

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