

<i>CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE</i>	1
I. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Introducción a la glaciología.....	3
1.2 Importancia del estudio de los glaciares.....	3
1.3 Evolución de los glaciares del pirineo español.....	7
1.4 Glaciares estudiados Aneto – La Maladeta. Su evolución.....	13
II. ESTUDIO GEOFÍSICO.....	19
1.5 Técnicas geofísicas utilizadas.....	19
1.5.1 Técnicas geofísicas que se utilizan para el estudio de los glaciares.....	19
1.5.2 Estudios realizados anteriormente en el glaciar Aneto y La Maladeta.....	21
1.5.2.1 Período 1991-1992, prospección geofísica por sísmica de reflexión en el glaciar La Maladeta.....	21
1.5.2.2 Período 1994, prospección geofísica con georradar de ultra-alta frecuencia en los glaciares del Aneto y La Maladeta.....	24
1.5.2.3 Período 2008, prospección geofísica con georradar en los glaciares del Aneto y La Maladeta.....	29
1.6 Técnica geofísica GPR.....	32
1.6.1 Elección de la técnica GPR.....	32
1.7 Validación de los resultados obtenidos es esta tesis.....	34
 <i>CAPÍTULO 2: ECUACIONES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS</i>	 37
2.1 Introducción.....	39
2.2 Ecuaciones de Maxwell.....	40
2.3 Parámetros electromagnéticos de un medio.....	43
2.3.1 Conductividad. σ	43
2.3.2 Permitividad dieléctrica. ϵ	44
2.3.2.1 Relación entre la constante dieléctrica y conductividad.....	46
2.3.3 Permeabilidad magnética. μ	49
2.4 Parámetros de propagación del medio.....	51
2.5 Velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio material.....	54
2.6 Longitud de onda en un medio diferente del vacío.....	55
2.7 Atenuación.....	56
2.8 Determinación del contenido en agua.....	58
2.9 Polaridad de las ondas.....	59

<i>CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS</i>	61
3.1 Introducción.....	63
3.2 Reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas.....	64
a. Reflexión en una capa homogénea.....	69
3.3 Perdida de la energía en las ondas radar por procesos internos al medio.....	73
3.3.1 Dispersión geométrica del frente de ondas.....	74
3.3.2 Absorción.....	75
3.3.3 Dispersión de la energía (“scattering”).....	80
3.3.4 Atenuación y profundidad pelicular de penetración.....	82
3.4 Rango del radar.....	85
3.5 Resolución vertical y horizontal.....	87
3.5.1 Resolución vertical.....	88
3.5.2 Resolución horizontal.....	89
3.6 Toma de medidas.....	90
3.6.1 Rango o tamaño de la ventana temporal de un registro.....	90
3.6.2 Puntos por traza.....	92
3.6.3 Frecuencia de muestreo.....	92
3.6.4 Superposición de trazas. Stacking.....	93
3.6.5 Posición de inicio de la señal.....	93
 <i>CAPÍTULO 4: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN AGUA</i>	 95
4.1 Introducción.....	97
4.2 Velocidad de la onda RWV.....	97
4.2.1 Métodos para determinar la velocidad del medio.....	102
4.2.2 Método de las hipérbolas de difracción.....	103
4.3 Atenuación, conductividad, resistividad en el hielo.....	104
4.4 Densidad y contenido en agua.....	105
4.4.1 Hielo, neviza o nieve secos/fríos.....	112
4.4.2 Hielo, neviza o nieve húmedas.....	113
4.5 Fórmula para calcular el espesor del hielo.....	120
 <i>CAPÍTULO 5: PROCESADO DE DATOS GPS Y GPR</i>	 123
5.1 Datos GPS.....	125
5.1.1 Toma de datos GPS.....	125
5.1.2 Equipo utilizado.....	125
5.1.3 Metodología de adquisición de datos.....	127

5.1.3.1	Procesado	130
5.2	Datos GPR	132
5.2.1	Toma de datos GPR.....	132
5.2.1.1	Equipo utilizado.	132
5.2.1.2	Realización de medidas.	133
5.2.2	Procesado de los radargramas.....	137
A)	Visualización de los radargramas.	138
B)	Procesado de los radargramas.....	143
C)	Corrección topográfica.....	147
D)	Filtros.....	150
D.1)	Filtros verticales.....	151
D.2)	Filtros horizontales.....	152
D.3)	Transformada de Hilbert.....	152
D.4)	Ganancias.....	155
D.5)	Migración.	156
D.6)	Deconvolución.....	158
5.2.3	Determinación de la velocidad mediante las hipérbolas de difracción.....	160
5.2.4	Determinación de las capas que forman la estructura interna del glaciar.....	162
5.3	Proceso para realizar el modelo 3D.....	164
5.3.1	Obtención de coordenadas UTM.....	165
5.3.2	Tratamiento de las trazas georreferenciadas en AutoCad.....	166
5.3.3	Modelado en 3D.....	167
5.4	Proceso para realizar el modelo 3D.....	167
5.4.1	Errores y precisión en los puntos registrados con la estación total Sokkia set630rk.....	167
5.4.1.1	Errores en los puntos registrados.....	168
5.4.1.2	Precisión en la planimetría y altimetría en la radiación de puntos	172
5.4.2	Errores y precisión en los puntos registrados con la tecnología GPS, Trimble 4000ssi.....	173
5.4.3	Errores y precisión en los puntos registrados con georradar SIR 3000	174
 <i>CAPÍTULO 6: APLICACIÓN A LOS GLACIARES ANETO Y LA MALADETA</i>		177
6.1	Introducción.....	179
I.	GLACIAR ANETO.....	180
I.1	Toma de datos.	180
I.2	Obtención de la topografía del glaciar.....	184
I.3	Secciones composición modelado 3D.....	186
I.4	Análisis de las capas que conforman la estructura interna del Aneto.....	189

I.4.1 Estrato neviza/firn.....	191
I.4.2 Hielo templado	196
I.4.2.1 Análisis de las trazas.....	198
I.4.2.2 RWV y W en el glaciar Aneto.....	201
I.4.3 Análisis de los elementos endoglaciares.....	206
I.4.3.1 Reflectores puntuales.....	206
I.4.3.2 Estudio de reflectores lineales (grietas colmatadas).....	211
I.4.3.3 Estudio de casos especiales (zonas anómalas).....	215
I.4.4 Lecho del glaciar Aneto.....	219
I.4.4.1 Sedimentos subglaciares.....	221
I.5 Relieve subglaciar del glaciar Aneto en 3D.....	225
II. GLACIAR LA MALADETA.....	227
II.1 Toma de datos.....	227
II.2 Obtención de la topografía del glaciar La Maladeta.....	230
II.3 Secciones composición modelado 3D.....	231
II.4 Análisis de las capas que conforman la estructura interna de La Maladeta.....	233
II.4.1 Estrato neviza/firn.....	233
II.4.2 Hielo templado.....	236
II.4.3 Análisis de los elementos endoglaciares.....	238
II.4.3.1 Reflectores puntuales y reflectores lineales.....	238
II.4.3.2 Grietas superficiales.....	242
II.4.4 Lecho del glaciar.....	243
II.4.4.1 Cavidad subglaciar.....	244
II.5 Relieve subglaciar del glaciar La Maladeta.....	244
<i>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES</i>	247
7.1 Conclusiones.....	249
7.2 Futuras líneas de investigación.....	256
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	259
<i>ANEXO I: Perfiles topográficos de la superficie y zócalo granítico de los glaciares Aneto y La Maladeta</i>	269
<i>ANEXO II: Tablas</i>	287