POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



Tesi di Laurea Magistrale

Indagini Georadar per stima dello spessore dei ghiacciai e messa a punto di modelli evolutivi

Relatore:

Prof. Alberto Godio

Candidata:

Isabella Nicole Pisoni

Anno accademico 2020-2021

Sommario

1 Intro	duzione	3		
1.1	Problematica			
1.2	Obiettivi della tesi			
1.3	Articolazione del lavoro			
2 De	escrizione del sito	6		
2.1	Il ghiacciaio negli ultimi venti anni	6		
3 Camp	pagne di misurazione georadar			
3.1 /	Acquisizione dati nei diversi anni con tabelle riassuntive di tutti i profili realizzati			
3.2 9	Strumentazione utilizzata			
3.3 I	Modalità di acquisizione dati			
3.4 F	Principali definizioni e grandezze fisiche			
3.	4.1 Rifrazione delle onde elettromagnetiche			
3.	4.2 Coefficiente di riflessione e trasmissione			
4 Elabo	prazione dati			
4.1[Diagramma di flusso			
4.21	llustrazione del procedimento			
4.	2.1 Elaborazione dei dati grezzi			
4.	2.2. Radargramma elaborato e successive operazioni			
4.3 A	Analisi e presentazione dei radargrammi	24		
4.4 F	Risultati			
5 Discu	ssione sull'evoluzione delle strutture endoglaciali			
6 Conc	lusioni			
7 Biblic	7 Bibliografia			
Ringraz	ziamenti			

1 Introduzione

1.1 Problematica

Il Ghiacciaio di Cherillon è in continua evoluzione. I naturali processi dinamici responsabili di tale evoluzione nel tempo e nello spazio sono influenzati dal cambiamento climatico, che causa prevalentemente l'innalzamento della temperatura media terrestre ma anche molte altre anomalie. Il motivo per cui il ghiacciaio è soggetto a cambiamenti così repentini può individuarsi nella sua collocazione. Infatti, il complesso glaciologico di cui fa parte è esposto a Sud e riceve luce solare per tutta la durata del giorno. In particolare, la sua collocazione specifica non è riparata dalla morfologia circostante, pertanto non beneficia mai di protezione dalla luce solare. L'innalzamento della temperatura negli ultimi anni è stato notevole, tanto da arrivare a registrare temperature fino ai 10 °C oltre i 3500 metri di altitudine. In modo più dettagliato, si è osservato un innalzamento delle temperature medie di 1,2°C (contro 0,74°C globali) sulla catena montuosa (ARPA Valle d'Aosta, 2018). Questo non è compatibile con la presenza di nevi perenni, soggette quindi a fusione. Si registra anche, per il ghiacciaio di Cherillon, la fusione del collegamento tra il fronte del ghiacciaio e la porzione a monte, con la conseguente interruzione dell'alimentazione del ghiacciaio stesso (Ansa, 2020).

I sistemi di telerilevamento satellitare, ovvero una sorta di estensione di quello che l'occhio umano può vedere, mostrano solamente la superficie del ghiacciaio. I satelliti Landsat e Sentinel-2 sono i sistemi di telerilevamento che forniscono le immagini per lo studio dei ghiacciai. Landsat 8 e 9 sono i modelli più recenti ma numerose immagini sono disponibili da Landsat 7. Questi satelliti rilevano in diverse bande cromatiche. Un numero maggiore di bande comporta firme spettrali più accurate. Il ghiaccio ha una firma spettrale che comprende una riflettività concentrata tra le lunghezze d'onda di 0,3 e 1,2 micrometri, mentre la neve è rilevabile fino ai 2,4 micrometri. In ogni caso, la maggior parte dei satelliti ha una risoluzione spettrale media, ovvero che rileva fino a 15 bande (Boccardo, 2019). Per quanto riguarda la risoluzione spaziale, Landsat 7 ha una risoluzione spaziale compresa tra 15 e 30 m, mentre Landsat 8 arriva fino a 15 m. Dal software Google Earth, le immagini più precise sono ricavate tramite il satellite ALOS, che presenta un raggio di osservazione di 70 km e una risoluzione di 2,5 m, che costituisce un dettaglio notevole (Guida di Google Earth, 2021). Naturalmente si può osservare di anno in anno l' evoluzione nel tempo e nello spazio del ghiacciaio, in termini di riduzione dello spazio occupato, direzione in cui il ghiacciaio di ritira o si propaga, tasso di fusione nivale superficiale, eccetera. Quello che però non si può percepire con questi strumenti è ciò che avviene all'interno del volume del ghiacciaio. Si parla della propagazione in profondità e dei processi dinamici interni; la formazione e la soppressione di cavità, l'apertura e chiusura di crepacci, la presenza di corpi solidi quali massi rocciosi o detriti, la formazione di canali interni. Sono questi elementi a determinare in modo significativo quella che è la "storia" del ghiacciaio, che è ben più complessa di quanto può essere osservato in superficie.

Chiaramente, non è possibile conoscere quello che si trova all'interno del volume del ghiacciaio in modo diretto, ovvero con osservazione visiva. Questo tipo di informazione può essere ottenuto a livello puntuale, effettuando dei sondaggi locali. Come è intuibile, i sondaggi non possono essere effettuati per tutto il volume del ghiacciaio, in quanto molto costosi e di complicata realizzazione, e forniscono pertanto informazioni indicative solamente relative all'intorno del punto in cui sono state effettuate. E' per questo che si ricorre a metodi di indagine non invasiva, in questo caso l'utilizzo del GPR (ground penetrating radar). Sebbene questo strumento permetta di ottenere solo delle informazioni indirette su quanto ci sia al di sotto della superficie, è quanto di più idoneo si possieda in questo momento per mappare l'intero volume del ghiacciaio e le sue caratteristiche.

1.2 Obiettivi della tesi

Il presente lavoro si propone di fornire un modello di analisi della struttura del ghiacciaio nella finestra temporale 2017-2020, basandosi su campagne di indagine condotte ogni anno, nello stesso periodo. Si intende mostrare le principali caratteristiche del ghiacciaio per ciascuna campagna e confrontare la sua morfologia nel periodo compreso tra il 2017 e 2020, ovvero verificare l'evoluzione nello spazio e nel tempo. I due elementi su cui questo studio si concentra sono la individuazione di cavità endoglaciali e lo spessore del ghiacciaio. Lo studio dell'evoluzione dello spessore consente di valutare la perdita di volume e quindi di massa nei quattro anni, il che permette di valutare qualitativamente e quantitativamente l'impatto del cambiamento climatico sull'oggetto di indagine. Inoltre, è possibile studiare la dinamica della fusione del ghiacciaio, i fronti su cui maggiormente è avvenuta la perdita di massa solida e le aree interne maggiormente interessate dalla variazione di spessore. Per quanto riguarda invece le cavità, lo studio del loro pattern consente di valutare la stabilità e l'integrità del ghiacciaio dal punto di vista meccanico ma anche di capire come queste siano influenzate dalle condizioni ambientali.

SI vogliono fornire dati qualitativi e quantitativi, accompagnati da immagini georeferenziate che possano essere confrontate e sovrapposte tra loro e anche sovrapponibili a immagini satellitari di pubblico dominio.

Con questo studio si vuole inoltre porre una base per un'eventuale elaborazione di un modello previsionale riguardante l'evoluzione del ghiacciaio nel futuro, sfruttando l'analisi degli elementi ottenuti grazie alle indagini passate. Un modello previsionale di questo ghiacciaio nello specifico potrà essere abbinato ad altri studi simili, condotti su altri ghiacciai. Potenzialmente, si potranno sviluppare dei modelli di scenario globale.

1.3 Articolazione del lavoro

Il lavoro svolto è suddiviso principalmente in due parti: elaborazione dei dati acquisiti e loro interpretazione., entrambe basate sui dati ottenuti dalle campagne di acquisizione.

La prima parte consiste strettamente nel prendere i dati grezzi ottenuti dalle campagne di acquisizione e dar loro una forma. I dati in ingresso, infatti, sono sempre sotto forma di file inseribili all'interno di altri software. Sono pronti per l'elaborazione ma, allo stato grezzo, non danno alcuna informazione utile ad essere direttamente interpretata. Nello specifico, l'utilizzo del software di programmazione Matlab ha permesso di organizzare i dati in vettori e matrici e di implementarli in immagini bidimensionali che fornissero un'informazione visiva ed immediata di quanto sia presente sotto la superficie del ghiacciaio. Si sono così ottenuti dei radargrammi bidimensionali in grado di fornire una immagine del ghiacciaio al di sotto della superficie.

La parte di interpretazione dei dati vuole dare un significato a ciò che risulta dall'elaborazione. Le immagini ottenute a seguito della prima fase sono rappresentative solamente di una traccia, ovvero di una sezione verticale specifica, mentre l'obiettivo finale è quello di ottenere una valutazione 3D dell'intero volume del ghiacciaio, dotata di georeferenziazione. Nella fase di interpretazione dati, pertanto, ci si è dedicati a conferire una forma quantitativa, oltre che qualitativa, ai dati elaborati, per poi intrecciare i risultati delle singole sezioni tra loro ed ottenere un'informazione completa, applicabile a successivi utilizzi, primo fra tutti alla visualizzazione diretta della posizione delle cavità sulle immagini di base fornite dagli strumenti di telerilevamento (immagini satellitari). Il risultato è quindi costituito da immagini tridimensionali georeferenziate, che mostrano l'aspetto del ghiacciaio nei singoli anni di indagine (per ciascuna campagna) e anche immagini in cui anni diversi vengono messi a confronto, in questo caso il 2017 con il 2020, per valutare i cambiamenti all'interno dei quattro anni a disposizione. Grazie ai dati GPS e alla

georeferenziazione, è stato anche possibile collocare la posizione delle cavità in sovrapposizione al software Google Earth, in modo da dare una visione immediata ed intuitiva della collocazione di suddette cavità.

Nel documento si fornisce anche una breve panoramica sul ghiacciaio di Cherillon così come è apparso negli ultimi venti anni, sulla base di dati messi a disposizione da geoportali e siti web online, e una descrizione sintetica della strumentazione utilizzata, delle sue caratteristiche e della sua modalità di funzionamento e utilizzo.

2 Descrizione del sito

2.1 Il ghiacciaio negli ultimi venti anni

Il ghiacciaio di Cherillon si trova nel comune di Valtournenche, in Valle d'Aosta. L'area di interesse si trova nella zona nord-est della Valle d'Aosta, all'estremità Nord dello Stato italiano, confinante con la Svizzera a Nord e con la regione Piemonte a est. Il comune di Valtournenche confina con: Zermatt (Svizzera) a nord, Bionaz a ovest, Torgnon a sud, Ayas e Gressoney-la-trinité a est, come mostrato in *figura 1* (Geoportale Valle D'Aosta, 2020). E' situato sul monte Cervino, nel gruppo montuoso Dent d'Herens-Murailles, facente parte del vasto sistema di ghiacciai, che ne comprende in gran numero. I più rilevanti, in quanto confinanti o adiacenti sono i ghiacciai di: Grandes Murailles e Mont Tabel a est, del Leone a ovest, come mostrato in *figura 2* (Geoportale Valle D'Aosta, 2020). La figura 2 a) è un inquadramento più generale, che mostra i ghiacciai del monte Cervino. Ciascuno è contrassegnato da un triangolo colorato, identificato nella legenda. Il ghiacciaio di Cherillon è evidenziato dal rettangolo rosso. In figura 2b) si può osservare l'inquadramento nello specifico del solo ghiacciaio di Cherillon e la sua evoluzione negli ultimi due secoli, per quanto riguarda la superficie occupata.

A livello generico, il ghiacciaio di Cherillon ha esposizione sud tra le quote 3300 e 2670 metri. La zona di accumulo, ovvero zona in cui prevale l'accumulo di materiale piuttosto che la sua ablazione o fusione, è molto ridotta, infatti solo il 24 % del ghiacciaio si trova sopra 3100 metri. La fronte è molto sottile e coperta da detrito (Fondazione Montagna Sicura, 2020). Il fatto che ci sia del deposito solido è una caratteristica da un lato vantaggiosa, in quanto protegge la superficie del ghiacciaio dalla radiazione solare diretta ma dall'altro lato negativa, dato che ne riduce il potere riflettente, anche indicato con la proprietà "albedo".

In tabella 1 alcuni dati numerici (Catasto ghiacciai Valle d'Aosta 2020).

Tabella 1: parametri significativi caratterizzanti il ghiacciaio di Cherillon

Quota massima del complesso (Dent d'Herens)	4197 m
Area (2005)	0.852 km ²
Quota massima dell'area ghiacciata (1999)	3280 m
Quota minima fronte (2008)	2780 m



Figura 1: inquadramento territoriale cartografico della zona di interesse, fornito dalla Regione Valle d'Aosta, in scala 1:500.000. Il territorio di interesse, in cui si trova il ghiacciaio di Cherillon, è evidenziato dal cerchio rosso. L'area fa parte del comune di Valtournenche



Figura 2 a): ghiacciai del complesso di interesse, scala 1:100.000. I triangoli, come da legenda, indicano i ghiacciai circostanti il ghiacciaio di Cherillon. Evidenziato dal rettangolo rosso



Figura 2b): inquadramento del ghiacciaio di Cherillon. Illustrazione della sua evoluzione nel corso degli ultimi due secoli

Come mostra la *figura 2 a*), ciascun ghiacciaio del complesso presenta una variazione di estensione nel corso del tempo. Si possono osservare le conformazioni per gli anni 1820, 1999, 2005, 2012 e 2019. Negli ultimi anni la superficie glaciale risulta ridotta rispetto ai secoli passati.

Nello specifico per il ghiacciaio di Cherillon, in *figura 2b*), si può chiaramente osservare un ritiro della sua superficie in corrispondenza della lingua che punta verso sud. Si osserva infatti una progressiva riduzione di superficie in corrispondenza del tratto sud del ghiacciaio che è partito da una forma piuttosto allungata nel 1820 fino alla riduzione ad una forma più equilatera nel caso del 2019. Con l'innalzamento delle temperature nel corso dell'anno, infatti, la linea delle nevi perenni ha subito un innalzamento in altitudine, determinando quindi lo scioglimento dei ghiacci nelle aree più in basso. Si può semplicisticamente approssimare un innalzamento della "equilibrium line" di 100 metri ogni volta che l'incremento di temperatura è pari a 1 K (Zekollari, 2019), anche se questa assunzione potrebbe non essere applicabile ad ogni caso studio.

I cambiamenti significativi nelle aree interessate dalla copertura glaciale possono però essere visualizzati con chiarezza solo paragonando le aree interessate dai ghiacciai nel 1999 e quelle invece coperte nel 2019 (escludendo l'area coperta nel 1820). Ciò lascia intendere che nella finestra temporale compresa tra 2005 e 2019, la superficie del ghiacciaio di Cherillon, così come quella degli altri ghiacciai, non abbia subito un ritiro tanto significativo quanto quello avvenuto nei primi anni del millennio (1999-2005).

Nel 2011, il ghiacciaio di Cherillon era caratterizzato da una copertura nevosa residua quasi inesistente, costituita essenzialmente da accumuli di valanghe o da vento. Il ghiacciaio risulta in modo evidente diviso in due rami; infatti, in corrispondenza di un tratto più ripido, è emersa un'isola rocciosa, che altrimenti non sarebbe stata visibile se il ghiacciaio fosse rimasto costituito da un unico braccio. Questo è direttamente conseguenza dell'assottigliamento del manto nevoso. Il substrato roccioso del Ghiacciaio Cherillon forma grosso modo una grandiosa scalinata a quattro pedate. In alto la zona sottostante il Col Tournenche, interrotta dal gradino costituito dall'affioramento roccioso sopra citato, segue poi un secondo tratto pianeggiante fra quota 3000 e 2900 m ca. che termina con un secondo gradino oggi in gran parte libero da ghiacci, fatta eccezione per il suo tratto più occidentale ai piedi della Cresta Albertini ove si arresta la fronte a quota 2780 m ca. Ancora più in basso c'è il gradino che fascia la base della Cresta Albertini a quota 2750 m ca., attualmente ingombro di detriti che potrebbero nascondere zone ghiacciate sottostanti. Infine, più in basso si giunge al vallone che un tempo ospitava la lingua comune con il contiguo Ghiacciaio di Montabel. di cui sopravvive oggi un grande accumulo di ghiaccio nero coperto da detriti. Considerando lo sviluppo del ghiacciaio in un periodo comprendente alcuni anni, si individua talvolta una variazione dello spessore del manto nevoso, con un netto positivo per l'anno 2014, tuttavia viene osservato come il ghiacciaio riduca la sua superficie complessiva di anno in anno. La quota minima del fronte rimane individuata a 2800 metri di altitudine (Baroni, Bondesan, Mortara, 2012).

Nel 2008, il ghiacciaio di Cherillon presentava una copertura nevosa che variava da poche decine di centimetri in corrispondenza del fronte del ghiacciaio (ovvero il settore con minore altimetria) fino a 300 centimetri in corrispondenza delle aree più elevate. La copertura nevosa del ghiacciaio è influenzata da numerosi fattori, primo tra tutti le precipitazioni nevose. (Fondazione Montagna Sicura, 2008).

La stazione metereologica di Plateau Rosa, elevazione 3488 metri sul livello del mare, fornisce dati metereologici dettagliati, aggiornati al presente. In *figura 3* è riportato l'andamento della temperatura media nell'anno 2020. In generale, le temperature registrate nel 2020 sono comprese tra i -10 °C nei mesi invernali e i 15°C nei mesi estivi. Temperature sopra i 10 °C causano una notevole fusione nivale e ciò è una delle principali cause del ritiro del ghiacciaio di Cherillon.



Figura 3: andamento delle temperature medie giornaliere registrate alla stazione di Plateau Rosa (3488 m elevazione) nel 2020. Ogni colore rappresenta un mese diverso

Particolare attenzione va rivolta al fatto che le temperature scendono sotto lo zero solamente nei mesi invernali (rappresentati dal trend di gennaio). Questo dato è molto rilevante in quanto si deve considerare che, sopra lo zero, lo scambio di calore innesca il processo di fusione del ghiaccio.

In *figura 4*, è invece riportato un trend delle temperature media, minima e massima per diversi anni, riferito alla stazione di Plateau Rosa.

La figura 5 è esplicativa delle precipitazioni registrate per quattro mesi del 2020. Anche in questo caso, ogni colore è associato ad un mese diverso.



Figura 4: andamento delle temperature alla stazione meteo Plateau Rosa negli ultimi nove anni. Le curve si riferiscono alla temperatura media, minima e massima, come indicato in legenda.



Figura 5: precipitazioni giorno per giorno per quattro mesi differenti nell'arco del 2020, registrate alla stazione di Plateau Rosa. Ogni colore rappresenta un mese diverso, come indicato in legenda.

Dalla *figura 5* si può osservare come i mesi estivi, rappresentati dal mese di luglio, siano i più piovosi. Tuttavia, le precipitazioni di intensità maggiore si hanno per il mese di aprile ed il mese di gennaio.

3 Campagne di misurazione georadar

3.1 Acquisizione dati nei diversi anni con tabelle riassuntive di tutti i profili realizzati

In *figura 6* è disegnata l'area di indagine approssimativa. Nelle figure successive si fa riferimento più in dettaglio alle singole tracce. La figura 5 può essere facilmente confrontata con le figure precedenti per comprendere meglio la collocazione dell'area di indagine in un contesto più ampio.



Figura 6: immagine satellitare rappresentativa dell'area di indagine, evidenziata in azzurro. Inquadramento su vasta scala, rappresentativo di parte del versante su cui è situato il ghiacciaio di Cherillon.

In *tabella 2* è riportato uno schema riassuntivo delle tracce utilizzate per i vari anni. La campagna del 28-06-2018 non è stata successivamente tenuta in conto né per l'elaborazione dati, né per l'interpretazione degli stessi.

	colore	Tracce in totale	Tracce sovrapponibili	Tracce migrate
13-09-2017		1-17	7-15	8,10,13,15
28-06-2018		1-15	1-10	-
10-04-2018		1-28	1-12; 16-21; 23-25	3,4,17,19,20,21
27-09-2019		1-33	1-9; 14-20; 30-33	4,5,14,16,18
30-09-2020		1-11	1-11	1,3,8,10,11,12

Tabella 2: campagne di misura e profili associati. Ogni campagna è associata ad un colore diverso

Le "tracce migrate" sono quelle che sono state sottoposte alla fase di "migration after stack", che verrà illustrata successivamente.

In *figura 7 a*) è rappresentato il reticolo costituito da tutte le tracce originariamente risultanti dalle campagne di acquisizione.

Le tracce si dispongono secondo una griglia, composta da elementi che procedono da sud verso nord ed altri da est verso ovest. Ogni campagna presenta un numero diverso di tracce, a seconda delle condizioni in cui si è svolta la campagna e le circostanze presenti. Per completezza, si riportano anche le tracce della seconda campagna del 2018 che però non sono state considerate nell'elaborazione dati.

Si è ristretto il numero di tracce di analisi alle sole che si trovassero in un'area condivisa da tracce di tutti gli anni, in modo da poter operare un confronto. Pertanto, il 2020 è stato decisivo per quanto riguarda la selezione delle tracce, in quanto la campagna di indagine di quell'anno ricopre un'area più limitata rispetto alle campagne degli anni precedenti. Dopo aver messo da parte le tracce al di fuori dell'area di indagine del 2020, il risultato è stato quello riportato in *figura 7 b*).



Figura 7 a): tracce di ciascuna campagna, evidenziate dai colori diversi per ciascun anno, come riportato in tabella 2, prima della selezione delle tracce nell'area di interesse

Figura 7 b): tracce di ciascuna campagna, evidenziate dai colori diversi per ciascun anno, dopo la selezione delle tracce nell'area di interesse, tracce che saranno utilizzate nei passaggi successivi

Riducendo il numero di tracce da analizzare, è possibile ricavare uno schema più chiaro di come le campagne dei singoli anni si sovrappongano.

Le tracce non sono esattamente sovrapposte per le campagne dei diversi anni. Per quanto riguarda la modellazione dello spessore del ghiacciaio, quindi l'individuazione della posizione della roccia sottostante, questo non costituisce un problema. Infatti, con l'interpolazione, è stato possibile ottenere delle superfici 3D da confrontare. Parlando delle cavità, invece, la questione è più delicata. Se i profili non sono abbastanza sovrapponibili, non è possibile osservare l'evoluzione nel tempo di ciascuna cavità ma si potrà solamente conoscere la situazione anno per anno. Per questo sono state scelte solamente alcune coppie di profili di anni differenti come strumento per analizzare l'evoluzione di pochi gruppi di cavità.

3.2 Strumentazione utilizzata

Tutte le campagne di acquisizione sono state realizzate con l'utilizzo della strumentazione GPR: ground penetrating radar.

Il GPR è uno strumento che permette un'indagine non invasiva operando sulla superficie soprastante il volume di sottosuolo che si vuole studiare. Non richiede nessun tipo di campionamento/carotaggio/analisi di campioni, basandosi solo ed esclusivamente sulle proprietà geoelettriche del materiale.

Il GPR è costituito prevalentemente da tre componenti: unità di controllo, batteria, antenna; l'antenna, a sua volta, è composta da trasmettitore e ricevitore. In questo caso, essendo necessaria la georeferenziazione dei dati acquisiti, si è disposto anche di un'antenna GPS. Tutti i componenti del GPR sono montati su una struttura compatta che può essere spinta e trasportata grazie alla presenza di ruote alla base.

In *figura 8* è mostrato un esempio di strumentazione GPR.



Figura 8: esempio di strumentazione GPR e sue componenti. Antenna, batteria, CU e GPS

L'unità di controllo (o "control unit", CU) è come il cervello della macchina. Comunica all'antenna quando inviare il segnale elettromagnetico in uscita e registra il segnale elettromagnetico di ritorno. Possiede un computer integrato e un'unità di memorizzazione (disco rigido), per permettere la registrazione dei dati acquisiti e la successiva elaborazione. L'unità di controllo può anche essere direttamente collegata ad un computer esterno, in modo da non dover trasferire i dati in seguito all'acquisizione, e dispone anche di un'interfaccia grafica per l'utente. E' attraverso l'unità di controllo che si governa la strumentazione.

La batteria può avere diverse potenze di fabbrica, a seconda dell'utilizzo desiderato. Per ogni tipo di batteria esistono anche degli appositi adattatori. Si possono avere batterie integrate con la macchina (batterie ricaricabili), oppure si possono avere fonti di energia esterna di vario tipo, collegabili tramite adattatori appositi.

L'antenna, come accennato in precedenza, si divide in trasmettitore e ricevitore. Il trasmettitore raccoglie le informazioni di invio del segnale dall'unità di controllo e si occupa di inviare il segnale elettromagnetico all'interno del terreno sottostante. Il trasmettitore può trasmettere segnali a diverse frequenze, a seconda della natura dell'indagine, delle profondità che si desidera raggiungere e del dettaglio che si vuole ottenere. Maggiore frequenza del segnale significa maggiore dettaglio ma minore penetrazione in profondità. Solitamente, per profilazione geologica a scopi ambientali si usano frequenze che vanno generalmente dai 40 MHz ai 2 GHz (Godio, 2019) ma esistono strumentazioni che trasmettono anche a 16 MHz. Per profondità superiori ai 30 metri e un ridotto dettaglio si usano basse frequenze mentre per profondità ridotte ma maggiore dettaglio si usano alte frequenze. L'antenna ha anche dimensioni diverse a seconda della frequenza di trasmissione. (Del Conte, 2004). Bisogna tenere però conto di un elemento molto importante; la profondità di indagine dipende fortemente dalla frequenza dal segnale ma anche dalla conduttività del materiale e dai fenomeni di dissipazione ed attenuazione del segnale. A parità di frequenza, si ha maggiore penetrazione per materiali più resistivi (Zeid, 2019).

In generale, il ghiaccio può essere considerato un materiale molto conduttivo se compatto. Nel caso però la sua continuità sia compromessa da porosità, presenza di cavità, crepacci e corpi estranei all'interno del suo volume, la sua conduttività diventa estremamente variabile e soggetta a riduzione di valore. L'antenna emette il segnale fino a 50000 volte per ciascuna traccia, ovvero una traccia è costituita da più segnali di ritorno che, sommati insieme, permettono una maggiore "forza" del segnale registrato, che risulta quindi più chiaro.

La strumentazione GPR con cui si sono svolte le campagne di indagine emette ad una frequenza di 200 MHz ed è bistatica, ovvero l'antenna trasmittente e l'antenna ricevente si trovano adiacenti ma situate in scatole separate. Grazie all'elevata conducibilità del ghiaccio e al recupero divergenza per rimediare almeno in parte alla perdita di intensità del segnale per attenuazione e dispersione, si è potuto raggiungere profondità elevate, che dessero una chiara visione della posizione del bedrock, generalmente situato ad una profondità intorno ai 30 metri.

I principali vantaggi dell'utilizzo del GPR sono:

- versatilità per quanto riguarda la scelta della profondità di indagine e della risoluzione
- possibilità di individuare oggetti di piccole dimensioni
- strumentazione compatta e maneggevole da uno o due utenti
- possibilità di essere trasportato su molte tipologie di terreno dove altre strumentazioni non potrebbero essere altrettanto efficienti
- immediata disponibilità dei dati acquisiti
- è una tecnica non invasiva e non distruttiva
- ha un costo limitato rispetto ad altre strumentazioni e/o metodologie di indagini

I principali limiti dell'utilizzo del GPR sono:

- richiede un compromesso tra profondità di indagine e risoluzione
- il segnale è soggetto ad attenuazione globale che può causare la mancata individuazione di oggetti situati ad elevate profondità o di dimensioni ridotte
- essendo un metodo di indagine non invasivo, presenta molte incertezze ed esiste la possibilità di commettere errori di errata interpretazione o dovuti a interferenze e altri fattori ambientali e/o strumentali.

3.3 Modalità di acquisizione dati

Il GPR invia un segnale elettromagnetico nel terreno al di sotto della posizione dell'antenna. Per l'acquisizione dei dati di un profilo, ci si muove lungo la direzione desiderata, spostando mantenendola a contatto col terreno.

La velocità con cui il segnale attraversa il substrato dipende dalla natura del substrato stesso ed è quindi un dato di particolare interesse, nonché fondamentale in un'indagine GPR. La velocità delle onde elettromagnetiche all'interno di uno strato di ghiaccio senza discontinuità è pari a 1.7E8 m/s. L'impulso trasmesso dallo strumento ha una struttura simile a quella rappresentata in *figura 9*:



Figura 9: impulso trasmesso dall'antenna. Rappresentazione dell'ampiezza dell'onda e sua modalità di propagazione nel tempo

Il segnale emesso dal trasmettitore in parte si propaga lungo la superfice ("direct wave") e in parte attraversa il materiale (ghiaccio) fino a che non incontra una discontinuità. A questo punto si divide nuovamente in due parti: una parte viene riflessa e la restante rifratta. Sono quindi le tre parti di onda elettromagnetica risultanti. Lo strumento registra l'istante in cui trasmette l'impulso e l'istante in cui lo riceve di nuovo. In questo modo può calcolare il tempo di percorso del segnale per attraversare il primo strato ed essere riflesso. questo modo, notala velocità di propagazione delle onde nel mezzo, è possibile individuare la posizione dell'interfaccia.

Ogni volta che il segnale incontra una discontinuità di piccole dimensioni rispetto alla lunghezza d'onda irradiata, si produce un'iperbole di diffrazione e l'energia re-irradiata dalla discontinuità si propaga e ritorna al ricevitore; le iperboli consentono di individuare appunto le discontinuità all'interno del radargramma (Godio, 2018), come mostrato in *figura 10* (Nazionale, 2016).

Questa metodologia opera in "time domain", utilizzando il tempo impiegato dall'onda a percorrere il mezzo da trasmittente a ricevente.



Figura 10: iperbole di diffrazione. Partenza del segnale dall'antenna, sua propagazione nel sottosuolo e rifrazione e immagine rilevata

La propagazione delle onde elettromagnetiche dipende essenzialmente da tre grandezze fisiche: permettività dielettrica (ϵ), resistività elettrica (σ), permeabilità magnetica (μ), come si può dimostrare dalle equazioni di Maxwell (Abu Zeid, 2019). La prima descrive il comportamento di un materiale in presenza di un campo elettrico, più precisamente il modo in cui la corrente viene trasportata, se più o meno facilmente; la permettività dielettrica riguarda il trasporto della corrente elettrica perché descrive il modo in cui le cariche si polarizzano. La resistività elettrica, invece, riguarda il vero e proprio fenomeno di conduzione, ovvero il trasporto di elettroni. A seconda della frequenza dell'onda, prevale il fenomeno della propagazione o della conduzione. Per frequenze superiori a 100 MHz, come nel caso delle acquisizioni sul ghiaccio di Cherillon ,

prevale il fenomeno della propagazione. Per questa caratteristica che si definisce il GPR, perché ha un'alta capacità di penetrazione. La permeabilità magnetica invece ha un ruolo nella propagazione del segnale all'interno del mezzo, insieme alla permettività dielettrica relativa ε_r .

3.4 Principali definizioni e grandezze fisiche

Le principali definizioni e relazioni tra le grandezze fisiche sono definite nel seguito:

Permeabilità relativa

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

dove ϵ_0 la permettività dielettrica del vuoto, pari a 8.86E-12 F/m.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \, \mu_0}}$$

con c la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto pari a 3E8 m/s, μ_0 la permeabilità magnetica nel vuoto e v la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nel mezzo.

$$\lambda = \frac{\mathbf{v}}{f}$$

 $con \lambda$ la lunghezza d'onda del segnale, f la frequenza dell'onda.

La risoluzione verticale e laterale viene definita tramite le formule:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{4}; \Delta x = \sqrt{\frac{\lambda D}{2}}$$

con Δz la risoluzione massima verticale, Δx la risoluzione massima orizzontale e D la profondità.

Si può chiaramente dedurre da questa formula e dalla precedente come risoluzione e frequenza siano strettamente collegate: se la frequenza cresce, diminuisce la risoluzione spaziale e viceversa. Inoltre, la risoluzione verticale non dipende dalla profondità di indagine, a differenza della risoluzione orizzontale.

In figura 11, un esempio del potere risolutivo del GPR (Santarato, 2016).



Figura 11: risoluzione spaziale a seconda della frequenza del segnale trasmesso dall'antenna; alta, media e bassa frequenza

La profondità massima di investigazione è dipendente sostanzialmente da due fattori: attenuazione intrinseca del materiale, frequenza centrale dell'antenna. L'attenuazione, a sua volta, dipende da: perdite per dispersione geometrica dovuta alla propagazione semisferica dell'onda nel mezzo, perdite di energia all'interno degli strati e del materiale, perdite per scattering (diffrazioni), attenuazione intrinseca α . L'attenuazione intrinseca dipende dalle tre grandezze più importanti sopra citate: ϵ , μ , σ , secondo la formula approssimata:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

e si misura in dB/m.

La resistività elettrica gioca un ruolo predominante nell'attenuazione intrinseca.

E' importante specificare come l'attenuazione globale sia inversamente proporzionale alla frequenza del segnale.

In tabella 3 sono riportate le grandezze principali relative al ghiacciaio (Gossenberg, 2019).

Tabella 3: parametri fisici principali correlati al ghiacciaio di Cherillon

Densità (g/m3)	917
Permettività dielettrica (F/m)	2.835E-11
Velocità di propagazione dell'onda (m/ns)	0.168
Conduttività elettrica (S/m)	1.000E-5
Permeabilità magnetica relativa (-)	1
Permeabilità magnetica nel vuoto (H/m)	1.260E-6

Riassumendo estremamente i concetti, quindi, il principio di funzionamento dell'acquisizione con il GPR può essere descritto dalla formula (Zeid 2019):

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{-i(\omega t - \beta z)}$$

 α (dB/m): attenuazione (o fattore di dissipazione)

β (dB/m) propagazione (o numero d'onda). Questa grandezza è correlata alla precedente e coinvolge le stesse grandezze.

 ω (2 π f [rad/s]) velocità angolare

f (1/s) frequenza

 $V = \omega/\beta$ (m/s) velocità propagazione onde elettromagnetiche

 $\lambda = 2\pi/\beta = V/f$ (m) lunghezza d'onda

Questa equazione è la soluzione alle equazioni di Maxwell che regolano il comportamento delle onde elettromagnetiche.

3.4.1 Rifrazione delle onde elettromagnetiche

Al passaggio tra due materiali con caratteristiche elettromagnetiche differenti, l'onda elettromagnetica subisce una parziale rifrazione.

Per analizzare il modo in cui l'onda trasmessa nel terreno e che si propaga ad una materiale con caratteristiche elettromagnetiche differenti, è opportuno riferirsi alla Legge di Snell, esemplificata in *figura 12* (Weschool, 2021):



Figura 12: comportamento di un raggio elettromagnetico al passaggio tra due materiali con caratteristiche elettromagnetiche differenti (legge di Snell)

In cui gli indici n_i e n_r sono indici caratteristici dei mezzi, chiamati anche "impedenza". Di solito, la legge di Snell viene espressa con le velocità di propagazione dell'onda nei due mezzi:

$$\frac{\sin\theta i}{\sin\theta r} = \frac{v1}{v2}$$

Nel caso in cui il raggio incidente all'interfaccia la incontri con un angolo detto "angolo critico" θc , il raggio rifratto viaggia esattamente all'interfaccia tra i due strati e verrà rifratto di nuovo verso la superficie, giungendo così al ricevitore. In questo caso, si ha:

 $\sin \theta r = 0$ perché l'angolo di rifrazione è un angolo retto,

$$\sin \theta i = \sin \theta c = \frac{v_1}{v_2}$$

Dalla relazione precedente è chiaro come, se la velocità di propagazione dell'onda nel secondo strato fosse maggiore, non si potrebbe avere nessun angolo critico. Per quanto riguarda le densità, invece, il ghiaccio ha una densità media di 917 kg/m³, mentre la roccia ha una densità media di 2700 kg/m³.

3.4.2 Coefficiente di riflessione e trasmissione

Un'ultima importante regola da considerare è la così chiamata "RT rule" valida solo se l'angolo di incidenza del segnale è maggiore di 80° e lo spessore del secondo strato è molto maggiore della lunghezza d'onda del segnale.

Secondo tale legge, si hanno due parametri:

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$
$$T = \frac{2z_2}{z_2 + z_1}$$

Con:

R coefficiente di riflessione (-)

T coefficiente di trasmissione (-)

Z impedenza intrinseca; $z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{i\omega\varepsilon + \sigma}}$

Questi parametri sono coefficienti che esprimono la parte di onda che viene trasmessa o riflessa, a partire dall'intensità originaria del segnale. La somma di R e T deve essere quindi pari a 1.

4 Elaborazione dati

Di seguito si riporta un diagramma di flusso illustrativo di come si è svolto il lavoro. Si considerano quattro blocchi. In primis si inseriscono i dati di entrata nel codice Matlab, successivamente questi dati vengono elaborati. In seguito all'elaborazione, si procede all'analisi e interpretazione dei risultati e quindi all'esposizione degli stessi.

4.1 Diagramma di flusso



Si fornisce di seguito una spiegazione più dettagliata di alcune fasi.

4.2 Illustrazione del procedimento

4.2.1 Elaborazione dei dati grezzi

Questa operazione è stata svolta tramite codice Matlab, chiamato GPRproc. Il codice si occupa di restituire, per ogni profilo, un'immagine bidimensionale che sia rappresentativa di ogni sezione del ghiacciaio corrispondente a ciascun profilo. Il codice chiede alcune azioni in entrata, durante il processamento, che riguardano:

Selezione del main bang. Il main bang corrisponde al momento in cui l'antenna comincia a trasmettere il segnale nel sottosuolo. E' necessario comunicare al software il punto in cui c'è l'interfaccia tra aria e superficie del ghiacciaio, per permettere la distinzione tra i dati provenienti dalla trasmissione delle onde elettromagnetiche in atmosfera e quelle sulla superficie del ghiacciaio o al suo interno. In *figura 13*, un esempio di come il radargramma si presenta prima di qualsiasi operazione. Chiaramente risulta totalmente impossibile da interpretare.



Figura 13: radargramma prima delle operazioni. Sull'asse x sono riportate le tracce e sull'asse y i samples. Vanno rispettivamente riferiti a disposizione lungo la direzione di acquisizione e profondità

- Rimozione della traccia media. Questo passaggio è utile a mettere in atto una prima filtrazione del segnale; eliminando la traccia media si può vedere più chiaramente la variazione del segnale.
- Taglio di inizio e fine ad antenna ferma. Con questa operazione si eliminano i dati riferiti agli istanti in cui l'antenna si trovava ferma perché a inizio o fine acquisizione; dati pertanto non utili.
- Filtraggio passa banda. Qui si ha la possibilità di scegliere se filtrare il segnale e, se sì, sulla base di quale frequenza campione; la media frequenza del segnale o una frequenza fissa di 200 MHz. Si ricorda che l'antenna della strumentazione utilizzata durante le campagne di indagine trasmette a 200 MHz. La scelta di effettuare questo tipo di filtraggio si fa sulla base dello spettro di ampiezza del segnale, presentato dall'interfaccia del software dopo il passaggio successivo. Se è chiaramente individuabile la presenza di una traccia di ampiezza nettamente diversa dal resto e che presenta una certa continuità, l'applicazione del filtraggio centrato su quella frequenza aiuta a rimuovere una parte di segnale di fondo, permettendo una visione più chiara del segnale principale.

In *figura 14*, un esempio della figura presentata da Matlab sullo spettro di ampiezza del segnale complessivo, dopo i passaggi precedenti. Si può vedere come non c'è una particolare differenza di ampiezza tra segnale di fondo e traccia.



Figura 14: spettro di ampiezze riguardante l'intera traccia. Sull'asse y è riportata la frequenza del segnale registrato, in scala colore la sua ampiezza. Sull'asse x la direzione di acquisizione

- Filtraggio passa basso e passa alto moving average. Anche qui, la possibilità di scelta è tra nessun filtraggio o un filtraggio utilizzando un numero dispari corrispondente alla moving average. Con questa operazione si eliminano sostanzialmente i valori outliers e le interferenze che possono rendere il segnale disturbato.
- Recupero di divergenza approssimato. Questa parte permette di compensare la perdita di intensità del segnale dovuta all'attenuazione geometrica e attenuazione dissipativa. Si può scegliere tra un recupero assente, lineare, quadratico o cubico. In questo modo si può vedere più chiaramente in profondità. In *figura 15 a*) è mostrato il radargramma prima del passaggio, in *figura 15 b*) il radargramma dopo il passaggio. Nonostante il radargramma sia molto confusionario, siccome mancano ancora i passaggi successivi, dopo il recupero divergenza si può già intravedere la posizione dell'interfaccia ghiaccio-roccia.





 Rimozione di tracce ferme all'interno del profilo. Corrispondenti a momenti in cui ci si è fermati durante l'acquisizione. Nel codice, l'opzione viene riproposta tre volte ma può essere effettuata anche un numero di volte maggiore, se necessario.

4.2.2. Radargramma elaborato e successive operazioni

Fase 3: La matrice di dati in uscita racchiude tutto ciò che risulta dal processamento dei dati grezzi in ingresso. E' per questo che questi dati sono utili non solo per dar forma all'immagine del radargramma processato ma anche per successive rielaborazioni, come la migration.

Fase 3a: Le iperboli che sono visibili dal radargramma processato non necessariamente corrispondono in parte integrale alle cavità ma possono anche rappresentare discontinuità di tipo diverso, come la presenza di un corpo roccioso estraneo al ghiacciaio. Per cercare di selezionare le iperboli corrispondenti solamente alle cavità, si è utilizzato un codice Matlab chiamato MIGRATION_afterSTACK. Il codice esegue fondamentalmente due operazioni: lo stack e la migration. Lo stack consiste nel raggruppare tra loro più tracce all'interno del profilo, in modo da alleggerire la quantità di dati da elaborare durante la fase successiva. La migration riduce il più possibile le iperboli ad un punto singolo, in modo da poter evidenziare la posizione presunta esatta delle cavità ed eliminare altri elementi che non corrispondono a cavità, seppur vengano rappresentati tramite iperboli.

Il codice utilizza i dati in uscita dal codice GPRproc. In uscita si ottengono quindi dei radargrammi processati senza iperboli ma con elementi puntuali, corrispondenti idealmente alle cavità.

Fase 4a, 4b: In questa fase, si è fatto uso di un codice Matlab chiamato GPRpick. Il codice parte dalla figura Matlab ottenuta dal processamento con il codice GPRproc. Lo scopo è quello di tracciare lo sviluppo della base del ghiacciaio e la presenza di eventuali cavità all'interno di esso. Il codice permette di eseguire questa operazione, consentendo di posizionare dei punti direttamente sull'immagine del radargramma processato.

L'operazione di "picking" va fatta separatamente per il fondo e per le cavità. Alla fine dell'operazione, infatti, il codice restituisce una nuova figura Matlab in cui sono isolati i punti presi sulla sezione del radargramma, che devono quindi essere rigorosamente distinti tra quelli appartententi alla base del ghiacciaio e quelli corrispondenti alla cavità. In particolare, essendo che le cavità ed altre anomalie del ghiacciaio sono visualizzati come iperboli sul radargramma, si è selezionato solo il vertice per ciascuna iperbole. Nel caso dei picking effettuati sui radargrammi risultanti dalla migration, si è effettuato il picking degli elementi puntiformi, non più delle iperboli.

Fase 5a e 5b: In queste fasi si ottengono delle immagini che forniscono informazioni qualitative e quantitative della disposizione della base e delle cavità del ghiacciaio lungo ciascun profilo. Ogni immagine corrisponde ad un radargramma. Un'immagine singola non fornisce informazioni significative, per questo è necessario il passaggio successivo.

Fase 6a e 6b: La fase di picking ha consentito di determinare il fondo del ghiacciaio e le cavità presenti per ciascun profilo preso singolarmente. Successivamente è stato quindi necessario mettere insieme tutti i profili ottenuti dal picking per ciascun anno di indagine. Questa operazione è stata svolta con il codice Matlab ASSEMBLA_PICKING. Il codice si occupa infatti di unire i vari profili in un'unica immagine georeferenziata. I dati per ogni singolo profilo sono stati uniti separatamente per fondo e cavità.

Si sono così ottenute diverse tipologie di immagini, relative sia al fondo del ghiacciaio che alle cavità (o discontinuità generiche all'interno del volume del ghiacciaio).

L'operazione di assemblaggio dei picking è stata svolta, ovviamente, separatamente per quanto riguarda immagini derivanti dal picking diretto e quelle derivanti da picking dei radargrammi migrati.

4.3 Analisi e presentazione dei radargrammi

Nella fase 3 si ottiene un'immagine come quella in *figura 16*: essa costituisce il radargramma processato in uscita dal codice GPRproc.



Figura 16: radargramma processato in uscita dal codice GPRproc, ovvero immagine definitiva del radargramma. In particolare, la figura è riferita al profilo 14 del 2019

Dalla *figura 16* si possono chiaramente individuare due tipologie di informazioni:

- La transizione tra volume del ghiacciaio e roccia madre. Il volume del ghiacciaio risulta di colore verde, mentre la roccia appare come uno strato prevalentemente nero. Al di là della distinzione dei colori, si può individuare la transizione tra uno strato e l'altro con un'interfaccia abbastanza netta.
- Le iperboli di colore scuro all'interno del volume di ghiaccio. Tali elementi individuano discontinuità all'interno del ghiacciaio, siano esse cavità, corpi estranei o anche crepacci. Possono apparire più o meno definite, a seconda della qualità dell'immagine elaborata e dei dati di partenza ma anche a seconda delle dimensioni della discontinuità stessa.

In figura 17 sono illustrate le caratteristiche del radargamma e gli elementi presenti.



Figura 17: radargramma processato con illustrazione delle varie caratteristiche ed elementi presenti

In fase 3a, la migration è una procedura di elaborazione che permette di correggere l'effetto delle iperboli, concentrando il segnale diffratto nel vertice dell'iperboledelle iperboli. Il risultato è un radargramma che non presenta più le iperboli ma solamente elementi puntuali, interpretabili come cavità. Il risultato è mostrato in *figura 18*.



Figura 18: radargramma così come risulta dopo l'operazione di migration after stack ed evidenziazione di una cavità endoglaciale

Nella fase 4a, si esegue il picking direttamente sul radargramma elaborato; la figura risultante mostra i punti selezionati come asterischi rossi. In *figura 19* si può vedere l'operazione di picking della base del ghiacciaio, effettuata percorrendo il più fedelmente possibile la linea di separazione tra i due diversi strati.



Figura 19: operazione di picking del fondo, evidenziata dai punti rossi sul radargramma. Nello specifico, traccia 14, 2019

In fase 4b il picking viene fatto solamente per le cavità, in quanto la natura dell'interfaccia tra volume di ghiaccio e substrato roccioso viene modificata in modo marginale dalla migration e non costituisce il target principale della migration.

4.4 Risultati

Con la fase 5a e 5b, risultati possono essere analizzati in modo qualitativo e quantitativo. Come accennato in precedenza, per ogni profilo si sono ottenute immagini 3D in grado di evidenziare la situazione delle discontinuità e l'andamento dell'interfaccia ghiaccio-substrato roccioso. In *figura 17* il risultato per uno dei profili. La *figura 20 a*) è riferita al picking del fondo, mentre la *figura 20 b*) al picking delle cavità.



Figura 20 a): immagine 3D dal picking della base del ghiacciaio. I punti rossi rappresentano la base e la curva nera la traccia di acquisizione sulla superficie. Nello specifico, l'esempio è riferito alla traccia 14 del 2019

Figura 20 b): discontinuità del ghiacciaio, rappresentate in rosso, e traccia in superficie, in nero. Nello specifico, l'esempio è riferito alla traccia 14 del 2019

In rosso il risultato del picking mentre la linea nera rappresenta la traccia di acquisizione sulla superficie. Le immagini in 3D consentono di apprezzare le coordinate spaziali per ciascun punto: latitudine, longitudine e altitudine, sebbene si tratti ancora di un unico profilo.

Con la fase 6a e 6b vengono assemblati i risultati ricavati da tutti i profili per ciascun anno. In questo modo sono state ottenute immagini tridimensionali rappresentative della morfologia della superficie del substrato roccioso e delle cavità del ghiacciaio per i singoli anni.

La procedura di interpolazione, eseguita sempre in ambiente Matlab, consente di modellare un'immagine tridimensionale continua della morfologia del fondo ghiacciaio per ciascun anno. L'immagine risultanteè interattiva ed è possibile "interrogarla" sulle coordinate di ciascun punto, nonché sulla profondità. E' possibile ruotare e ribaltare l'immagine, per apprezzarne ogni dettaglio. Trattandosi di un'interpolazione, l'accuratezza del risultato è comunque dipendente da molteplici fattori, che qui non vengono analizzati in dettaglio quali la densità la distribuzione dei punti sperimentali, la loro accuratezza, e l'errore introdotto dal processo di interpolazione.

In *figura 21,22,23,* si vedono diverse tipologie di rappresentazione dei risultati ottenuti dall'unione di tutti i profili relativi alla base del ghiacciaio così come si presentava nel 2019. La scala colore vale per tutte le immagini e si riferisce alla profondità rispetto alla superficie.



Figura 21: picking 3D per ciascuna traccia. In rosso sono rappresentati tutti i picking della base del ghiacciaio, eseguiti per ciascuna traccia e assemblati in un'unica immagine



Figura 22: picking 3D per ciascuna traccia con scala colore a seconda della profondità. Le singole tracce sono state assemblate in un'unica immagine



Figura 23: immagine bidimensionale recante la profondità al di sotto della struttura del ghiacciaio, con scala colore. L'immagine è stata costruita in seguito all'assemblaggio dei picking per le singole tracce

Per permettere una migliore comprensione della situazione, in *figura 24* è mostrato un accostamento tra la superficie del ghiacciaio così come appare su Google Earth e l'immagine recante la profondità del ghiacciaio, calcolata con Matlab.



Figura 24: confronto tra dati fotografici e dati di calcolo della profondità.

24a): inquadramento territoriale su larga scala

24b) inquadramento dell'area di interesse su scala ridotta e identificazione dei vertici che circoscrivono l'area

24c): immagine georeferenziata esplicativa della profondità del ghiacciaio al di sotto della superficie

In particolare, la figura 21 a) è l'immagine satellitare su larga scala, per inquadrare in modo più vasto l'area di interesse, la figura 21 b) riporta l'area di interesse su piccola scala e la figura 21 c) riporta la profondità del ghiacciaio al di sotto della superficie.

Sull'immagine fotografica i quattro punti delimitano l'area quadrata all'interno della quale è inserito il poligono rappresentativo della profondità della superficie nei vari punti. L'orientamento è lo stesso sia per l'immagine satellitare che per l'immagine riportata nel grafico.

Le coordinate dei punti sull'immagine satellitare, in figura 24 b), sono:

- 1: 393280 E, 5090840 N
- 2: 393400 E, 5091000 N
- 3: 393400 E, 5090840 N
- 4: 393280 E, 5091000 N

Si può vedere come la profondità maggiore, nel 2019 così come anche negli altri anni, sia raggiunta nell'area centrale della maglia costituita dalle tracce ma indicativamente anche nell'area centrale del ghiacciaio. Tale caratteristica è intuibile, in quanto le aree periferiche sono quelle direttamente coinvolte negli scambi di calore con la roccia circostante e l'atmosfera, nonché alle variazioni di volume dovute alla fusione, all'erosione del vento e al distacco di materiale solido.

In figura 25 si riporta un modello 3D della base ottenuto tramite interpolazione.



Figura 25: modello con scala colore della profondità del ghiacciaio nel 2019 ottenuta tramite interpolazione

Questa immagine è la più esplicativa, in quanto mostra l'aspetto del ghiacciaio nella sua interezza, indica l'andamento della profondità con latitudine e longitudine. La scala colore aiuta ad associare una profondità a ciascun punto. Si ribadisce come la profondità maggiore si raggiunga nell'area centrale.

In *figura 26 a) e figura 26 b)* sono invece riportate le discontinuità. La scala colore si riferisce nuovamente alla profondità



Figura 26 a): immagine 3D delle discontinuità ottenute tramite picking con scala colore per la profondità, riferite al 2019

Figura 26 b): immagine 3D delle discontinuità ottenute tramite picking monocromatiche, riferite all'anno 2019

La disposizione delle discontinuità sembra concentrarsi nell'area centrale del volume; la zona più superficiale e quella più profonda sono meno affette da discontinuità, così come le aree periferiche laterali.

Purtroppo, si può notare come i volumi siano piuttosto affollati dai punti o asterischi. Le immagini rappresentano infatti la presenza non solo delle cavità, ma di qualsiasi irregolarità all'interno del volume di ghiaccio che, nel radargramma, è rappresentata come iperbole. E' per questo che è più corretto parlare in generale di discontinuità, piuttosto che di cavità nello specifico.

Ci si può sbilanciare a parlare solamente di cavità nel caso di assemblaggio di profili sottoposti a picking dopo la migration, che ha come scopo quello appunto di mostrare solamente le discontinuità individuabili come cavità. In *figura 27 a*) *e figura 27 b*) si vedono i risultati del 2019 dal picking dopo l'operazione della migration.



Figura 27 a): immagine 3D delle cavità con scala colore dopo l'operazione di migration after stack, riferite al 2019 Figura 27 b): immagine 3D delle cavità in monocromatico dopo l'operazione di migration after stack, riferite al 2019

Si osserva come la quantità di punti o asterischi sia notevolmente ridotta rispetto all'assemblaggio effettuato senza prima agire con la migration.

Dopo aver ottenuto un'indicazione abbastanza completa sulla struttura del fondo e la posizione delle cavità del ghiacciaio, si è passato al confronto tra i profili di diversi anni e all'analisi dei cambiamenti all'interno dell'arco temporale di studio, ovvero la fase 7.

In *figura 28* è riportato il confronto tra il fondo del ghiacciaio negli anni 2017 e 2020. Purtroppo, parte delle superfici 3D non risultano sovrapponibili o confrontabili, in quanto l'ampiezza dell'area di indagine del 2020 è ridotta rispetto a quella del 2017. Tuttavia, è evidente come negli ultimi quattro anni il ghiacciaio sia stato interessato da una riduzione di spessore e quindi volume.



Figura 28: sovrapposizione per messa a confronto delle profondità del ghiacciaio così come si presentava nel 2017 (rosso) e nel 2020 (blu)

La superficie blu (2020) si trova ad una profondità minore rispetto a quella rossa (2017), salvo alcuni punti isolati. In questi punti particolari, si vede come nel 2020 il ghiacciaio si sia ispessito. Sembrerebbe una considerazione controintuitiva. In effetti tale situazione potrebbe essere dovuta ad un'imprecisione nell'interpolazione dei punti per elaborare la superficie. E' quindi plausibile un ispessimento del ghiacciaio negli ultimi anni, soprattutto se in punto rari e isolati e nelle aree che già presentavano maggiore profondità.

Lo spessore del ghiacciaio è quindi minore nel 2020. Inoltre, il ghiacciaio così come si presenta nel 2020, possiede una struttura meno concava rispetto a come appariva nel 2017. La diminuzione di concavità dipende sicuramente dalla perdita di volume per fusione.

Anche questa immagine, come tutte le immagini, d'altra parte, è interattiva ed offre la possibilità di analisi diretta di ciascun punto.

Si è provveduto anche ad analizzare la variazione di profondità del ghiacciaio nell'arco temporale dei quattro anni, in modo da capire l'entità numerica della variazione.

Si è calcolata una perdita di spessore fino ad un massimo di 11,46 m (considerando una sezione verticale).

Si è calcolato, in prima approssimazione, la riduzione del volume del ghiacciaio tra gli anni 2017 e 2020. Il punto di partenza sono i valori differenza di profondità per l'arco di tempo considerato; si stima un valore di circa 42000 m³ "persi".

Il risultato si basa sull'utilizzo della funzione meshgrid di Matlab, pertanto non rappresenta un valore accurato; fornisce tuttavia una buona indicazione dell'evoluzione del volume del ghiacciaio durante la finestra temporale, per lo meno in modo da avere una valutazione di massima.

Si è inoltre proceduto alla dei risultati di profili diversi di anni diversi. L'accoppiamento è stato realizzato selezionando, a due a due, profili che ricalcassero il più possibile la stessa direzione. In *figura 29* è riportato un esempio di sovrapposizione tra profili per la base del ghiaccio e in *figura 30* uno per le cavità.



Figura 29: sovrapposizione e messa a confronto dei profili per la profondità del ghiacciaio, traccia 11 del 2018 (rosso) e traccia 8 del 2019 (blu)

Dalla *figura 29*, si può apprezzare non solo la riduzione di profondità del ghiacciaio ma anche la notevole riduzione (fino a scomparsa, in questa sezione precisa) della sua concavità.



Figura 30: sovrapposizione e messa a confronto dei punti che individuano le possibili cavità del ghiacciaio, traccia 11 del 2018 (rosso) e traccia 8 del 2019 (blu)

In *figura 30*, si nota come nessuna delle cavità del 2018 sia rimasta presente fino al 2019. La sezione sottolinea un aspetto della ricerca che riguarda tutti e quattro gli anni e tutte le sezioni. Si è notato, infatti, che non esistono sovrapposizioni tra cavità di anni diversi. Questo può dipendere da numerosi fattori che vengono esplicati in un paragrafo successivo. In ogni caso, la variazione del pattern delle cavità è un tema molto importante nello studio dei ghiacciai e, in particolare, del ghiacciaio Cherillon. Più della variazione dello spessore del ghiacciaio, la variazione della disposizione delle cavità ne influenza la stabilità e l'evoluzione nel

tempo. Ogni cavità, infatti, rappresenta un punto di discontinuità che può favorire un cambiamento dei parametri del ghiacciaio: porosità, conducibilità termica, peso, eccetera.

Per ciascuno dei quattro anni si è provveduto ad estrapolare le ipotetiche posizioni della cavità all'interno del volume del ghiacciaio a partire dai radargrammi processati. Grazie all'unione di tutti i risultati ottenuti dai singoli radargrammi corrispondenti alle singole tracce si è potuto ottenere una griglia recante la posizione delle cavità. I file sono stati convertiti in formato supportato da Google Earth, in modo da sovrapporre la posizione delle cavità con le tracce delle acquisizioni, come si vede in *figura 31*, relativa alla campagna di acquisizione del 2020. Si parla di cavità perché i dati utilizzati sono quelli in uscita dalla migration.



Figura 31: immagine satellitare che presenta la collocazione delle tracce appartenenti alla campagna di indagine del 2020 e proiezione sulla superficie del ghiacciaio e sulle tracce stesse della posizione delle cavità rilevate

Il procedimento è stato ripetuto per ogni singolo anno, in modo che fosse possibile collocare le cavità sulle tracce.

Con il processo di migration after stack, il numero di cavità individuate si è ridotto notevolmente rispetto alla situazione risultante prima dell'operazione. In questo modo sono state evidenziate solamente le cavità di maggiore entità e quindi maggiore impatto e significatività per lo studio del ghiacciaio.

Si sono sovrapposte i reticoli delle cavità della campagna di acquisizione del 2017 e 2020, in modo da visualizzare le variazioni nell'arco dei quattro anni. Il risultato è mostrato in *figura 32*. Purtroppo, alcune cavità del 2017 risultano fuori dal campo di indagine del 2020, pertanto alcuni risultati non sono paragonabili tra i due anni considerati.





Figura 32: immagine satellitare che riporta le tracce della campagna di indagine del 2020, con sovrapposizione della proiezione delle posizioni delle cavità del 2020 (blu) e 2017 (giallo), messe a confronto.

Quello che in linea di massima si può osservare da questo risultato è che le cavità non ricalcano lo stesso pattern nella finestra di indagine. Ciò significa che in quattro anni, l'evoluzione morfologica del ghiacciaio ha modificato il pattern delle cavità all'interno del volume. Inoltre, si osservi anche come le cavità si trovino tendenzialmente a gruppi, seppur non manchino anche elementi più isolati dagli altri.

5 Discussione sull'evoluzione delle strutture endoglaciali

La scomparsa e ricomparsa della cavità può dipendere da numerosi fattori:

- 1. L'aumento della temperatura. Essa è a sua volta dipendente da altre variabili, come l'albedo della superficie ghiacciata, lo spessore del manto nevoso, i venti e le precipitazioni. La variazione di albedo causa una variazione della capacità riflettente della superficie ghiacciata. Se essa decresce, la temperatura sulla superficie del ghiacciaio e/o del manto nevoso sale, a causa del maggiore assorbimento di radiazioni solari. La diminuzione dell'albedo può essere causata dal deposito di particelle sabbiose, particolati atmosferici portati dal vento, per esempio. In aggiunta, uno spessore ridotto del manto nevoso favorisce l'assorbimento e/o la trasmissione direttamente nel volume sottostante di ghiaccio, causandone possibilmente l'innalzamento di temperatura e potendo anche portare ad un principio di fusione.
- 2. I venti e le precipitazioni influenzano lo scambio di calore tra atmosfera e sistema del ghiacciaio. Il tutto dipende dalla natura stessa delle precipitazioni. Il vento a bassa temperatura favorisce uno scambio di calore da ghiacciaio ad atmosfera, mentre un vento caldo promuove il processo contrario. Precipitazioni acquose favoriscono la fusione del manto nevoso per scambio di calore, mentre le precipitazioni nevose favoriscono la crescita di spessore del manto nevoso, che può funzionare, in un certo senso, da isolante tra il volume del ghiacciaio e l'atmosfera. Per quanto riguarda l'andamento delle temperature nel 2020, si fa riferimento alla *figura 3*. Per quanto riguarda le precipitazioni, invece, si riporta alla *figura 5*.
- 3. Lo spessore stesso del ghiacciaio. Volume maggiore significa peso maggiore. Se il peso del ghiacciaio crescesse, le cavità già presenti potrebbero essere soggette a scomparsa per il collasso delle pareti della cavità stessa. L'incremento del peso coinvolge anche l'apporto positivo delle precipitazioni nevose, mentre il vento può invece causare un'abrasione dello strato nevoso superficiale.
- 4. Scambio di calore all'interno del ghiacciaio. Potrebbe verificarsi la comparsa di canali preferenziali di trasmissione del calore all'interno del volume del ghiacciaio, per qualche variazione locale di spessore o cambiamento nella morfologia del ghiacciaio. Questo potrebbe portare a fusione e solidificazione di parti circoscritte all'interno del volume del ghiacciaio, soprattutto per quanto riguarda le aree soggette ad elevate pressioni.
- L'inquinamento atmosferico e la sospensione di polveri e particolato atmosferico. Questi elementi influenzano il deposito di materiali e, appunto, polveri sottili sullo strato superficiale del ghiacciaio. Se il ghiacciaio è reso opaco dalla presenza di depositi, la sua capacità riflettente albedo diminuisce. Le conseguenze sono quelle illustrate al punto 1.

6 Conclusioni

Il ghiacciaio di Cherillon, come tutti i ghiacciai della Valle d'Aosta e del Mondo intero, sono soggetti a continui cambiamenti. Ultimamente, però, la preoccupazione data dai cambiamenti osservati è sempre maggiore, a causa dell'impatto che essi hanno sull'attività antropica e sull'ambiente stesso. Negli ultimi due secoli, si è registrata una progressiva riduzione della superficie montuosa coperta dal ghiaccio, per quanto riguarda il complesso del Cervino e il ghiacciaio di Cherillon nello specifico, come illustrato dalle immagini satellitari in *figura 2 a*) e *2 b*), fornite dalla regione Valle d'Aosta. I principali fattori contribuenti alla fusione nivale e glaciale sono sicuramente da attribuire al cambiamento climatico, in prima battuta; l'innalzamento di temperatura negli ultimi anni nelle aree montuose in questione è addirittura superiore all'innalzamento termico mondiale, raggiungendo un valore di ben + 1,2 °C (contro 0,73°C di media mondiale). L'innalzamento della temperatura media porta chiaramente uno squilibrio termico con conseguente mobilitazione di flussi termici che provocano la fusione dei ghiacci. Le conseguenze sono serie, a partire dalla quantità di acqua di fusione che si riversa nelle vallate, provocando squilibri idrici e instabilità dei versanti.

Inoltre, le precipitazioni nei mesi invernali, che potrebbero contribuire ad un ispessimento del manto nevoso e ad una ricostruzione del volume dei ghiacciai, sono molto scarse e concentrate in poche giornate, come illustrato in *figura 5*. Sono più abbondanti le precipitazioni nei mesi estivi e primaverili ma in questi mesi le temperature registrate sono troppo alte per ottenere beneficio dalle precipitazioni che spesso non sono nemmeno nevose ma piovose. Quindi non c'è equilibrio tra fusione e solidificazione, la prima prevale sulla seconda a causa delle condizioni ambientali. Nel corso degli anni si avrà quindi sempre più fusione che non sarà mai compensata da nuova solidificazione e ricostruzione dello spessore dei ghiacci.

Per affrontare il problema, si può cominciare dal cercare di studiarne le conseguenze. Per fare ciò, è necessario conoscere i ghiacciai in modo approfondito. Per questo, è importante studiarne non solo le caratteristiche morfologiche nel presente ma il modo in cui queste caratteristiche variano nel corso degli anni. Partendo dai dati bibliografici a disposizione, si può proseguire con lo studio delle evoluzioni future basandosi sui dati del passato recente e del futuro.

In questo studio si è adottato un approccio che ha permesso di ottenere dati esplicativi sullo spessore del ghiacciaio e la presenza di cavità all'interno del suo volume nell'arco di quattro anni, dal 2017 al 2020. La finestra temporale è ridotta ma è un inizio. In primis, si sono raccolte informazioni su come il ghiacciaio si presentava ciascun anno. La strumentazione utilizzata, il GPR, ha permesso un'indagine non invasiva effettuata direttamente sulla superficie del ghiacciaio. La metodologia utilizzata si basa sull'utilizzo di onde elettromagnetiche, trasmesse e ricevute per riflessione e rifrazione, e sulla conoscenza delle proprietà elettromagnetiche del ghiaccio e della roccia che costituisce il substrato su cui il ghiacciaio sorge.

Lo studio si è suddiviso quindi in due fasi: elaborazione dei dati e loro analisi e interpretazione.

L'elaborazione dei dati si è basata sulle campagne di indagine condotte sul ghiacciaio nei quattro anni e ha permesso di ottenere delle immagini che permettono una visualizzazione diretta della morfologia del ghiacciaio al di sotto della superficie. I metodi elettromagnetici consentono infatti di capire cosa si trova sotto la superficie senza la necessitò di verificarlo fisicamente. Le immagini bidimensionali ottenute, chiamate radargrammi, hanno permesso una costruzione di nuove immagini tridimensionali o bidimensionali, sovrapponibili alle immagini satellitari disponibili in rete; a questo scopo, tutte le immagini sono georeferenziate.

La fase di analisi e interpretazione dei risultati, invece, riguarda principalmente il confronto tra la situazione del ghiacciaio nei quattro anni. Si sono sovrapposte immagini tridimensionali per valutare la riduzione di spessore del ghiaccio, come mostrato in *figura 28*. Il massimo dislivello tra profondità del ghiacciaio tra 2017

e 2020 è stato calcolato pari a 11,46 m, per sezioni verticali, ed è stata calcolata una riduzione di volume di circa 42000 m³.

Sebbene le indagini condotte con il GPR presentino numerosi vantaggi, primo tra tutti la possibilità di interpretare i dati interamente in formato digitale, il rovescio della medaglia riguarda l'intrinseca difficoltà di interpretazione. Si è infatti ribadito più volte come i dati forniti dal radar non consentano una valutazione precisa della reale presenza e dell'effettiva collocazione e dimensione delle cavità endoglaciali. Le iperboli di diffrazione registrate sui radargrammi, infatti, non possono essere direttamente interpretabili come cavità. La presenza delle iperboli, infatti, può derivare anche da rumore di fondo, irregolarità nel ghiaccio di entità irrilevante, disturbo nella frequenza del segnale, presenza di corpi rocciosi all'interno del ghiaccio e ancora crepacci o disomogeneità. Con l'operazione di migration after stack si è potuto in parte ridurre il numero di iperboli presenti, identificando le cavità non più come iperboli sul radargramma ma come punti. Tuttavia, con questa operazione è possibile che siano state soppresse anche iperboli che effettivamente rappresentavano delle cavità.

Anche la valutazione dello spessore del ghiacciaio presenta le sue criticità. Infatti, sebbene i radargammi mostrino un'interfaccia abbastanza riconoscibile tra ghiaccio e substrato roccioso, si può comunque incorrere in errori ed imprecisioni, ancora una volta causati da imprecisione nell' acquisizione dei dati, rumore, interferenza, eccetera.

Un'altra difficoltà è rappresentata dai limiti del software di calcolo, soprattutto per quanto riguarda le interpolazioni. Non essendo presenti infatti dati continui ma discreti, è stato inevitabile ricorrere all'interpolazione, soprattutto per la costruzione e visualizzazione di immagini tridimensionali in seguito all'assemblaggio di più tracce radar, derivanti dall'operazione di picking. L'interpolazione, però, implica approssimazione e di conseguenza molte immagini risultano frastagliate e imprecise. Bisogna tenere conto di questo aspetto ogni volta che si confrontano dati di anni diversi ma anche nell'interpretazione di immagini appartenenti a campagne di indagine di un solo anno.

In ogni caso, quello che è certo, è che il ghiacciaio si sia nettamente assottigliato negli ultimi quattro anni e che le cavità al suo interno non si trovino nella stessa posizione per due anni di fila. Mentre la riduzione di spessore del ghiacciaio può sicuramente essere attribuita al cambiamento climatico, ovvero all'innalzamento della temperatura media e conseguente fusione di volume di ghiaccio, il cambiamento del pattern delle cavità è un argomento più delicato da affrontare, in quanto coinvolge processi più complessi, come scambi di calore, agenti meccanici, eccetera.

Per sintetizzare, quindi, il lavoro svolto fornisce una panoramica dei principali aspetti e caratteristiche riscontrati ed una valutazione qualitativa ed in parte anche quantitativa di ciò che è accaduto al ghiacciaio di Cherillon negli ultimi quattro anni, soprattutto per quanto concerne il suo spessore e le cavità nel volume di ghiaccio. Si mettono a disposizione delle immagini rappresentative della situazione al di sotto della superficie che possono essere utilizzate anche per comprendere le aree e i volumi del ghiacciaio maggiormente esposti a fusione, fornendo anche un pattern delle cavità o irregolarità verosimilmente presente nei diversi anni.

I risultati ottenuti possono essere utilizzati in futuro per costruire una modellazione numerica previsionale dell'evoluzione del ghiacciaio di Cherillon ma anche, più in grande, dei ghiacciai del sistema del Cervino e, possibilmente, di tutti i ghiacciai del nord Italia. Tutti i dati e le immagini fornite possono essere integrati con altri studi e materiali a disposizione, nonché essere implementati e resi oggetto di un maggiore approfondimento, portando avanti lo studio già iniziato. Con una sufficiente quantità di dati, raccolti in una finestra temporale più ampia, sarà possibile cercare un eventuale schema nell'evoluzione spazio-temporale dei ghiacciai e quindi renderla prevedibile. E' possibile che si trovi anche uno schema nell'evoluzione della disposizione di cavità e irregolarità all'interno del ghiacciaio, cosa che non è stata possibile con solamente quattro anni di dati.

7 Bibliografia

Zekollari H., Huss H., Farinotti D., 2019, *Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble*, The Cryosphere.

Oerlemans J., *Minimal glacier models*, 2008, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht.

Gossenberg E., 2019, *Analisi di dati georadar per l'individuazione di cavità endoglaciali*, Politecnico di Torino.

Baroni C., Bondesan A., Chiarle M., 2016, *Relazioni della campagna glaciologica 2016*, pp. 45-46, http://www.glaciologia.it/wp-

content/uploads/FullText/full_text_campagne_GFDQ/GFDQ_40_2_Campagna_Glaciologica_2016_233_320 .pdf

Baroni C., Bondesan A., Chiarle M., 2015, *Relazioni della campagna glaciologica 2015,* pp. 42-43, http://geoclimalp.to.cnr.it/campagne_glaciologiche/CG2015.pdf

Baroni C., Bondesan A., Chiarle M., 2011, *Relazioni della campagna glaciologica 2011*, p. 40, http://www.glaciologia.it/wp-content/uploads/FullText/full text 35 2/GFDQ 35 2 Campagna glaciologica 2011 211 279.pdf

ARPA Piemonte, 2009, *Clima e ghiacciai alpini*, https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/impatti/Ghiacciai.html

Fondazione montagna sicura, 2013, *I dati dei ghiacciai valdostani,* http://www.fondazionemontagnasicura.org/asset/dati_ghiacciai_valdostani_rava_bertolo_2324.pdf

Isprambiente, Regione autonoma della Valle d'Aosta, 2012, *Catasto ghiacciai della regione autonoma della Valle d'Aosta: aggiornamento e piano di prevenzione dei rischi glaciali,* https://www.isprambiente.gov.it/files/doc-rischio-idraulico/broccolato.pdf

Regione autonoma della Valle d'Aosta, 2016, *Catasto ghiacciai*, http://catastoghiacciai.partout.it/ice/bd_attuale?l=it, https://mappe.regione.vda.it/pub/geoCartoSCT/ e http://catastoghiacciai.partout.it/GeoGhiacciai?l=it

Fondazione montagna sicura, 2008, *Ghiaccio di Cherillon – Valtournenche*, http://app.fondazionemontagnasicura.org/multimedia/crgv/public/allegati/28/Gh._Ch%C3%A9rillon.pdf

Annan A. P., *Ground penetrating radar principles, procedures and applications,* https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf

Nazionale S., 2016, *Relazione di fine tirocinio*, http://didaingcivile.altervista.org/files/Simone-Nazionale-LM-IVT.pdf

Del Conte A., 2004, *Il Radar penetrante (GPR)*, https://docplayer.it/23948462-Il-radar-penetrante-gpr-ing-antonio-del-conte.html

Abu Zeid N., 2019, *Georadar (GPR), tecnica elettromagnetica ad alta frequenza,* http://www.unife.it/scienze/lm.geologia/insegnamenti/geofisica-applicata/diapositive-lezioni-aa-2018-2019/metodo-em-ad-alta-frequenza-gpr/capitolo-gpr-em-geo11-parte02 e http://www.unife.it/scienze/lm.geologia/insegnamenti/geofisica-applicata/diapositive-lezioni-aa-2018-2019/metodo-em-ad-alta-frequenza-gpr/capitolo-gpr-em-parte01 Cara P., 2015, *Il Georadar: dalle indagini su vaste aree al riconoscimento dei materiali archeologici* (applicazioni nell'area di San Salvatore di Sinis e di Mont'e Prama, Sardegna), Università degli studi di Pisa, https://core.ac.uk/download/pdf/79619179.pdf

Università degli studi di Trieste, 2020, *Ground Penetrating Radar, GPR, principi e acquisizione dati*, https://moodle2.units.it/pluginfile.php/293601/mod_resource/content/1/UD3A_GPR_principi_acquisizion e_2019_2020.pdf

Santarato G., *Il georadar*, http://www.unife.it/interfacolta/lm.preistoria/insegnamenti/geofisica-applicata-per-larcheologia/materiale-didattico/dispense-aa-2015-2016/georadar-2.pdf

Godio A., 2019, *Electrical Properties, Principles of electromagnetism, GPR*, materiale didattico, Politecnico di Torino

Boccardo P., 2019, Dispense sul Telerilevamento, materiale didattico, Politecnico di Torino

ARPA Valle d'Aosta, 2018, *I ghiacciai come indicatori del cambiamento climatico*, www.arpa.vda.it/it/effetti-sul-territorio-dei-cambiamenti-climatici/ghiacciai

Landsat Science, NASA, 2021, https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overviewGuida di Google Earth, 2021,

https://earth.google.com/web/@35.3454469,138.68319708,1570a,151951d,35y,13h,0t,0r/data=CjISMBIg ODJmYzhkNGM0MTk0MTFlOGJmZjVkMzdkYTU5MmE0MmEiDHZveV9wb2ludF8xMQ?hl=it

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto la mia famiglia per avermi sostenuto durante l'intero percorso di studi.

Ringrazio poi i professori del Dipartimento Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture per avermi dato questa magnifica opportunità per approfondire e lavorare su un argomento così interessante e stimolante e per avermi dato tutto il supporto e l'aiuto necessario per sviluppare la mia tesi.

Ringrazio anche i miei amici che sono stati un'importante presenza durante non solo l'ultimo semestre ma soprattutto durante tutto il mio percorso di studi.