



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SELECCIÓN Y DISEÑO DE SENSORES DE HUMEDAD
PARA MINERIA BLOCK CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICO

CLAUDIO NICOLAS CASAFONT HERNANDEZ

PROFESOR GUÍA:

MARTIN ADAMS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAUL CASTRO RUIZ

ASIEH HEKMAT

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Eléctrico
POR: Claudio Nicolás Casafont Hernández
FECHA: Enero 2017
PROFESOR GUÍA: Martin Adams

SELECCIÓN Y DISEÑO DE SENSORES DE HUMEDAD PARA MINERÍA BLOCK CAVING

El bombeo de barro corresponde a un ingreso repentino de mineral saturado a labores subterráneas. Este puede causar diversos daños y retrasos en la producción. Según estudios anteriores, una de las principales variables que determina el estado crítico es la cantidad de agua presente en el material fragmentado, y hoy en día todos los análisis de la cantidad de agua presente en el mineral fragmentado son realizados a través de un experto, el cual entrega una observación cualitativa del material.

El presente trabajo tiene por objetivo seleccionar y diseñar un sensor capaz de medir el contenido volumétrico de agua presente en el mineral fragmentado en los puntos de extracción para block caving, con el fin de obtener mediciones cuantitativas y caracterizar el material.

De la revisión bibliográfica se encuentran cuatro tecnologías candidatas, estas son infrarrojas de espectro cercano, reflectometría de microondas en el dominio de la frecuencia, reflectometría de microondas en el dominio del tiempo y radar de penetración terrestre.

Se realiza un proceso analítico jerárquico para determinar la tecnología más adecuada. Gracias al gran área que cubre el radar de penetración terrestre, fue escogida dicha tecnología.

Para su utilización se desarrolla un método de inversión basado en la impedancia eléctrica del suelo, el cual estima la permitividad eléctrica de este. Los dos pasos más importantes de la inversión se basan en deconvoluciones para obtener las señales de interés. Además se utiliza una aproximación polinómica de tercer grado para estimar el contenido de agua tras obtener la permitividad eléctrica. También se identifican los problemas y se muestra como debe ser empleado el sensor en un entorno minero, entregando las especificaciones de la capacidad de medición para distintos tamaños de este.

Para verificar la validez del esquema de inversión se desarrollan dos simulaciones con escenarios distintos. Luego se verifica si tras el esquema de inversión se logra llegar a los parámetros de entrada de la simulación.

Los resultados arrojan que el método es capaz de recuperar dentro de un plano el contenido volumétrico de agua con una incertidumbre de 1%.

Se concluye que el método es adecuado teóricamente para detectar la humedad en el punto de extracción. Se recomienda continuar el estudio con mediciones en terreno y mejoras en la reducción de ruido

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que me educo, formo y siempre me apoyo a pesar de todo. En especial a mi abuela y tía que me acogieron sin preguntas cuando me vine a la capital.

A los amigos con que viví en el extranjero y me acogieron, en especial a Steven Rendon, Francisco Catrileo, Sebastián Labbe, Javiera Castillo, Karen Guillen, Kanoko Nishikawa y Sacha Vakili, quienes me hicieron sentir como en casa.

A los Cabros, Alfredo Villalobos, Bastián Garrido, Fabián Astudillo, Felipe San Martin, Ignacio Valdevenito, Roberto Ibañez, Tomas Wolf, Pancho Ley y Diego Valenzuela, que me ayudaron a disfrutar cada día.

A mis amigos de tenis de mesa, con quienes disfrute innumerables partidos y entrenamientos.

A mis amigos del colegio, con quienes a pesar de la distancia, aun comparto muy gratos momentos.

A mis compañeros del laboratorio de block caving, que me enseñaron todo lo que se de minería, con quienes viví una entretenida y difícil época de mi vida.

A Sandra Ardila, que siempre me escucho y ayudo.

A mis profesores, que siempre me presionaron cuando veían que no estaba esforzándome mucho.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	3
1.1	Motivación y definición del sistema.....	3
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivos generales.....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Estructura del trabajo.....	4
2	Antecedentes.....	5
2.1	Block Caving.....	5
2.1.1	Punto de extracción.....	6
2.1.2	Mud rush.....	6
2.1.3	El problema.....	6
2.2	Propiedades del agua.....	7
2.2.1	Constante dielectrica.....	8
2.2.2	Espectro de absorción.....	9
2.3	Ecuacion de topp.....	9
2.4	Tecnologia infrarroja.....	10
2.5	Tecnologia Microondas.....	12
2.5.1	Reflectometria de microondas en el dominio de la frecuencia (FDR).....	12
2.5.2	Reflectometria de microondas en el dominio del tiempo (TDR).....	13
2.6	Tecnología GPR.....	14
3	Elección de sensor.....	18
3.1	Alternativas.....	18
3.2	Metodo de selección.....	19
3.3	Resultados.....	21

4	Diseño e implementación	24
4.1	Metodología.....	24
4.1.1	Estrategia de inversión.....	25
4.2	Simulaciones.....	27
4.2.1	Conceptos básicos del modelamiento GPR.....	27
4.3	Demostración metodología	29
5	Aplicación minera.....	33
5.1	Consejos de utilización	33
5.2	Profundidad y frecuencia	35
5.3	Resolución vertical y frecuencia.....	36
5.4	Frecuencia y largo antenas.....	36
5.5	Frecuencia ideal	37
6	Análisis de resultados	38
6.1	Casos simulados.....	38
6.2	Resultados simulación	39
6.3	Resultado tratamiento de datos	40
6.4	Validez de resultados	41
7	Conclusiones.....	43
7.1	Conclusiones.....	43
7.2	Trabajos futuros	43
8	Bibliografía.....	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema de mina de hundimiento por bloques.....	5
Ilustración 2: Puntos de extracción.....	6
Ilustración 3: Matriz de peligro de bombeo de barro para puntos de extracción, El Teniente (Becerra, 2011).....	7
Ilustración 4: Efectos de aplicar un campo eléctrico sobre un dieléctrico	8
Ilustración 5: Movimientos del agua, las flechas representan la dirección en que ocurre la deformación. Vázquez (1980).	9
Ilustración 6: IR cercano (NIR).....	10
Ilustración 7:Diagrama de bloques del sensor de humedad	11
Ilustración 8: Esquema de un sensor FDR. Trabelsi (2006).....	12
Ilustración 9: Mala Pro Ex Gpr	14
Ilustración 10: Esquemático ilustrando un perfil de reflexión (a) y un sondeo de punto medio común (b). Tx representa la antena transmisora y Rx la antena receptora. Steelman (2012).	15
Ilustración 11: Esquema funcionamiento GPR	16
Ilustración 12: IR-3000 Moistech.....	18
Ilustración 13:CS616	19
Ilustración 14: Unidad de control GSSI Sir 3000 GPR.....	19
Ilustración 15:Desertgold GPR.....	19
Ilustración 16: Permitividad eléctrica de un perfil	29
Ilustración 17: B-scan georadar.....	30
Ilustración 18: Perdida de amplitud.....	30
Ilustración 19: B-scan preprocesado.....	30
Ilustración 20: Reflectividad	31
Ilustración 21: Reflectividad filtrada.....	31
Ilustración 22: Impedancia para un espectro de frecuencia limitado	31
Ilustración 23: Permitividad para un espectro de frecuencia limitado	31
Ilustración 24: Contenido de agua aproximado.....	32
Ilustración 25: Plano de medición del sensor	33
Ilustración 26: Diferentes ángulos de medición para los planos bidimensionales de medición. La zona verde representa el área anterior al ángulo crítico, dentro de los alcances de esta memoria. La zona roja representa el área posterior al ángulo crítico, una zona en donde las mediciones poseerán mayor ruido y error debido a los alcances de la memoria. Finalmente la línea punteada representa distintos planos de medición.	34
Ilustración 27: Permitividad eléctrica de zonas de humedad para el caso 1.....	38
Ilustración 28: Permitividad eléctrica de zonas de humedad para el caso 2.....	38
Ilustración 29: Porcentaje de agua en las rocas para el caso 1.	39

Ilustración 30: Porcentaje de agua en las rocas para el caso 2.	39
Ilustración 31: Sondeo GPR para el caso 1.	39
Ilustración 32: Sondeo GPR para el caso 2.	39
Ilustración 33: Inversión de banda completa de permitividad para el caso 1.	40
Ilustración 34: Inversión de banda completa de permitividad para el caso 2.	40
Ilustración 35: Contenido volumétrico de agua para el caso 1.	41
Ilustración 36: Contenido volumétrico de agua para el caso 1.	41
Ilustración 37: Diferencia porcentual entre el contenido volumétrico de agua en la entrada de la simulación y el resultado del procesamiento de datos para el caso 1.	42
Ilustración 38: Diferencia porcentual entre el contenido volumétrico de agua en la entrada de la simulación y el resultado del procesamiento de datos para el caso 2.	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Permitividad eléctrica relativa de las rocas y minerales más comunes	8
Tabla 2: Criterios de selección	20
Tabla 3: Escala de Saaty	20
Tabla 4: Pesos relativos entre criterios	21
Tabla 5: Pesos relativos e índice de consistencia de cada criterio.....	22
Tabla 6: Resultado final.....	23
Tabla 7: Distancia mínima del sensor, en función del largo de la antena para distintos ángulos .	34
Tabla 8: Relación frecuencia de las antenas con la profundidad máxima de la señal radar.....	35
Tabla 9: Relación frecuencia de las antenas con la espesor mínimo detectable por el radar	36
Tabla 10: Relación frecuencia con el largo de las antenas sin protección	36
Tabla 11: Cuadro resumen de los parámetros que modifica la frecuencia.....	37

GLOSARIO

ε	Permitividad eléctrica
ε_r	Permitividad eléctrica relativa
θ_w	Contenido volumétrico de agua
a_λ	Absorbancia a una longitud de onda determinada
L	Longitud
J	Unidad números imaginarios
Φ	Cambio de fase entre ondas
C	Velocidad de la luz en el vacío
F	Frecuencia
v	Velocidad de propagación
T	Tiempo
A	Amplitud de la onda
L_1	Norma de Hölder de nivel 1
Z	Impedancia eléctrica
Z_0	Impedancia eléctrica del vacío
R	Reflectividad
NIR	Infrarrojos de espectro cercano
TDR	Reflectometría en el dominio del tiempo
FDR	Reflectometría en el dominio de la frecuencia
GPR	Radar de penetración terrestre
CMP	Sondeo de punto medio común
USD	Dólares americanos
AHP	Proceso analítico jerárquico
DP	Transmisor de presión diferencial
FDTD	Diferencias finitas en el dominio del tiempo

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN Y DEFINICIÓN DEL SISTEMA

El tema de esta memoria es el diseño y la implementación de un sistema de detección para determinar la cantidad de agua presente en el material en el punto de retiro para *block caving*, esto con el fin de optimizar el proceso, pero principalmente para determinar los peligros asociados a la extracción de este.

En términos generales, *block caving* o hundimiento por bloques, es una técnica de explotación minera subterránea, donde el material es fracturado por sí mismo gracias a las fuerzas gravitatorias.

Actualmente es una persona quien determina el estado del material, por ende existe un grado de subjetividad, que hace inexacto la medición ya que puede suceder que dos personas diferentes presentaran diferentes resultados. Además para la unificación de resultados se deben enviar las muestras al laboratorio, lo cual es un proceso lento.

El propósito de este proyecto de título es entregar una uniformidad en los resultados, de manera que de repetirse la medición, el resultado entre los distintos ensayos sea igual. Y al realizar mediciones entre puntos diferentes exista los mismos criterios y referencias. Además debe ser sencillo para el usuario sin interrumpir el proceso de producción.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

Diseñar y evaluar el desempeño de un sistema de medición de contenido de agua volumétrico para los puntos de extracción para minería *caving*.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar el tipo de sensor capaz de realizar la medición en el entorno minero, que cumpla con los requisitos determinados.

Diseñar un método para extraer la información sobre el contenido de agua de los parámetros medidos por el sensor selecto.

Realizar pruebas de medición para evaluar el desempeño del método desarrollado.

Analizar resultados de las pruebas realizadas.

1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

La presentación del informe de trabajo de título, del proyecto “Detección de humedad para block caving” se realiza por medio de seis capítulos cuyo contenido se explica a continuación.

El primer capítulo es el de introducción al tema, en el cual se entrega la motivación de por qué se realiza el proyecto, explicando tanto los objetivos específicos como generales del mismo.

Dentro del segundo capítulo se presenta los antecedentes, contexto y herramientas existentes para el problema de humedad para distintas aplicaciones. Dentro del contexto se explica el sistema actual con el que se realiza el trabajo de medición de humedad y sus deficiencias. En las herramientas se exploran diferentes tecnologías con el potencial de resolver el problema.

En el tercer capítulo se describe el método utilizado para la elección del sensor, entregando todos los parámetros considerados en su selección. Se cuantifica la opción que mejor resuelve el problema.

En el cuarto capítulo se muestra la metodología implementada para lograr las mediciones deseadas. También se explica el método para la obtención de datos de simulación y finalmente se muestra brevemente paso a paso como se implementara el algoritmo para transformar la información del sensor en cantidad de agua volumétrica.

El quinto capítulo corresponde a la aplicación minera de la herramienta, entregando consejos para su uso y mostrando como debe utilizarse dentro de la mina.

El sexto capítulo muestra los resultados de las simulaciones y los algoritmos tal como se presentaron en el capítulo 3. Estos resultados se presentan mediante gráficos. Además de análisis y comentarios respecto a los resultados obtenidos.

El séptimo capítulo entrega las conclusiones y las recomendaciones para los trabajos futuros.

2 ANTECEDENTES

El presente capítulo tiene por objetivo ubicar al lector en el entorno en el cual se desarrolla este trabajo de título, entregando los antecedentes previos y necesarios para su contextualización.

En primer lugar, en la sección 2.1, se indican las características generales del proceso *de block caving* y sus características relevantes para este proyecto. En el apartado 2.2 se señala las propiedades del agua pertinentes en este estudio. En el apartado 2.3 se describe la conversión de permitividad eléctrica a contenido de agua. En el apartado 2.4 se describe la tecnología infrarroja para la detección de agua en muestras. En el apartado 2.5 se describe la tecnología en base a ondas microondas para la detección de agua en muestras. En la sección 2.6 se habla sobre la tecnología de georadar.

2.1 BLOCK CAVING

En términos generales, *block caving* o hundimiento por bloques, es una técnica de explotación minera subterránea.

En este método el mineral es fracturado por sí mismo, como resultado de las fuerzas y esfuerzos internos; de este modo se requieren mínima perforación y voladura en la producción. El plan de minado es dividido en secciones. Cada bloque es completamente cortado por un corte horizontal que es excavado en la parte inferior del bloque. Las fuerzas gravitacionales son del orden de millones de toneladas que actúan sobre la masa rocosa, ocasionando de esta manera el fracturamiento de la roca que cae hacia los niveles inferiores donde es recolectada por maquinaria.

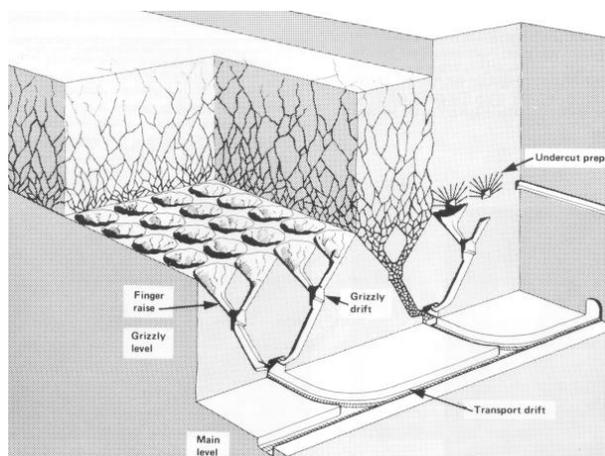


Ilustración 1: Esquema de mina de hundimiento por bloques

2.1.1 PUNTO DE EXTRACCIÓN

Tras ser fracturado por los esfuerzos internos el material cae a través de un embudo denominado batea hasta el nivel inferior de la mina, llamado el nivel de transporte. Es allí donde el material se deposita en los puntos de extracción, que son los puntos terminales de los embudos. A continuación se muestran algunas imágenes de estos.



Ilustración 2: Puntos de extracción

Tal como se observa en la Ilustración 2: Puntos de extracción Ilustración 2, estos puntos tienen 3.6 metros de ancho y están reforzados mediante un armazón de fierro y concreto.

2.1.2 MUD RUSH

El principal peligro en estos puntos de extracción son los llamados “mud rushes”, estos son flujos repentinos de barro y mineral fragmentado desde los puntos de extracción. La rapidez del flujo de barro es tal que el escape del personal es poco probable, con terribles consecuencias para la seguridad. Estos también son responsable de daños severos a la infraestructura. Una gran violencia, en la forma de una ráfaga de aire, esta generalmente asociado a los flujos repentinos de barro. Este golpe de aire también puede ser responsable de múltiples accidentes y daños a la infraestructura.

2.1.3 EL PROBLEMA

Existen diversos estudios que relacionan el riesgo de que ocurra el fenómeno de “mud rush” a dos propiedades del punto de extracción, la granulometría y la presencia de agua en el punto. Según el instituto de minería y metalurgia de Sudáfrica el riesgo aumenta al doble cuando el material pasa de estar un poco húmedo a estar mojado (las mediciones fueron realizadas por un

experto de manera cualitativa). Si esto se suma a una gran presencia de material fino, el riesgo pasa a ser inminente, de aquí la importancia de conocer siempre la cantidad de agua presente en cada punto de extracción. Como muestra la Ilustración 3, cualquier contenido volumétrico de agua superior al 10% representa un peligro inminente para el punto de extracción, el cual en cualquier momento podría generar un bombeo de fango. Además para condiciones en donde la presencia de finos es importante (70% de granos inferiores en diámetro a 25 cm) este porcentaje crítico se reduce a 7%.

Moisture content	Grain size (G) \leq 25 cm		
	G < 30% (mostly thick granulometry)	30% \leq G < 70%	G \geq 70% (mostly fine granulometry)
<4%			
4%-7%			
7% - 10%			
\geq 10%			

	Normal condition
	In observation
	Critical risk

Ilustración 3: Matriz de peligro de bombeo de barro para puntos de extracción, El Teniente (Becerra, 2011)

Como actualmente en Codelco es un experto el que realiza esta medición, pueden existir diferencias entre cada evaluación, ya que es un análisis cualitativo. Además distintos expertos pueden sugerir distintas evaluaciones para el mismo punto, pues es muy difícil que tanto sus criterios y formación sean iguales. Cabe destacar que la maquina utilizada para extraer el material del punto de extracción tiene un ancho de 3 metros, como solo quedan 60 centímetros de holgura, se debe detener la producción en este punto para poder realizar el estudio, disminuyendo así la producción.

2.2 PROPIEDADES DEL AGUA

El agua es una sustancia que posee características únicas y distintivas lo cual facilita su detección. Debido a la imposibilidad de medir directamente la cantidad de agua presente en las sustancias, una estimación se realiza a través de la medición de sus propiedades. Dos de estas son su constante dieléctrica y su espectro de absorción infrarrojo.

2.2.1 CONSTANTE DIELECTRICA

Un dieléctrico es un material aislante o un conductor muy pobre de la corriente eléctrica. Cuando estos son puestos bajo un campo eléctrico, por ejemplo al conectar una batería en ambos extremos, prácticamente no circula corriente por ellos a diferencia de los metales. En vez de eso ocurre un fenómeno de polarización eléctrica, donde los electrones son desplazados levemente en contra del campo eléctrico, generando que una porción del material quede negativa y la otra positiva, tal como muestra la Ilustración 4. Esto se opone al campo eléctrico externo y al finalmente el campo eléctrico que existe dentro de material es menor que el externo.

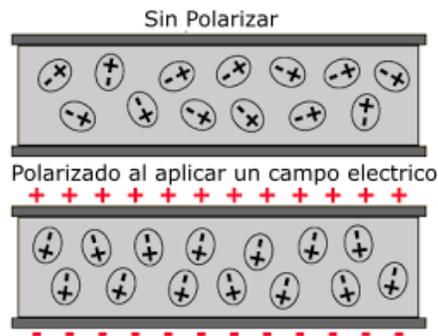


Ilustración 4: Efectos de aplicar un campo eléctrico sobre un dieléctrico

La permitividad o constante dieléctrica es la característica que describe la tendencia de un material a polarizarse frente a la aplicación de un campo eléctrico. Por ende es el número que cuantifica que tanto se opone el material al campo eléctrico externo. La permitividad relativa es una constante adimensional que cuantifica este efecto en función de la permitividad eléctrica del vacío. El agua posee una permitividad relativa de aproximadamente 80, la más elevada entre todos los materiales. Como referencia, la del aire es aproximadamente 1.

Minerales, rocas	Constante dieléctrica relativa
Anhidrita	6,35
Yeso	4,16
Arenisca	4,65
Caliza	7,5 a 9,2
Lutita	5 a 25
Dolomía	6,8

Tabla 1: Permitividad eléctrica relativa de las rocas y minerales más comunes

2.2.2 ESPECTRO DE ABSORCIÓN

El espectro de absorción de un material muestra la fracción de la radiación electromagnética incidente que un material absorbe dentro de un rango de frecuencias. El espectro de cada molécula posee líneas de absorción en algunas longitudes de onda, las cuales son determinadas debido a los movimientos que esta puede realizar con una determinada cantidad de energía. La molécula de agua tiene una estructura no lineal, y por lo tanto presenta tres modos de vibración: una tensión simétrica (ν_1), una flexión simétrica (ν_2) y una tensión asimétrica (ν_3), los cuales son representados en la Ilustración 5. Cada modo de vibración se observa en una banda de frecuencia específica. Generalmente se requiere menos energía para deformar un ángulo entre tres átomos que para estirar un enlace, por lo que la banda ν_2 debe aparecer a menores frecuencias que ν_1 y ν_3 . Las vibraciones ν_1 y ν_3 modifican la magnitud del momento dipolar (vibraciones paralelas) mientras que la vibración ν_2 cambia la orientación de dicho momento (vibración perpendicular).

Las bandas de absorción aparecen a distintas frecuencias dependiendo de numerosos factores, a modo de orientación las tres frecuencias de vibración correspondientes al agua líquida son 3450 cm^{-1} , 1640 cm^{-1} y 3580 cm^{-1} .

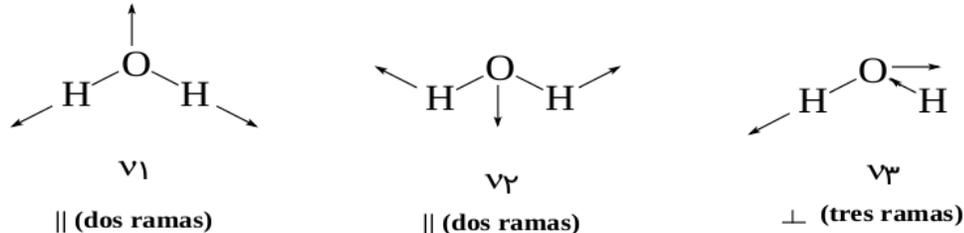


Ilustración 5: Movimientos del agua, las flechas representan la dirección en que ocurre la deformación. Vázquez (1980).

2.3 ECUACION DE TOPP

Existen diversos métodos para relacionar el contenido de agua volumétrico en el suelo con la constante dieléctrica aparente. La función más usada es la polinómica de tercer grado desarrollada por Topp et al. (1980), conocida como ecuación universal. Cuya ventaja principal es que no necesita ningún parámetro del suelo. Muchos de los equipos de que miden humedad hoy en día son entregados por su fabricante con esta ecuación de calibración:

$$\theta_w = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_a - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_a^2 + 5.5 \cdot 10^{-6} \varepsilon_a^3$$

Donde θ_w es el contenido de agua volumétrico y ϵ_a la permitividad dieléctrica aparente. Sin embargo, esta ecuación no ha mostrado buena aplicabilidad en suelos volcánicos ni en suelos de textura fina. Por ello, se ha sugerido que se realicen estudios de calibración para generar funciones específicas a los tipos de suelo y condiciones de uso del equipo en cuestión.

Así a falta de datos en terreno se postula la ecuación de Topp como una primera aproximación.

2.4 TECNOLOGIA INFRARROJA

Mediante el uso de la termografía infrarroja el nivel de agua presente en la superficie de un material no puede ser computado debido a que la intensidad de la radiación no depende solo de la humedad. Así se puede lograr un método más exacto midiendo la absorción en longitudes de ondas específicas (NIR). Este método permite la determinación de la humedad relativa en la superficie y en una fina capa debajo del material. Como fue mencionado en el punto 2.2.2 el agua reacciona de manera particular al ser expuesta a rayos NIR ya que al ser una molécula triatómica, al ser expuesta a estos rayos puede realizar movimientos complejos, para las cuales absorbe energía de la radiación. Esta establecido que esto ocurre en las longitudes de ondas entre 1.45 y 1.94 μm , las llamadas longitudes de ondas de absorción del agua.

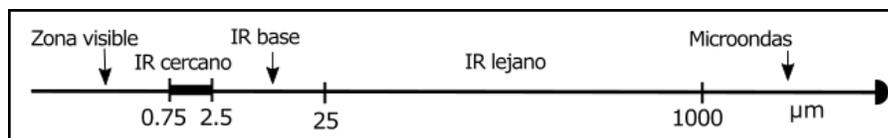


Ilustración 6: IR cercano (NIR)

El espectrómetro de absorción capaz de trabajar en la banda del NIR es la base para este sensor de humedad, y su objetivo es determinar la relación entre la radiación absorbida y la radiación total transmitida en la banda de absorción. Además de este cociente es importante señalar que la humedad relativa en la sustancia medida depende de la sustancia y debe ser calibrado. La instrumentación NIR tiene una alta proporción entre la señal y el ruido, así en el proceso de espectrometría las muestras no necesitan ser redistribuidas para disminuir su concentración.

Cuando la radiación NIR entra en contacto con una muestra, esta puede ser absorbida, transmitida o reflejada. Según la ley de Beer-Lambert, la concentración de los componentes está directamente relacionada con la absorbancia de la muestra.

$$a_{\lambda} = e_{\lambda} L d$$

Donde a_{λ} es la absorbancia a una longitud de onda determinada, e_{λ} es el coeficiente de absorción molar a una longitud de onda determinada, L es la longitud de la trayectoria y d la

concentración del componente absorbente. El coeficiente de absorción molar se puede determinar mediante la calibración con una muestra con una concentración conocida de los componentes de interés.

Esta relación fundamental es relevante no sólo para las mediciones de transmisión, sino también en la espectroscopia de reflectancia difusa. En la espectroscopia de absorción, la longitud de la trayectoria de la radiación se mantiene constante. La transmitancia y reflectancia difusa se ven afectadas por la dispersión de luz. La dispersión es una función de las propiedades físicas de la muestra, tales como, tamaño de partícula, textura de la superficie, contenido de humedad y la temperatura. La reflectancia difusa se utiliza comúnmente para el análisis cualitativo en la región NIR de 1100 nm a 2500 nm y mediciones de transmitancia se utilizan en la región de 800 nm a 1100 nm.

Un esquema de bloques de dicho sensor se presenta a en la Ilustración 7.

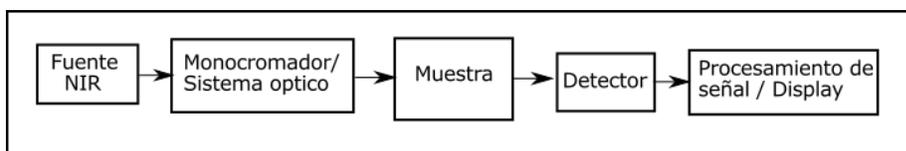


Ilustración 7: Diagrama de bloques del sensor de humedad

Los cinco componentes principales de la instrumentación NIR mostrados en la Ilustración 7 son la fuente radiante de energía, el dispositivo de discriminación de longitudes de onda, el soporte de muestra, el detector para convertir la radiación en señales eléctricas y el procesamiento de la señal. Lámparas halógenas son la fuente común de radiación y es usada para longitudes de onda en la región de 320 nm a 2500 nm. Dos tipos de componentes para discriminación de ondas son filtros y monocromadores. La instrumentación para filtrar tiene un número de filtros de interferencia (6-19 en general) montados en discos rotatorios, permitiendo a la radiación pasar a través de cada filtro. Los monocromadores utilizan un enrejado o un prisma como elemento de dispersión. La radiación es detectada midiendo señales fotoeléctricas usando materiales fotosensibles, principalmente sulfato de plomo para 1000 nm a 2600 nm, y silicio para menos de 1000 nm. La señal proveniente del detector es amplificada y linealizada. La respuesta de los instrumentos son convertidas a logaritmo (como $\log_{10} 1/R$), comparándola con transmitancia o la reflectancia de materiales comunes, como cerámicos, así obteniendo una relación lineal entre la respuesta NIR y la concentración de la muestra dentro de un amplio rango.

2.5 TECNOLOGIA MICROONDAS

La tecnología basada en microondas consiste a grandes rasgos en aprovechar las propiedades de la transmisión de este tipo de ondas para calcular diferentes parámetros de interés.

2.5.1 REFLECTOMETRIA DE MICROONDAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA (FDR)

Los sensores basados en este tipo de tecnología miden tanto la amplitud y fase de un pulso en cada banda de frecuencia, esta información está relacionada con la permitividad eléctrica a través de un modelo de circuito acoplado o a través de modelos que utilizan técnicas variacionales. La permitividad en el dominio de la frecuencia es una función compleja ya que mide tanto una variable real (amplitud) y una compleja (fase). El campo magnético para materiales no magnéticos es ignorado.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

Donde ε^* es la permitividad eléctrica, ε' es la parte real y $j\varepsilon''$ es la parte imaginaria. La permitividad está relacionada al contenido de agua como se mencionó en 2.3. Un esquemático de este tipo de sensor se muestra en la Ilustración 8, este está compuesto por un oscilador controlado a base de voltaje, un aislador, un divisor de potencia, dos antenas una en frente de la otra, seguido por un detector de atenuación y fase, además de una unidad de procesamiento de datos.

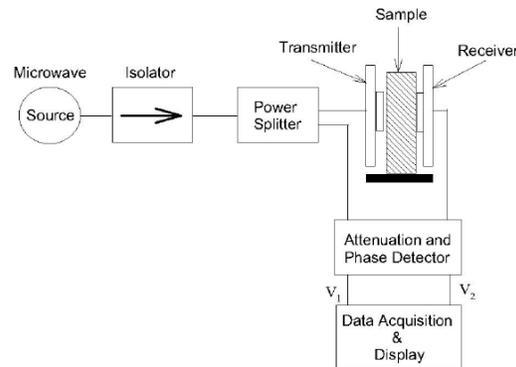


Ilustración 8: Esquema de un sensor FDR. Trabelsi (2006).

Básicamente, dos voltajes son medidos en la antena receptora, el primero es el voltaje transmitido con el recipiente de la muestra entre las dos antenas vacío, y luego con la muestra en él. De estos voltajes se calcula la atenuación y el cambio de fase producto de la muestra, y ambas componentes de la permitividad compleja son calculados de la siguiente manera.

$$\varepsilon' = \left[1 - \frac{\phi}{360d} \frac{c}{f} \right]^2$$

$$\varepsilon'' = \frac{-A}{8.686\pi d} \frac{c}{f} \sqrt{\varepsilon'}$$

Donde ε' es la parte real de la permitividad eléctrica, ε'' la parte imaginaria de la permitividad, ϕ la variación de fase entre las ondas, A es la atenuación en decibeles, c la velocidad de la luz en m/s, d el espesor de la muestra en metros y f la frecuencia de la antena en hertz.

Una vez que ε' y ε'' son determinados, una función independiente del material y la densidad es calculada. Un tipo de función de calibración es la siguiente:

$$\psi = \sqrt{\frac{\varepsilon''}{\varepsilon' (a_f \varepsilon' - \varepsilon'')}}}$$

Donde a_f es la pendiente determinada para cada material. El contenido de agua en la muestra es generalmente lineal con la función de calibración, luego puede ser obtenido de manera sencilla tras calibrar el sensor.

$$\psi = a M + b$$

Donde M es el contenido de agua en la muestra y tanto a como b son parámetros a ajustar de la ecuación lineal.

2.5.2 REFLECTOMETRIA DE MICROONDAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TDR)

Esta técnica hace uso del tiempo de vuelo de un impulso electromagnético propagándose entre los extremos del sensor. La señal se muestrea tras ser reflejada en el extremo del sensor y se obtiene la velocidad de propagación a través del material. La velocidad de propagación en el material es un cociente entre la velocidad de propagación en la sonda y la velocidad de la onda en el vacío. La velocidad de propagación está relacionada con la permitividad dieléctrica de la siguiente manera.

$$v = \frac{2L}{t}$$

$$v_p = \frac{2L}{ct}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2$$

Donde v es la velocidad de propagación de la onda, v_p la velocidad de propagación en el material, L el largo, t el tiempo de propagación, c la velocidad de la onda en el vacío y ϵ la permitividad eléctrica.

Las mediciones de humedad del sensor en el dominio del tiempo relacionan la cantidad volumétrica de agua a la permisividad efectiva de la muestra. Para este propósito curvas empíricas de calibración son usualmente extrapoladas de resultados experimentales. Además de las curvas de calibración empíricas, algunos modelos de mezcla de dieléctricos han sido propuestos para describir la relación entre la permisividad eléctrica y la cantidad de agua. Los modelos de mezcla de dieléctricos están basados en la representación dieléctrica de cada componente del medio. Estos modelos pueden estimar la constante dieléctrica resultante a partir de la constante dieléctrica de cada uno de los componentes del medio, así son particularmente útiles para la caracterización de materiales heterogéneos.

El comportamiento dieléctrico de materiales porosos o granulares que llenan el espacio de la sonda del sensor TDR es altamente influenciado por el porcentaje de aire, agua y las partículas sólidas del material. Como resultado el material tiene una permisividad aparente. El agua tiene la permitividad más elevada (aproximadamente 80, la permitividad del aire es aproximadamente 1). Como el agua tiene la contante más alta, la permisividad aparente depende fuertemente del contenido de agua de la muestra y puede ser utilizada para estimar el contenido de agua de la muestra.

2.6 TECNOLOGÍA GPR

Las técnicas de radar de penetración terrestre (GPR) están basadas en la utilización de ondas de radar. De manera básica consisten en dos antenas, una emite una señal de radar y cuando esta se encuentra con una variación en el medio de propagación, por ejemplo un cambio de permitividad, parte de la señal es reflejada y la otra antena recibe la señal, registrando el tiempo y la amplitud de esta, tal como muestra la Ilustración 10.



Ilustración 9: Mala Pro Ex Gpr

Estas técnicas han sido utilizadas por distintos investigadores para caracterizar el contenido de agua del suelo, usando sondeos de altas frecuencias en perfiles de reflexión, que son cuando las dos antenas se mueven en conjunto a través de un camino creando un plano de reflectividades como muestra la parte a de la Ilustración 10 y sondeos de punto medio común (CMP) para medir de forma cuantitativa la distribución del contenido de agua, que es cuando con un punto medio fijo las antenas son alejadas una de la otra de forma uniforme tal como muestra la parte b de la Ilustración 10. Los perfiles de reflexión proveen información de alta resolución sobre el tiempo de viaje de las ondas electromagnéticas entre puntos estratégicos mientras que los resultados del CMP permiten la determinación de la profundidad de las interfaces medidas en el perfil de reflexión.

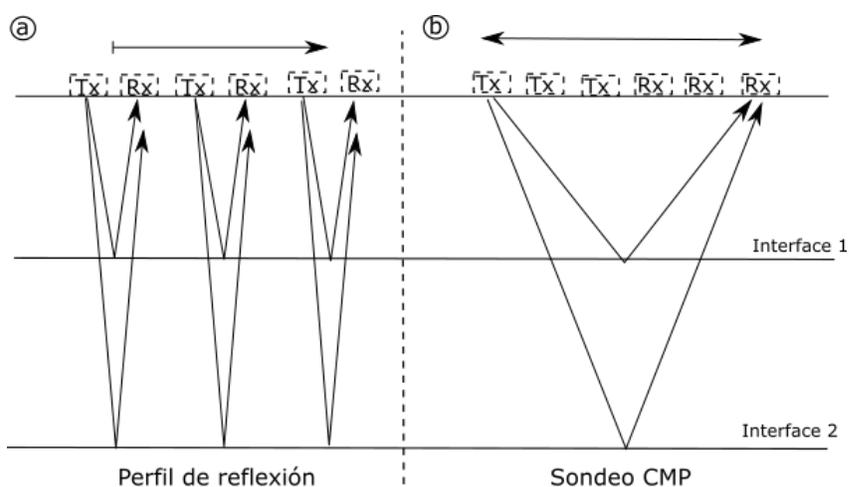


Ilustración 10: Esquemático ilustrando un perfil de reflexión (a) y un sondeo de punto medio común (b). Tx representa la antena transmisora y Rx la antena receptora. Steelman (2012).

La operación de este equipo, como se mencionó anteriormente, está basado en la propagación y reflexión de las ondas electromagnéticas en los materiales. Hay tres propiedades que afectan el comportamiento del GPR, la permitividad eléctrica (ϵ), la permeabilidad magnética (μ) y la conductividad eléctrica (σ). Aun así no todos estos parámetros proveen información relevante al GPR.

La conductividad eléctrica generalmente afecta la penetración del GPR, debido a la absorción de las ondas de radar en el medio. Cualquier medio con un alto contenido de humedad aumenta su conductividad, por ende disminuyendo la penetración de la onda. La conductividad eléctrica de la mayoría de los materiales para ingeniería es generalmente baja. También la permeabilidad magnética generalmente es despreciable salvo para materiales ricos en óxido de hierro. Es por esta falta de materiales magnéticos en los materiales que la permeabilidad no entrega mucha información útil debido a su bajo contraste en los pulsos electromagnéticos irradiados. La

permitividad eléctrica provee una mayor variación en las ondas reflejadas. Esto resulta en una buena caracterización de los materiales.

Los GPR han probado ser muy útiles en el estudio de contenido de agua, al tener una buena profundidad de investigación, la cual es dependiente de la frecuencia de la antena utilizada. Bajas frecuencias con grandes longitudes de onda tienen la mejor penetración. A diferencia de altas frecuencias con bajas longitudes de onda tienen mejor resolución, pero menor penetración. Para la elección del equipo adecuado debe sacrificarse una característica en función de la otra, siendo imperativo determinarlas para cada uso en particular, ya que además al ser estos valores dependientes del material a observar no pueden determinarse por adelantado.

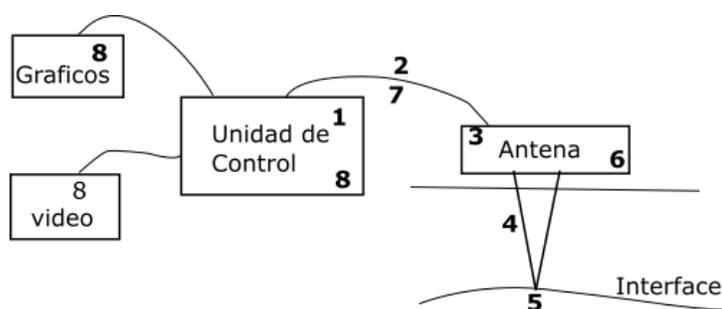


Ilustración 11: Esquema funcionamiento GPR

A continuación se ilustra cada paso de una medición GPR en función de las partes presentadas en la Ilustración 11.

- 1) Un disparador genera pulsos en la unidad de control a una tasa de repetición normal de 50 KHz.
- 2) El pulso es enviado a través del cable de control al transmisor electrónico en el transductor.
- 3) En el transductor, cada pulso es transformado en un pulso bipolar con una amplitud mayor que el pulso gatillado. La forma del pulso varía con la antena. (de Digital a analógico).
- 4) El pulso transmitido se propaga entonces a lo largo de la antena y es radiado hacia el subsuelo. El tamaño de la antena y las propiedades del subsuelo determinan la frecuencia de la energía que se propaga.
- 5) En el subsuelo, las reflexiones ocurren en los límites donde existe contraste en las propiedades dieléctricas. La porción de señal reflejada regresa a la antena.
- 6) El receptor en la antena detecta la señal que retorna y la envía a la unidad de control.

- 7) En la unidad de control la señal es procesada y mostrada.
- 8) La salida del gráfico grabado o desplegado en el monitor es una representación de la señal analógica.
 - El eje horizontal es la distancia a lo largo de la superficie.
 - El eje vertical es el tiempo doble de tránsito en nanosegundos.
 - La amplitud de la señal determina la gama de grises o de color en la impresión o en la pantalla del monitor.

3 ELECCIÓN DE SENSOR

Dentro de los sensores estudiados, GPR, NIR, FDR y TDR se realiza un procedimiento de toma de decisiones conocido como proceso analítico jerárquico (AHP) para decidir el más apto para la investigación. Este método está basado en la cuantificación de los diferentes criterios relevantes para la selección, y la comparación de cada sensor dentro de estos criterios de forma independiente, para además de ponderar los criterios entre ellos para determinar cuales tienen mayor relevancia, para finalmente agregar estos resultados y obtener una puntuación global final. Esta puntuación es usada para indicar la preferencia para cada sensor, siendo el que posee la puntuación más alta, el preferido.

3.1 ALTERNATIVAS

Seis diferentes sensores fueron considerados en el estudio, dentro de 4 categorías. Estas categorías son las mencionadas anteriormente, espectrómetro de infrarrojos cercanos (NIR), reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) y radar de penetración terrestre (GPR).

Espectrómetro de infrarrojos cercanos: se evaluó el IR-3000 de MoistTech, evaluado en USD\$ 7000. Se muestra en la Ilustración 12.



Ilustración 12: IR-3000 Moistech

Reflectometría en el dominio de la frecuencia: se evaluó el CS616, debido a su pequeño tamaño, múltiples unidades son necesarias para abarcar toda la superficie del punto de extracción. Tiene un valor de USD\$ 1000 la unidad. Se muestra en la Ilustración 13.



Ilustración 13:CS616

Reflectometría en el dominio del tiempo: Se evaluó los sensores Acclima. Como el sensor anterior tiene el problema de dimensiones, ya que abarca un área muy pequeña, son necesarias múltiples unidades. Su tiempo de respuesta es de 28s. Su precio es de USD 10000.

Radar de penetración terrestre: se evaluaron 3 sensores usando antenas en torno a las 100 Mhz, un Mala Pro Ex con una resolución de 25cm, una penetración máxima de 9 metros y un precio de USD 62000; Un GSSI SIR 3000 con las mismas características pero más pesado, a un precio de USD 46000; y un DesertGold GPR con una resolución de 50cm y una penetración máxima de 9 metros, a un precio de USD 4000.



Ilustración 14: Unidad de control GSSI Sir 3000 GPR

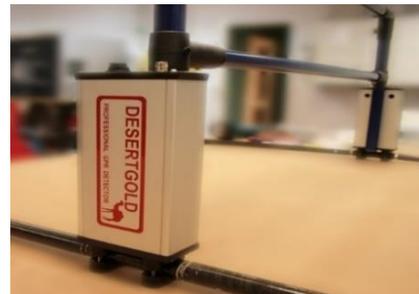


Ilustración 15:Desertgold GPR

3.2 METODO DE SELECCIÓN

Cuando se ha identificado el objetivo del problema, las alternativas y los criterios que gobiernan el proceso de comparación. La aplicación de AHP se vuelve sencilla y puede ser descrita en los siguientes pasos.

Paso1: Definir la jerarquía de la decisión. La Tabla 2 muestra la lista de criterios y sus descripciones, los cuales serán usados como base para la comparación entre los sensores.

Tabla 2: Criterios de selección

Criterio	Comentario
Precisión	Incertidumbre de los resultados
Extensión sondeo	Volumen abarcado por sondeo
Portabilidad en tamaño	Transporte entre puntos de extracción
Portabilidad en peso	Transporte entre puntos de extracción
Capacidad de actualización	Posibilidad de reforzar o actualizar
Facilidad de uso	Necesidad de entrenamiento
Número de unidades	Cantidad de sensores requeridos
Resistencia a impactos	Calidad de la construcción
Filtrado de ruido	Calidad del software
Garantía	Tiempo de garantía
Servicio post-venta	Facilidad de acceso a la compañía
Precio	Valor del producto

Paso 2: La comparación se lleva a cabo en pares, tanto de los criterios, como de las alternativas en cada criterio. Comparando cada sensor con otro, un par a la vez por criterio. Esto se hace para determinar los pesos de cada criterio y como se desempeña cada alternativa en un determinado criterio. Empezando por el nivel de las alternativas, la importancia relativa de una alternativa con respecto a la otra con respecto al mismo sub-criterio en la jerarquía de decisión puede ser determinada por la escala de Saaty mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3: Escala de Saaty

Intensidad de la importancia	Definición
1	Igualmente importante
3	Levemente más importante
5	Fuertemente más importante
7	Muy fuertemente más importante
9	Extremadamente más importante
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios.

De acuerdo a Saaty, el peso relativo de la alternativa “i” comparada con la alternativa “j” con respecto al mismo sub-criterio se puede obtener de una escala de 9 puntos y asignada a la posición (i, j) de la matriz de comparación.

La comparación entre dos componentes tales como el criterio “Ci” y “Cj” se realiza haciendo preguntas del tipo: De estos dos criterios, cual es más importante y por cuánto. La escala de Saaty transforma los juicios verbales de la preferencia relativa de un componente al otro a un

valor numérico, representado por el elemento (i,j) de la matriz, lo que se traduce en una matriz de 12x12 para los criterios y 12 matrices de 6x6 para las alternativas.

Paso 3: Los pesos son obtenidos de las matrices extrayendo los valores propios y normalizándolos de modo que su suma de uno. Índices y razones de consistencia son calculadas para determinar si la toma de decisiones es lógica y consistente. Si la razón es inferior a 0.1, las relaciones son consistentes.

Paso 4: Los pesos de cada componente son agregados para obtener el resultado final para cada alternativa.

3.3 RESULTADOS

Los pesos relativos obtenidos de las matrices de comparación de criterios son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4: Pesos relativos entre criterios

Criterio	Peso
Precisión	0,050829172
Extensión sondeo	0,20055304
Portabilidad en tamaño	0,129713668
Portabilidad en peso	0,097980855
Capacidad de actualización	0,050048402
Facilidad de uso	0,0878303
Número de unidades	0,079580277
Resistencia a impactos	0,085911336
Filtrado de ruido	0,060911936
Garantía	0,060174243
Servicio post-venta	0,031829793
Precio	0,064636979
Índice de consistencia	0,098582176

Es evidente que dos categorías resaltan, están son extensión del sondeo y la portabilidad, lo cual es evidente por el problema a resolver. Debido a que los puntos de extracción son amplios y profundos, y el objetivo es conocer la humedad de toda el área, siendo lógico que este criterio tenga preferencia. Además como existen muchos puntos de extracción, el transporte entre estos debe ser

sencillo, lo que otorga prioridad a la portabilidad. Por otro lado el servicio post venta tiene el puntaje más bajo, ya que se desarrollaran herramientas que utilicen el sensor y no será utilizado como viene de fábrica. Por ultimo de esta tabla podemos confirmar que el índice de consistencia es 0.0986, lo que es menor a 0.1, indicando la consistencia de la toma de decisiones.

La Tabla 5 muestra los pesos para cada criterio de cada sensor, además del índice de consistencia (IC) para cada comparación dentro del criterio entre las alternativas.

Tabla 5: Pesos relativos e índice de consistencia de cada criterio

Criterio	GPR desertgold	GPR mala	GPR gssi	TDR	FDR	NIR	IC
Precisión	0,082	0,144	0,144	0,196	0,105	0,33	0,034
Extensión sondeo	0,236	0,311	0,311	0,048	0,03	0,064	0,038
Portabilidad en tamaño	0,111	0,111	0,111	0,312	0,312	0,043	0,004
Portabilidad en peso	0,1	0,1	0,1	0,336	0,336	0,03	0,03
Capacidad de actualización	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,091	0
Facilidad de uso	0,14	0,217	0,217	0,057	0,057	0,313	0,018
Número de unidades	0,277	0,277	0,277	0,054	0,054	0,061	0,068
Resistencia a impactos	0,096	0,234	0,234	0,109	0,109	0,218	0,004
Filtrado de ruido	0,129	0,314	0,314	0,049	0,049	0,146	0,004
Garantía	0,076	0,327	0,327	0,093	0,067	0,11	0,047
Servicio post-venta	0,099	0,329	0,329	0,065	0,065	0,113	0,021
Precio	0,23	0,028	0,036	0,116	0,378	0,211	0,037

Todos los índices de consistencia son inferiores a 0.1, por ende se consideran consistentes. Considerando los criterios más importantes, los GPR tienen un puntaje mucho mayor, lo que es consistente debido a las diferencias de rango. Un TDR o FDR solo tienen un alcance de unos centímetros, mientras que los GPR estudiados llegan hasta los 10 metros.

La Tabla 6 muestra los resultados finales agregados para cada alternativa.

Tabla 6: Resultado final

Sensor	Puntaje
GPR desertgold	0,157683674
GPR mala	0,215119005
GPR gssi	0,215640698
TDR	0,138930923
FDR	0,146005362
NIR	0,126620338

Los tres GPR son los que tienen el puntaje mayor, debido a que son los que poseen el mayor alcance en rango y son los más sencillos de transportar. Entre ellos su principal diferencia es la calidad de construcción y el software que los acompaña. Siendo los primeros dos de compañías líderes en el mercado y el último de una firma menos conocida, orientada a un público más general con una construcción más simple y menos sofisticada. De hecho el precio de tanto el Mala como el GSSI es 9 veces mayor que el Desertgold. Finalmente el equipo NIR tiene el puntaje más bajo, principalmente debido a la necesidad de estar fijo y por ende no es portable.

Finalmente se concluye que la tecnología GPR es la más indicada para desarrollar un prototipo y cuál de los sensores se debe adquirir para desarrollar un prototipo funcional depende íntegramente del presupuesto del proyecto.

4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Se procede a presentar el método utilizado y la forma de obtención y procesamiento de datos.

4.1 METODOLOGIA

Tras la obtención de la información del sensor GPR, se obtiene la información que muestra el perfil de la onda reflejada en el tiempo, mostrando la amplitud en los puntos en donde esta fue reflejada.

Para relacionar las señales del GPR a las propiedades relevantes del medio, se asume propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia a través de medios no magnéticos. Además, para el modelo, baja conductividad eléctrica. De esta manera, la permitividad relativa del medio, determina tanto la velocidad de propagación de las ondas del GPR ($v_{gpr} = c_0/\sqrt{\epsilon_r}$ donde c_0 es la velocidad de la luz en el vacío (0.3m/ns)) y la impedancia eléctrica del medio.

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Donde Z_0 es la impedancia del vacío, ϵ_r la permitividad relativa y Z la impedancia del medio.

La secuencia de inversión se basa en que el medio puede ser representado como un conjunto de capas horizontales homogéneas. Además se asume que la señal GPR ($D(t)$) puede ser tratada como una señal plana unidimensional que puede ser modelada mediante la convolución de una serie de reflectividades $R(t)$ con una onda estacionaria de banda limitada $W(t)$.

$$D(t) = R(t) \otimes W(t)$$

Donde \otimes representa la convolución. El coeficiente de reflexión normal correspondiente en la frontera

$$R_n = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r_n}} - \sqrt{\epsilon_{r_{n+1}}}}{\sqrt{\epsilon_{r_n}} + \sqrt{\epsilon_{r_{n+1}}}}$$

Donde R es el índice de reflexión y el sub índice de cada término determina el número de la capa del modelo que corresponde.

Las características vectoriales del patrón de radiación de la fuente de emisión pueden ser ignoradas debido a lo asumido previamente. $W(t)$ se consideró estacionario, por ende, su amplitud decae con el tiempo de propagación y la dispersión, y estos no están modelados por las ecuaciones anteriores.

4.1.1 ESTRATEGIA DE INVERSIÓN.

El esquema de inversión para extraer las propiedades físicas de la información reflejada por el GPR consiste en los siguientes pasos principales:

- Escalar determinísticamente la amplitud para compensar las pérdidas de la propagación debido a absorción, difracción y pérdidas de transmisión.
- Deconvolución GPR para eliminar el wavelet de la fuente del GPR y así producir una imagen más precisa de la sub-superficie.
- Deconvolución sparse-spike para recuperar una estimación de la reflectividad de la información pre condicionada.
- Integración de banda limitada y ajuste para obtener un estimador de banda limitada de la impedancia y de la permitividad relativa.
- Recuperación de la impedancia en todo el ancho de banda usando información adicional.
- Estimación de la cantidad de agua.

La amplitud de la reflexión decae con el tiempo de propagación. Compensar esto es la clave para más tarde poder recuperar de manera exitosa la reflectividad. Una forma de hacerlo es usando funciones de ganancias basadas en el inverso del modelo de amplitud determinística.

$$A_t(t) = A_o(t) \frac{1}{t^n} \exp(-\alpha t)$$

Donde $A_t(t)$ y $A_o(t)$ son la amplitud verdadera y medida respectivamente, t el tiempo y α es el parámetro a ajustar.

La deconvolución GPR es la clave para quitar las distorsiones de la información de reflexión registrada debido a la forma de la fuente de irradiación, la cual posee diversas fases mezcladas. Las rutinas de deconvolución estándar involucran generalmente la estimación de la radiación fuente asumiendo fase mínima, lo cual no es satisfeco generalmente por el GPR, o necesitan conocer la forma de la radiación incidente, lo cual es muy difícil para registros en terreno. Por otro lado la rutina implementada apunta a recuperar la información sin asumir nada sobre la fase del espectro de radiación. En cambio está basado en una hipótesis más restrictiva involucrando la distribución

de la amplitud. Otro punto clave es el uso de información previa sobre la fuente, la que es incluida en un marco bayesiano para restringir la estimación. Se usa la deconvolución GPR para estimar la wavelet fuente original para cada traza y se reemplaza por una onda simétrica de fase cero $W(t)$, con un espectro de amplitud ecualizado sobre el ancho de banda de la señal. Como este proceso es llevado a cabo traza por traza, los efectos de la variación del acople de las antenas también son removidos. Si no se remueve el wavelet fuente de la información del GPR produciría errores en la amplitud y tiempo (profundidad) de los estimados de la permitividad y contenido de agua.

La migración convierte el campo de ondas 2D/3D en un campo unidimensional con resolución horizontal aumentada. Debido a las hipótesis del modelo convolucional, algoritmos sísmicos de migración pueden ser usados para el procesamiento. Después de los últimos 2 procesos, se espera que la información procesada $D(t)$ cumpla las hipótesis de la ecuación de convolución.

Para extraer un estimado de la serie de reflectividad de banda limitada, se usa una norma L_1 iterativamente volviendo a ponderar a través de mínimos cuadrados para la deconvolución sparse-spike. Esta invierte la ecuación de convolución asumiendo que la serie de reflectividad puede ser representada como una serie de picos. Este proceso entrega el tiempo y tamaño de los reflectores más grandes y recupera de manera efectiva la parte perdida de alta frecuencia de la reflectividad.

Los estimadores de la reflectividad se pueden relacionar a la impedancia de la sub-superficie invirtiendo la ecuación de la reflectividad. Asumiendo el conocimiento de la impedancia de la primera capa, se puede dar la forma general.

$$Z_n = Z_1 \prod_{i=1}^{n-1} \frac{1 + R_i}{1 - R_i}$$

Se usa una aproximación de la ecuación anterior.

$$Z_n = Z_1 \exp\left(2 \sum_{i=1}^{n-1} R_i\right)$$

Esta ecuación es solo válida para pequeños coeficientes de reflexión ($|R| < 0.3$). En la práctica se obtiene un estimado de la impedancia de banda limitada evaluando la ecuación anterior en el dominio de la frecuencia, integrando la reflectividad. Debido a que no se conoce la ponderación correcta de $W(t)$ al deconvolucionar, tampoco se puede obtener la ponderación correcta de $R(t)$. Información adicional se necesita para ponderarlas de manera correcta.

El ruido generalmente impide la recuperación de la parte perdida de baja frecuencia de $R(t)$, luego la reflectividad suave de fondo y la tendencia de impedancia, $Z_b(t)$ debe ser construida con información adicional. Luego la impedancia en todo el ancho de banda es:

$$Z(t) = \langle Z(t) \rangle + Z_b(t)$$

$Z_b(t)$ puede ser derivado de una sonda DP, CMP de alta calidad o información geológica del medio. Finalmente la impedancia puede ser transformada a permitividad y esta puede ser relacionada a la cantidad de agua mediante un modelo de calibración como la ecuación de Topp.

Si no se puede obtener información fidedigna sobre $Z_b(t)$, un estimador de banda limitada de la permitividad $\langle \epsilon_r \rangle$ puede ser obtenido evaluando el diferencial total de la relación entre permitividad e impedancia.

$$\langle \epsilon_r(t) \rangle = -2 \left(\frac{Z_0}{Z(t)} \right)^2 \frac{\langle Z(t) \rangle}{Z(t)} \approx -2 \left(\frac{Z_0}{Z_{ave}} \right)^2 \frac{\langle Z(t) \rangle}{Z_{ave}}$$

Donde Z_{ave} representa un valor promedio supuesto de la impedancia. En lugares donde la velocidad de GPR es casi constante, esta ecuación puede proveer modelos interpretables de la permitividad y la cantidad de agua.

En principio este proceso permite obtener las características de capas cuyo grosor es mayor a un cuarto de la longitud de onda utilizada para observación. Por ende una resolución de unos cuantos decímetros se pueden esperar de un registro con un GPR de 100mhz en condiciones no saturadas. ($v_{gpr} \approx 0,1$ m/ns).

4.2 SIMULACIONES

Para la realización de pruebas, los resultados serán simulados usando dos softwares, GPRMAX y MATGPR. Estas simulaciones estarán usando algoritmos de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). Estos softwares incorporan un simulador de ondas electromagnéticas para el modelamiento de GPR.

4.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DEL MODELAMIENTO GPR

La respuesta del GPR a un objetivo en particular o a un grupo de estos puede ser simulada resolviendo las ecuaciones de Maxwell sujeto a la geometría del problema y a la condición inicial.

La condición inicial, por ejemplo, la excitación de la antena propagadora del GPR, es definida para evitar la propagación a través del espacio alcanzando un valor de cero en el infinito. Esto es debido a que no existe ningún límite específico a la geometría del problema ni donde los campos electromagnéticos tomen algún valor predeterminado. El problema directo de GPR puede ser clasificado como uno de valor inicial con condiciones de bordes abierta.

En general el planteamiento FDTD para una solución numérica a las ecuaciones de Maxwell es discretizar tanto el tiempo como el espacio. Así el paso de la discretización espacial Δx , Δy y Δz y la temporal Δt juegan un rol importante, mientras más pequeños sean más cercano es el modelo a la representación real del problema. Aun así estos valores siempre deben ser finitos debido a que los computadores tienen capacidad de almacenamiento limitada y una velocidad de procesamiento finita. De esta forma el modelo FDTD representa una versión de tamaño limitado del problema real. La unidad mínima de la grilla FDTD se llama “Yee cell”.

La simulación comienza definiendo la estructura que será modelada e identifica el rango de longitudes de onda para los cuales computar una respuesta. Una grilla es definida basado en el espacio mínimo para poder resolver la longitud de onda de interés más pequeña y resolver los más pequeños detalles de la estructura.

La solución es obtenida de manera iterativa donde los campos electromagnéticos se propagan en la grilla FDTD. Los campos son simulados para una determinada ventana de tiempo especificando el número de iteraciones y cada iteración corresponde a un tiempo transcurrido de un Δt . La energía nunca puede viajar más de una grilla de espaciado en una iteración debido a la manera en la cual los campos son actualizados. De este modo el paso temporal debe ser suficientemente pequeño para reflejar de manera correcta los campos físicos. Los valores Δx , Δy , Δz y Δt no pueden ser asignados de forma independiente debido a su condición numérica de estabilidad que es conocida como condición CFL. La cual está dada por:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}$$

Donde c es la velocidad de la luz. De este modo Δt está delimitado por los valores de Δx , Δy y Δz . La condición de estabilidad para el caso de dos dimensiones se logra fácilmente dejando a Δz tender a infinito.

Como se estipulo anteriormente, la excitación de la antena del GPR debe ser definida primero para determinar la región de cálculo. Una condición aproximada conocida como condición de borde absorbente es introducida a una distancia suficiente de la fuente para truncar y limitar el espacio computacional absorbiendo cualquier onda que incida sobre ella.

4.3 DEMOSTRACIÓN METODOLOGÍA

Se crea un perfil de rocas con diferentes propiedades simulando distintos niveles de humedad. A modo de demostración se crea un perfil con 4 capas de diferente humedad las cuales a través de un modelo de mezcla tienen diferentes permitividades eléctricas. Tal como muestra la Ilustración 16. Este modelo es la entrada para el programa de simulación de ondas electromagnéticas de georadar, el cual transformara las diferentes capas del modelo en el resultado que se obtendría de utilizar un georadar para medir las propiedades de las rocas.

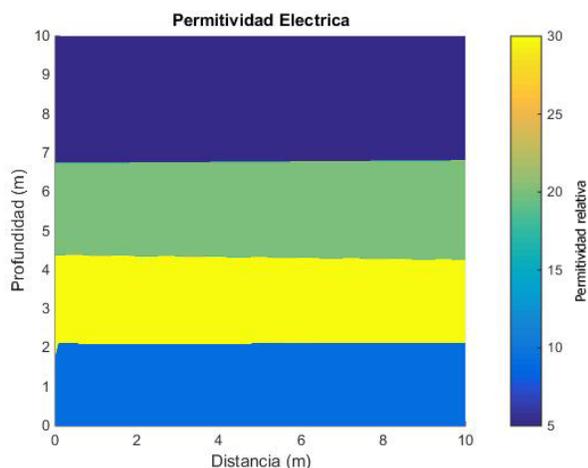


Ilustración 16: Permitividad eléctrica de un perfil

Los resultados de la simulación se muestran en la Ilustración 17. La profundidad está en milisegundos debido a que es el tiempo que le toma al equipo recibir la señal y más adelante este tiempo será transformado en distancia.

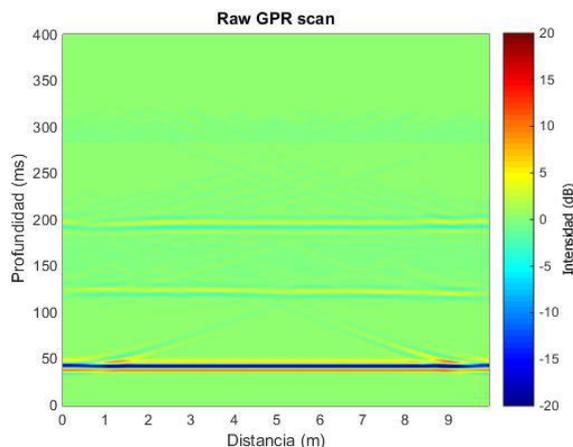


Ilustración 17: B-scan georadar

Se pueden apreciar claramente 3 zonas en donde hay un cambio de propiedades del material. Tras obtener los resultados de la simulación se procede con el tratamiento de datos. Los pasos son las correcciones de tiempo cero para poner el origen en el lugar correcto, el desfase DC para ubicar todo en función del origen, un filtro pasa alto, filtros varios para eliminación de ruido y una corrección determinística de la amplitud. En la Ilustración 18 y la Ilustración 19, se puede apreciar la compensación de la amplitud y el resultado del procesamiento de datos.

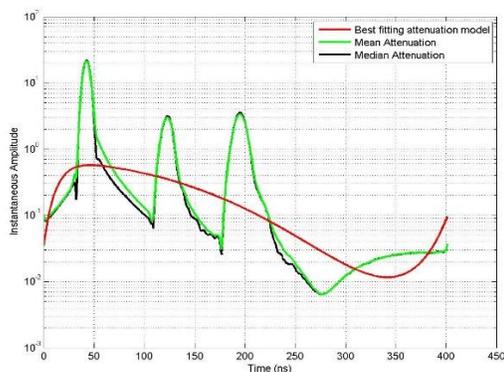


Ilustración 18: Perdida de amplitud.

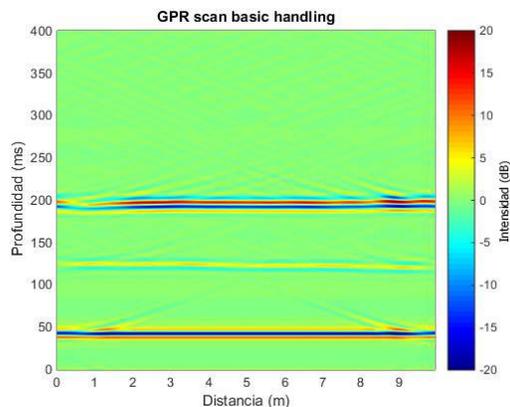


Ilustración 19: B-scan preprocesado.

Luego se procede a realizar las convoluciones con el fin de extraer el perfil de reflectividad de los materiales y borrar la influencias de la forma característica de emisión de ondas de las antenas del georadar. A continuación se muestran los resultados de la operación (Ilustración 20) y

los resultados tras aplicar diversos filtros como mediana, moda y punto máximo locales (Ilustración 21). Con el fin de identificar las interfaces y mostrar de manera puntual la reflexión.

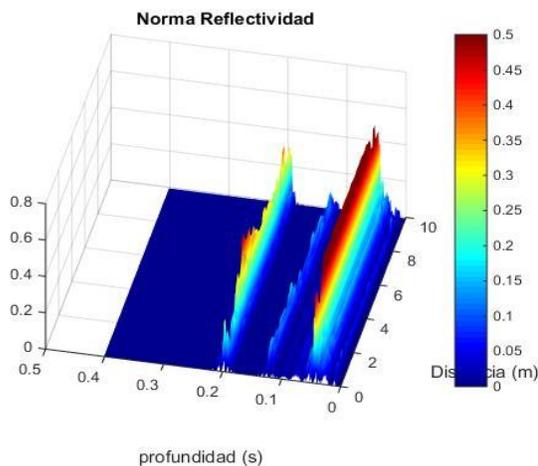


Ilustración 20: Reflectividad

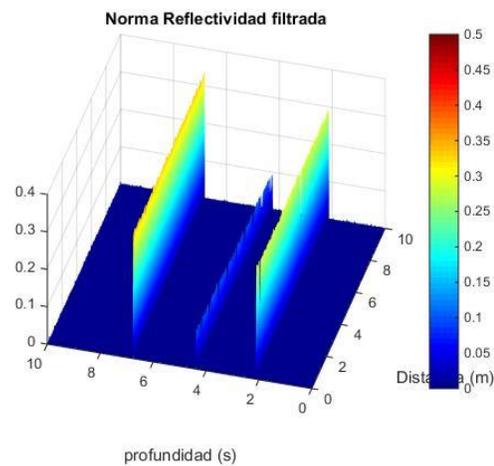


Ilustración 21: Reflectividad filtrada

Luego se recupera la impedancia de los materiales (Ilustración 22), usando la estrategia de inversión señalada anteriormente. Y de tener datos sobre los perfiles medidos se pueden hacer las correcciones para los datos. Se salta este paso ya que al ser una simulación y poseer de antemano todas las características del material sería sesgado agregar más datos a los resultados. Por ende se resuelve para un ancho de banda limitado. Obteniendo aproximaciones de los valores reales (Ilustración 23).

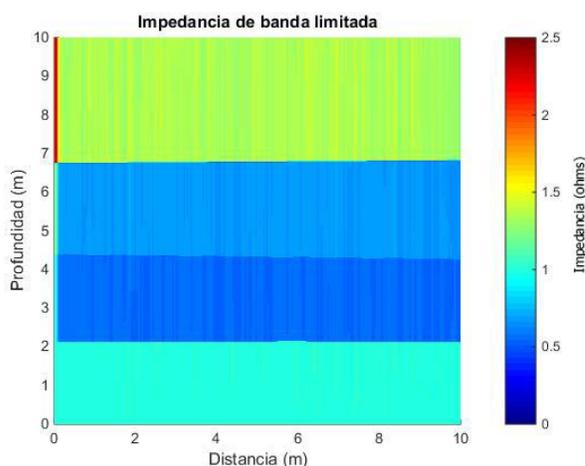


Ilustración 22: Impedancia para un espectro de frecuencia limitado

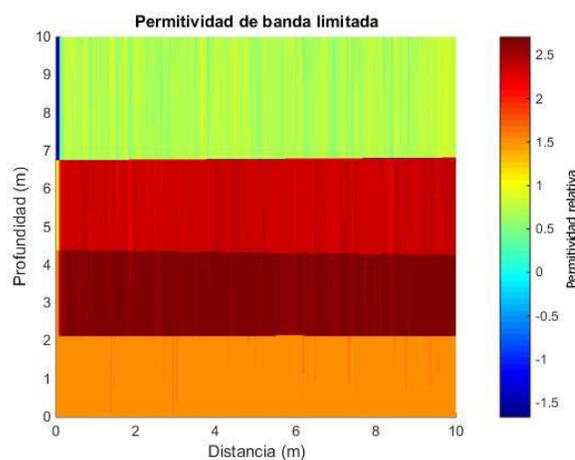


Ilustración 23: Permitividad para un espectro de frecuencia limitado

Luego para transformar a valores de contenido de agua hay que utilizar alguna ecuación de calibración, además de agregar información para complementar la información limitada en ancho de banda, con el fin de obtener la permitividad de espectro completo. A modo de ejemplo se utiliza la ecuación de Topp para estimar el contenido de agua y se muestran los resultados en la Ilustración 24.

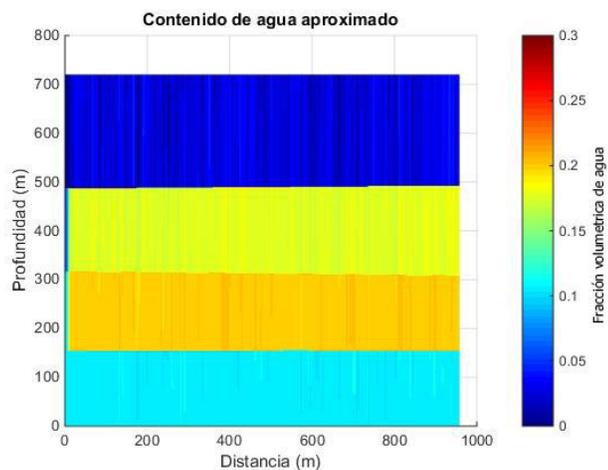


Ilustración 24: Contenido de agua aproximado

5 APLICACIÓN MINERA

De manera evidente para la utilización del sensor en ambientes mineros se deben tomar precauciones adecuadas, además de seleccionar los mejores parámetros para una medición óptima.

5.1 CONSEJOS DE UTILIZACIÓN

En primer lugar se debe posicionar el sensor lo más próximo posible al mineral fragmentado, debido a que la interfaz de aire puede generar errores en la medición. Si bien dentro del tratamiento de datos existe un método para la corrección del tiempo cero, es preferible disminuir la fuente de errores al mínimo. Esta distancia depende de 3 factores principales, el ángulo de reposo del material en el punto de extracción (β), en ángulo de orientación del centro de la antena del sensor con respecto al suelo (α) y el largo de la antena (L). Estos parámetros se muestran en la Ilustración 25.

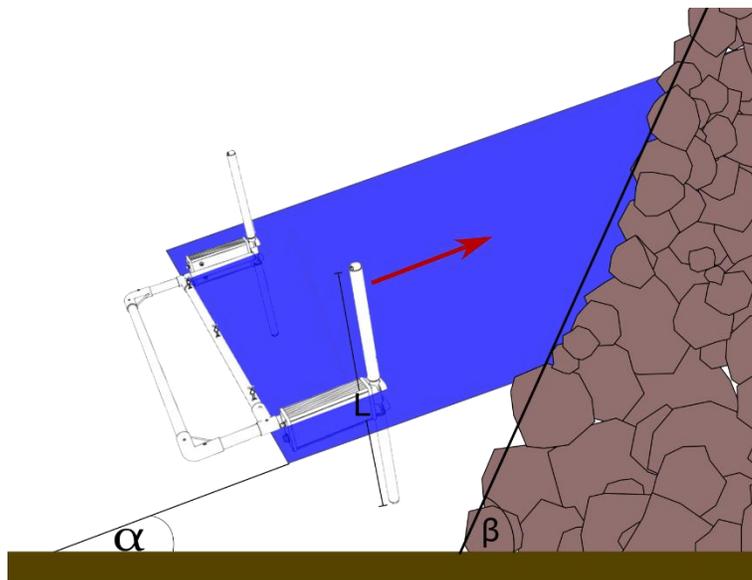


Ilustración 25: Plano de medición del sensor

La distancia mínima a la cual debe ubicarse el sensor se puede calcular mediante la siguiente fórmula.

$$Dm = \frac{L \cos(\alpha - \beta)}{2 \sin(\beta)}$$

La Tabla 7 muestra en función del largo de la antena, la proporción que tiene esta con la distancia mínima. Como ejemplo si la antena es de 1 metro, el ángulo de reposo es de 45° y el

ángulo de orientación del sensor es 0° , la distancia mínima a la que se debe ubicar el sensor es 0,5 metros con respecto al centro de la antena, en donde además la punta inferior de la antena apenas roza la pila de material.

Tabla 7: Distancia mínima del sensor, en función del largo de la antena para distintos ángulos

β	α	0°	10°	20°	30°
35°		0,71	0,79	0,84	0,87
45°		0,50	0,58	0,64	0,68
60°		0,29	0,37	0,44	0,50

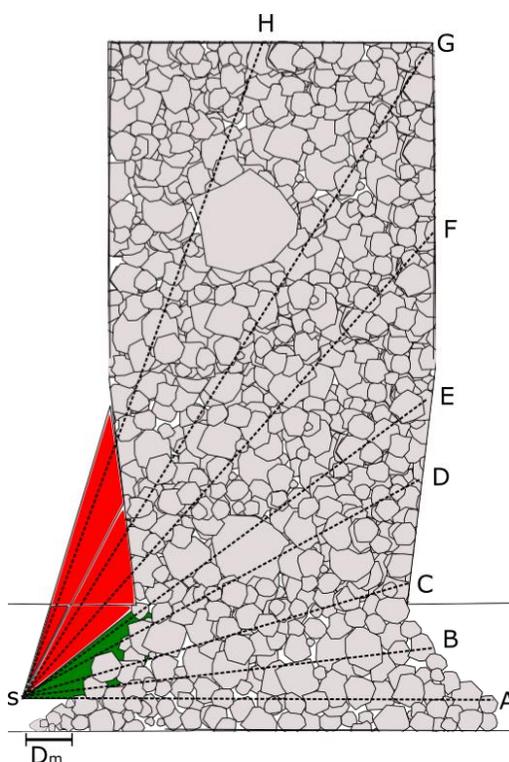


Ilustración 26: Diferentes ángulos de medición para los planos bidimensionales de medición. La zona verde representa el área anterior al ángulo crítico, dentro de los alcances de esta memoria. La zona roja representa el área posterior al ángulo crítico, una zona en donde las mediciones poseerán mayor ruido y error debido a los alcances de la memoria. Finalmente la línea punteada representa distintos planos de medición.

El sensor debe ser sujetado por el mango y orientado en dirección a la pila de rocas del punto de extracción, tal como muestra la Ilustración 25, para una medición exitosa se debe desplazar suavemente el sensor en la dirección que se quiere generar el plano de medición, evitando movimientos bruscos que pueden generar un desfase entre las antenas de emisión y recepción. Esta zona se muestra como el plano azul de la figura anterior, y en función de esta figura el eje de desplazamiento es el que se ubica hacia dentro o fuera del plano de la imagen. Dependiendo del

plano de mineral fragmentado que se desea medir se puede orientar el sensor en diferentes ángulos. El ángulo de orientación del sensor se puede observar en la Ilustración 25, el cual es denominado como α . De este modo si se desea una medición de la capa inferior del punto de extracción este debe orientarse paralelo al suelo, lo cual generara una medición entre los dos puntos de extracción para la misma batea, lo que está representado por el plano A en la Ilustración 26. En cambio si se desea observar un nivel superior de la columna este debe ser orientado cada vez en un mayor ángulo (α) con respecto al suelo, hasta un ángulo crítico, que es cuando el sensor apunta al vértice entre la columna y el punto de extracción, esto se puede apreciar de mejor manera en la Ilustración 26, en donde el ángulo crítico es mostrado entre la frontera de las zonas roja y verde. Debido al armazón metálico del que refuerza la estructura, posterior a este punto se genera un mayor índice de error, producto de la atenuación de la señal por la conductividad del hierro y la influencia de la permitividad magnética en los cambios de la señal.

Posterior a este ángulo se puede seguir midiendo para encontrar resultados, por ejemplo los planos F, G y H de la última ilustración, pero al medir fuera de la columna de rocas el sensor debe pasar a través del espacio de suelo entre en punto de extracción y la columna, además de los marcos del punto de extracción están fabricados con una malla de hierro reforzada con concreto. Este último modifica en gran medida la medición y se debe desarrollar un algoritmo adicional para compensar por las pérdidas y cambios de la señal al pasar por este medio, lo cual incrementa el error de la medición. Además de que al estar cada vez más alejada la zona de interés de medición se incrementa el error del artefacto, siendo cada vez más difícil identificar cada porción de la señal recibida, principalmente debido a la mayor atenuación de la señal de interés y por ende del incremento de la proporción ruido-síñal.

5.2 PROFUNDIDAD Y FRECUENCIA

Tal como se mencionó en el capítulo 2, existe una relación inversa entre la frecuencia de la antena utilizada por el GPR en la medición y la profundidad máxima de la medición. Usando las relaciones de atenuación de ondas electromagnéticas, la penetración máxima en los materiales y las propiedades estimadas de los parámetros eléctricos en las rocas para El Teniente, se estima la máxima profundidad para el GPR. La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos.

Tabla 8: Relación frecuencia de las antenas con la profundidad máxima de la señal radar.

Frecuencia (MHz)	Profundidad (m)
500	1,5
200	2,5
100	10
50	15
25	35

5.3 RESOLUCIÓN VERTICAL Y FRECUENCIA

De la misma manera que la frecuencia afecta la profundidad, esta afecta la resolución. Esta depende de manera directa de la frecuencia, es decir, a mayor frecuencia, mejor resolución, lo que implica que el espesor mínimo que puede resolver para un objeto es más pequeño. Este es un cuarto de la longitud de onda y esta varía con la frecuencia y las propiedades eléctricas del objetivo. A continuación se presenta una tabla con los valores referenciales para la roca de el teniente.

Tabla 9: Relación frecuencia de las antenas con la espesor mínimo detectable por el radar

Frecuencia (MHz)	Espesor mínimo (m)
500	0,05
200	0,15
100	0,25
50	0,5
25	1

Esto implica que zonas con propiedades diferentes que sean inferiores en tamaño vertical al espesor mínimo pueden no ser detectadas de manera precisa por el sensor.

5.4 FRECUENCIA Y LARGO ANTENAS

En función de la frecuencia requerida, el largo de las antenas también varía, siendo las antenas más grandes pertenecientes a las frecuencias más bajas. Si la frecuencia de la antena es muy baja, la antena podría no tener espacio suficiente para ser desplegada frente al punto de extracción.

Tabla 10: Relación frecuencia con el largo de las antenas sin protección

Frecuencia (MHz)	Largo antena (m)
500	0,2
200	0,5
100	1
50	2
25	4

Aun así con mejores protecciones y diseños de antenas no tubulares se puede reducir el tamaño de estas. A pesar de esto es muy difícil encontrar en el mercado antenas de estas características.

5.5 FRECUENCIA IDEAL

Finalmente se deben tomar en consideración estos datos para escoger la frecuencia ideal. Sacrificando resolución por profundidad o al revés. Se recomienda tener una resolución superior a 0,5 m, debido a que si no hay mucha información que puede perderse gracias a las condiciones heterogéneas de la mina, donde el sensor pasara por alto las zonas diferentes inferiores en espesor a la resolución. Se recomienda una antena de 100 MHz, la cual entrega un óptimo entre buena penetración, resolución aceptable y un tamaño del sensor adecuado para los puntos de extracción en minería subterránea.

Tabla 11: Cuadro resumen de los parámetros que modifica la frecuencia.

Frecuencia (MHz)	Profundidad (m)	Espesor mínimo (m)	Largo antena (m)
500	1,5	0,05	0,2
200	2,5	0,15	0,5
100	10	0,25	1
50	15	0,5	2
25	35	1	4

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se simulan dos posibles escenarios, con zonas de contenido volumétrico de agua de diferentes tamaños, los cuales serían posible de encontrar en el punto de extracción minero. Obteniendo su sondeo de GPR para luego convertirlo a permitividad eléctrica y contenido de agua.

6.1 CASOS SIMULADOS

Se presentan las siguientes distribuciones de humedad representados como modelo de mezclas dieléctricas en la Ilustración 27 y la Ilustración 28.

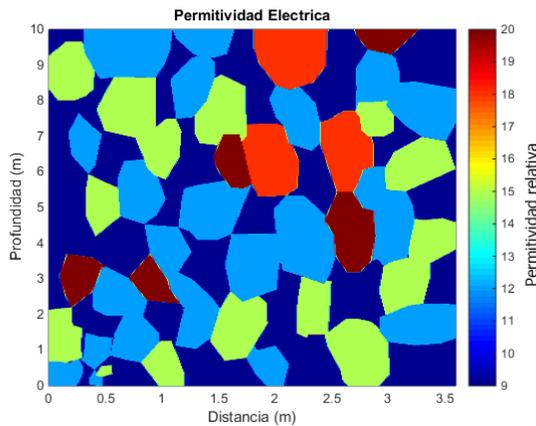


Ilustración 27: Permitividad eléctrica de zonas de humedad para el caso 1.

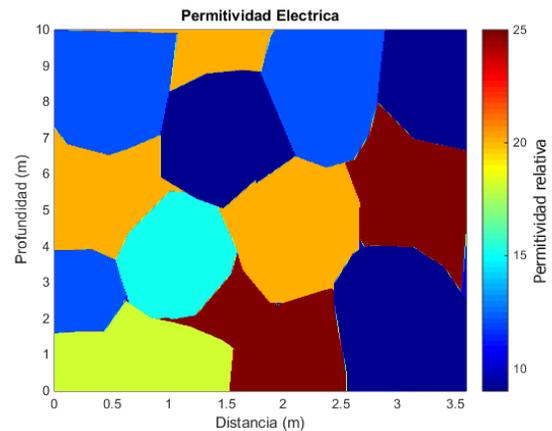


Ilustración 28: Permitividad eléctrica de zonas de humedad para el caso 2.

Cada polígono en los gráficos representa una zona con una permitividad eléctrica determinada, la cual en si con una transformación adecuada representa un determinado contenido de agua volumétrico. Los contenidos porcentuales de agua en cada zona se representan a continuación en la Ilustración 29 y la Ilustración 30. Se puede observar que ambos casos bordean los criterios críticos de humedad según la matriz de riesgo de la Ilustración 3, representado de manera idónea el problema de la mina. Para el caso 1 la humedad promedio del conjunto es 8% y para el caso dos es de 10%.

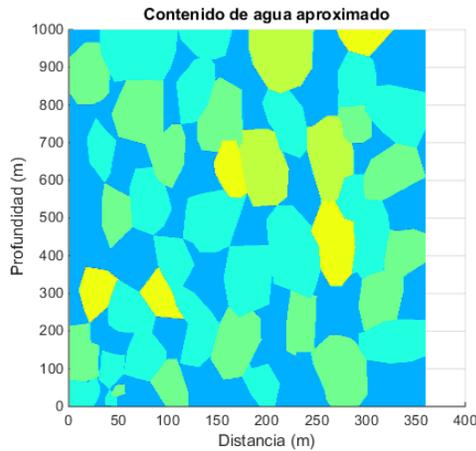


Ilustración 29: Porcentaje de agua en las rocas para el caso 1.

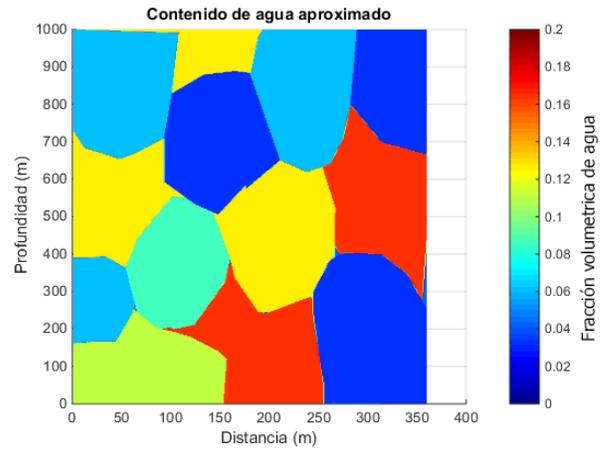


Ilustración 30: Porcentaje de agua en las rocas para el caso 2.

6.2 RESULTADOS SIMULACIÓN

Se presentan los sondeos GPR de cada caso tras el pre-tratamiento de los datos en la Ilustración 31 y la Ilustración 32.

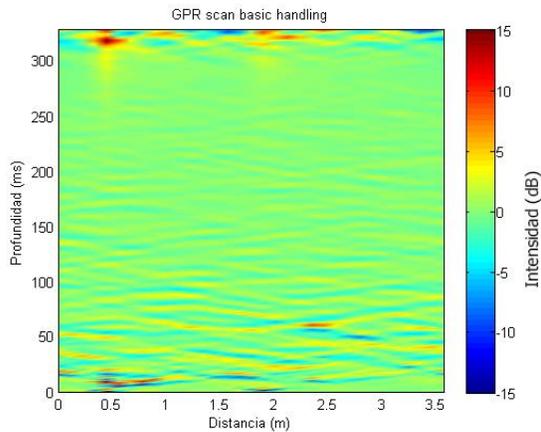


Ilustración 31: Sondeo GPR para el caso 1.

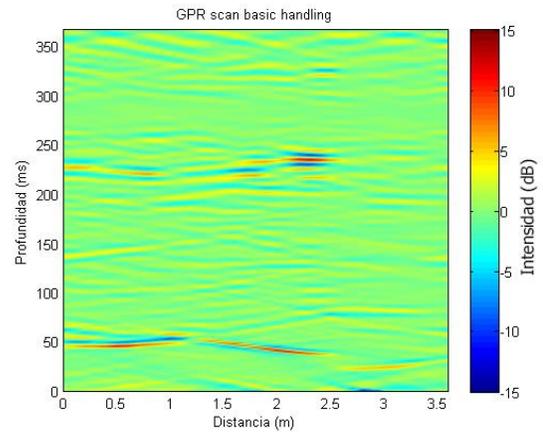


Ilustración 32: Sondeo GPR para el caso 2.

A pesar de no haber filtrado el patrón de radiación de la onda ya se puede observar información importante de los gráficos presentados. Se observan zonas rojas que significan sectores en donde el cambio de medio es más pronunciado, estos indican interfaces en donde cambian las propiedades del material. Además para estas mismas zonas se puede apreciar el fenómeno de pérdida de definición a causa de la profundidad, en el caso de la Ilustración 31, para tiempos de viaje de la onda superiores a 300 ns, los picos se observan borrosos, producto de que al recuperar al información a través de la compensación por la pérdida de amplitud, la proporción ruido-síñal es más importante para los sectores más alejados del origen.

También se observa que la cantidad de picos de grandes amplitudes es pequeña, siendo las ondas reflejadas en su mayoría de dentro de un rango de amplitudes determinado. Esto indica que los cambios de medio no son abruptos y las propiedades eléctricas de las zonas contiguas tienen un margen de variación pequeño. Si se aprecia la entrada de las simulaciones el contenido de agua fluctúa solo entre un 6% y un 14%, validando la hipótesis de pequeñas variaciones ya que producen pequeños índices de reflexión.

Se puede apreciar igualmente que patrón siguen las líneas de la misma magnitud (mismo color), las cuales tienen la tendencia a curvarse. Esto nos muestra un poco sobre el patrón de radiación de la antena. Debido a que la incidencia no es puntual, los puntos colindantes al centro del patrón de radiación vuelven a la antena receptora con un pequeño desfase, generando el tipo de ruido que se aprecia en forma de curvaturas.

6.3 RESULTADO TRATAMIENTO DE DATOS

Se presentan los resultados de la transformación de las mediciones del GPR a permitividad eléctrica, los cuales además están migrados para convertir tiempo de viaje de las ondas a profundidad en metros.

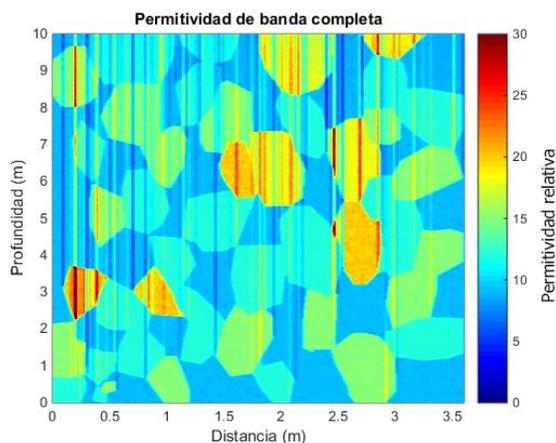


Ilustración 33: Inversión de banda completa de permitividad para el caso 1.

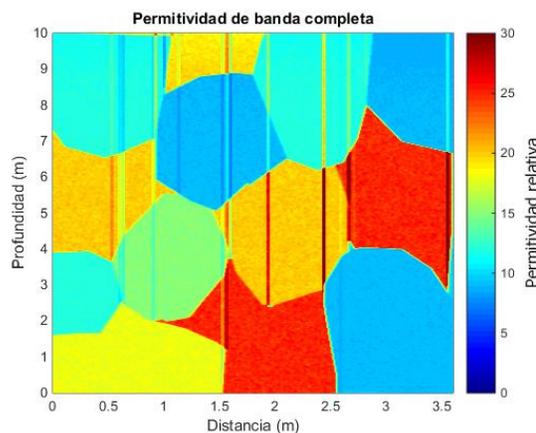


Ilustración 34: Inversión de banda completa de permitividad para el caso 2.

Luego la transformación a contenido volumétrico de agua según la ecuación de Topp adaptada para ser usada en las condiciones del problema.

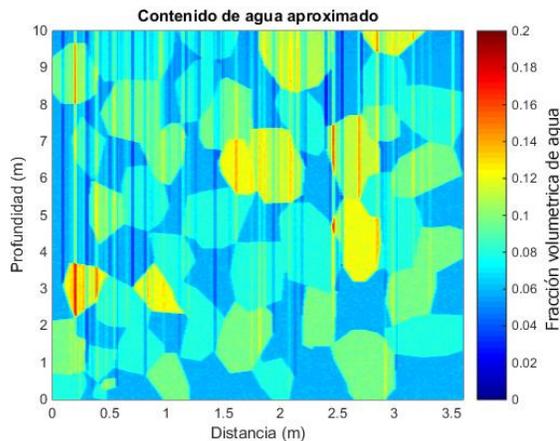


Ilustración 35: Contenido volumétrico de agua para el caso 1.

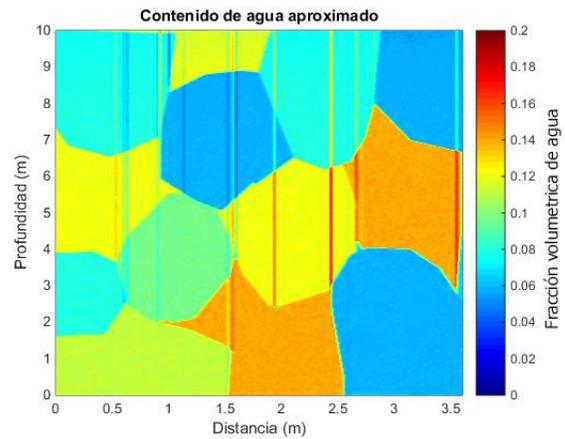


Ilustración 36: Contenido volumétrico de agua para el caso 1.

En ambos casos se observan líneas verticales en los gráficos, los cuales son errores producidos en el procesamiento de datos. Esto ocurre debido a que el algoritmo tiene como hipótesis capas horizontales por ende en zonas donde los ángulos entre cada zona son muy pronunciados se generan errores debido a que la condición no se satisface de manera local en algún punto de ese tramo.

También se observan diversos puntos dentro de cada zona que se incrementan a medida que aumenta la profundidad. Estos representan errores aleatorios de las mediciones, los cuales no fue posible retirar a través de filtros debido a su alta proporción ruido-sígnal.

6.4 VALIDEZ DE RESULTADOS

Para cada uno de los casos simulados se evalúa el error porcentual de los resultados comparándolos con la entrada a las simulaciones, en particular el contenido de agua, los cuales se muestran en la Ilustración 37 y la Ilustración 38.

De estos datos podemos concluir que el error promedio para el caso 2 es de 2,79% y para el caso 1 de 7,03%. Estos valores son relativamente pequeños, si se considera que al evaluarlos en torno al contenido porcentual de agua volumétrico representan que el estimador tiene para el caso 2 una sensibilidad de 0,4% y para el caso 1 de 0,6%.

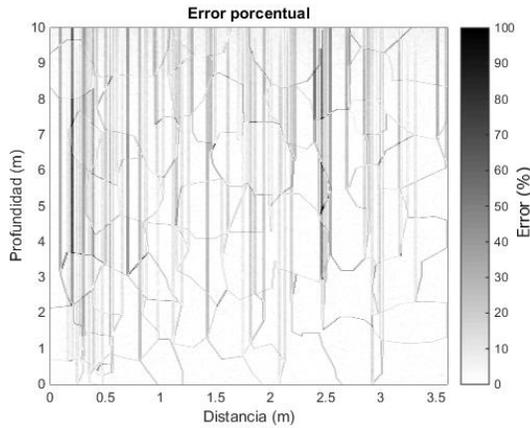


Ilustración 37: Diferencia porcentual entre el contenido volumétrico de agua en la entrada de la simulación y el resultado del procesamiento de datos para el caso 1.

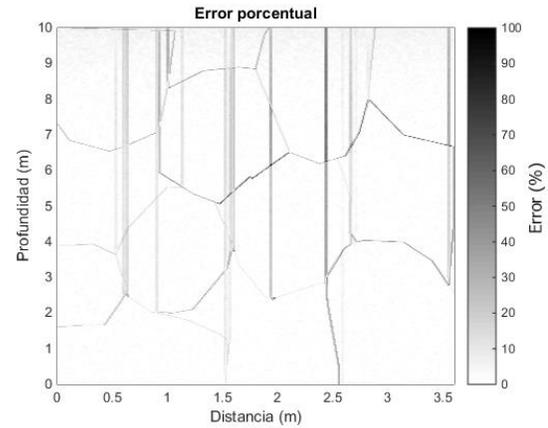


Ilustración 38: Diferencia porcentual entre el contenido volumétrico de agua en la entrada de la simulación y el resultado del procesamiento de datos para el caso 2.

Además de los gráficos se puede apreciar claramente que los algoritmos empleados no detectan de manera adecuada la zona cercana a la frontera de los diferentes contenidos de agua. Presentando los resultados un tamaño ligeramente inferior al de la entrada de las simulaciones. Por ende al substrair ambos en los gráficos de error se muestran la frontera de cada zona. Además tal como los gráficos anteriores se marcan líneas verticales las cuales representan errores arrastrados de los pasos anteriores.

7 CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES

Tras analizar los diferentes sensores capaces de medir propiedades que se pueden relacionar con la humedad se selecciona el GPR sobre los demás debido a la alta capacidad de penetración hacia el interior de la roca que este método posee. Además dentro del mismo método se concluye que para su utilización en el terreno la frecuencia óptima de funcionamiento de este aparato es de 100 MHz, con esta frecuencia se obtiene una penetración estimada de 10m en la roca además de una resolución de 25 cm lo cual permite obtener los datos para la matriz de riesgo de bombeo de fango. La cual distingue entre la cantidad de rocas menores a 25cm de diámetro para asignar la humedad crítica en donde aún es seguro extraer material del punto de extracción.

Se presentó un nuevo método para estimar el contenido volumétrico de agua, ya sea en el espectro completo de frecuencia o limitado en un ancho de banda, utilizando la información estándar de reflexión de un georadar de superficie con una separación entre antenas constante, a través de un esquema de inversión basado en la impedancia.

La estrategia de inversión está basada en el supuesto de ondas planas de GPR propagándose a través de medios con baja pérdidas con propiedades independientes de la frecuencia puede ser modelada por el modelo convolucional. Se cree que este abordaje del problema no restringe el uso del esquema para otros tipos de estudios hidrológicos, tal como se muestra en los resultados, el método es válido para zonas de humedad no horizontales, a pesar de que el incremento de heterogeneidad presenta un impacto en el aumento del error de las mediciones. El éxito de la imagenología GPR solo está limitado en lugares con alta atenuación dispersiva.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Si efectos de una dispersión moderada son observadas (secciones borrosas en el sondeo GPR), técnicas como las propuestas por Turner [1994], que usa filtros de tiempo variable para deshacer los efectos de la atenuación dependiente de la frecuencia, o Irving y Knight [2003], que supone una dispersión lineal con la frecuencia para retirarlos del sondeo, pueden ser empleados para asegurar el desempeño. En un principio el proceso es aplicable solo en entornos con relieve bajo a moderado, donde la hipótesis del reflector plano es aplicable localmente. En el caso de reflectores inclinados, como es el caso de un relieve muy heterogéneo, rutinas de migración modificadas pueden ser empleadas para corregir por el patrón de radiación de la antena, como los

trabajos de Streich y van der Kruk [2007], en donde utilizan funciones de Green exactas para la migración con el fin de compensar por el patrón de radiación de la antena. La información de baja frecuencia es la clave para recuperar la distribución de propiedades físicas a mediana y gran escala, lo cual es sabido de la inversión de impedancia sísmica. Información adicional tales como modelos de velocidad GPR de análisis CMP o información geológica previa son necesarios para substituir las reflexiones ausentes de baja frecuencia. Debido a que la fuente de radiación del GPR en general posee un ancho de banda limitado y un espectro de amplitud muy limitado, el problema del déficit de información a baja frecuencia es probablemente más grave que para información sísmica. Además, la falta información de baja frecuencia puede volverse más severo con el aumento de la frecuencia nominal de la antena del GPR. Sin olvidar los fenómenos de inducción de baja frecuencia y ruido del sistema, los cuales deben ser eliminados a través de filtros “de-wow”, los cuales afectan la zona clave de baja frecuencia de la señal.

Respecto a la velocidad de cómputo del método desarrollado, el paso que más recursos utiliza es la deconvolución, la cual involucra estimar la fuente de radiación para cada trazo de la medición, lo que puede tomar algunos cientos de iteraciones. Todos los otros procesos a excepción de la migración y la deconvolución para obtener las reflexiones son operaciones de una iteración. Además el costo computacional de estos último dos procesos es pequeño en comparación al primero. Para ser usado en tiempo real sin alguna espera se debe mejorar la eficiencia de la deconvolución, el cual puede generar un retraso en el procedimiento.

Siempre se discutió los procedimientos para la aplicación a información 2D, pero su uso para información de georadar 3D es directa con leves modificaciones para ser capaz de tratar mayor cantidad de datos.

El siguiente paso es realizar experimentación en laboratorio para validar los resultados de las simulaciones, el más simple consistente de un recipiente con una superficie de al menos un metro cuadrado, el cual debe estar repleto de material fragmentado proveniente de la mina y tener poseer su contenido de agua controlado. Para realizar mediciones con el sensor real y verificar el procedimiento de inversión con información real.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. T. Brown, Block Caving Geomechanics, The International Block Caving Study, 1997-2004.
- [2] A. Holder, A. J. Rogers, P. Bartlett y G. Keyter, «Review of mud rush mitigation on mitigation on Kimberley's old scraper drift block caves,» *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2013.
- [3] S. Trabelsi, N. S. O. y O. Ramahi, «A Low-Cost Microwave Moisture Sensor,» de *European Microwave Conference*, Manchester, 2006.
- [4] A. Ilyas, «Microwave dielectric sensing of Moisture in Mswibottom ash – comparison of frequency vs. time domain reflectometry,» *Journal of Water Management and Research*, 2012.
- [5] H. Mittelbach y S. S. I. Irene Lehne:, «Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland,» *Journal of Hydrology*, 2012.
- [6] V. Čorluka, M. Filić, M. Mesić y Z. Valter, «Near infrared based moisture meter,» de *International Symposium Electronics in Marine*, Zadar, 2004.
- [7] C. Kandala y J. Sundaram, «Nondestructive moisture sensing in peanuts by NIR reflectance,» de *Sensors Applications Symposium*, Limerick, 2010.
- [8] Y. L. Then, K. Y. You y M. Dimon, «Soil Moisture Dielectric Measurement Using Microwave Sensor System,» de *International Symposium on Antennas and Propagation*, Kaohsiung, 2014.
- [9] T. Vazquez, «Aplicaciones prácticas de la espectroscopia de absorción infrarrojo en el estudio de los crudos, del clinker y del cemento portland anhidro,» *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, 1980.
- [10] R. Carmona, E. Decoster, J. Hemingway, M. Hizem, L. Mossé, T. Rizk, D. Julander, J. Little, T. McDonald, J. Mude y N. Seleznev, «Zapping Rocks,» *Oilfield Review*, 2011.

- [11] C. Schmelzbach, J. Tronicke y P. Dietrich, «High-resolution water content estimation from surface-based ground-penetrating radar reflection,» *Water Resources Research*, 2012.
- [12] E. W. Harmsen y H. Parsiani, «Inverse procedure for estimating vertically distributed soil hydraulic parameters using GPR,» de *NOAA-CREST/NASA-EPSCoR Joint Symposium for Climate Studies*, 2003.
- [13] G. Turner, «Subsurface radar propagation deconvolution,» *Geophysics* 59(2), pp. 215-223, 1994.
- [14] J. D. Irving y R. J. Knight, «Removal of wavelet dispersion from ground-penetrating radar data,» *Geophysics*, 68(3), pp. 960-970, 2003.
- [15] R. Streich, J. van der Kruk y A. G. Green, «Vector-migration of standard copolarized 3D GPR data,» *Geophysics* 72(5), pp. j65-j75, 2007.
- [16] N. J. F. Bostanudin, «Computational Methods for Processing Ground Penetrating Radar Data,» University of Portsmouth, 2013.
- [17] K. Basaure, «Caracterización geotécnica de mineral saturado de mina Diablo regimiento, Codelco, división El Teniente,» Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [18] B. J. Rusell, Introduction to seismic inversion methods, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1988.
- [19] C. Becerra, «Controlling drawpoints prone to pumping,» *El Teniente Mine*, 2011.
- [20] C. M. Steelman, A. L. Endres y J. P. Jones, «High-resolution ground-penetrating radar monitoring of soil moisture dynamics: Field results, interpretation, and comparison with unsaturated flow model,» *WATER RESOURCES RESEARCH*, vol. 48, 2012.
- [21] J. A. Alonso y M. T. Lamata, «CONSISTENCY IN THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: A NEW APPROACH,» *International Journal of Uncertainty*, 2006.