,283
Total [UF]	197,549	197,549	197,549	197,549	197,549
VAN (3 años) [UF]	483,005				
VAN (5 años) [UF]	730,672				

Tabla XXII: Flujo de caja para contratación de servicio externo y escenario de costos mínimos.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	170,363	170,363	170,363	170,363	170,363
Elaboración de calicatas [UF]	45,430	45,430	45,430	45,430	45,430
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Contratación servicio externo [UF]	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606
Multas y/o cargos por retraso [UF]	181,720	181,720	181,720	181,720	181,720
Sueldo empleado especializado [UF]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Total [UF]	-507,302	-507,302	-507,302	-507,302	-507,302
VAN (3 años) [UF]	-1.240,349				
VAN (5 años) [UF]	-1.876,352				

### **Escenario de costos promedios:**

Tabla XXIII: Flujo de caja para compra de equipo y escenario de costos promedio.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	653,057	653,057	653,057	653,057	653,057
Elaboración de calicatas [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Compra equipo [UF]	-788,716	0,000	0,000	0,000	0,000
Multas y/o cargos por retraso [UF]	363,440	363,440	363,440	363,440	363,440
Sueldo empleado especializado [UF]	-75,717	-75,717	-75,717	-75,717	-75,717
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Total [UF]	383,000	1.171,716	1.171,716	1.171,716	1.171,716
VAN (3 años) [UF]	2.154,088				
VAN (5 años) [UF]	3.623,066				

Tabla XXIV: Flujo de caja para arriendo del equipo y escenario de costos promedio.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	653,057	653,057	653,057	653,057	653,057
Elaboración de calicatas [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Arriendo del equipo [UF]	-205,516	-205,516	-205,516	-205,516	-205,516
Multas y/o cargos por retraso [UF]	363,440	363,440	363,440	363,440	363,440
Sueldo empleado especializado [UF]	-100,956	-100,956	-100,956	-100,956	-100,956
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Flujo por probabilidad de robo (10% de costo de reposición) [UF]	-56,283	-56,283	-56,283	-56,283	-56,283
Total [UF]	884,678	884,678	884,678	884,678	884,678
VAN (3 años) [UF]	2.163,030				
VAN (5 años) [UF]	3.272,149				

Tabla XXV: Flujo de caja para contratación de servicio externo y escenario de costos promedio.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	653,057	653,057	653,057	653,057	653,057
Elaboración de calicatas [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Contratación servicio externo [UF]	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606
Multas y/o cargos por retraso [UF]	363,440	363,440	363,440	363,440	363,440
Sueldo empleado especializado [UF]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Total [UF]	179,827	179,827	179,827	179,827	179,827
VAN (3 años) [UF]	439,676				
VAN (5 años) [UF]	665,125				

**Escenario de costos máximos:**

Tabla XXVI: Flujo de caja para compra de equipo y escenario de costos máximos.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	1.135,751	1.135,751	1.135,751	1.135,751	1.135,751
Elaboración de calicatas [UF]	90,860	90,860	90,860	90,860	90,860
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Compra equipo [UF]	-788,716	0,000	0,000	0,000	0,000
Multas y/o cargos por retraso [UF]	545,160	545,160	545,160	545,160	545,160
Sueldo empleado especializado [UF]	-75,717	-75,717	-75,717	-75,717	-75,717
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Total [UF]	1.070,130	1.858,846	1.858,846	1.858,846	1.858,846
VAN (3 años) [UF]	3.834,113				
VAN (5 años) [UF]	6.164,543				

Tabla XXVII: Flujo de caja para arriendo del equipo y escenario de costos máximos.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	1.135,751	1.135,751	1.135,751	1.135,751	1.135,751
Elaboración de calicatas [UF]	90,860	90,860	90,860	90,860	90,860
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Arriendo del equipo [UF]	-205,516	-205,516	-205,516	-205,516	-205,516
Multas y/o cargos por retraso [UF]	545,160	545,160	545,160	545,160	545,160
Sueldo empleado especializado [UF]	-100,956	-100,956	-100,956	-100,956	-100,956
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Flujo por probabilidad de robo (10% de costo de reposición) [UF]	-56,283	-56,283	-56,283	-56,283	-56,283
Total [UF]	1.571,808	1.571,808	1.571,808	1.571,808	1.571,808
VAN (3 años) [UF]	3.843,054				
VAN (5 años) [UF]	5.813,626				

Tabla XXVIII: Flujo de caja para contratación de servicio externo y escenario de costos máximos.

Periodo [años]	1	2	3	4	5
Multa por ruptura de servicio [UF]	1.135,751	1.135,751	1.135,751	1.135,751	1.135,751
Elaboración de calicatas [UF]	90,860	90,860	90,860	90,860	90,860
Reemplazo de tuberías por rotura [UF]	68,145	68,145	68,145	68,145	68,145
Contratación servicio externo [UF]	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606	-1.067,606
Multas y/o cargos por retraso [UF]	545,160	545,160	545,160	545,160	545,160
Sueldo empleado especializado [UF]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ahorro control de demoliciones [UF]	94,646	94,646	94,646	94,646	94,646
Total [UF]	866,957	866,957	866,957	866,957	866,957
VAN (3 años) [UF]	2.119,700				
VAN (5 años) [UF]	3.206,602				