UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA IN VALORIZZAZIONE E TUTELA DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO MONTANO

ANALISI SPAZIALE DELL'ABLAZIONE SUPERFICIALE DEL GHIACCIAIO DEI FORNI

Relatore: Prof. Michele Eugenio D'Amico

Correlatore: Prof.ssa Antonella Senese

Elaborato finale di:
Mattia Dalpiaz
Matricola n° 965878

Anno accademico 2022-2023

INDICE

RIASSUNTO 3
1. INTRODUZIONE 4
1.1 FINALITÀ DELLO STUDIO 4
1.2 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA 4
1.3 STUDI PRECEDENTI 4
1.4 AREA DI STUDIO 5
1.4.1 I Ghiacciai 5
1.4.2 Il Ghiacciaio dei Forni 8
2 DATI E METODI 11
2.1 ATTIVITÀ DI CAMPO 11
2.2 DATI RACCOLTI 16
2.3 METODI 18
2.3.1 Ablazione superficiale 21
2.3.2 Stima dell'albedo 24
2.3.3 Distribuzione spaziale di ablazione, copertura detritica e albedo 29
3. RISULTATI E DISCUSSIONE 32
3.1 STIMA DELL'ALBEDO 32
3.2 ABLAZIONE SUPERFICIALE 35
3.3 DISTRIBUZIONE SPAZIALE DI ABLAZIONE, ALBEDO E COPERTURA DETRITICA 42
4 CONCLUSIONI 44
BIBLIOGRAFIA 46
RINGRAZIAMENTI 49

RIASSUNTO

Con l'innalzamento della temperatura media globale, dovuto ai cambiamenti climatici in corso, negli ultimi decenni si è posta una maggior attenzione all'ambiente e all'uso delle risorse.
In questo quadro emerge particolarmente l'evoluzione dei ghiacciai: questi sono, infatti, uno degli ambienti che più risentono di tale cambiamento e costituiscono un'importantissima fonte di approvvigionamento idrico per le popolazioni che vivono ai piedi delle più importanti catene montuose, non solo per quanto riguarda la risorsa idrica ad uso potabile, ma anche per tutte quelle attività che necessitano di questa risorsa, come l'agricoltura e la produzione di energia idroelettrica.
Il presente lavoro di tesi, avente come area di studio il Ghiacciaio dei Forni, uno dei più estesi ghiacciai italiani dell'arco alpino, rientra in un progetto scientifico nazionale, chiamato COLD CASE, coordinato da UNIMI e che vede come partner UNIMIB e MUSE di Trento, finalizzato al monitoraggio delle forme di vita presenti sul Ghiacciaio dei Forni e l'influenza delle condizioni superficiali sulle stesse.
Sono stati individuati diciotto siti sparsi lungo la lingua d'ablazione del ghiacciaio: per ognuno di questi siti, ad ogni uscita in ghiacciaio, sono state rilevate le coordinate geografiche e i parametri di quota e di ablazione superficiale. È stata effettuata, inoltre, una fotografia della superficie del ghiacciaio che comprendesse un'area di circa un metro quadrato.
Tali foto sono state elaborate con software gratuiti al fine di ricavare la percentuale di copertura detritica di quel sito e da questa, tramite un modello empirico precedentemente sviluppato (Azzoni et al., 2016), l'albedo (i.e. riflettività della superficie alla radiazione solare).
Il valore di albedo dipende da molte variabili; oltre alla percentuale di copertura detritica, perciò, sarebbe opportuno integrare il metodo illustrato nel presente elaborato con altri che sfruttano diversi strumenti e tecnologie.
I dati grezzi di ablazione sono stati elaborati tramite fogli di calcolo al fine di ricavare i valori di ablazione superficiale media giornaliera e cumulata: i valori massimi ottenuti sono stati rispettivamente di 6,6 cm e 312 cm.
È stata studiata poi la correlazione fra l'ablazione, variabile dipendente, e i parametri di quota e copertura detritica (variabili indipendenti). È risultato che all'aumentare della quota, in condizioni di copertura detritica simili, l'ablazione decresce. I siti con copertura detritica totale, con detrito di sufficiente spessore, hanno registrato un'ablazione inferiore, a parità di quota, rispetto ai siti *debris-free*, ovvero quelli in cui non è presente detrito superficiale. I siti che invece presentano del detrito sparso, di granulometria medio piccola, risultano essere quelli con un tasso di ablazione maggiore.
Infine, i dati di ablazione cumulata, percentuale di copertura detritica e albedo sono stati utilizzati per creare delle mappe tramite QGIS, software gratuito che permette di associare dei dati alla loro posizione geografica sulla superficie terrestre e di elaborarli per estrarne informazioni. É stata quindi effettuata un'interpolazione, ovvero l'acquisizione di dati continui a partire da dati discreti, quelli relativi alle diciotto aree di studio, permettendo di distribuire spazialmente su tutta la lingua del ghiacciaio le tre variabili.

1. INTRODUZIONE

1.1 FINALITÀ DELLO STUDIO

Lo scopo dell'attività svolta è quello di determinare l'ablazione superficiale cumulata e media giornaliera del Ghiacciaio dei Forni (Alta Valtellina), a partire dai dati raccolti manualmente sulla lingua del ghiacciaio durante la stagione estiva 2023. Questo al fine di poter mappare l'area campionata, evidenziando il cambiamento del tasso di ablazione in base alla quota e alle condizioni superficiali (e.g. spessore dello strato di detrito ricoprente il ghiaccio stesso).

1.2 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Il presente lavoro di tesi fa parte di un progetto scientifico nazionale (PRIN), chiamato COLD CASE, coordinato da UNIMI e che vede come partner UNIMIB e MUSE di Trento. Tale progetto prevede il monitoraggio delle forme di vita presenti sul Ghiacciaio dei Forni e l'influenza delle condizioni superficiali sulle stesse. È stato scelto questo ghiacciaio grazie alle lunghe serie di dati glaciologici, biologici, ecologici e meteorologici acquisiti sullo stesso (Fugazza et al., 2019; Franzetti et al., 2020; Pelfini & Gobbi, 2005; Senese et al., 2016). Le misure di ablazione del ghiaccio nella stagione 2023 vanno, quindi, a completare l'insieme delle misure atte a descrivere il cambiamento dell'habitat delle specie considerate nel progetto, anche in relazione ai cambiamenti climatici.

1.3 STUDI PRECEDENTI

Nel corso degli anni, il Ghiacciaio dei Forni è stato oggetto di numerosi studi che hanno monitorato l'andamento dell'ablazione del ghiaccio e della neve. A tale scopo è stata installata sulla lingua del ghiacciaio, nel settembre 2005, la prima stazione meteorologica permanente su un ghiacciaio italiano (*Authomatic Weather Station* – AWS1 Forni) (FIG 1.1) (Citterio et al, 2007). In particolare, la stazione possiede sensori per la misura di temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità e direzione del vento, pressione barometrica, radiazione solare incidente e riflessa di lunghezza d'onda compresa tra 0,3 µm e 3µm e radiazione nel lontano infrarosso (range di lunghezza d'onda: 5-50 µm) derivante dal cielo o dalla superficie glaciale (Citterio et al, 2007). Tali parametri sono stati utilizzati nel 2012 da Senese et al. per effettuare il bilancio di massa del ghiacciaio. Dallo studio è emerso che, mediamente, nel punto in cui è installata la stazione si ha una fusione pari a -5,4 ± 0,021 m w.e all'anno (water equivalent: quantità di acqua contenuta in un volume noto di neve o ghiaccio (Casarotto, 2010)) e un accumulo annuo di +0,7 ± 0,006 m w.e., con un bilancio di massa (i.e. somma algebrica fra accumulo e ablazione), che si chiude in negativo, di -4,7 ± 0,023 m w.e.. Il bilancio di massa è influenzato molto dalle condizioni superficiali: in particolare, la durata del periodo di ablazione è influenzata dalla permanenza della neve nella stagione primaverile e il verificarsi di precipitazioni nevose nelle stagioni estiva e autunnale (Senese et al., 2012a). Utilizzando i parametri di radiazione rilevati tramite l'AWS è stato anche possibile sviluppare dei modelli per la quantificazione della fusione puntuale (Senese et al., 2021).

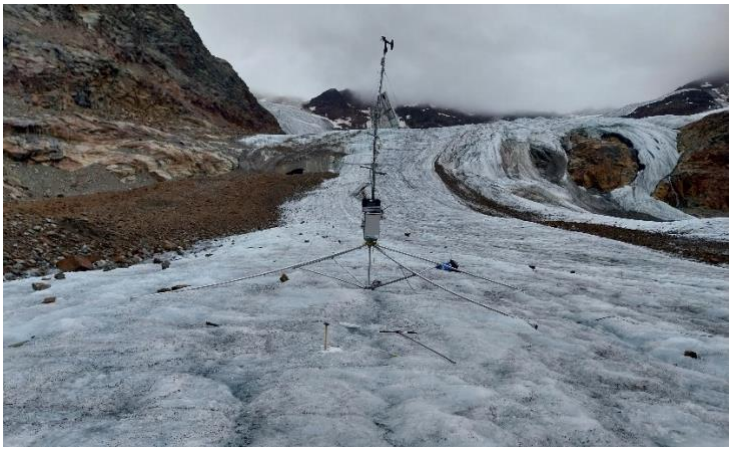


FIG 1.1: Stazione meteorologica permanente installata sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni. Foto scattata il 02-08-2023

Sempre riguardo all'influenza delle condizioni superficiali sul tasso di ablazione del ghiaccio, nel 2015 è stato condotto uno studio che suggerisce l'utilizzo di droni per effettuare rilievi atti ad acquisire immagini a maggior risoluzione, necessarie a cartografare l'area del ghiacciaio a grande scala (Fugazza et al.,2015). Ciò permette di studiare le dinamiche del ghiacciaio, come il fenomeno del *darkening*, ovvero la riduzione dell'albedo dovuta ad una maggior presenza di detrito fine e sparso (Fugazza et al., 2019), utilizzando un metodo semi-automatico da affiancare a quelli più tradizionali, come quello della misurazione delle paline ablatometriche illustrato di seguito nel presente elaborato, in modo da integrare i dati di ablazione e prevedere l'andamento dell'evoluzione del ghiacciaio stesso.
È stato condotto, infine, uno studio finalizzato allo studio del legame tra copertura detritica e albedo, che ha portato alla definizione di un modello empirico che lega il logaritmo naturale dell'albedo alla percentuale di copertura detritica (Azzoni et al., 2016). Il procedimento utilizzato dagli autori è stato seguito anche nel presente lavoro, per stimare l'albedo a partire dalle fotografie della superficie del ghiacciaio.

1.4 AREA DI STUDIO

1.4.1 I GHIACCIAI

Un ghiacciaio è una massa compatta plurimetrica permanente di ghiaccio naturale, derivante dal metamorfismo della neve, che si origina sulla terraferma ed è soggetta a deformazioni gravitazionali. Il ghiaccio si origina dalla neve meteorica, porosa, che passa prima per vari stati, quali neve granulare e ghiaccio bolloso, prima di diventare, appunto, ghiaccio di ghiacciaio, compatto e trasparente: tale trasformazione è permessa soprattutto dal ripetersi di cicli gelo-disgelo, che si osservano durante i mesi primaverili ed estivi (Casarotto C., 2010). Un ghiacciaio tipico è costituito da due parti divise da una linea immaginaria detta ELA (*Equilibrium Line Altitude*) ovvero il limite delle nevi persistenti, o snow line, dove accumulo e ablazione si pareggiano. La parte superiore è detta bacino di accumulo ed inizia dal crepaccio terminale, sopra il quale non vi è movimento della massa. In questa sezione la neve si accumula e subisce la trasformazione in ghiaccio. La zona d'ablazione, o lingua, è la sezione sottostante l'ELA, in cui il fenomeno dell'ablazione è prevalente. Il limite inferiore del ghiacciaio è

chiamato fronte e solitamente presenta un'apertura, chiamata bocca, da cui genera un corso d'acqua in cui confluiscono le acque di ablazione del ghiacciaio, chiamato torrente proglaciale (FIG 1.2).

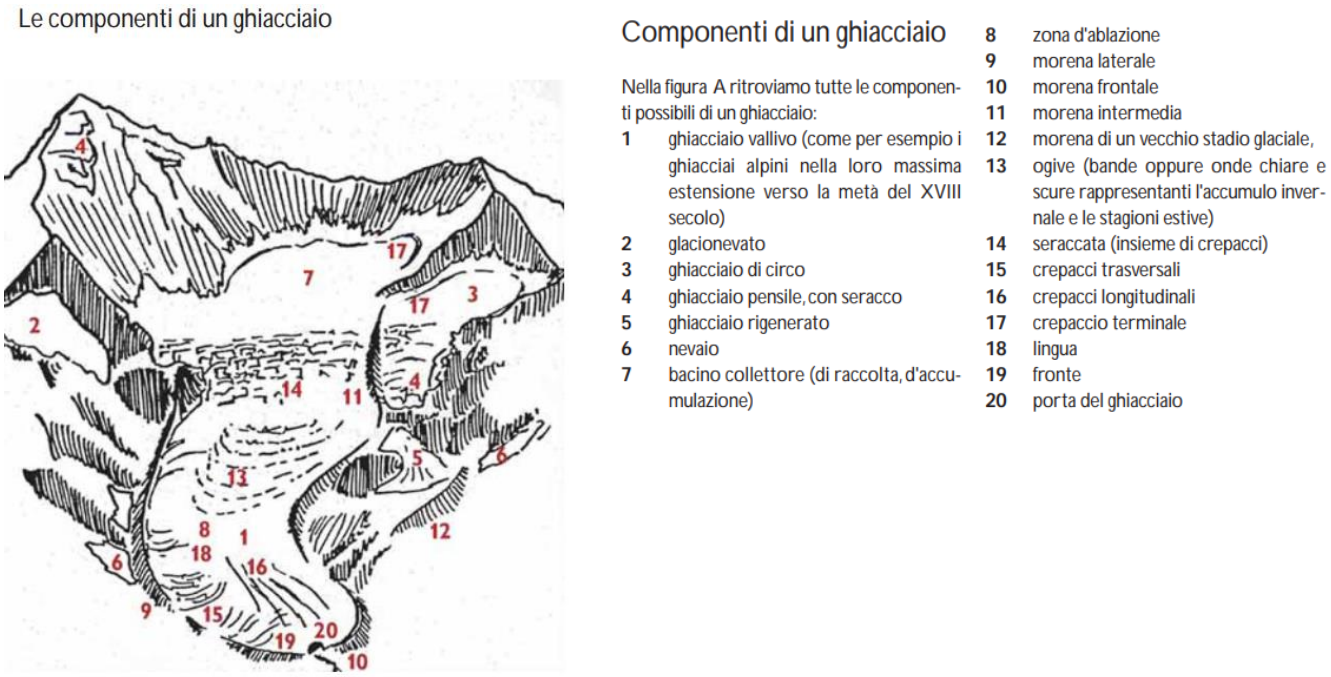


FIG 1.2: Componenti di un ghiacciaio. Fonte: Kappenberger & Locarno-Monti, 2006

L'apporto nevoso nella zona di accumulo può essere di tipo diretto o indiretto. Per quanto riguarda l'apporto diretto ci si riferisce alle precipitazioni di tipo nevoso che avvengono normalmente nei mesi invernali e nei primi mesi primaverili. Per apporto indiretto si intende la massa portata sul ghiacciaio in seguito a fenomeni valanghivi o eolici (Glossario del Servizio Glaciologico Lombardo, 2011). Per quanto riguarda le valanghe, queste prendono origine principalmente dai versanti a maggior inclinazione o da quelli esposti a sud, dove il manto nevoso è meno stabile. La massa nevosa trasporta con sé frammenti rocciosi delle pareti da cui si distacca che vanno a formare la copertura detritica. Questi in seguito ai fenomeni di trasporto possono dare origine a morfologie tipiche chiamate morene, le quali possono essere laterali, terminali o mediane. Le morene laterali si trovano ai margini della lingua del ghiacciaio; quelle mediane si formano a partire dalle morene laterali di due lingue differenti quando queste si incontrano; le morene terminali hanno tipica forma semicircolare e si formano in corrispondenza della fronte del ghiacciaio e forniscono informazioni riguardo alla massima espansione del ghiacciaio e alle varie fasi di ritiro o avanzamento che hanno caratterizzato l'evoluzione del ghiacciaio stesso (Smiraglia, 1992).

Secondo il Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani (Smiraglia & Diolaiuti, 2015), sono presenti 903 ghiacciai estesi complessivamente su un'area di 369.90 km^2 ± 2%. Circa l'84% dei ghiacciai (per numero) è rappresentato da apparati di dimensioni minori a 0.5 km^2 che insieme coprono il 21% della superficie totale. Ghiacciai più estesi di 1 km^2 sono solo il 9.4 % del numero complessivo, ma coprono il 67.8 % dell'area glaciale nazionale (FIG 1.3). Nella classe dimensionale maggiore (>10 km^2) sono risultati tre apparati glaciali. Solo 25 ghiacciai (2.8 % del numero totale) sono stati classificati come "vallivi" e la maggior parte del campione (57.3%) è stato classificato come "montano" mentre

il 40% è risultato di tipo “glacionevato”, a sottolineare come la risorsa glaciale italiana sia frammentata in un gran numero di piccoli apparati (Smiraglia et al., 2015). Per quanto riguarda la Lombardia, si osserva un incremento nel numero dei corpi glaciali (da 135 nel 1981 a 160 nel 2007 a 194 nel 2012), ma con una riduzione della superficie totale (-32% rispetto all’area del 1981, pari a -37,4 km^2) (Senese et al., 2017). Situazione simile si riscontra nel gruppo Ortles-Cevedale, gruppo montuoso in cui è situato il Ghiacciaio dei Forni: il numero di ghiacciai è infatti aumentato da 56 nel 1981, a 67 nel 2007, a 60 nel 2012, ma la superficie totale ha visto una contrazione del 36,4% fra il 1981 e il 2012 (passando da un’area di 42,8 km^2 ad un’estensione totale di 27,2 km^2) (Senese et al., 2017). L’articolo di Smiraglia va poi a confrontare i dati riportati nel Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani, con quelli pubblicati sul Catasto dei Ghiacciai dal CGI (Smiraglia et al., 2015). Tale confronto è riportato nella TAB 1.1.

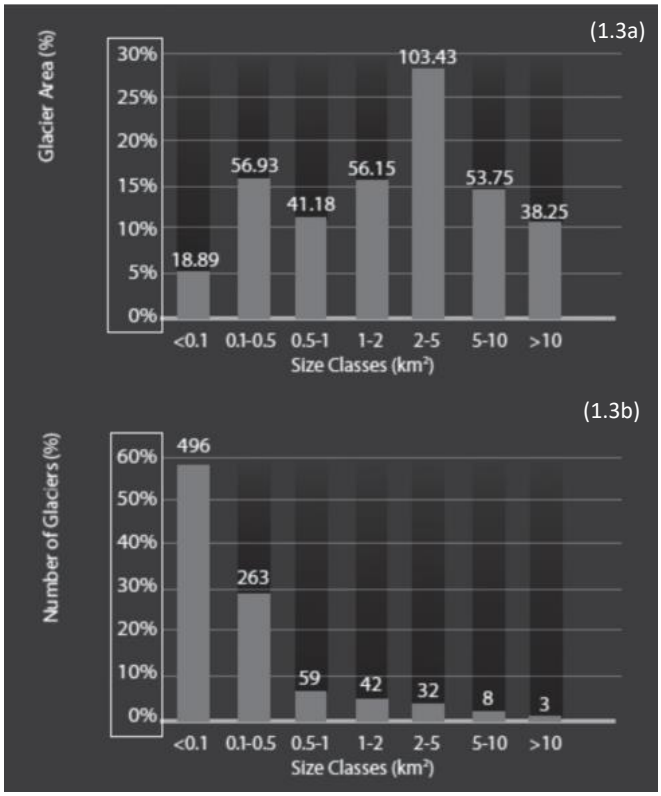


FIG 1.3: (1.3a) Ghiacciai suddivisi in 7 classi in base alla loro area: il grafico riporta il valore dell’area totale di ogni classe e la percentuale occupata rispetto all’area totale. (1.3b) Ghiacciai suddivisi in 7 classi in base alla loro area: il grafico riporta il numero di ghiacciai appartenenti ad ogni classe e il valore percentuale rispetto al numero totale. Fonte: Smiraglia et al., 2015.

Region	Glacier number in the New Glacier Inventory	Glacier number in the CGI Inventory	Change of glacier number	Area change (%)
PIEDMONT	107	115	-8	-48%
AOSTA VALLEY	192	204	-12	-26%
LOMBARDY	230	185	45	-24%
TRENTINO	115	91	24	-33%
SOUTH TYROL	212	206	6	-30%
VENETO	38	26	12	-43%
FRIULI	7	7	0	-50%
ABRUZZO	2	1	1	-33%
TOTAL	903	835	68	-30%

TAB 1.1: Cambiamento di area e numero di Ghiacciai, ordinati in base alla regione in cui sono ubicati.
Fonte: Smiraglia et al., 2015.

1.4.2 Il Ghiacciaio dei Forni

Il Ghiacciaio dei Forni, situato nel gruppo Ortles-Cevedale nel settore sud-orientale delle Alpi Retiche, è uno dei maggiori ghiacciai delle Alpi Italiane (Senese et al.,2017). Storicamente veniva classificato come ghiacciaio himalayano, o "vallivo a bacini composti" (Senese et al., 2017), ovvero formato da più bacini (in questo caso 3) confluenti in un'unica lingua (Kappenberger & Locarno-Monti, 2006); attualmente, in seguito alla riduzione di superficie dovuta alla fusione del ghiaccio, i tre bacini sono separati. In particolare, sono presenti due "ghiacciai montani di circo" (o pirenaici), ovvero privi di lingua, e un "ghiacciaio vallivo semplice" (o alpino), cioè con un solo bacino d'accumulo e una sola lingua (Senese et al., 2017).
La sua superficie si è sensibilmente ridotta nell'arco di poco più di un sessantennio, passando da 14,35 km^2 nel 1954 a 13,68 km^2 nel 1981, a 11,75 km^2 nel 2003, a 11,34 km^2 nel 2007, per arrivare ai 10,79 km^2 del 2012. Da segnalare l'incremento della riduzione areale annua: si passa infatti da -0,025 km^2/anno fra il 1954 e il 1981, a -0,088 km^2/anno fra il 1981 e il 2003, a -0,103 km^2/anno fra il 2003 e il 2007, per arrivare a -0,110 km^2/anno fra il 2007 e il 2012 (Senese et al., 2017).

Anche l'ELA e la QMF (Quota Media della Fronte) hanno subito diverse variazioni nel tempo: stando ai dati raccolti durante le varie Campagne Glaciologiche a partire dal 2005 (TAB 1.2), l'ELA del Ghiacciaio dei Forni è passata dai 3440 m slm del 2005 (Scotti, 2005) ai 3070 m slm del 2020 (Scotti & Lendvai, 2020), con un picco di 3600 m slm nel 2006. La QMF si è alzata dai 2500 m slm nel 2005 ai 2520 m slm nel 2021: nel corso dei rilievi effettuati nella stagione estiva 2023, la quota della fronte misurata è stata di 2530 m slm.

Anno	ELA (m slm)	Variazione frontale (m)	QMF (m slm)
2005	3440	-33	2500
2006	3600	-28	2500
2007	3540	-10,5	2500
2008	3500	-10,5	2510
2009	3300	-7	2505
2010	3250	-10,5	2500
2011	3150	-22	2520
2012	3250	-16	2522
2013	3000	-2,5	2522
2014	2950	-26	n.r.
2015	3300	-29	2512
2016	3200	-68	n.r.
2017	3200	-30	2518
2018	3250	-9	2510
2019	3100	-12,5	2510
2020	3070	-48,5	2515
2021	irregolare	-20	2520

TAB 1.2: Evoluzione di ELA, QMF e variazione frontale del ghiacciaio a partire dal 2005

La lingua del ghiacciaio è attraversata da 2 morene mediane costituite da frammenti angolosi del litotipo dominante nella regione (filladi quarzifere cloritiche e sericitiche appartenenti alla formazione delle Filladi di Bormio) (FIG 1.4), che la suddividono così in tre lembi di ghiaccio differenti (Smiraglia, 1986): quello centrale è l'unico collegato alla zona di accumulo, mentre quello alla destra orografica era collegato al bacino di accumulo soprastante (ora uno dei due "ghiacciai di circo"), fino al 2015: adesso è considerato ghiaccio morto, ovvero privo di movimento e di apporto di masse di ghiaccio.

FIG 1.4: Lingua del Ghiacciaio dei Forni vista dal Sentiero Glaciologico: si possono notare le due morene mediane con quella orientale (nella foto, a sinistra) più sviluppata e sopraelevata rispetto a quella ad ovest

La valle dei Forni (FIG 1.5), formata in seguito ai fenomeni di erosione glaciale, e, quindi, con caratteristica forma ad U, è la via di più facile accesso al Ghiacciaio dei Forni. Partendo dall'abitato di Santa Caterina Valfurva si percorre una strada carrozzabile fino al Parcheggio dell'Albergo "Rifugio Forni". Da qui si può raggiungere la fronte del ghiacciaio tramite diversi sentieri, passando per il Rif. Branca (Sent. 28) e quindi stando sul lato sinistro orografico, oppure tramite il Sentiero Glaciologico Basso (Sent. 524) o Alto (Sent. 520). Il Sentiero Glaciologico del Centenario è stato realizzato nel 1995 per celebrare il centenario di fondazione del Comitato Glaciologico Italiano (Smiraglia, 1995), e permette di raggiungere la fronte del ghiacciaio passando su due ponti sospesi e, in seguito, guadando il torrente proglaciale.

FIG 1.5: Valle dei Forni: si nota la forma a U, tipica delle valli glaciali. Sullo sfondo si notano due corpi glaciali: quello a sinistra è il Ghiacciaio dei Forni orientale, quello più a destra è una parte del bacino di accumulo dei Forni centrale

2 DATI E METODI

2.1 ATTIVITÀ DI CAMPO

I dati raccolti e successivamente elaborati sono stati misurati in campo durante lo svolgimento dell'attività di tirocinio compiuto durante il Corso di Laurea in "Valorizzazione e tutela dell'ambiente e del territorio montano" dell'Università degli studi di Milano.

I rilievi in campo sono stati effettuati nell'estate 2023, dal 18 luglio al 7 settembre. In particolare, sono stati raccolti dati il 18, 19 e 20 luglio, il 2 e 3 agosto, il 17 e 18 agosto e, infine, il 7 settembre.

Prima di procedere con l'impianto delle paline ablatometriche vengono posizionati sulla superficie del ghiacciaio due metri pieghevoli (metri da muratore), disposti in modo da formare la figura di un quadrato (FIG 2.1): si scatta, quindi, una foto di questo metro quadrato, con l'obiettivo della fotocamera parallelo alla superficie del ghiaccio, sempre dalla stessa distanza dalla superficie (FIG 2.2). Le foto sono sempre state effettuate dallo stesso operatore, a valle del metro quadro per non fare ombra sulla porzione di superficie da fotografare. Le foto vengono poi elaborate tramite un programma di elaborazione immagini (ImageJ) per stimare la percentuale di copertura detritica superficiale.

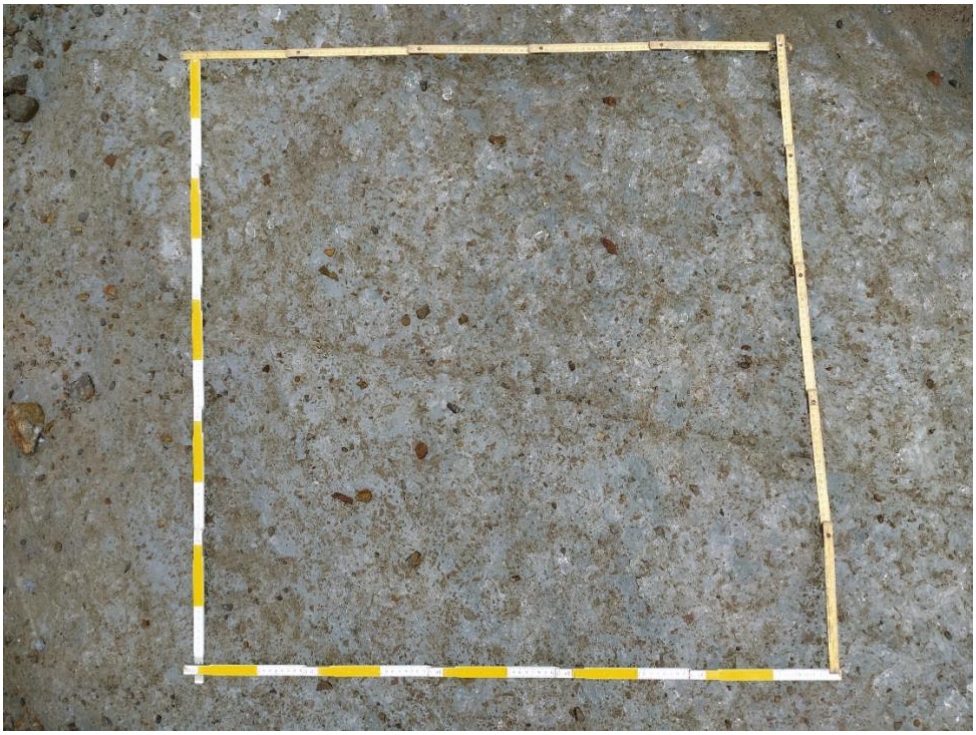


FIG 2.1: Esempio di foto al metro quadrato prima di impiantare la palina nel sito F1. La foto sarà poi oggetto di elaborazione tramite un software di elaborazione immagini. Foto scattata il 03-08-2023

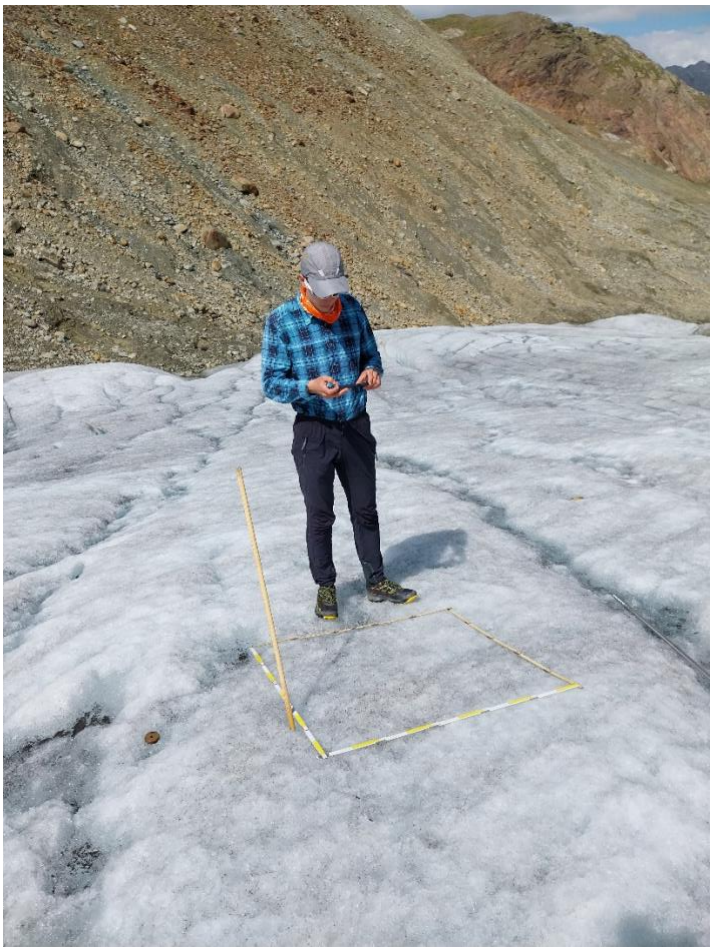


FIG 2.2: Esempio di attività di terreno mentre viene scattata la foto al metro quadrato nel sito di F12. Foto scattata il 18-08-2023

Per la raccolta dei dati di ablazione superficiale ci si è avvalso, come accennato, dell'uso di paline ablatometriche in legno di pino e lunghe 209,5 cm. La misurazione si effettua in due tempi: in un primo momento si effettua un foro nel ghiaccio con la trivella glaciologica (FIG 2.3), si immette la palina in tale foro e si misura l'emersione. Si torna, poi, in un secondo momento, solitamente dopo un periodo non superiore ai 15 giorni, oltre il quale si rischia che l'ablazione sia così elevata da causare la fuoriuscita della palina dal foro e quindi la perdita del dato, e si rimisura l'emersione della palina. La differenza tra le due misure dà l'ablazione reale del ghiaccio (FIG 2.4). Le successive volte si provvede ad effettuare un nuovo foro vicino al precedente in cui andare a spostare la palina, in modo tale da evitare la fuoriuscita della palina per il motivo sopracitato. Nei siti di morena, dove è molto difficile estrarre le paline a causa della compattezza del ghiaccio, si provvede ad impiantare una seconda palina vicino a quella già in loco (FIG 2.5).

FIG 2.3: (2.3a) Trivella e palina ablatometrica. (2.3b) Esempio di installazione della palina tramite foro effettuato con la trivella in F2, il 18-07-2023.

Fig 2.4: (2.4a) Palina F17 dopo l'impianto del giorno 18-08-2023. (2.4b) Palina F17 il giorno 07-09-2023, prima di essere reimpiantata.

FIG 2.5: Sito F11, su morena mediana: per evitare la perdita del dato di ablazione nei siti di morena, dopo 15 giorni è stata impiantata una seconda palina. Foto scattata il 18-08-2023

Al termine del periodo di misurazioni, in data 7 settembre, dopo aver reimpiantato le paline, queste sono state tagliate in modo che non fuoriuscissero oltre i 10 cm dalla superficie e opportunamente levigate: questo per evitare di creare un rischio ulteriore per alpinisti ed escursionisti che andranno a frequentare il ghiacciaio durante la stagione invernale. La permanenza delle paline nella superficie del ghiacciaio consente di ottenere i dati di ablazione sin dall'inizio della stagione di ablazione successiva, permettendo di avere un periodo di misurazioni più ampio anche rispetto a quello della stagione in corso, iniziato oltre la metà di luglio, e quindi dati reali più completi.

FIG 2.6: (2.6a) Esempio di attività di taglio della palina di F20 a circa 10 cm. (2.6b) Esempio di attività di rimozione delle schegge e levigatura della palina di F6. Foto scattate il 07-09-2023

Oltre all'impianto e alla misurazione delle paline ablatometriche, l'attività di tirocinio comprendeva altri compiti, non finalizzati alla raccolta dati per l'analisi oggetto del presente elaborato, e.g. il posizionamento, nei siti di morena, di termistori, strumenti atti alla misurazione e alla registrazione di dati di temperatura della roccia (FIG 2.7). Questi sono stati installati nelle vicinanze della palina, sotto ad un sottile sasso di cui è stato misurato lo spessore. Altri sassi vengono posizionati attorno a questo in modo da formare la figura di una croce per una più facile individuazione della posizione del termistore. Viene anche scattata una foto della croce mentre viene indicata da una persona, ponendo attenzione a catturare anche il panorama retrostante, in modo da facilitare l'orientamento nel caso in cui altre persone, oltre a chi ha posizionato lo strumento, debbano ritrovarlo.

FIG 2.7: (2.7a) Esempio di attività di posizionamento di un termistore nel sito F11. (2.7b) Esempio di fotografia alla croce di sassi mentre viene indicata, in cui è ben visibile il panorama, con il Gran Zebrù sullo sfondo. Foto scattate il 03-08-2023

2.2 DATI RACCOLTI

Le misure della ablazione sono state effettuate in 18 punti diversi, sparsi sulla superficie della lingua del ghiacciaio. Originariamente erano previste 25 aree di studio per il progetto COLD CASE, di cui 5 situate sul Ghiacciaio dei Forni orientale, ma per questioni di tempistiche è stato possibile installare le paline ablatometriche in 16 di queste, tutte sulla lingua del ghiacciaio centrale. Altre due paline sono state posizionate nelle vicinanze della stazione meteo presente sul ghiacciaio (FIG 2.8).

FIG 2.8: Aree di studio dove sono state piantate le paline ablatometriche: notare i due siti nelle vicinanze della stazione meteo indicati in verde

Per ogni sito è stata individuata un'area di 10 m x 10 m (100 m^2) al centro della quale è stata posizionata la palina ablatometrica. Sono stati raccolti i dati di ora, quota, coordinate, esposizione, pendenza, oltre che dell'emersione della palina una volta impiantata (FIG 2.9). Inoltre sono state descritte anche l'area del m^2 centrale e l'area di 10 m x 10 m. Le misure di quota e le foto del metro quadro sono state effettuate ogni volta che si tornava sul posto per misurare l'emersione, mentre per quanto riguarda le coordinate sono state rilevate il 18 agosto e il 7 settembre. Gli altri parametri sono stati misurati e descritti solo al momento del primo impianto della palina nel sito.

FIG 2.9 Esempio di attività di annotazione delle misure del sito F20, il giorno 07-09-2023

La quota è stata registrata tramite orologi dotati di altimetro barometrico, calibrati prima di effettuare le misure al Rif. Branca, di altitudine nota pari a 2493 m s.l.m.. Queste misurazioni sono state integrate con la quota indicata dall'applicazione Positional (FIG 2.10), scaricabile gratuitamente sul proprio smartphone, utilizzata anche per ottenere i valori delle coordinate. Entrambi i valori indicati dall'app presentano un certo grado di incertezza, pari a ± 3 m nel caso delle coordinate e ± 5 m s.l.m. nel caso della quota. Anche l'esposizione è stata misurata tramite gli orologi, utilizzando la funzione "Bussola". La pendenza è stata misurata utilizzando la funzione "Inclinometro" presente sullo smartphone, la quale necessita di posizionare quest'ultimo sulla superficie del terreno (FIG 2.11).

FIG 2.10: Schermata dell'App Positional: in primo piano le coordinate geografiche, in caratteri più piccoli l'accuratezza del dato e la misura dell'altitudine (con l'accuratezza). Schermata salvata il 18-08-2023, in corrispondenza di F12

FIG 2.11: Esempio di attività di rilevazione della pendenza. Foto scattata il 20-07-2023, in corrispondenza del sito F13.

2.3 METODI

I dati raccolti in campo sono stati poi sistemati ed elaborati utilizzando diversi software, tutti gratuiti. I diversi siti sono stati scelti in base alle loro caratteristiche e alla presenza di formazioni particolari, come *dirt cones* (i.e. accumulo di detrito fine a forma conica) (FIG 2.12), *bèdieres* (i.e. piccoli corsi d'acqua sopraglaciali) (FIG 2.13) e coppette crioconitiche (i.e. piccole depressioni superficiali favorite dall'accumulo di detrito fine che ne ha promosso la ablazione) (FIG 2.14), oggetto di analisi del

progetto, ma anche in base alla diversa copertura detritica. In questo modo si è potuto suddividere i siti in quattro classi, in base a quest'ultimo parametro: siti di morena, siti con detrito sparso, siti con crioconite, siti *debris-free*. Tali classi vedono un grado di copertura decrescente, da totale nel caso di morena, ad assente nel caso di *debris-free*. Per crioconite si intende un deposito sopraglaciale di sostanza mista inorganica ed organica; quest'ultima conferisce al deposito un colore bruno molto scuro. Per detrito sparso si intende, invece, la presenza di frammenti rocciosi, con diametro solitamente nell'ordine di pochi cm, se non mm, con massimi di una decina di cm, che non vanno a coprire interamente la superficie del ghiacciaio. I siti sono stati suddivisi come mostrato nella TAB 2.1. Tale classificazione si rende necessaria al momento dell'analisi dei risultati in quanto permette di confrontare siti con caratteristiche omogenee tra loro. Questa classificazione preliminare è stata poi validata tramite l'analisi con il software ImageJ e la quantificazione della percentuale di copertura detritica sopraglaciale.

FIG 2.12: Esempio di *dirt cone* del sito F17. Foto scattata il 02-08-2023

FIG 2.13: Esempio di *bèdiere* nel sito F5. Foto scattata il 20-07-2023

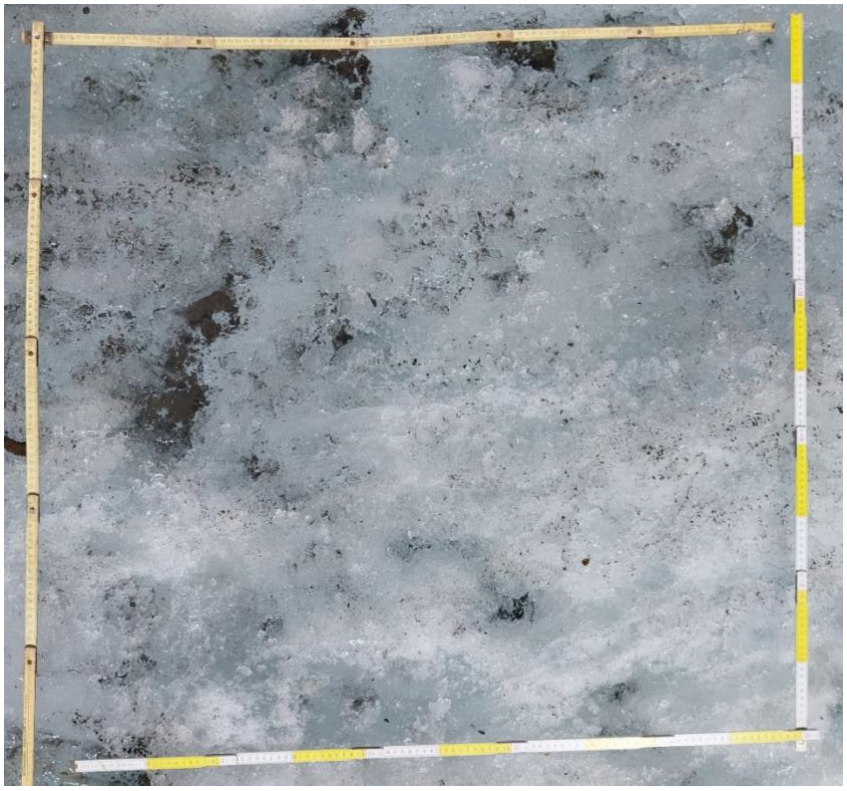


FIG 2.14: Esempio di coppetta crioconitica del sito F4. Foto scattata il 18-07-2023

N° paline	**18**	
Paline su morena	**5**	
Siti:	F3	F11
	F5	F18
	F6	
Paline non su morena	**13**	
Paline debris free	**6**	
Siti:	F8	F13
	F10	SMI
	F12	SMS
Paline con crioconiti	**3**	
Siti:	F4	F19
	F17	
Paline con detrito sparso	**4**	
Siti:	F1	F7
	F2	F20
Paline alla stazione	**3**	
Siti:	F10	SMS
	SMI	

TAB 2.1: Suddivisione in classi dei vari siti

2.3.1 Ablazione superficiale

I dati di ablazione sono stati elaborati tramite il programma "Microsoft Excel", che ha permesso la sistemazione degli stessi in tabelle e la creazione di grafici a partire da queste ultime.

Il primo passaggio è stato quello di riportare le misure e le descrizioni appuntate durante le attività in campo in formato digitale, tramite la creazione di un foglio per ogni sito con impaginazione che si può osservare in FIG 2.15. Per quanto riguarda il valore della quota, è stato ritenuto più attendibile il valore che si è registrato più volte, non considerando i valori misurati con l'app Positional, in quanto sempre superiori rispetto a quelli misurati con altimetro barometrico, anche di decine di m s.l.m. In quei siti di morena in cui sono state piantate due paline (F3, F6, F11, F18) nelle tabelle, i dati riferiti alla palina impiantata per seconda presentano l'indicazione "II" vicino al numero del sito.

SITO F7

Dati sito	
Quota	2570 m.s.l.m
Coordinate	46.39856 N 10.58640 E
Esposizione	SW
Pendenza	15°
Detrito (m^2)	Detrito fine, ma con presenza di alcuni (2) frammenti grossolani
Descrizione area	Zona a sx orografica (SW) vi è un > accumulo di detrito, con formazione di alcuni dirt cones

Misurazioni					
Data	Ora	Emersione da ghiaccio (cm)	h detrito (cm)	Emersione da detrito (cm)	Ablazione (cm)
18/07/2023	10:45	38,5	-	-	-
19/07/2023	09:30	45	-	-	6,5
20/07/2023	09:28	52	-	-	7
02/08/2023	09:25	133	-	-	81
	09:35	41	-	-	-
03/08/2023	10:00	50	-	-	9
17/08/2023	11:36	132	-	-	82
	11:50	35,5	-	-	-
18/08/2023	13:06	42	-	-	6,5
07/09/2023	11:18	154	-	-	112

Quota		
Data	Misura (m slm)	Condiz. Meteo
18/07/2023	2410	Soleggiato
02/08/2023	2520	Soleggiato
03/08/2023	2570	Nuvoloso
17/08/2023	2570	Nuvoloso
18/08/2023	2555	Soleggiato
	2621	
07/09/2023	2565	Soleggiato
	2608	

FIG 2.15: Esempio di impaginazione del foglio di calcolo in cui sono stati inseriti i dati grezzi del sito F7. La tabella in basso riporta tutti i valori di quota: nei giorni in cui sono stati appuntati due valori, uno (il secondo) è stato rilevato con l'App Positional.

Successivamente è stata calcolata l'ablazione, pari alla differenza di due misure consecutive di emersione. Poiché non tutte le paline sono state impiantate lo stesso giorno, si è presentata una certa variabilità nella distribuzione temporale dei dati (TAB 2.2): per questo si è deciso di suddividere l'arco di tempo totale in tre periodi: il primo dal 18-07 al 03-08 (16 giorni), il secondo dal 03-08 al 18-08 (15 giorni), il terzo dal 18-08 al 07-09 (20 giorni); il giorno d'inizio di ogni periodo è escluso della conta dei giorni, l'ultimo invece è incluso.

ABLAZIONE REALE MISURATA

Sito \ Data	18/07/2023	19/07/2023	20/07/2023	02/08/2023	03/08/2023	17/08/2023	18/08/2023	07/09/2023
1						91,5	7,5	114
2		6,5	6,5	65	9,5	68	6	105
3			9,5	43	6,5		56,5	79,5
3 II					7		57	73
4		6	7	65	13,5	68,5	7	109,5
5				69	9,5	68,5	4,5	102
6				61	4		54,5	
6 II							61,5	85,5
7		6,5	7	81	9	82	6,5	112
8			6	63,5	6,5	66,5	4	91
10				65	9	63,5	5,5	93
11				54,5	6		59	80
11 II					7		63	
12							61	88
13				58	6		67	93
17					8,5		81	108,5
18					5,5		48,5	74,5
18 II								74,5
19					8		69,5	91
20					4,5		96,5	114,5
SMI				64	11,5	63	6,5	92
SMS				61,5	12,5	68,5	5,5	95,5

TAB 2.2: Ablazione misurata durante le varie uscite in ghiacciaio. Come si può notare dalle celle vuote, non tutte le paline sono state piantate né rimisurate gli stessi giorni.

Sono stati esclusi quei valori fuorvianti la media (TAB 2.3), rappresentati principalmente da valori di ablazione giornaliera misurati in campo quando venivano effettuate le misure in due giorni consecutivi, quando questi dati andavano a rappresentare gli unici di un intero periodo. Un esempio è rappresentato dai siti 17, 18, 19 e 20: qui le paline sono state impiantate il giorno 2 agosto: per il primo periodo, quindi, l'unica misura disponibile è l'ablazione avvenuta fra il 2 e il 3 agosto, misura non rappresentativa per l'intero periodo.

ABLAZIONE MISURATA IN CAMPO			
Sito \ Periodo	dal 18/07 al 03/08 (16 d)	dal 03/08 al 18/08 (15 d)	dal 18/08 al 07/09 (20 d)
1		99	114
2	87,5	74	105
3	59	56,5	79,5
3 II	7	57	73
4	91,5	75,5	109,5
5	78,5	73	102
6	65	54,5	
6 II		61,5	85,5
7	103,5	88,5	112
8	76	70,5	91
10	74	69	93
11	60,5	59	80
11 II	7	63	
12		61	88
13	64	67	93
17	8,5	81	108,5
18	5,5	48,5	74,5
18 II			74,5
19	8	69,5	91
20	4,5	96,5	114,5
SMI	75,5	69,5	92
SMS	74	74	95,5

TAB 2.3: Ablazione misurata dei tre periodi: in rosso evidenziati i valori fuorvianti. Dai dati inseriti in questa tabella, sono stati calcolati poi i valori di ablazione giornaliera media

Dividendo per i giorni trascorsi tra le due misurazioni, è stata ricavata l'ablazione giornaliera media per ogni periodo: da questa, poi, è stata calcolata la media giornaliera dell'intero periodo di misurazioni. Questo valore è stato utilizzato come valore di ablazione media dei periodi in cui non ci sono dati disponibili (e.g. dati dell'ultimo periodo per le paline F6 e F11 II, causa fuoriuscita della palina dal foro).

Dall'ablazione media giornaliera è stata poi calcolata quella cumulata, sia per il periodo dal 03-08-2023 al 07-09-2023, sia per l'intero arco di tempo delle misurazioni. A partire da questi valori sono stati costruiti due grafici: uno considera i valori a partire dal secondo periodo, quando tutte le paline erano posizionate in loco, l'altro tiene conto anche dell'ablazione del primo periodo. Questo poiché, come anticipato, non tutte le paline sono state piantate contemporaneamente, perciò, per molte di queste i valori di ablazione media giornaliera del primo periodo, utilizzati in seguito anche per calcolare l'ablazione cumulata, corrispondono ai valori di media giornaliera dell'intero arco di tempo considerato, calcolata utilizzando, però, i dati di ablazione dei periodi successivi. Perciò nella sezione "Risultati" verranno mostrati le tabelle e i relativi grafici in coppia, dove uno mostra i valori riguardanti il periodo che va dal 03-08-2023 fino al 07-09-2023, mentre l'altro presenta i valori relativi all'intero arco temporale di misurazioni.

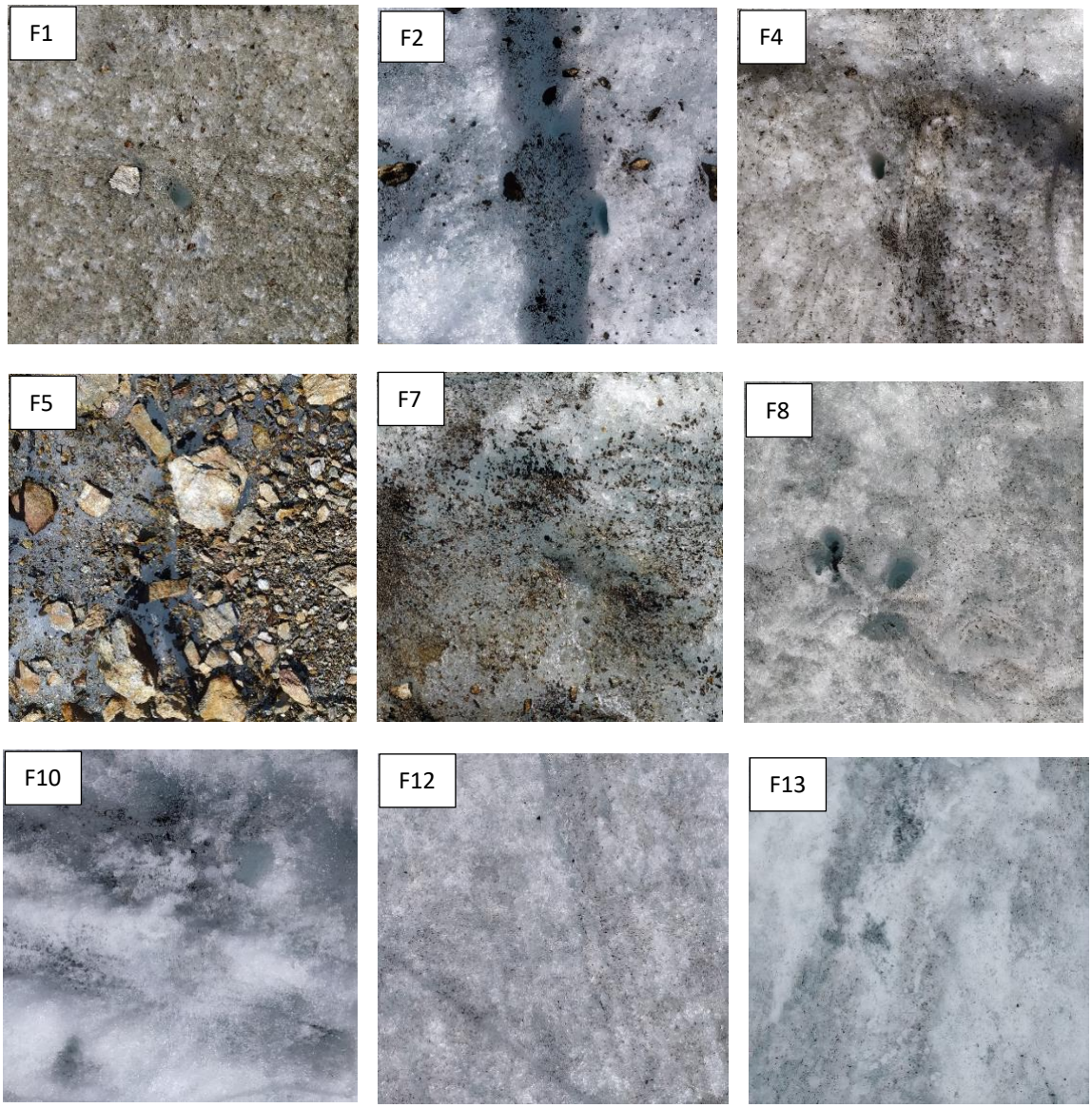
Infine, sono stati costruiti due grafici che mostrano il legame fra quota e ablazione cumulata: uno che mostra i valori di ablazione a partire dal 03-08 e uno dal 18-07. In entrambi i grafici le classi sono state colorate con quattro colori differenti, in modo da poter confrontare siti simili fra loro.

2.3.2 STIMA DELL'ALBEDO

L'albedo è definita come la frazione di radiazione solare riflessa da una superficie (Fugazza et al., 2016), in questo caso, la superficie del ghiacciaio: dal valore di albedo si può, quindi, capire quanta radiazione solare viene riflessa da una superficie e quanta, invece, assorbita rispetto all'energia totale.

ImageJ è un software scaricabile gratuitamente dalla rete, il quale è stato usato per l'elaborazione delle foto del metro quadrato necessaria alla stima dell'albedo.

Sono state elaborate le foto scattate i giorni 02-08-2023 e 07-09-2023 in modo da poter avere i valori di albedo per tutte le aree di studio nelle stesse giornate. Sono state escluse dall'elaborazione le fotografie dei siti di morena in quanto la copertura detritica è pari al 100,0% e non vi è ghiaccio affiorante (FIG 2.16), eccetto le foto di F5, dove il ghiaccio è in parte affiorante.



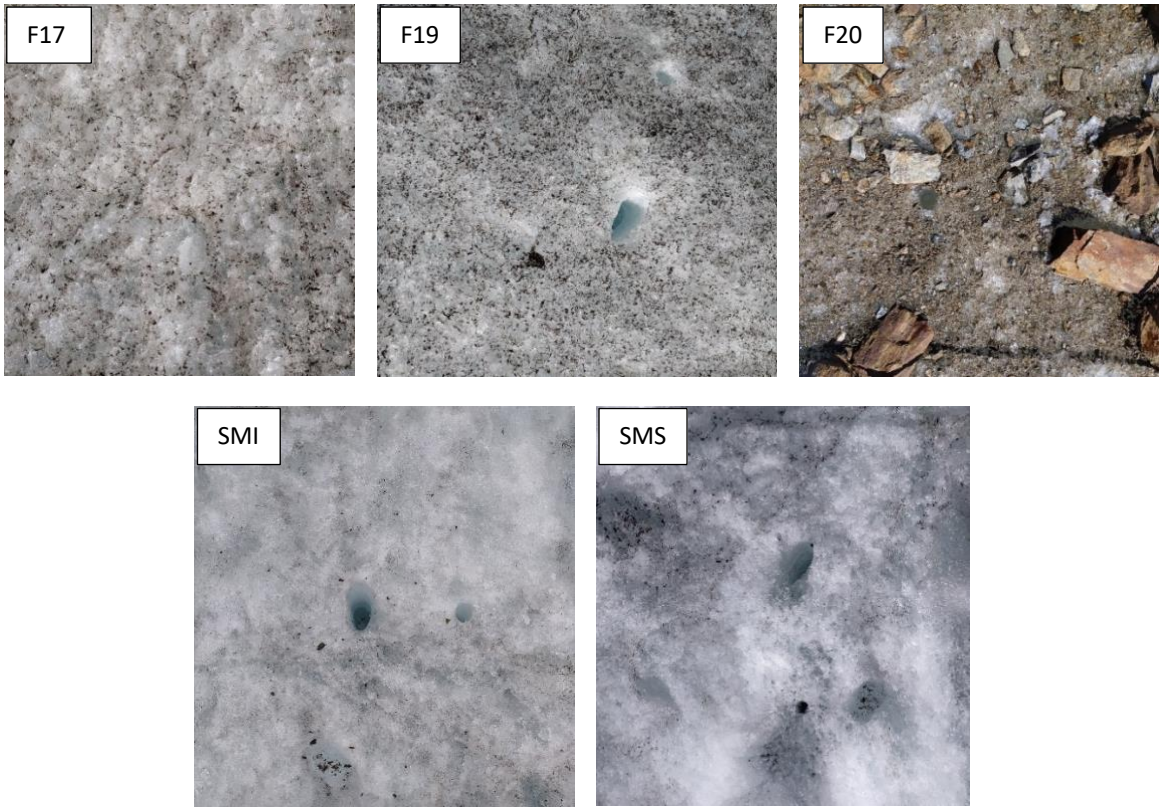


FIG 2.16: Immagini ritagliate del metro quadrato, che successivamnte sono state elaborate per trovare l'albedo. Foto scattate il 07-09-2023.

Per prima cosa si è provveduto a ritagliare l'immagine in modo da escludere dalla stessa i metri usati per definire l'area fotografata. Dopodiché l'immagine è stata convertita in scala di grigi a 8 bit, in modo tale da evidenziare il contrasto tra il ghiaccio e il deposito; a questo punto è stato registrato il numero di pixel totali formanti l'immagine (FIG 2.17).

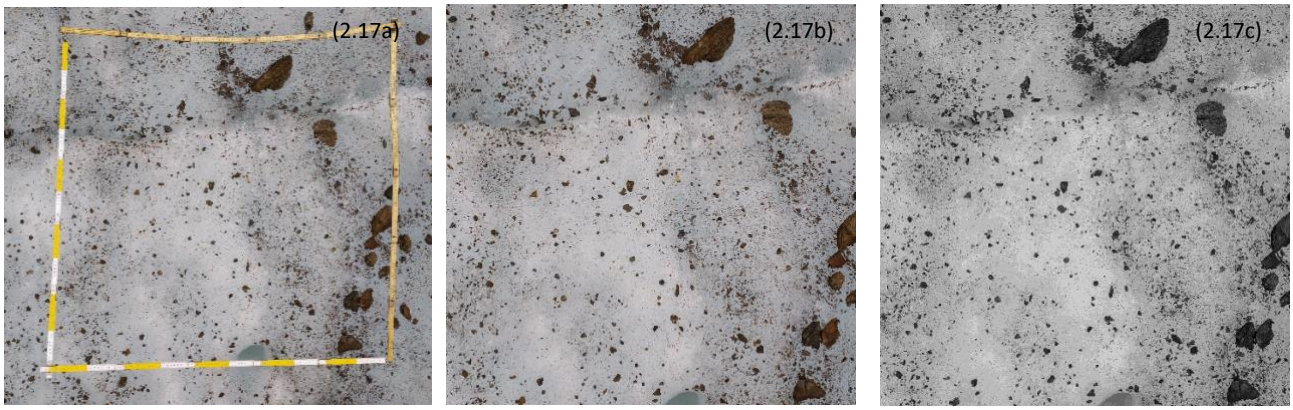


FIG 2.17: (2.17a) Foto del metro quadro. (2.17b) Foto ritagliata. (2.17c) Foto in scala di grigi 8 bit.
Foto del sito F2, scattata il 02-08-2023

Un'immagine a 8 bit è composta da 256 tonalità di grigio con valori da 0, corrispondente al colore nero, a 255, corrispondente al colore bianco. Il quarto passaggio è stato quello di impostare un valore soglia di tonalità per poter isolare quei pixel con luminosità inferiore a detta soglia (FIG 2.18). Il valore è stato impostato manualmente caso per caso, in modo tale che i pixel isolati corrispondessero al

meglio alla copertura detritica reale. Il programma, quindi, provvede a colorare di bianco i pixel sopra soglia (ghiaccio pulito) e di nero quelli sotto soglia (detrito) (FIG 2.19). Infine, quindi, si registra il numero di pixel neri (Azzoni et al., 2016).

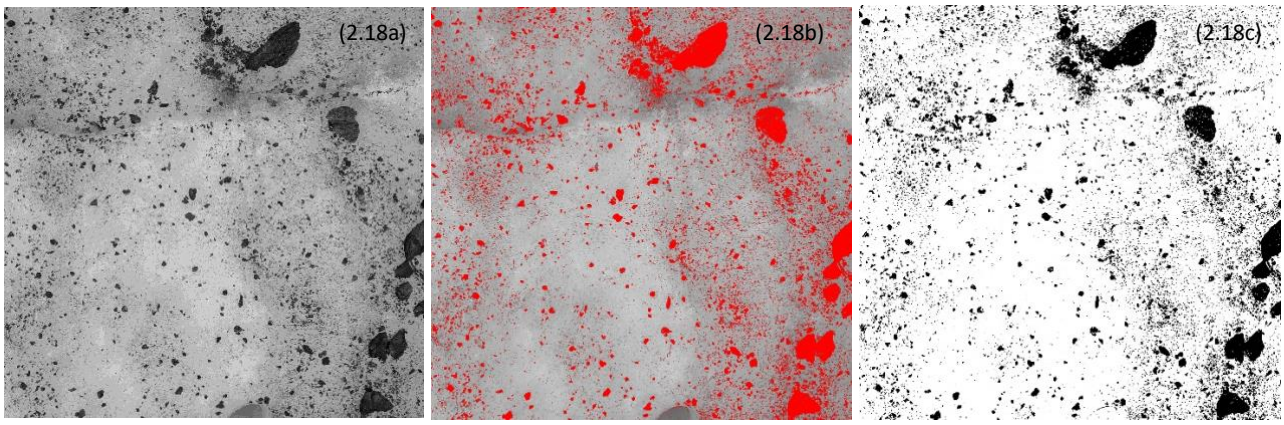


FIG 2.18: (2.18a) Foto in scala di grigi. (2.18b) Foto in fase di scelta della soglia. (2.18c) Foto elaborata: in nero i pixel corrispondenti al detrito, in bianco quelli corrispondenti al ghiaccio pulito. Continuo dell'elaborazione della FIG 2.17

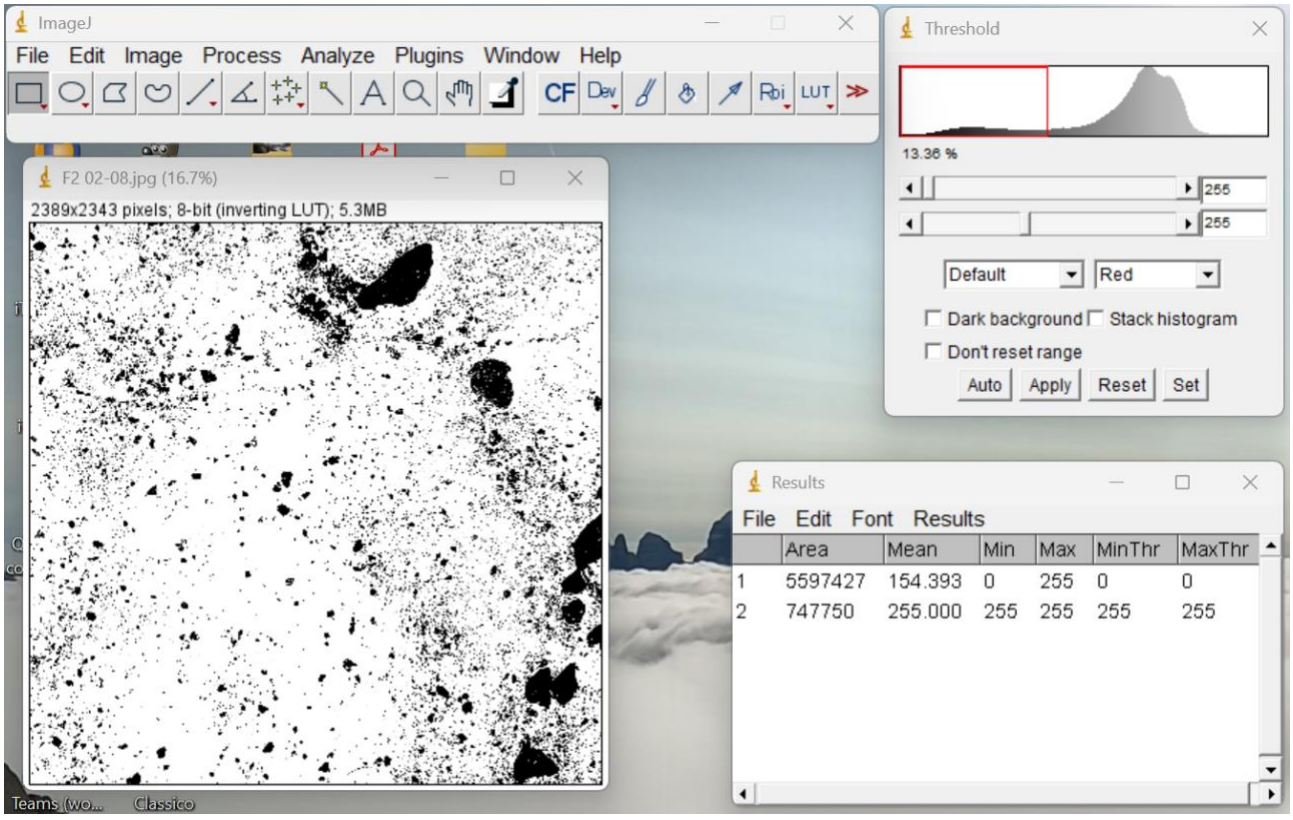


FIG 2.19: Schermata completa a foto elaborata: in alto a sinistra la barra degli strumenti, in basso a sinistra la foto elaborata, in alto a destra la finestra di impostazione della soglia, in basso a destra il conteggio dei pixel totali (sopra) e neri (sotto). Continuo dell'elaborazione delle FIG 2.17 e 2.18

Le foto relative ai siti con detrito sparso quali F1 e F20 e al sito su morena F5, in cui il detrito non ricopriva completamente il ghiaccio, hanno necessitato di un'elaborazione aggiuntiva con il programma gratuito GIMP, a monte di quella con ImageJ. Questo perché sono inclusi nella foto alcuni

frammenti rocciosi di colore chiaro, i quali presentano una tonalità di grigio con luminosità superiore alla soglia impostata. Innalzare la soglia avrebbe portato ad un risultato con errore elevato in quanto anche pixel corrispondenti a ghiaccio libero sarebbero risultati con una tonalità sotto la soglia, e quindi anneriti portando ad una sovrastima della copertura. Al contrario, abbassare la soglia avrebbe portato ad un risultato con errore altrettanto importante, in quanto anche pixel corrispondenti a detrito sarebbero risultati con una luminosità superiore alla soglia, e quindi sarebbero rimasti bianchi, con una conseguente sottostima della copertura (FIG 2.20). Attraverso l'uso di GIMP è stato possibile correggere manualmente la foto, andando ad abbassare la luminosità e la tonalità dei pixel corrispondenti a tale detrito (FIG 2.21). Le foto così modificate sono state poi elaborate con ImageJ tramite lo stesso procedimento delle altre (FIG 2.22).

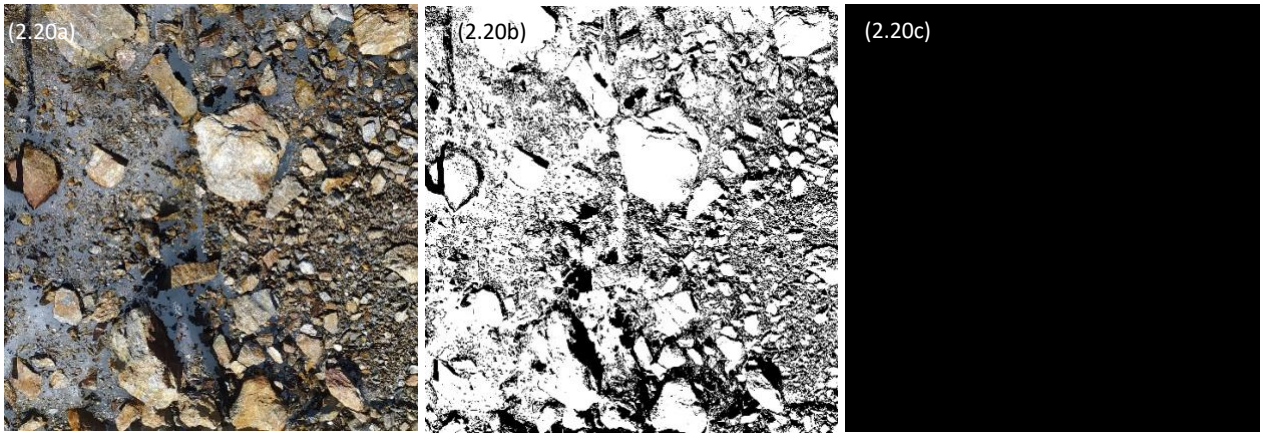


FIG 2.20 (2.20a) Foto ritagliata. (2.20b) Foto elaborata sottostimando la soglia: il detrito non si annerisce. (2.20c) Foto elaborata sovrastimando la soglia: si annerisce anche il ghiaccio. Foto relativa a F5 scattata il 07-09-2023

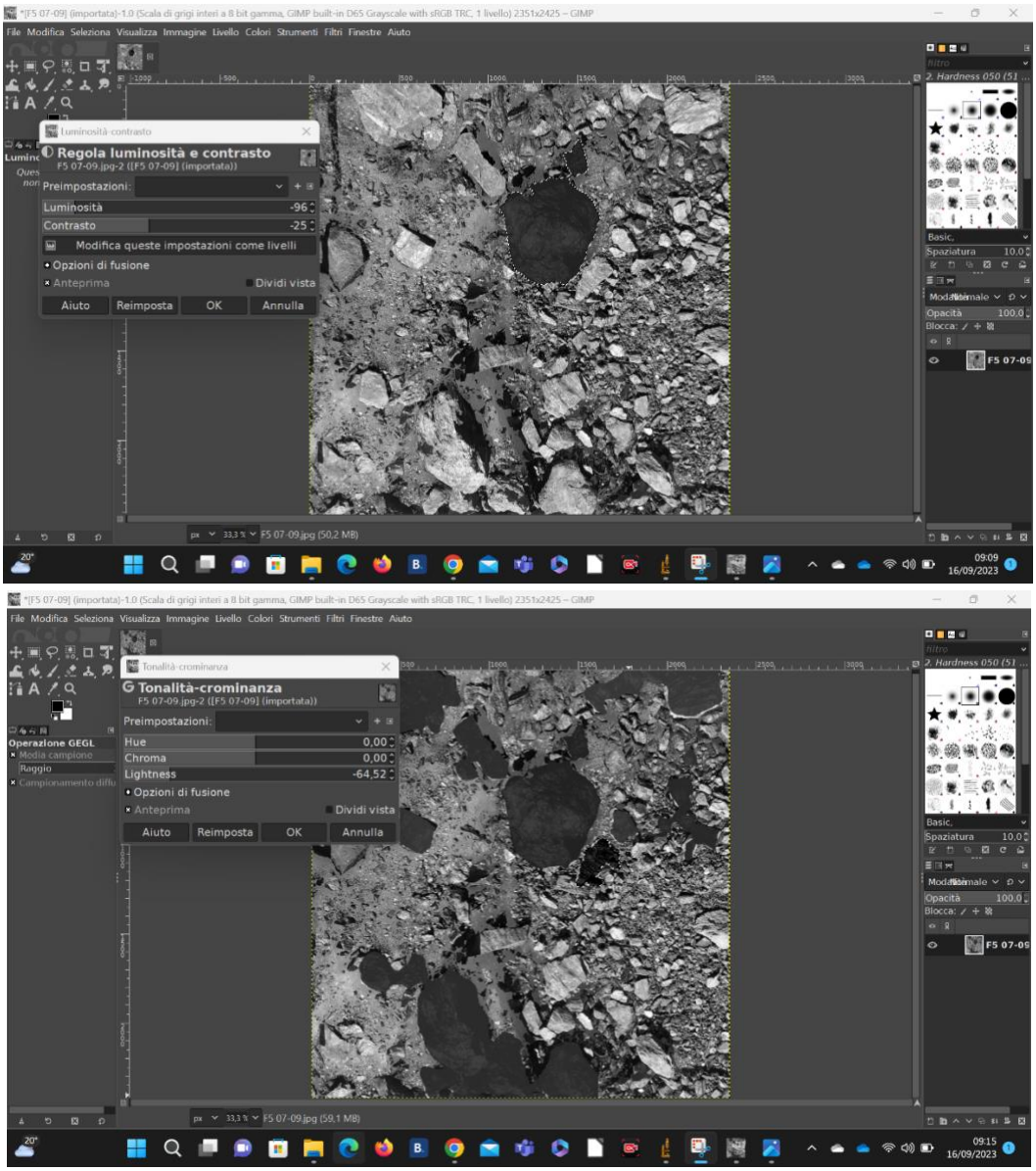


FIG 2.21: Elaborazione dell'immagine con GIMP in corso. Continuo dell'elaborazione della FIG 2.20

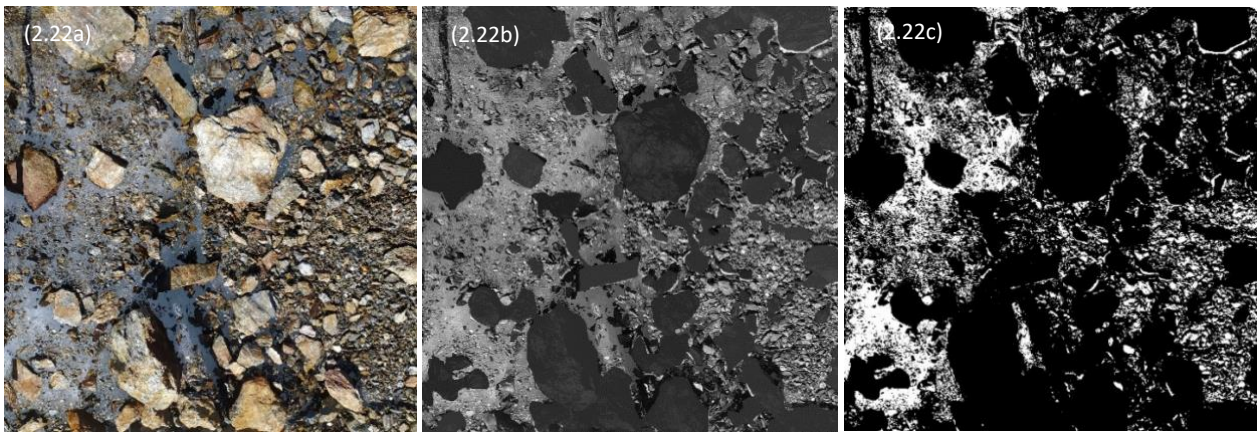


FIG 2.22: (2.22a) Foto ritagliata. (2.22b) Foto modificata con GIMP. (2.22c) Foto elaborata con ImageJ. Continuo dell'elaborazione delle FIG 2.20 e FIG 2.21

Si procede utilizzando dei fogli di calcolo per rapportare il numero di pixel neri e quello totale, andando, quindi, a trovare la percentuale di copertura detritica in quel sito. Tramite una formula sviluppata da precedenti studi, sempre sul Ghiacciaio dei Forni (Azzoni et al., 2016), è possibile legare tale valore percentuale di copertura detritica al logaritmo naturale dell'albedo (EQ. 1) e da questo, tramite la funzione esponenziale inversa, si risale all'albedo stessa.

$$\ln(\alpha) = (-2.04 \pm 0.19) \cdot d \; + \; (-1.50 \; \pm 0.04) \tag{1}$$

2.3.3 Distribuzione spaziale di ablazione, copertura detritica e albedo

Per riuscire a mappare l'area campionata, distribuendo l'ablazione cumulata, l'albedo stimata e la copertura detritica derivata, si è fatto uso del software gratuito QGIS (in particolare, è stata installata la versione 3.28.11). Dopo aver importato il layer di sfondo "Ortofoto 2021" dal sito del Geoportale della Lombardia, sono stati importati i valori delle coordinate rilevate in campo ed i valori di ablazione totale, copertura detritica e albedo, ricavati tramite i metodi precedentemente illustrati (TAB 2.4).

Nome	Longitudine	Latitudine	Ablazione (cm)	Copertura detritica	Albedo
F1	621884,85848	5139688,79056	312,2	0,0367	0,207
F2	622014,51706	5139512,42761	267,5	0,0642	0,196
F3	622076,96145	5139581,48691	196,2	1,0000	0,029
F4	622034,30464	5139446,13028	276,2	0,0245	0,212
F5	622040,95690	5139382,90410	265,1	0,8000	0,044
F6	622194,30552	5139405,99190	209,6	1,0000	0,029
F7	621952,91783	5139554,54327	304,5	0,3231	0,115
F8	622127,64962	5139316,83853	244,1	0,0050	0,221
F10	622224,27456	5139177,60984	247,8	0,0111	0,218
F11	622161,52483	5139161,89858	207,3	1,0000	0,029
F12	622062,86736	5138980,95437	216,7	0,0081	0,219
F13	622069,85100	5139131,15689	235,1	0,0045	0,221
F17	622290,72577	5139544,65392	275,4	0,0093	0,219
F18	622318,84303	5139408,49566	178	1,0000	0,029
F19	622407,15402	5139491,41771	234,6	0,0994	0,182
F20	622158,72421	5139607,58358	307,6	0,6646	0,058
SMI	622234,68013	5139195,60416	247,4	0,0022	0,222
SMS	622240,24024	5139186,82333	254,3	0,0050	0,221

TAB 2.4: Coordinate UTM e variabili con dati discreti, importati in QGIS

Poiché il sistema di riferimento utilizzato per il progetto è "WGS 84, UTM 32632" le coordinate sono state convertite da coordinate geografiche in formato decimale a coordinate UTM tramite il plugin "Coordinates Converter" (FIG 2.23).

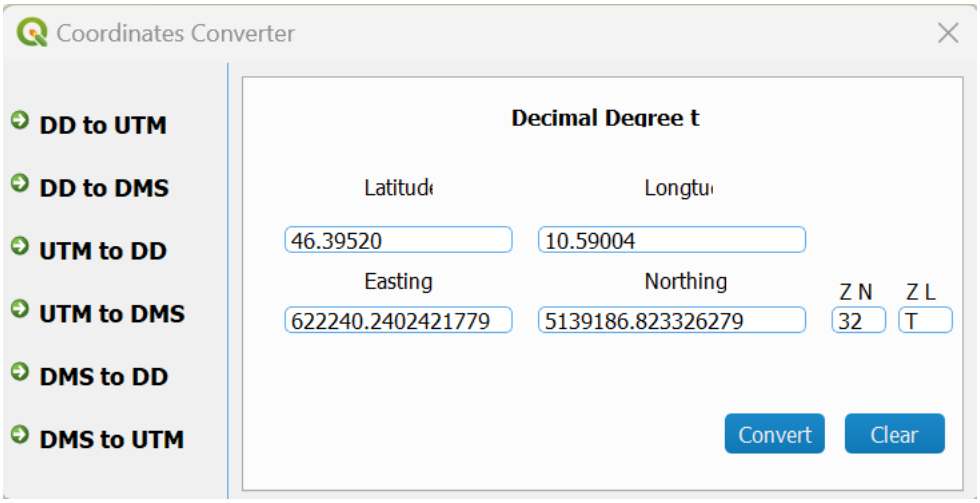


FIG 2.23: Conversione delle coordinate geografiche in coordinate UTM. Coordinate relative a SMS.

A questo punto è stata perimetrata l'area della lingua del ghiacciaio basandosi sull'ortofoto 2021, disponibile sul Geoportale della Lombardia (FIG 2.24), e tramite il plugin "Smart Map" (FIG 2.25), è stato possibile interpolare i valori discreti delle tre variabili ed ottenere, quindi, tre mappe, che mostrano l'andamento, rispettivamente, di ablazione espressa in centimetri di ghiaccio, di albedo espressa in percentuale di radiazione riflessa e di copertura detritica espressa in percentuale.

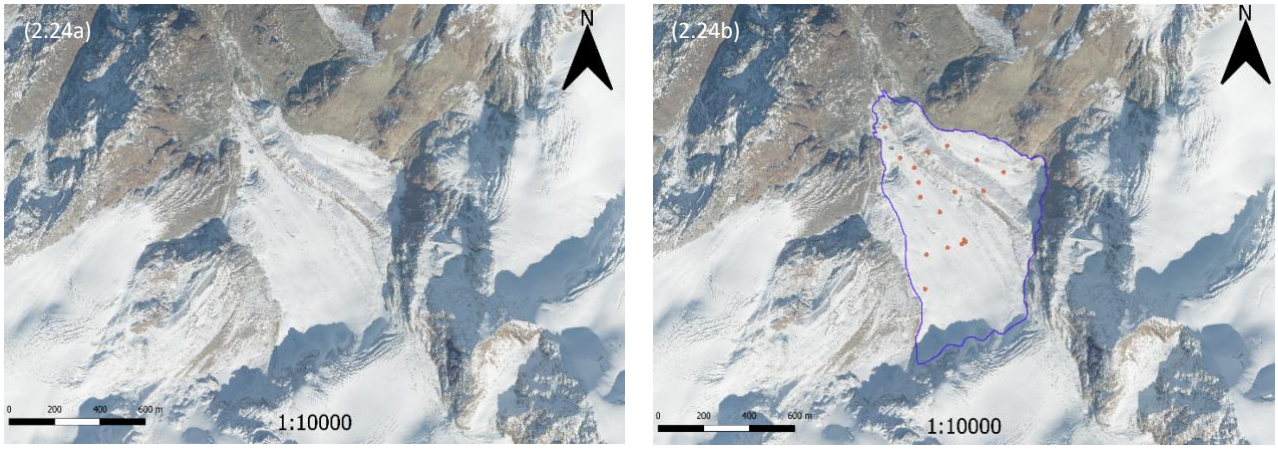


FIG 2.24: Ortofoto 2021 in scala 1:10000, prima (2.24a) e dopo (2.24b) aver perimetrato l'area e inserito le coordinate dei siti oggetto di studio

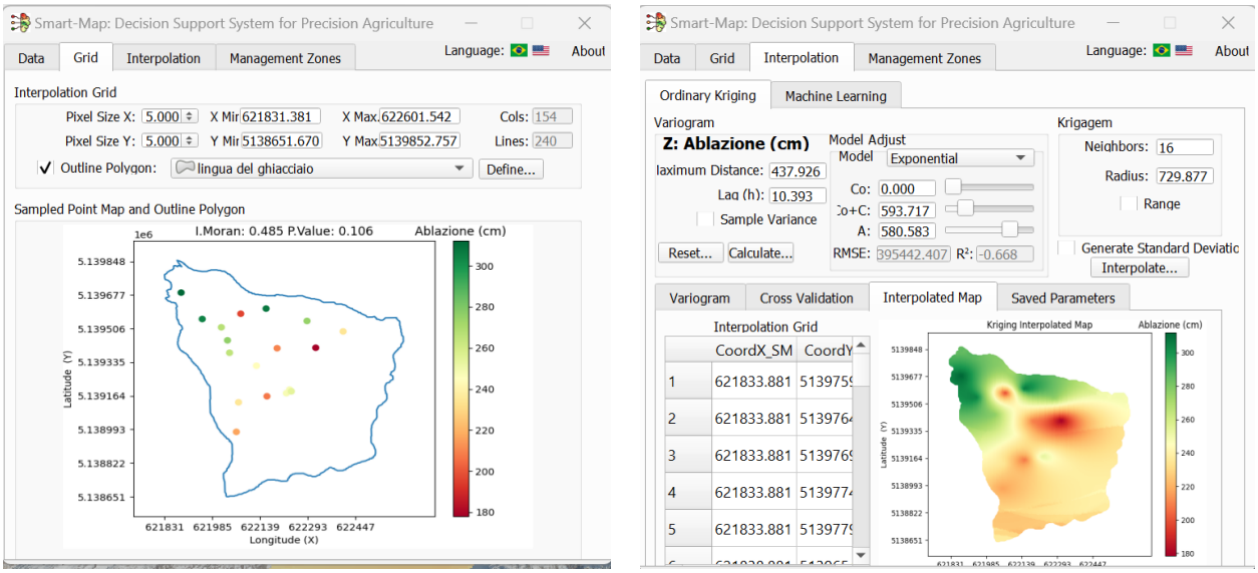


FIG 2.25: Finestra interattiva del plugin “Smart Map”, durante il processo di interpolazione dei valori di ablazione

Come possibile notare dalla FIG 2.25, avendo a disposizione limitati dati puntuali, il programma non riesce a definire precisamente le morene mediane. Per questo, si è reso necessario fissare dei punti in corrispondenza delle morene mediane (FIG 2.26) a cui associare un valore di copertura detritica e, di conseguenza, di albedo attendibili: nel caso della morena orientale è stato assegnato il valore 1,0 (ovvero 100,0% di copertura) a tutti i punti, mentre per quella occidentale, sono stati assegnati valori pari alla copertura in corrispondenza di F5 (80% di copertura) per la zona più a valle, mentre sono stati assegnati valori prossimi al 100,0% per la porzione sommitale, dove si trova anche F11. In questo modo la mappatura è stata più precisa, eccetto per la zona più sommitale della lingua, dove vi è una mancanza di dati.

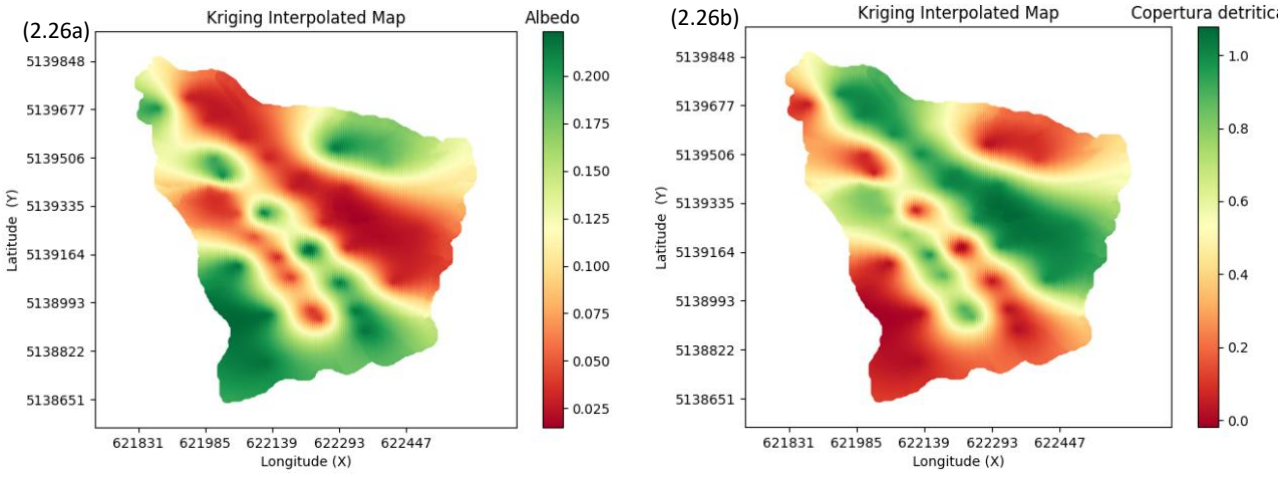


FIG 2.26: Interpolazione dei dati di albedo (2.26a) e copertura detritica (2.26b) ancora in fase di elaborazione

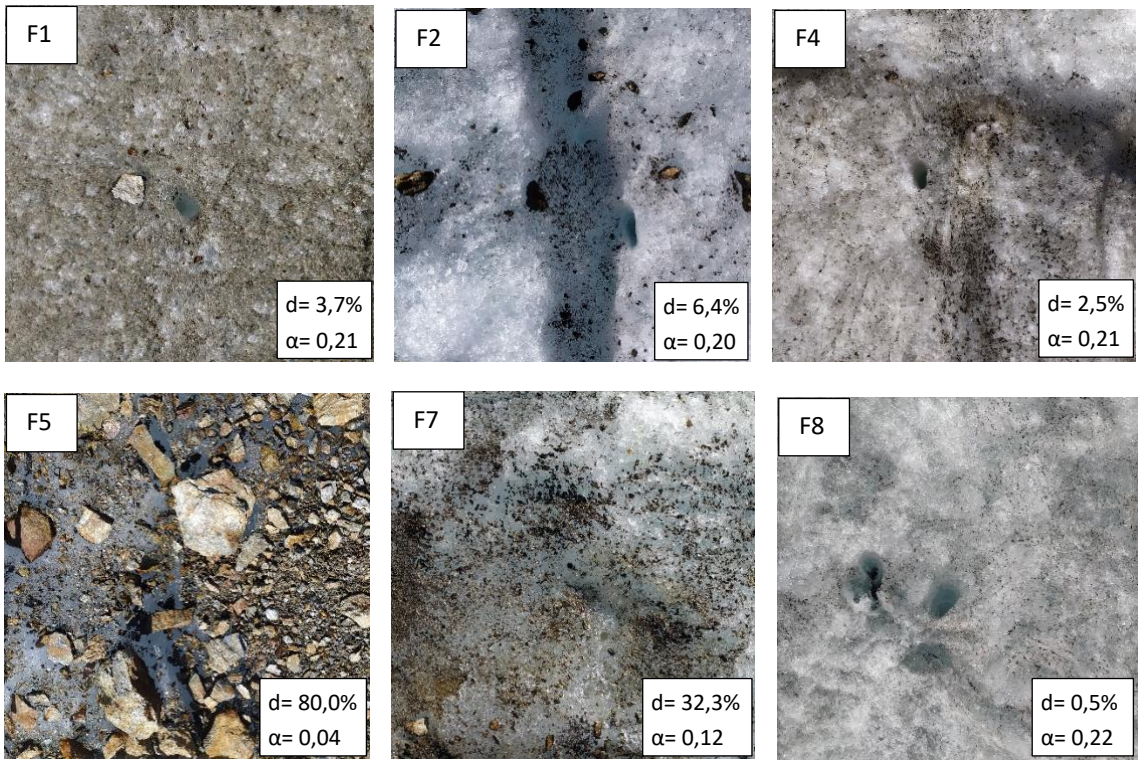
3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati di seguito descritti sono frutto della raccolta di dati, descritta nelle sezioni 2.1 e 2.2, e della loro successiva elaborazione effettuata tramite i metodi indicati nella sezione 2.3.

3.1 STIMA DELL'ALBEDO

Come descritto nella sezione 2.3.2, sono state elaborate le foto risalenti ai giorni 02-08-2023 e 07-09-2023: di seguito vengono riportate le foto, le tabelle e i grafici relativi alla seconda data, in modo tale da poter confrontare i valori di copertura detritica e albedo con le foto a cui si riferiscono, oltre che a poter confrontare la distribuzione spaziale dell'ablazione cumulata al 7 settembre con i valori di albedo della stessa data.

La copertura detritica presente sul Ghiacciaio dei Forni spazia tra valori dello 0,2% nei dintorni della stazione meteo al 07-09-2023, fino a valori dell'80,0% al sito F5 alla stessa data. Se non si considera quest'ultimo dato che riguarda un sito di morena, si arriva ad un valore di copertura pari al 66,0% in F20 sempre al 07-09-2023 (FIG 3.1). Tramite i passaggi descritti in precedenza nella sezione 2.3.2, si l'albedo è risultata variare tra 0,04 per il valore massimo di copertura detritica (80,0% presso il sito F5) e 0,22 in corrispondenza del valore minimo (0,2% presso il sito SMI). I risultati ordinati nella TAB 3.1, sono stati poi utilizzati per ricavare tre grafici (FIGG 3.2, 3.3 e 3.4), da cui si nota come all'aumentare della copertura detritica va a diminuire l'albedo: questo perché all'aumentare della percentuale di copertura, sempre meno ghiaccio affiora in superficie, riducendo, quindi, la frazione di radiazione riflessa, dovuta in gran parte alle superfici chiare, in questo caso, rappresentate dal ghiaccio pulito.



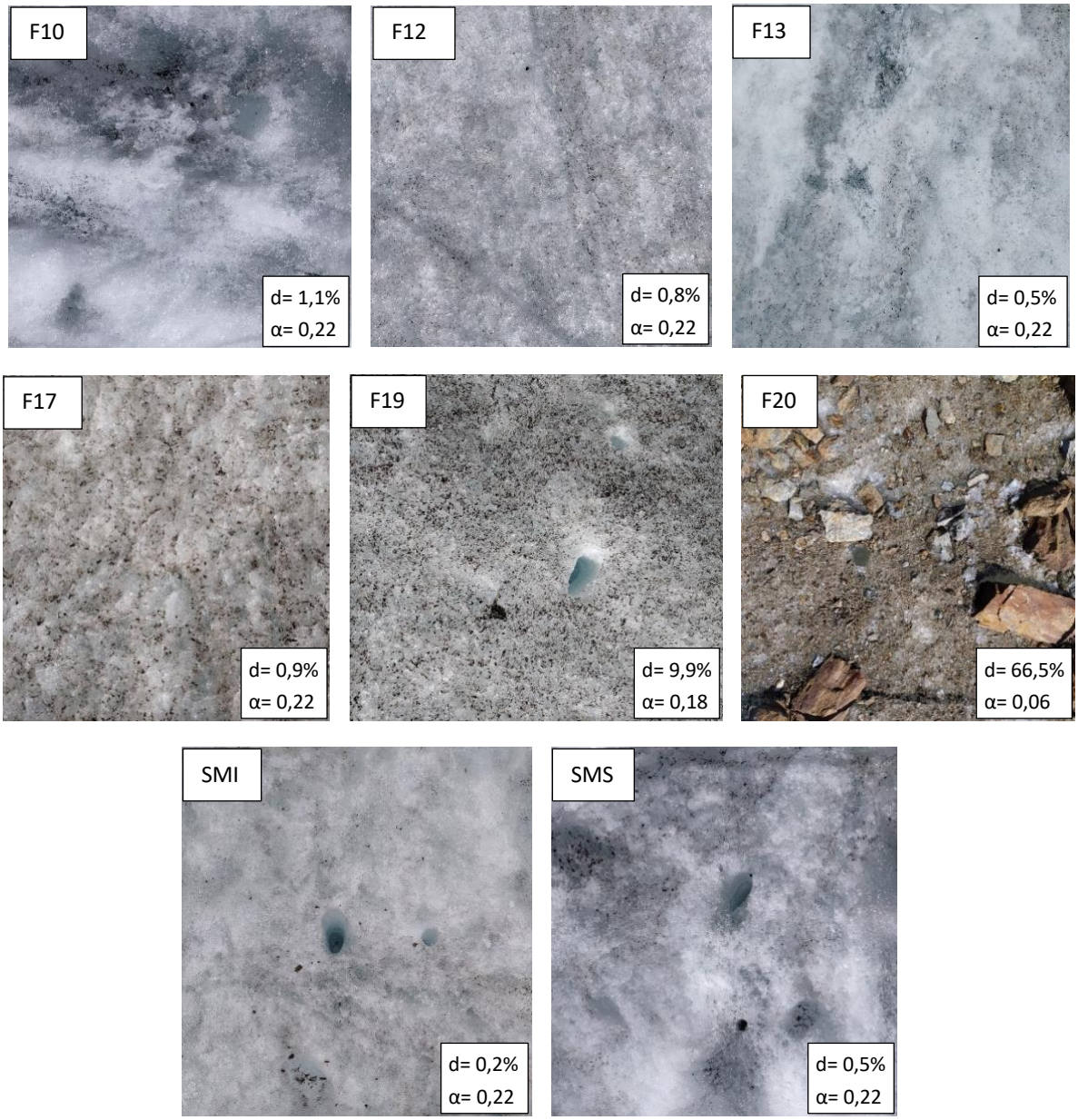


FIG 3.1: Immagini elaborate per trovare l'albedo con i relativi valori di copertura detritica d (%) e albedo (α). Foto scattate il 07-09-2023.

STIMA ALBEDO A PARTIRE DALLA % DI COPERTURA DETRITICA (07-09-2023)							
Sito	Area totale (pixel)	Area detrito (pixel)	% copertura detritica	Copertura detritica d	Stima albedo (lnα)	Albedo (α)	Tipo di detrito
F1	649467	23850	3,67%	0,0367	-1,57	0,207	Detrito sparso
F2	6640925	426101	6,42%	0,0642	-1,63	0,196	Detrito sparso
F3				1,0000	-3,54	0,029	Morena
F4	6341202	155096	2,45%	0,0245	-1,55	0,212	Crioconite
F5	620844	496681	80,00%	0,8000	-3,13	0,044	Morena
F6				1,0000	-3,54	0,029	Morena
F7	5931495	1916466	32,31%	0,3231	-2,16	0,115	Detrito sparso
F8	5861856	29330	0,50%	0,0050	-1,51	0,221	Debris-free
F10	5373099	59708	1,11%	0,0111	-1,52	0,218	Debris-free
F11				1,0000	-3,54	0,029	Morena
F12	5391684	43735	0,81%	0,0081	-1,52	0,219	Debris-free
F13	5678113	25451	0,45%	0,0045	-1,51	0,221	Debris-free
F17	5609286	52253	0,93%	0,0093	-1,52	0,219	Crioconite
F18				1,0000	-3,54	0,029	Morena
F19	5159968	512826	9,94%	0,0994	-1,70	0,182	Crioconite
F20	350383	232865	66,46%	0,6646	-2,86	0,058	Detrito sparso
SMI	5753694	12416	0,22%	0,0022	-1,50	0,222	Debris-free
SMS	5864688	29097	0,50%	0,0050	-1,51	0,221	Debris-free

TAB 3.1: A partire dal numero di pixel calcolato con ImageJ si sono calcolati prima la copertura detritica (in percentuale) e poi l'albedo. In rosso sono evidenziate le celle relative ai siti (tutti su morena) con copertura detritica del 100,0%. Tabella relativa ai valori per le foto scattate il 07-09-2023

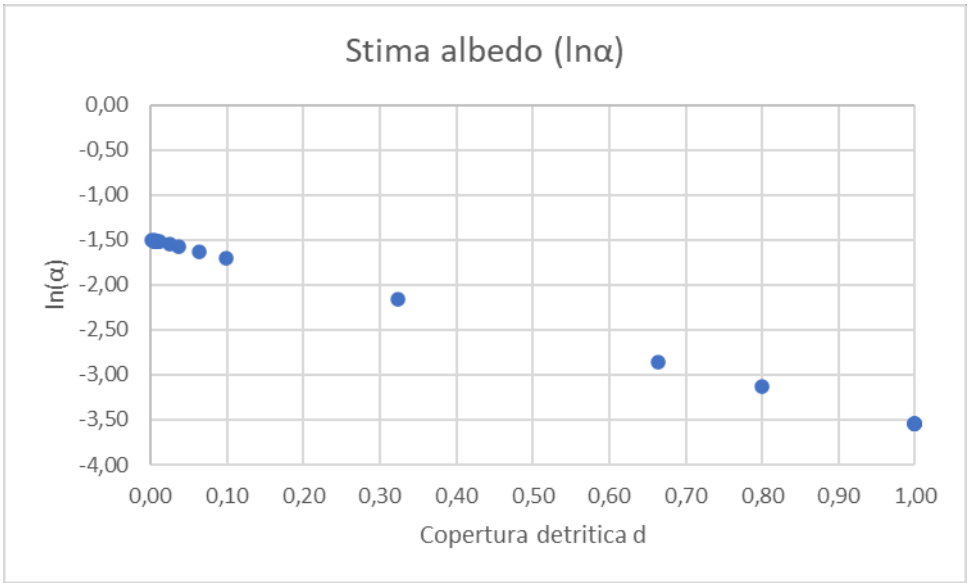


FIG 3.2: Logaritmo naturale dell'albedo in funzione della copertura detritica considerando anche i siti di morena.
Dati riferiti al 07-09-2023

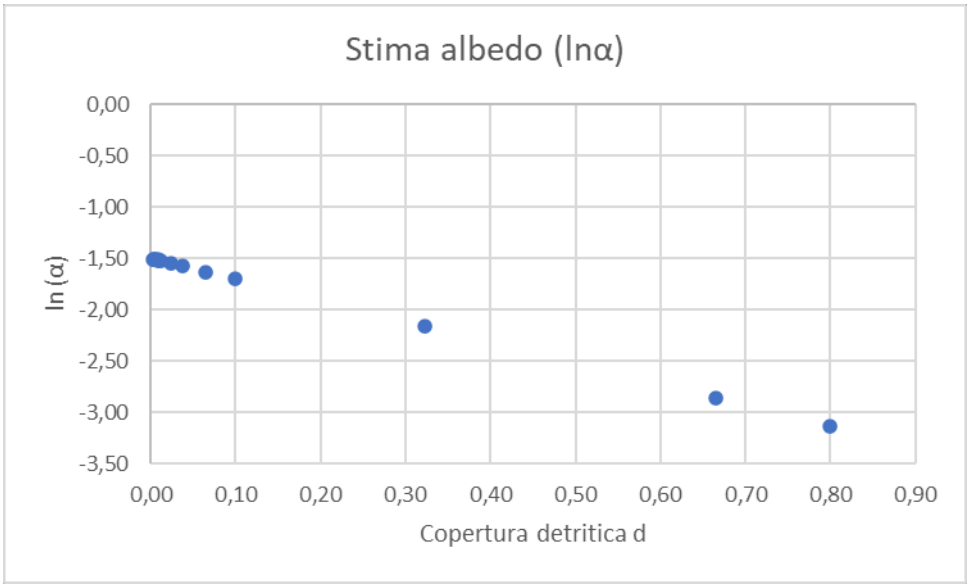


FIG 3.3: Logaritmo naturale dell'albedo in funzione della copertura detritica. Sono stati esclusi i valori dei siti di morena, eccetto F5, elaborato con GIMP. Dati riferiti al 07-09-2023.

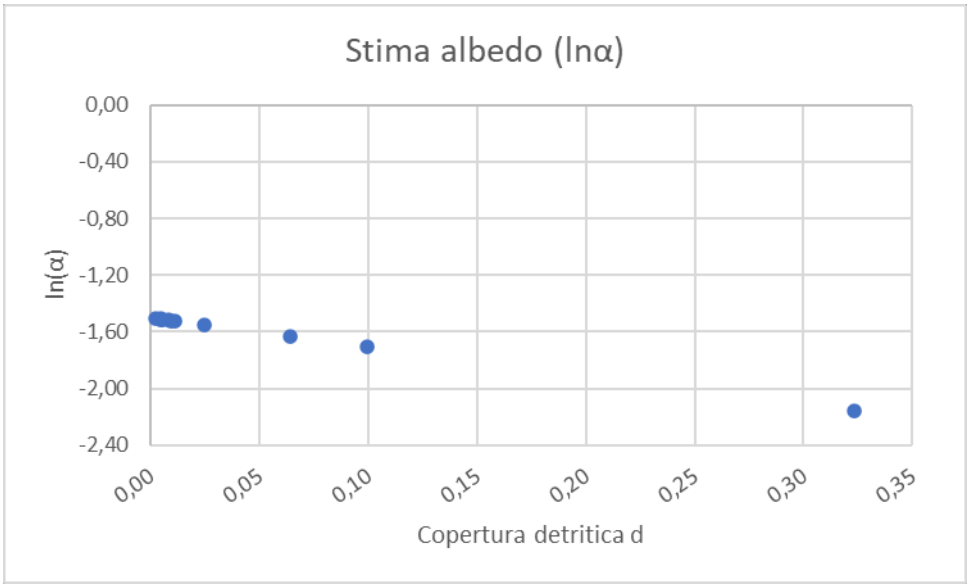


FIG 3.4: Logaritmo naturale dell'albedo in funzione della copertura detritica. Sono stati esclusi i valori di tutti siti di morena e di F20, elaborato con GIMP. Dati riferiti al 07-09-2023.

3.2 ABLAZIONE SUPERFICIALE

Per quanto riguarda l'analisi della ablazione superficiale, il primo risultato interessante ottenuto è stata l'ablazione media giornaliera (TAB 3.2). Nel periodo considerato questa varia dai 3,2 ai 6,6 cm al giorno. Tale range è dovuto alle diverse condizioni dei siti oggetto di studio. In particolare, due sono i parametri più influenti: la copertura detritica e la quota.

ABLAZIONE GIORNALIERA MEDIA					
PERIODO / SITO	dal 18/07 al 03/08	dal 03/08 al 18/08	dal 18/08 al 07/09	dal 18/07 al 07/09	dal 03/08 al 07/09
1	6,2	6,6	5,7	6,2	6,2
2	5,5	4,9	5,3	5,2	5,1
3	3,7	3,8	4,0	3,8	3,9
3 II	3,7	3,8	3,7	3,7	3,7
4	5,7	5,0	5,5	5,4	5,3
5	5,6	4,9	5,1	5,2	5,0
6	4,6	3,6	4,1	4,1	3,6
6 II	4,2	4,1	4,3	4,2	4,2
7	6,5	5,9	5,6	6,0	5,8
8	5,1	4,7	4,6	4,8	4,6
10	4,6	4,6	4,7	4,6	4,6
11	4,3	3,9	4,0	4,1	4,0
11 II	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
12	4,2	4,1	4,4	4,2	4,2
13	4,6	4,5	4,7	4,6	4,6
17	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
18	3,5	3,2	3,7	3,5	3,5
18 II	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
19	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
20	6,1	6,4	5,7	6,1	6,1
SMI	5,4	4,6	4,6	4,9	4,6
SMS	5,3	4,9	4,8	5,0	4,9

TAB 3.2: Valori di ablazione media giornaliera (cm al giorno) divisi per periodo: le due colonne a destra rappresentano rispettivamente l'ablazione media del periodo totale e quella del periodo a partire dal 03-08-2023 fino a fine misurazioni. I valori in azzurro sono i valori estrapolati.

É stata, quindi, analizzata la correlazione tra la copertura detritica e l'ablazione del ghiacciaio. Come si può notare dalla FIG 3.5, fra i siti *debris-free* e quelli con presenza di crioconite non vi è una marcata differenza di ablazione in quanto la palina non era installata all'interno della coppetta crioconitica e quindi i valori di ablazione misurati sono paragonabili con porzioni di superficie priva di detrito. È ben evidente invece come i siti su morena presentino un tasso di ablazione medio inferiore agli altri siti, mentre le zone a maggior ablazione sono quelle che presentano detrito sparso sulla superficie. Questo fenomeno è chiamato ablazione differenziale e si basa sul fatto che, se la copertura detritica risulta avere uno spessore superiore ad una determinata soglia, chiamata spessore critico, essendo la roccia un cattivo conducente di calore, l'ablazione del ghiaccio sottostante risulta rallentata. Se il detrito sopraglaciale non raggiunge la soglia di spessore critico le particelle, che risultano quindi di piccole dimensioni, si scaldano più velocemente e cedono il proprio calore al ghiaccio circostante, andando ad aumentarne il tasso di ablazione. I dati di spessore detritico raccolti durante le attività in campo in corrispondenza dei siti di morena non sono sufficienti per definire lo spessore critico del Ghiacciaio dei Forni, però è possibile affermare, anche in accordo con altri studi sui ghiacciai alpini, che la soglia è inferiore alla decina di centimetri e spesso varia tra i 2 e i 7 cm in funzione della litologia (tipo di roccia) e granulometria (dimensioni dei frammenti rocciosi) del detrito roccioso e della latitudine ove è ubicato il ghiacciaio (Mosconi B.; Diolaiuti et al, 2006). Da uno studio effettuato nell'estate del 1984 sul Ghiacciaio dei Forni ad una quota di 2650 m s.l.m., è risultato che nel caso di ghiaccio pulito l'ablazione media giornaliera era 3 cm; con la

copertura di uno strato di 1 cm di limo e detrito fine tale media saliva a 3,7 cm, per scendere a poco oltre 1 cm con uno strato di detrito spesso 5 cm (Smiraglia, 1986).

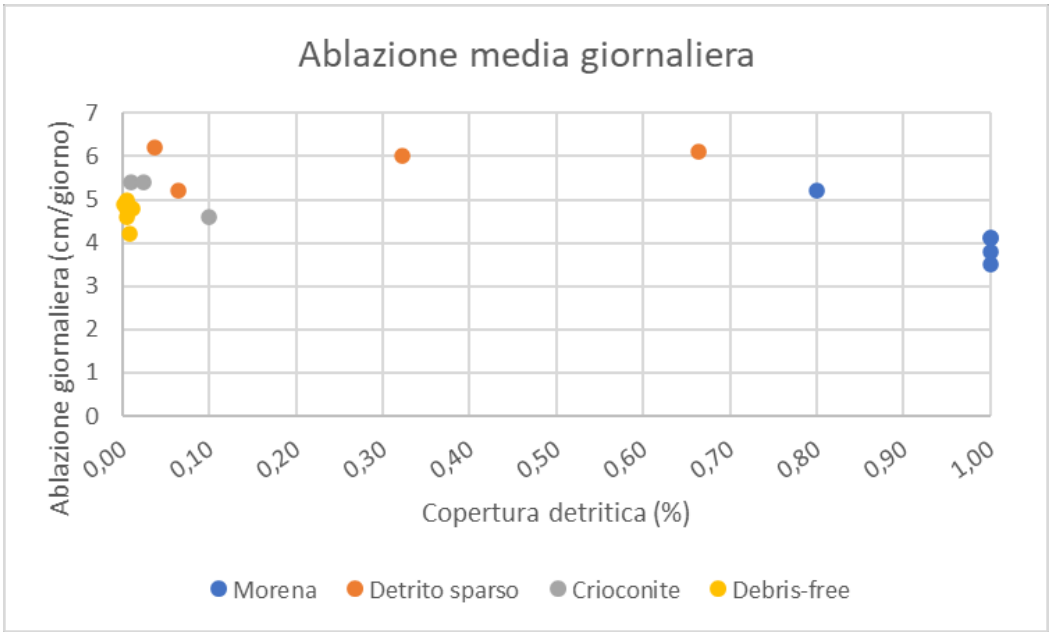


FIG 3.5: Ablazione giornaliera media in funzione della copertura detritica. Confronto siti con diverso grado di copertura detritica. Valori di copertura detritica relativi all'elaborazione delle fotografie del 07-09-2023.

La FIG 3.6 rappresenta sempre l'ablazione media giornaliera in funzione della copertura detritica, ma si focalizza sulla dispersione dei dati: il valore di R^2 pari a circa 0,68, mostra un'attendibilità dell'equazione della funzione piuttosto elevata: probabilmente l'influenza della quota sul tasso di ablazione va a condizionare tale valore, abbassandolo.

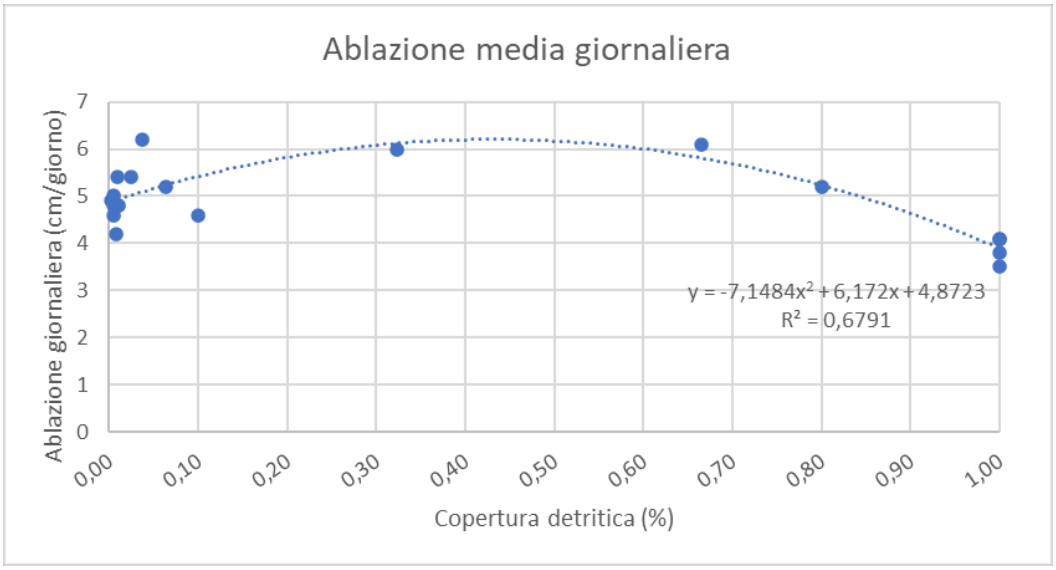


FIG 3.6: Ablazione giornaliera media in funzione della copertura detritica: linea di tendenza e R^2. Valori di copertura detritica relativi all'elaborazione delle fotografie del 07-09-2023.

È stata, poi, analizzata la relazione tra l'albedo e l'ablazione. Poiché, come descritto in precedenza, una maggior albedo corrisponde ad una maggior riflettività e, quindi, ad un minor assorbimento di

energia solare, l'ablazione risulta decrescente per valori crescenti di albedo. La FIG 3.7, mostra, però, come per i siti con elevata copertura detritica (siti su morena), l'ablazione sia inferiore a quella degli altri siti. Questo perché, in queste aree, lo spessore di detrito è superiore alla soglia critica e va, quindi, a ridurre il tasso di ablazione. Non è quindi sufficiente analizzare l'albedo per distribuire l'ablazione, ma è fondamentale anche considerare lo spessore detritico.

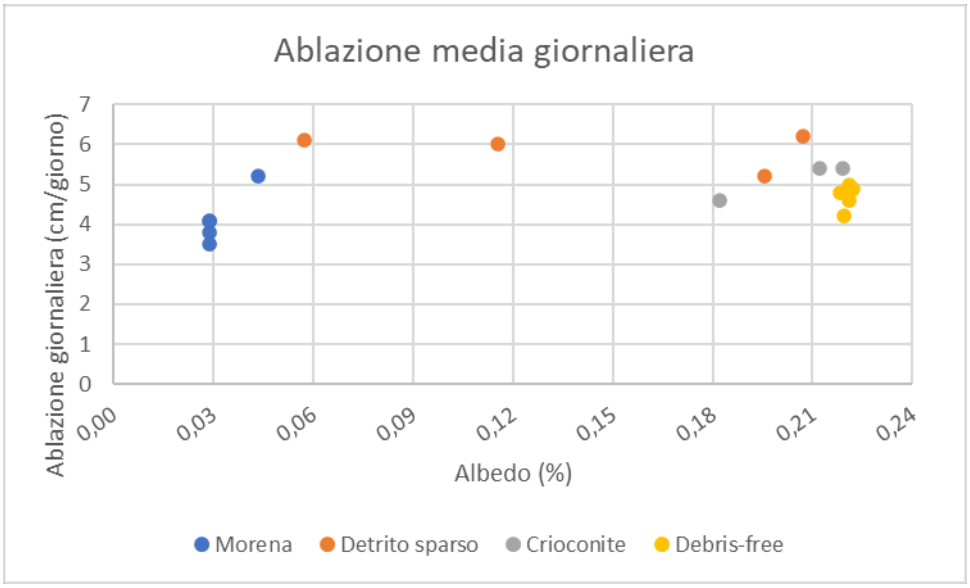


FIG 3.7: Ablazione media giornaliera in funzione dell'albedo. Albedo ricavata tramite l'analisi delle fotografie scattate il 07-09-2023

In seguito, è stata analizzata l'influenza del secondo parametro, ovvero la quota. La FIG 3.8 mostra come all'aumentare della quota, il tasso di ablazione si riduce, indipendentemente dalla tipologia di copertura detritica: questo è dovuto probabilmente al gradiente di temperatura, pari mediamente a -6,5°C ogni 1000 m di quota saliti (Senese et al., 2014), ovvero -0,65°C ogni 100 m in più di altitudine. La FIG 3.9 mostra come la dispersione dei dati risulta essere inferiore se si escludono i valori relativi ai siti di morena: R^2 passa infatti da valori attorno a 0,30 a valori superiori a 0,75. Le FIGG 3.10 e 3.11 portano alle stesse conclusioni, evidenziando con colori differenti le quattro classi di copertura detritica: ciò fa notare anche come, a quote simili, i siti di morena tendano ad avere un'ablazione inferiore alle altre categorie. Si è deciso di mostrare i grafici che considerano uno il periodo a partire dal 03-08-2023, uno l'intero arco di tempo in cui sono state effettuate le misurazioni. Questo perché nel primo caso sono disponibili tutti i dati, mentre nel secondo per alcune paline sono stati ritenuti validi i valori di ablazione medi giornalieri, poiché non sono disponibili i dati fino al 03-08-2023. Dai grafici si nota, infatti, come il valore di R^2 sia leggermente superiore nel caso si consideri l'ablazione a partire dal 3 agosto.

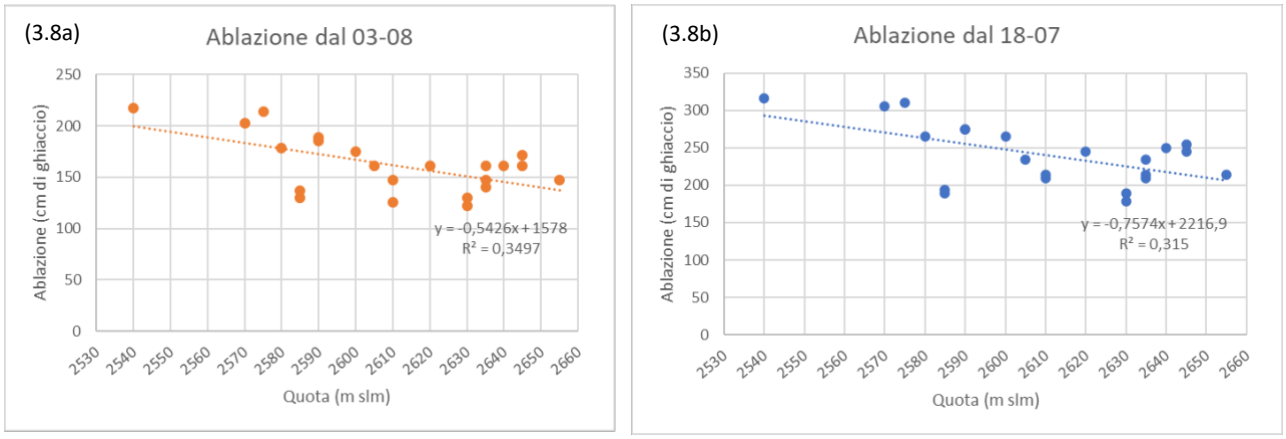


FIG 3.8: (3.8a) Ablazione cumulata in funzione della quota a partire dal 03-08-2023. (3.8b) Ablazione cumulata in funzione della quota a partire dal 18-07-2023

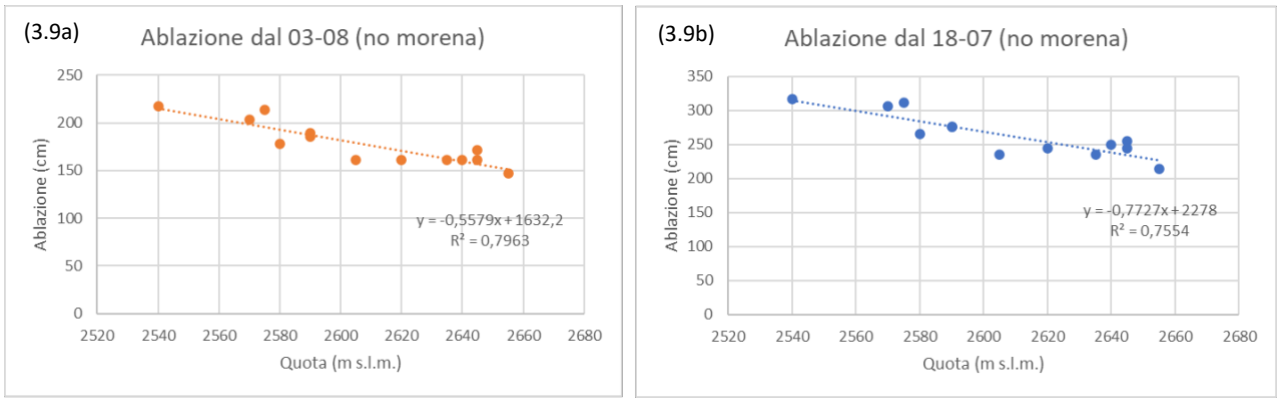


FIG 3.9: (3.9a) Ablazione cumulata in funzione della quota a partire dal 03-08-2023, escludendo i valori relativi ai siti di morena. (3.9b) Ablazione cumulata in funzione della quota a partire dal 18-07-2023, escludendo i valori relativi ai siti di morena.

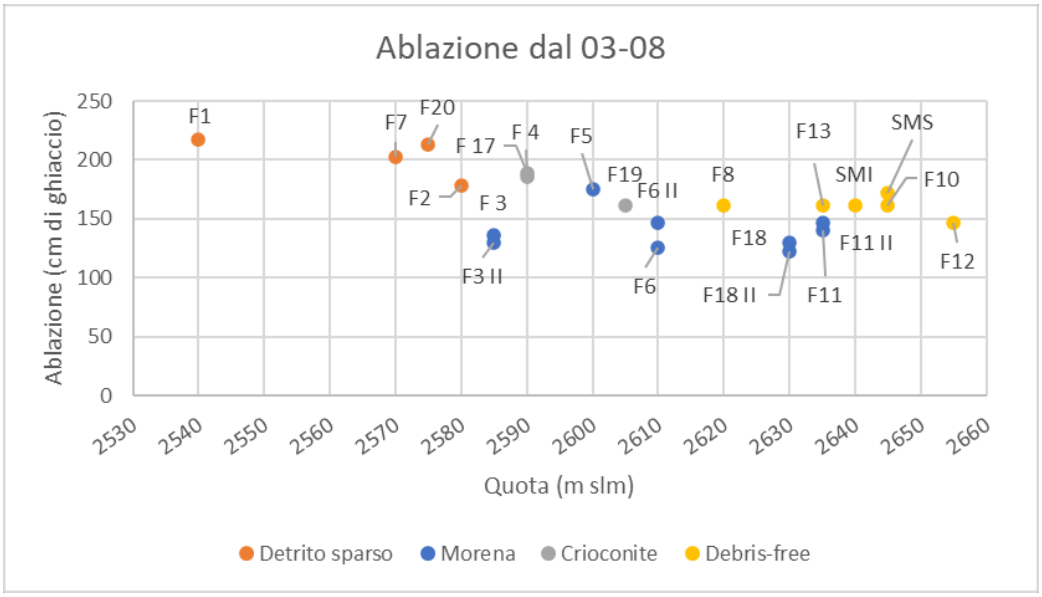


FIG 3.10: Ablazione cumulata in funzione della quota a partire dal 03-08-2023

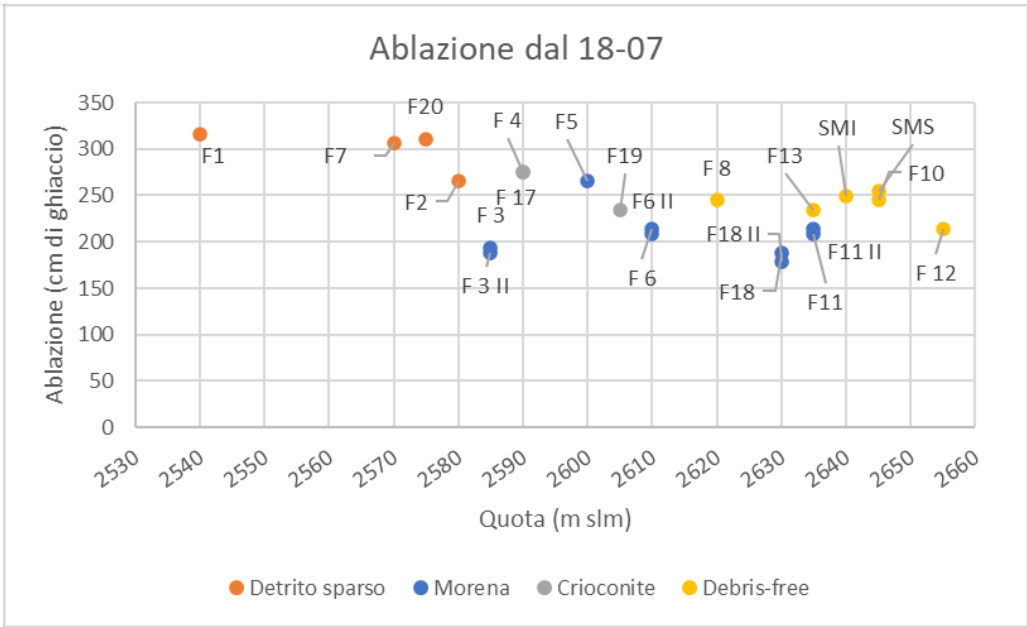


FIG 3.11: Ablazione cumulata in funzione della quota a partire dal 18-07-2023

Si procede ora ad analizzare i valori di ablazione cumulata, ottenendo quindi i valori totali di ablazione nel periodo di osservazione (TABB 3.3 e 3.4). In un totale di 51 giorni, l'ablazione massima si è verificata, in generale, nei siti con detrito sparso sulla superficie e fra questi, in particolare, il sito F1 ha registrato l'ablazione totale massima pari a 312 cm di ghiaccio: ciò è anche dovuto, probabilmente, alla quota e alla presenza di detrito, in quanto tale sito si trova nei pressi della fronte del ghiacciaio ad una quota di 2540 m s.l.m. e presenta una copertura del 3,7%. Il sito che ha registrato l'ablazione minore è stato F18, situato su morena ad una quota di 2630 m s.l.m.. Questi risultati confermano quanto osservato in precedenza, ovvero che, in media, i siti con detrito sparso e quelli a quote inferiori presentano un maggior tasso di ablazione (FIG 3.12 e FIG 3.13). Anche in questo caso si è deciso di mostrare i grafici che considerano sia il periodo a partire dal 03-08-2023, sia l'intero arco di tempo in cui sono state effettuate le misurazioni, per la medesima motivazione.

ABLAZIONE DAL 03-08																						
DATA	F1	F2	F3	F3 II	F4	F5	F6	F6 II	F7	F8	F10	F11	F11 II	F12	F13	F17	F18	F18 II	F19	F20	SMI	SMS
03/08/2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04/08/2023	6,6	4,9	3,8	3,8	5	4,9	3,6	4,1	5,9	4,7	4,6	3,9	4,2	4,1	4,5	5,4	3,2	3,7	4,6	6,4	4,6	4,9
18/08/2023	99	73,5	57	57	75	73,5	54	61,5	88,5	70,5	69	58,5	63	61,5	67,5	81	48	55,5	69	96	69	73,5
19/08/2023	104,7	78,8	61	60,7	80,5	78,6	58,1	65,8	94,1	75,1	73,7	62,5	67,2	65,9	72,2	86,4	51,7	59,2	73,6	101,7	73,6	78,3
07/09/2023	213	179,5	137	131	185	175,5	136	147,5	200,5	162,5	163	138,5	147	149,5	161,5	189	122	129,5	161	210	161	169,5

TAB 3.3: Ablazione cumulata dal 03-08-2023 al 07-09-2023

ABLAZIONE DAL 18-07																						
DATA	F1	F2	F3	F3 II	F4	F5	F6	F6 II	F7	F8	F10	F11	F11 II	F12	F13	F17	F18	F18 II	F19	F20	SMI	SMS
18/07/2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/07/2023	6,2	5,5	3,7	3,7	5,7	5,6	4,6	4,2	6,5	5,1	5,3	4,3	4,2	4,2	4,6	5,4	3,5	3,7	4,6	6,1	5,4	5,3
03/08/2023	99,2	88	59,2	59,2	91,2	89,6	73,6	67,2	104	81,6	84,8	68,8	67,2	67,2	73,6	86,4	56	59,2	73,6	97,6	86,4	84,8
04/08/2023	105,8	92,9	63	63	96,2	94,5	77,2	71,3	109,9	86,3	89,4	72,7	71,4	71,3	78,1	91,8	59,2	62,9	78,2	104	91	89,7
18/08/2023	198,2	161,5	116,2	116,2	166,2	163,1	127,6	128,7	192,5	152,1	153,8	127,3	130,2	128,7	141,1	167,4	104	114,7	142,6	193,6	155,4	158,3
19/08/2023	203,9	166,8	120,2	119,9	171,7	168,2	131,7	133	198,1	156,7	158,5	131,3	134,4	133,1	145,8	172,8	107,7	118,4	147,2	199,3	160	163,1
07/09/2023	312,2	267,5	196,2	190,2	276,2	265,1	209,6	214,7	304,5	244,1	247,8	207,3	214,2	216,7	235,1	275,4	178	188,7	234,6	307,6	247,4	254,3

TAB 3.4: Ablazione cumulata dell'intero periodo di misurazioni

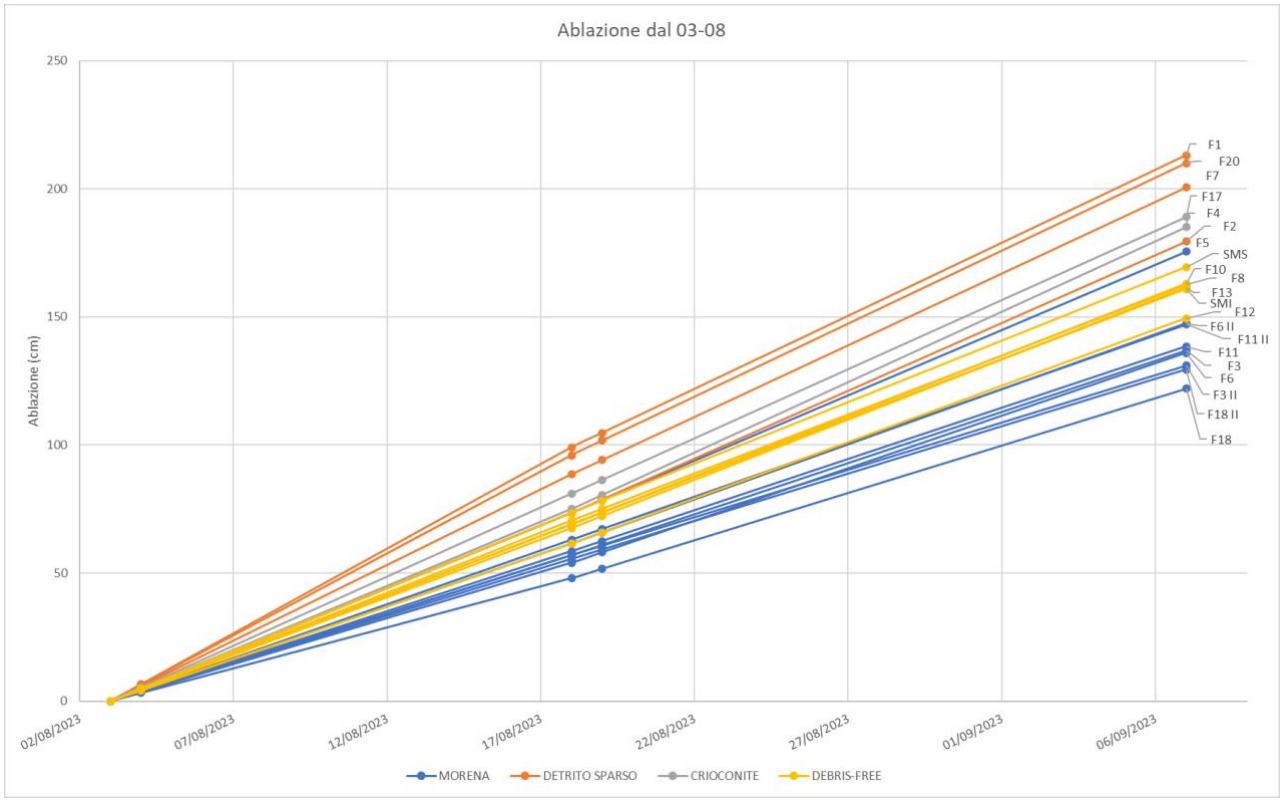


FIG 3.12: Ablazione cumulata a partire dal 03-08-2023

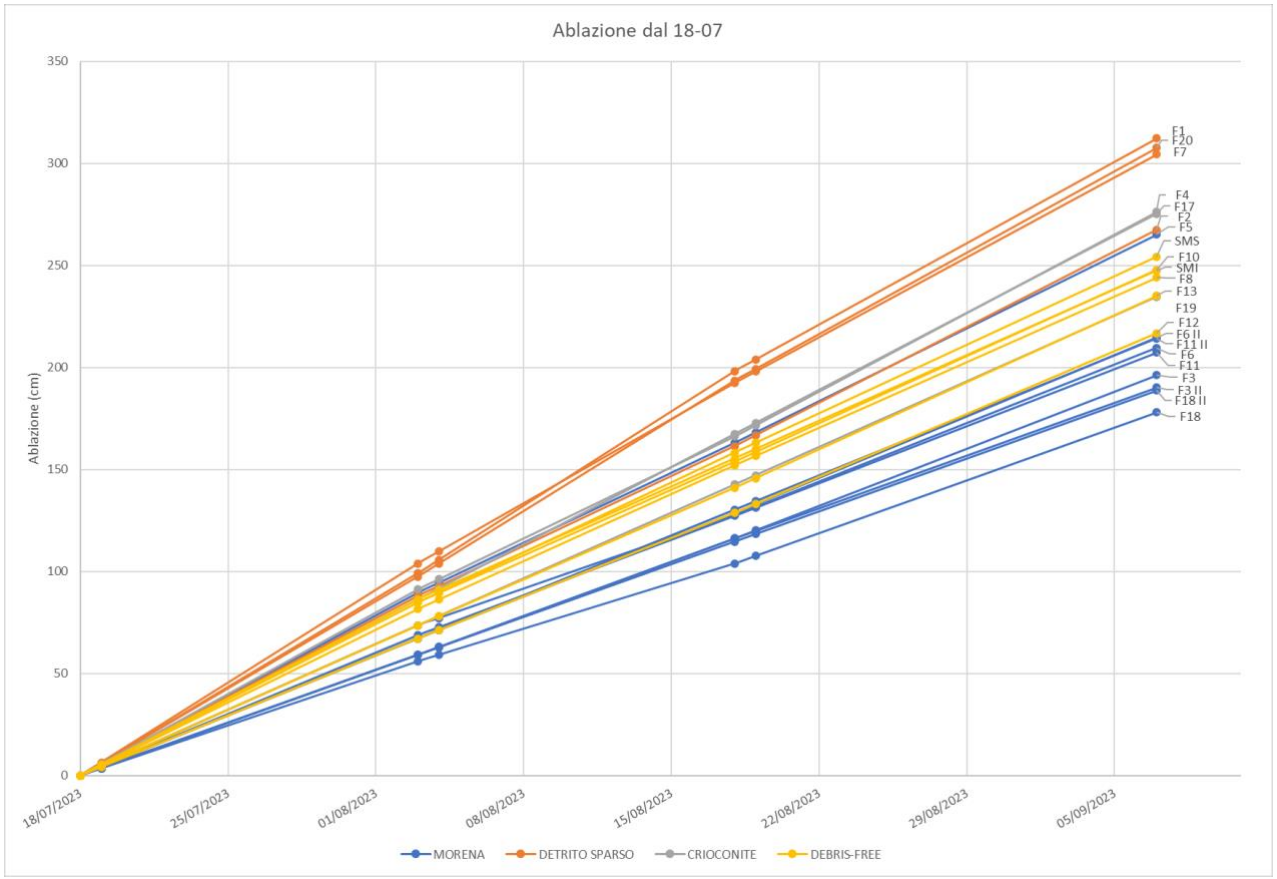


FIG 3.13 Ablazione cumulata a partire dal 18-07-2023

3.3 DISTRIBUZIONE SPAZIALE DI ABLAZIONE, ALBEDO E COPERTURA DETRITICA

L'interpolazione dei dati discreti in dati continui ha permesso di ottenere tre mappe, le quali mostrano la distribuzione dell'ablazione, della copertura detritica e dell'albedo lungo la lingua d'ablazione del Ghiacciaio dei Forni.

La FIG 3.14 mostra la distribuzione spaziale dell'ablazione. Si può notare come, in linea generale, ad una maggior quota corrisponda una diminuzione graduale dell'ablazione, così come nelle zone di morena si registra una riduzione della stessa, rispetto ai siti con detrito sparso o assente.

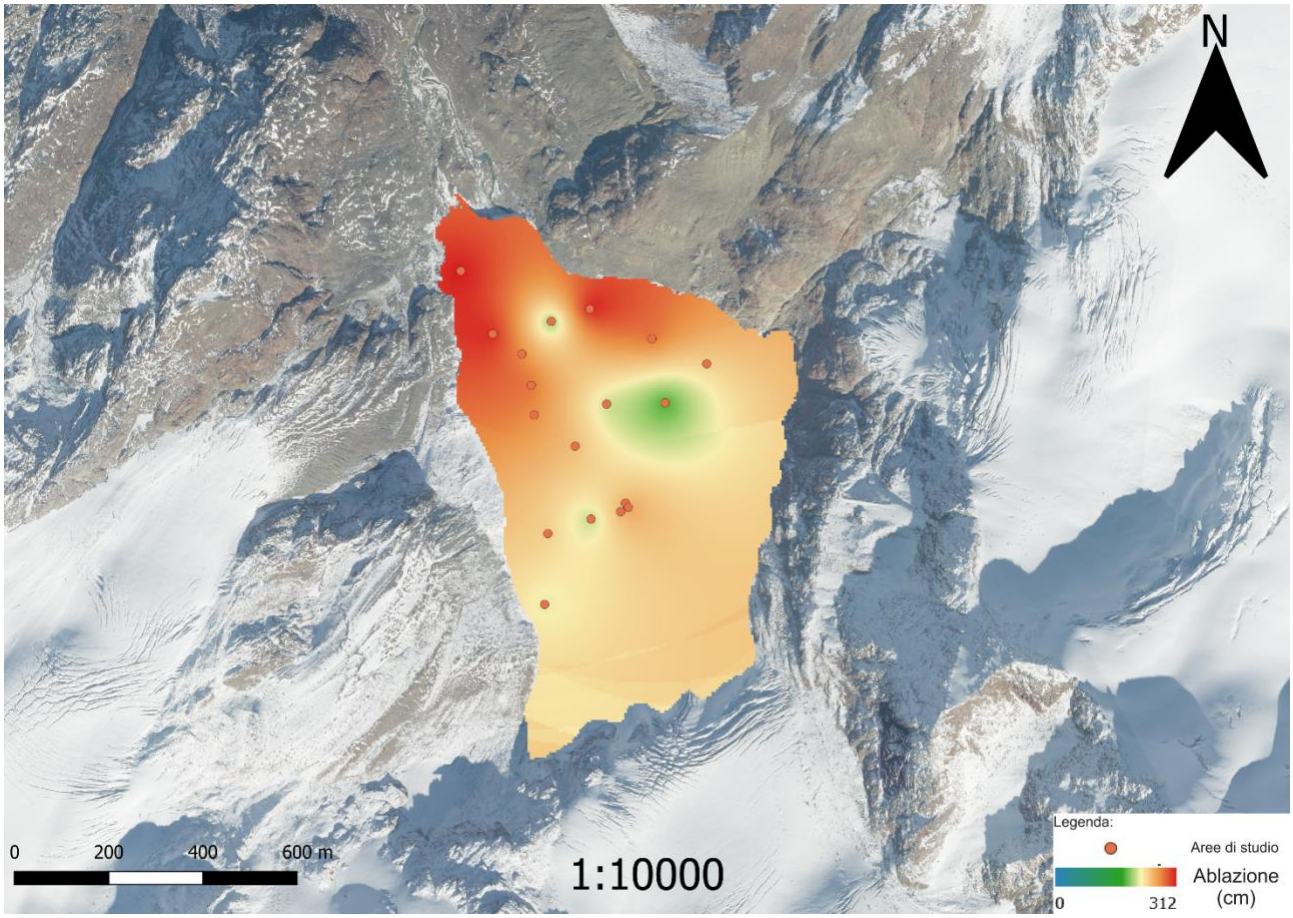


FIG 3.14: Distribuzione spaziale dell'ablazione cumulata (cm) sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni. Ablazione crescente dal colore verde al rosso, passando per colorazioni giallastre e aranciate

Il confronto fra le FIGG 3.15 e 3.16 mostra come i valori di copertura detritica e albedo siano molto correlati fra loro: infatti dove la copertura detritica risulta molto elevata se non completa (zone di morena) l'albedo è molto ridotta. Inoltre, confrontando le FIGG 3.14 e 3.16, è ben visibile il fenomeno dell'ablazione differenziale: in corrispondenza delle aree di morena, dove la copertura detritica è completa e presenta uno spessore superiore alla soglia critica, la mappa dell'ablazione mostra come questa sia inferiore rispetto ai siti *debris-free* situati alla stessa quota.

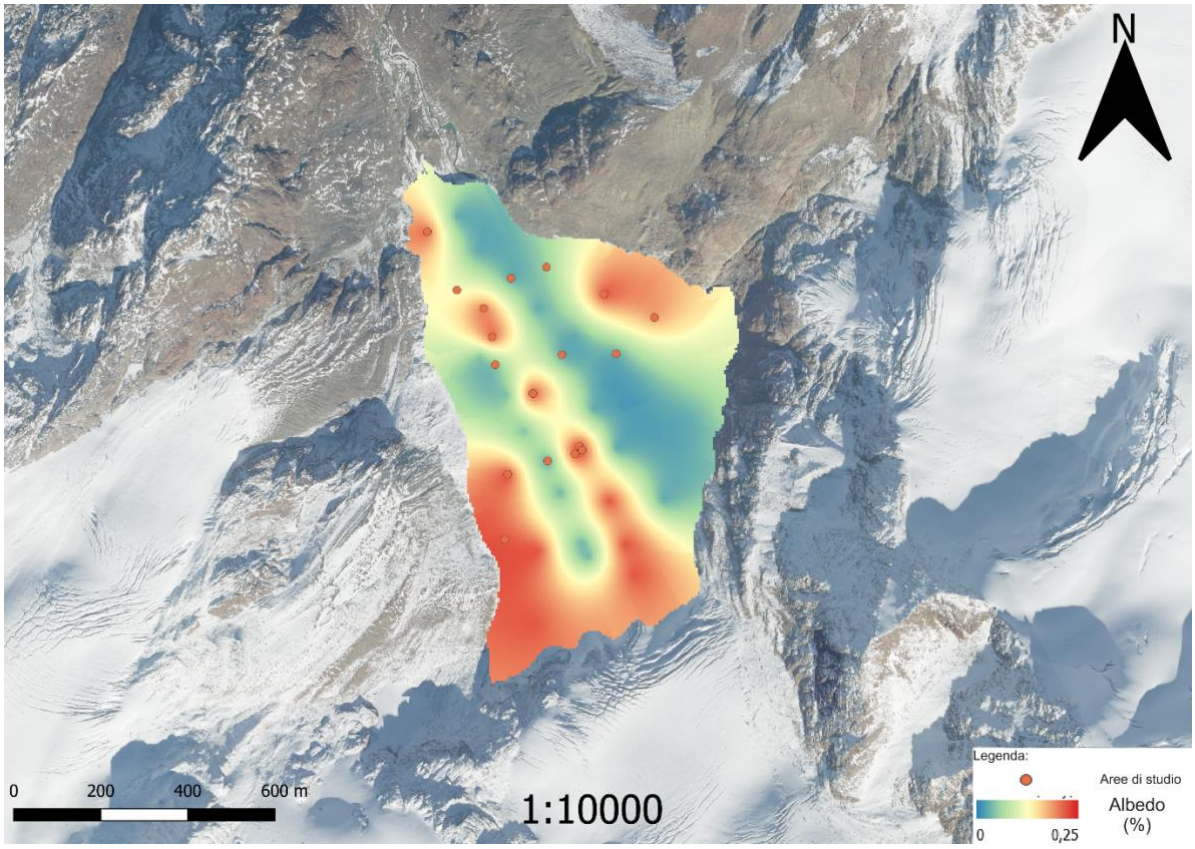


FIG 3.15: Distribuzione spaziale dell'albedo (% di radiazione solare riflessa) sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni: Colorazioni rosse indicano albedo elevata (valore massimo registrato: 0,22), colorazioni blu indicano albedo ridotta

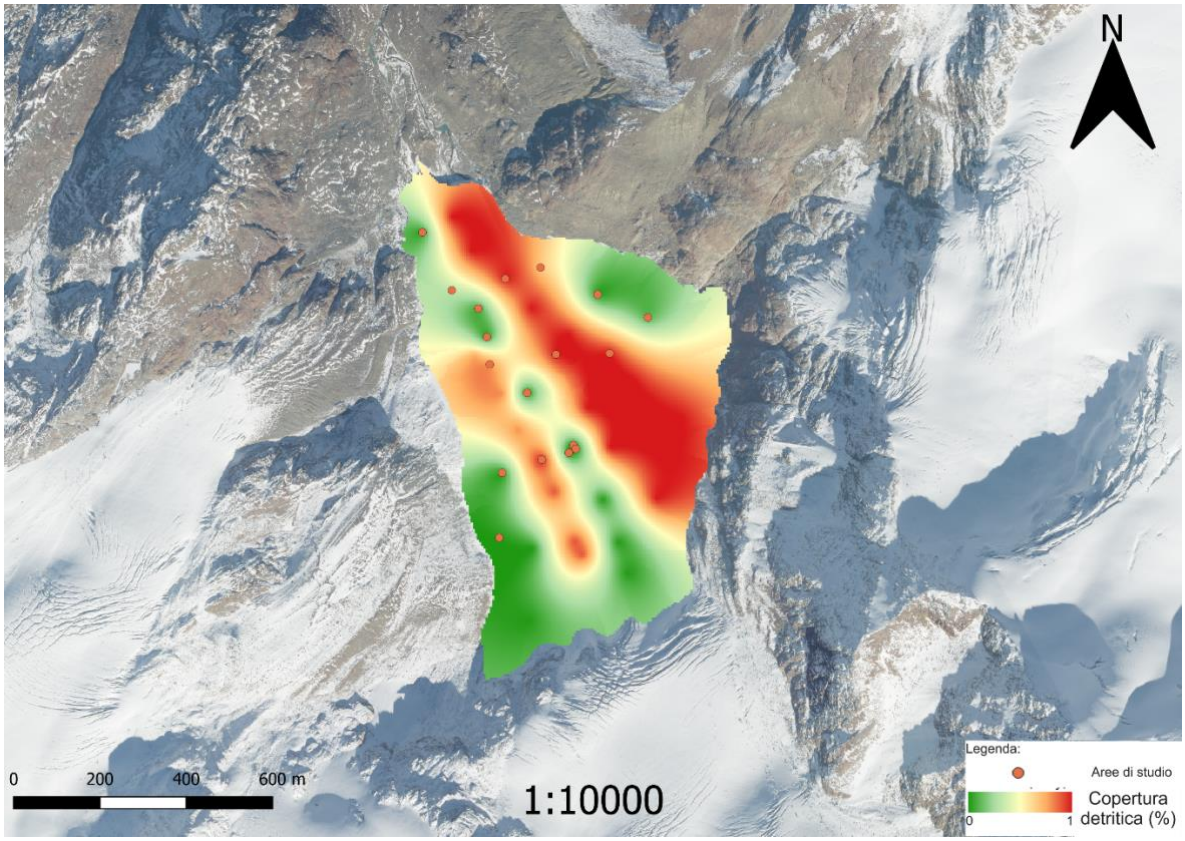


FIG 3.16: Distribuzione spaziale della copertura detritica (%) sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni: colorazioni rosse indicano copertura elevata (pari al 100,0% sulla morena orientale), colore verde intenso indica copertura limitata, vicina allo 0,0%

4 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dall'analisi dei dati permettono di avere un quadro abbastanza chiaro sulla distribuzione spaziale dell'ablazione sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni. I valori di ablazione cumulata alla fine del periodo considerato sono riferiti ad un arco di tempo pari a 51 giorni. Considerando un periodo di ablazione compreso fra i mesi di giugno e settembre, di durata di circa cento giorni (Senese et al., 2012b), l'ablazione cumulata nella stagione d'ablazione 2023 va da un minimo di 350 cm del sito F18, situato su morena a 2630 m s.l.m. di quota, ad un massimo di 620 cm del sito F1 situato nei pressi della fronte ad una quota di 2540 m s.l.m. e con una copertura detritica pari al 3,7%.
Calcolando grossolanamente la media tra questi due valori estremi, risulta che il ghiacciaio vede ridotto il suo spessore, in media, di 485 cm di ghiaccio rispetto all'inizio della stagione d'ablazione: considerando una densità relativa del ghiaccio media pari a 0,9 kg m^{-3}, la perdita è pari a 4,37 m w.e.. Tali valori possono essere utilizzati per effettuare previsioni riguardo alle dinamiche del ghiacciaio in un futuro prossimo: infatti è possibile misurare lo spessore di ghiaccio utilizzando degli strumenti radar. Tale metodo è stato testato anche sul Ghiacciaio dei Forni nel 2012, dove è stato rilevato uno spessore di circa 120 m in corrispondenza della cascata centrale (Urbini et al., 2017). Conoscendo i valori di spessore e i bilanci di massa del Ghiacciaio dei Forni è, quindi, possibile, modellare l'evoluzione del ghiacciaio (Garavaglia et al., 2014).

I valori di ablazione media giornaliera ottenuti risultano in linea con quanto osservato in precedenti studi: infatti Senese et al. hanno rilevato valori pari a 5 cm durante la stagione estiva 2009 e pari a 4 cm in quella successiva (Senese et al., 2012b). Uno studio di Smiraglia riguardante l'ablazione differenziale riporta valori di ablazione media giornaliera misurati ad una quota di 2650 m s.l.m. pari a 3 cm nel caso di superficie *debris-free*, 4 cm nel caso di superficie coperta da detrito fine e sparso e 2 cm nei siti con uno spessore di detrito superiore ai 5 cm (Smiraglia, 1986). Tali dati, oltre a mostrare come il trend degli ultimi anni sia l'aumento del tasso di ablazione, confermano quanto osservato per ciò che concerne l'influenza della copertura detritica sul tasso di ablazione, ovvero che, a parità di quota, una superficie glaciale coperta da detrito sparso e di granulometria contenuta presenta un'ablazione maggiore rispetto ad una superficie *debris-free* la quale, a sua volta, presenta un'ablazione superiore a quelle superfici ricoperte con uno strato di detrito con spessore superiore alla soglia critica: quest'ultima, solitamente, con valori nell'ordine dei centimetri.
Considerando i valori di ablazione media giornaliera per le quattro categorie di copertura detritica, è risultato che, mediamente, nei siti *debris-free* (con una copertura detritica media dello 0,6%) l'ablazione è stata pari a 4,72 cm, nei siti con presenza di sola crioconite (copertura detritica media pari a 4,4%) l'ablazione è stata di 5,13 cm, nei siti dov'è presente detrito sparso (con copertura detritica media di 27,2%, con un range, però, molto variabile, tra il 3,7% e il 66,5%), l'ablazione media giornaliera risulta pari a 5,88 cm, mentre nei siti di morena (con copertura detritica totale eccetto F5, in cui la copertura raggiunge l'80,0%) la media è stata di 4,14 cm al giorno. Si nota come all'aumentare della copertura detritica vi sia un incremento del tasso di ablazione che continua fino a valori di copertura del 50-60%, quando inizia, invece, una riduzione del tasso di ablazione, più

intensa in valore assoluto dell'aumento precedente. Per avere dati ancor più attendibili, bisogna provvedere a definire siti con presenza di detrito sparso anche alle quote superiori, in quanto nel presente studio, tali siti si trovano solamente nei primi 40 m di quota campionati, dove mancano, invece, siti *debris-free*.
È, però, possibile effettuare un confronto fra siti situati a quote simili: andando a considerare quattro siti *debris-free* (F10, F13, SMI e SMS) e due siti su morena (F11 e F18) situati a quote simili, attorno a 2640 m s.l.m., è risultato che l'ablazione media dei siti *debris-free* sia di 4,8 cm di ghiaccio al giorno, con una copertura detritica media dello 0,5%, mentre per i siti di morena, con copertura pari al 100,0% ed uno spessore detritico medio di 3 cm, l'ablazione media è stata di 3,8 cm al giorno, esattamente 1 cm in meno, valore superiore a quello ricavato dalle medie globali, pari a 0,58 cm al giorno di differenza fra i siti *debris-free* e su morena.
Altro parametro, interessante da prendere in considerazione, è la temperatura: i dati misurati dalla AWS possono, infatti essere utilizzati per definire dei modelli empirici che permettono di stimare l'ablazione del ghiaccio partendo dai valori di temperatura. Questi possono essere resi ancor più precisi integrando i valori di temperatura con quelli dei flussi radiativi (Senese et al., 2021)

Per quanto riguarda i valori di albedo, questi presentano un range fra 0,04 e 0,22, del tutto confrontabili con i risultati ottenuti in un precedente studio, in cui è stato utilizzato lo stesso metodo del presente elaborato per il calcolo della percentuale di copertura detritica, che spaziano da 0,06 a 0,32 (Azzoni et al., 2016). Ciò nonostante, la copertura detritica non è l'unico parametro che influisce sull'albedo del ghiaccio, ma questa dipende da molte altre variabili, in modo non ancora ben definito, quali l'angolo di elevazione solare, ovvero l'angolo d'incidenza dei raggi solari rispetto all'orizzontale, la struttura cristallina del ghiaccio, la presenza di bolle d'aria nel ghiaccio e le dimensioni delle stesse (Fugazza et al., 2016). Per tale motivo non è ancora stato ben definito un algoritmo che definisca l'andamento dell'albedo al variare di tali parametri (Fugazza et al, 2016).
Altri metodi sono stati sviluppati negli anni per determinare l'albedo dei ghiacciai alpini: uno di questi prevede l'analisi dei dati di albedo misurati direttamente dalla stazione meteo AWS1-Forni presente sulla lingua del Ghiacciaio dei Forni: poiché i dati riguardano un'area limitata devono essere integrati con l'uso di albedometri in diversi punti della lingua (Brock et al., 2000). Dai dati puntuali è poi possibile studiare la distribuzione spaziale tramite il metodo dell'interpolazione, illustrato precedentemente. Per far ciò occorre, però, un elevato numero di rilievi in campo, non sempre possibile a causa di diversi fattori quali condizioni meteo che permettono uscite in campo e il non facile raggiungimento di tutti i punti sulla superficie del ghiacciaio; per ovviare a questo problema si possono prevedere dei rilievi tramite satellite ad alta risoluzione (e.g. satelliti Landsat, con risoluzione di 30 m) (Fugazza et al., 2016).
Per uno studio completo sulla distribuzione spaziale dell'albedo sulla superficie glaciale sarebbe, quindi, opportuno affiancare i vari metodi sopra riportati, in modo tale da poter confrontare i risultati fra gli stessi ed ottenere valori più attendibili dell'albedo stessa.

BIBLIOGRAFIA

Azzoni, R. S., Senese, A., Zerboni, A., Maugeri, M., Smiraglia, C., & Diolaiuti, G. A. (2016). Estimating ice albedo from fine debris cover quantified by a semi-automatic method: the case study of Forni Glacier, Italian Alps. The Cryosphere, 10, 665-679.

Brock, B. W., Willis, I. C., & Sharp, M. J. (2000). Measurement and parameterization of albedo variations at Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. Journal of Glaciology, 46(155), 675-688.

Casarotto, C. (2010). Ghiacciai in Trentino: ricerca e stato di salute. Atti dell'Accademia roveretana degli Agiati. B, Classe di scienze matematiche, fisiche e naturali, 10, 63-78.

Citterio, M., Diolaiuti, G., Smiraglia, C., Verza, G., & Meraldi, E. (2007). Initial results from the automatic weather station (AWS) on the ablation tongue of Forni Glacier (Upper Valtellina, Italy). Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 30(2), 141-151.

Diolaiuti, G., Citterio, M., Carnielli, T., D'agata, C., Kirkbride, M., & Smiraglia, C. (2006). Rates, processes and morphology of freshwater calving at Miage Glacier (Italian Alps). Hydrological Processes: An International Journal, 20(10), 2233-2244.

Franzetti, A., Pittino, F., Gandolfi, I., Azzoni, R. S., Diolaiuti, G., Smiraglia, C., Pelfini, M., Compostella, C., Turchetti, B., Buzzini, P., & Ambrosini, R. (2020). Early ecological succession patterns of bacterial, fungal and plant communities along a chronosequence in a recently deglaciated area of the Italian Alps. FEMS Microbiology Ecology, 96(10), fiaa165.

Fugazza, D., Senese, A., Azzoni, R. S., Smiraglia, C., Cernuschi, M., Severi, D., & Diolaiuti, G. A. (2015). High-resolution mapping of glacier surface features. The UAV survey of the Forni Glacier (Stelvio National Park, Italy). Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 38(1), 25-33.

Fugazza, D., Senese, A., Azzoni, R. S., Maugeri, M., & Diolaiuti, G. A. (2016). Spatial distribution of surface albedo at the Forni Glacier (Stelvio National Park, Central Italian Alps). Cold Regions Science and Technology, 125, 128-137.

Fugazza, D., Senese, A., Azzoni, R. S., Maugeri, M., Maragno, D., & Diolaiuti, G. A. (2019). New evidence of glacier darkening in the Ortles-Cevedale group from Landsat observations. Global and Planetary Change, 178, 35-45.

Garavaglia, R., Marzorati, A., Confortola, G., Bocchiola, D., Cola, G., Manzata, E., Senese, A., Smiraglia, C., & Diolaiuti, G. A. (2014) Evoluzione del Ghiacciaio dei Forni

Kappenberger, G., & Locarno-Monti, M. (2006). Che cos' è un ghiacciaio.

Mosconi B., 2013. Tesi di dottorato UNIMI. Documento consultabile al seguente link: https://air.unimi.it/bitstream/2434/216123/3/phd_unimi_R08686_2.pdf

Pelfini, M., & Gobbi, M. (2005). Enhancement of the ecological value of Forni Glacier (Central Alps) as a possible geomorphosite: New data from arthropod communities. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 28(2), 211-217.

Scotti R., (2005). Campagna Glaciologica 2005. Servizio Glaciologico Lombardo, pp 15. Consultabile al sito:
https://www.servizioglaciologicolombardo.it/pubblicazioni/#1652098498711-f473e6f8-be0c

Scotti R., Lendvai A., (2005). Campagna Glaciologica 2020. Alpi centrali italiane. Servizio Glaciologico Lombardo, pp 12. Consultabile al sito:
https://www.servizioglaciologicolombardo.it/pubblicazioni/#1652098498711-f473e6f8-be0c

Senese, A., Diolaiuti, G., Mihalcea, C., & Smiraglia, C. (2012a). Energy and mass balance of Forni Glacier (Stelvio National Park, Italian Alps) from a four-year meteorological data record. Arctic, antarctic, and alpine research, 44(1), 122-134.

Senese, A., Diolaiuti, G., Verza, G. P., & Smiraglia, C. (2012b). Surface energy budget and melt amount for the years 2009 and 2010 at the Forni Glacier (Italian Alps, Lombardy). Geogr. Fis. Din. Quat, 35, 69-77.

Senese, A., Maugeri, M., Vuillermoz, E., Smiraglia, C., & Diolaiuti, G. (2014). Using daily air temperature thresholds to evaluate snow melting occurrence and amount on Alpine glaciers by T-index models: the case study of the Forni Glacier (Italy). The Cryosphere, 8(5), 1921-1933.

Senese, A., Maugeri, M., Ferrari, S., Confortola, G., Soncini, A., Bocchiola, D., & Diolaiuti, G. (2016). Modelling shortwave and longwave downward radiation and air temperature driving ablation at the Forni Glacier (Stelvio National Park, Italy). Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 39(1), 89-100.

Senese, A., D'Agata, C., Maragno, D., Azzoni, R. S., Fugazza, D., & Diolaiuti, G. A. (2017). Ghiacciai che arretrano e aree proglaciali che si espandono: due fenomeni apparentemente contrastanti che convivono: una concreta occasione di incontro e collaborazione per geografi fisici ed umani. In L'apporto della Geografia tra rivoluzioni e riforme (pp. 731-738). A. Ge. I.

Senese, A., Michela, L., & Diolaiuti, G. A. (2021). A new enhanced temperature-index melt model including net solar and infrared radiation. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 44(1), 5-14.

Servizio Glaciologico Lombardo (2011). Dizionario glaciologico. Consultabile al sito: https://www.servizioglaciologicolombardo.it/glossary/

Smiraglia, C. (1986). Morfologia e genesi delle morene mediane del ghiacciaio dei forni (Alta Valtellina). Bollettino della Società geografica italiana, 221-240.

Smiraglia, C. (1992). Guida ai ghiacciai e alla glaciologia: forme, fluttuazioni, ambienti. Zanichelli.

Smiraglia, C., (1995), Il Ghiacciaio dei Forni in Valfurva. Sentiero Glaciologico del Centenario, Lyasis, Sondrio

Smiraglia, C., Azzoni, R. S., D'Agata, C., Maragno, D., Fugazza, D., & Diolaiuti, G. A. (2015). The evolution of the Italian glaciers from the previous data base to the New Italian Inventory. Preliminary considerations and results. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 38(1), 79-87.

Smiraglia, C., & Diolaiuti, G., (2015), Il Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani, Ev-K2-CNR Publ., Bergamo.

Urbini, S., Zirizzotti, A., Baskaradas, J. A., Tabacco, I. E., Cafarella, L., Senese, A., Smiraglia, C., & Diolaiuti, G. (2017). Airborne Radio Echo Sounding (RES) measures on Alpine Glaciers to evaluate ice thickness and bedrock geometry: preliminary results from pilot tests performed in the Ortles Cevedale Group (Italian Alps). Annals of Geophysics, 60(2), 1-12.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia in primo luogo il relatore prof. Michele Eugenio D'Amico per aver dato la disponibilità a seguire il presente lavoro di tesi.
A seguire, si ringrazia il correlatore prof.ssa Antonella Senese per aver coordinato l'attività di tirocinio svolta sul Ghiacciaio dei Forni e per il grande aiuto fornito nella stesura del presente elaborato.
Un grande ringraziamento va anche alla famiglia, per avermi trasmesso la passione per l'ambiente montano e per le attività sportive che in esso si possono svolgere.
Si ringraziano anche tutti i docenti e ricercatori di UNIMI, UNIMIB e MUSE, i quali hanno condiviso il loro sapere durante le attività in campo e di elaborazione dati.
Un ringraziamento, infine, ai compagni di Corso, con cui, negli ultimi tre anni, ho condiviso la passione per l'arrampicata e la montagna; in particolare merita un ringraziamento Rocco Crestani, con il quale ho avuto il piacere di condividere l'attività di tirocinio sul Ghiacciaio dei Forni.