



Il lago epiglaciale del Ghiacciaio del Belvedere a Macugnaga (VB)



Dipartimento della Protezione Civile
Ufficio Pianificazione, Valutazione e
Prevenzione dei Rischi



Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione

Versione 2 - 18 luglio 2002



Indice

Introduzione	1
Inquadramento del Ghiacciaio del Belvedere	3
Inquadramento topografico e morfologico	3
Le caratteristiche del ghiacciaio ed il suo movimento	3
Il lago epiglaciale	6
Una possibile interpretazione	7
Un fenomeno di “surge” glaciale	7
Aspetti climatici	8
Considerazioni storiche	8
Il periodo caldo di giugno 2002: cause ed effetti	8
Caratterizzazione meteorologica	8
Andamento dello zero termico e anomalie climatiche	12
Valutazione dell’effetto della radiazione sulla fusione della neve e del ghiaccio	17
Il rischio legato all’evoluzione del lago e del ghiacciaio	20
Scenari di rischio	20
Scenario 1: effetti di una tracimazione del lago attraverso depressioni della superficie glaciale.	20
Tracimazione del lago in destra orografica del ghiacciaio:	20
Tracimazione del lago in sinistra orografica del ghiacciaio:	21
Scenario 2: effetti di svuotamento del lago attraverso il circuito idrico sub-glaciale.	22
Considerazioni in merito alla sicurezza	23
Prevenzione e monitoraggio – gestione dell’emergenza	25
Attività di intervento	25
Piano di monitoraggio	26
L’assistenza meteorologica	29
Prospettive evolutive del fenomeno	30

Indice delle figure

Figura 1 Rappresentazione cartografica d’inquadramento del Ghiacciaio del Belvedere (estratto dalla Carta Nazionale della Svizzera)	4
Figura 2: Planimetria dell’area	5
Figura 3: Il lago epiglaciale ripreso in data 25/6/2002 dal rilievo circostante il Lago delle Locce.	6

Figura 4: Altezza di geopotenziale (linea continua) e Temperatura (linea tratteggiata) a 500 hPa il 06/06/2002 ore 12 UTC.	9
Figura 5: Altezza di geopotenziale a 500 hPa il 18/06/2002 ore 12 UTC.	10
Figura 6: Temperature Massime osservate 18/06/2002.....	11
Figura 7: Temperature Massime osservate presso le stazioni di Passo del Moro e Pecetto per il mese di Giugno	11
Figura 8: Andamento dello zero termico medio (espresso in m) tra gli anni 1948 e 2000	12
Figura 9: Zero termico (m) registrato tra il 01/05/2001 ed il 08/07/2001	13
Figura 10: Zero termico (m) registrato tra il 01/05/2002 ed il 08/07/2002 ...	13
Figura 11: Andamento dei valori medi dello zero termico (m) nel mese di Giugno tra gli anni 1948 e 2002.....	14
Figura 12: Confronto tra la posizione della fronte del ghiacciaio Belvedere (linea più scura, scala del grafico in metri, a sinistra) e lo zero termico medio mensile (in metri, scala del grafico a destra) di Maggio (linea puntinata) e Giugno (linea tratteggiata).	14
Figura 13: Andamento dei valori di zero termico (m) tra il 1948 ed il 2002	16
Figura 14: Andamento della temperatura dell'aria e dell'altezza della neve al suolo misurate dalla stazione di Passo del Moro a 2820 m, nel mese di giugno 2002.....	17
Figura 15: Andamento della radiazione e dell'altezza della neve al suolo misurate dalla stazione di Passo del Moro a 2820m, nel mese di giugno 2002.....	18

Introduzione

Il ghiacciaio del Belvedere, ai piedi della parete Est del M.Rosa, è soggetto, dall'estate dell'anno 2001, ad un raro fenomeno (noto in letteratura come "surge" glaciale), di rapido aumento della velocità di scorrimento e del conseguente progressivo sollevamento della massa glaciale.

A questo fenomeno si è associata la formazione, a partire dall'ottobre scorso, di un lago epiglaciale intorno a quota 2150 m, che raccoglie le acque di fusione dei ghiacciai sovrastanti e che nel mese di giugno si è accresciuto, fino a raggiungere dimensioni preoccupanti per la sicurezza dei luoghi e delle persone in caso di tracimazione o di svuotamento improvviso per sifonamento.

A seguito delle richieste espresse dal Comune di Macugnaga venivano effettuati nel mese di giugno ripetuti sopralluoghi da parte di tecnici dell'Amministrazione regionale, col supporto scientifico del Prof. Haeberli dell'Università di Zurigo, finalizzati alla definizione di un piano di monitoraggio del fenomeno di "surge" in generale e del lago epiglaciale in particolare, nonché all'individuazione di misure precauzionali urgenti per garantire la pubblica incolumità.

Il repentino innalzamento del livello del lago nel corso del fine settimana del 22 e 23 giugno determinava l'effettuazione il 25 giugno di un sopralluogo da parte dei tecnici regionali e dei consulenti scientifici, in cui veniva constatato l'aggravarsi della situazione; successivamente, il 27 giugno, gli esiti di un nuovo sopralluogo in presenza dei vertici del Dipartimento della Protezione Civile nazionale richiedevano la dichiarazione dello stato di emergenza per il territorio della Provincia VCO interessato dai rischi connessi dalla presenza dell'invaso epiglaciale del Belvedere, dichiarazione che avveniva con DPCM in data 28 giugno 2002. In pari data il Prefetto della Provincia Verbano, Cusio, Ossola emanava il Decreto di istituzione nel Comune di Macugnaga del Centro Operativo Misto (C.O.M.), al fine di agevolare il coordinamento dei servizi e degli interventi di emergenza per fronteggiare i rischi delineati, a supporto delle Autorità Comunali di Protezione Civile.

Il 4 Luglio, con ordinanza n.3227 del Presidente del Consiglio, venivano date le disposizioni organizzative e finanziarie per assicurare l'immediata attuazione del piano di emergenza, finalizzato prioritariamente alla riduzione del rischio attraverso la predisposizione di un sistema di pompaggio per l'abbassamento controllato del livello dell'invaso.

Il completamento del cantiere con la relativa messa in funzione del sistema di pompaggio ha segnato il raggiungimento degli obiettivi prefissati dal Dipartimento nella fase di prima emergenza.

L'attivazione del sistema di pompaggio ha contribuito, unitamente ad un naturale drenaggio, ad un abbassamento complessivo della superficie di quasi 5 m rispetto al massimo livello raggiunto alla fine del giugno scorso.

Mercoledì 17 luglio è avvenuto, sulla base di uno specifico protocollo di intesa, il passaggio formale di competenze dal Dipartimento della Protezione Civile alla Regione Piemonte, la quale ha assunto il coordinamento degli interventi successivi, finalizzati al superamento dell'emergenza, in particolare attraverso l'attuazione di un piano di monitoraggio dell'evoluzione del fenomeno dell'invaso epiglaciale nonché della gestione del sistema di pompaggio. In pari data il Prefetto di Verbania ha decretato la chiusura del Centro Operativo .Misto di Macugnaga.

Al Comune di Macugnaga è stato consegnato il Piano di allertamento, redatto dal Dipartimento in collaborazione con Regione, Provincia e Comuni della Valle Anzasca, che prevede l'attuazione di misure di protezione civile nel caso in cui si verificano variazioni anomale repentine del livello dell'invaso.

Il presente rapporto costituisce un contributo che viene via via aggiornato sulla scorta dell'evoluzione che il lago subisce.



Inquadramento del Ghiacciaio del Belvedere

Inquadramento topografico e morfologico

Il Ghiacciaio del Belvedere si sviluppa alla testata della Valle Anzasca, in Provincia del Verbano, Cusio, Ossola, da quota 2300 m ca., ai piedi della parete Est del M.Rosa, fino a quota 1785 m, dove termina la lingua sinistra, con uno sviluppo lineare di circa 2800 m; la sua superficie è valutabile complessivamente in circa 8 km².

Indagini geofisiche condotte nella metà degli anni '80 identificarono uno spessore massimo del ghiaccio pari a circa 250 – 300 m, sovrastante un centinaio di metri di spessore di depositi glaciali di fondo, poggiati a loro volta sul substrato roccioso.

Il ghiacciaio è classificato come umido-temperato, è alimentato da altri quattro ghiacciai (Nord delle Locce, Signal, Monte Rosa e Nordend) sul versante Nord-Est del Monte Rosa, ed è caratteristicamente coperto da una coltre di detriti, provenienti dalla stessa parete del M. Rosa.

Le caratteristiche del ghiacciaio ed il suo movimento

Il Ghiacciaio del Belvedere ha vissuto la sua ultima fase di espansione all'inizio dello scorso secolo; dall'inizio degli anni '20 è andato soggetto ad una progressiva fase di ritiro, valutabile in un arretramento complessivo del fronte glaciale sinistro pari a circa 690 m dai rilevamenti del Comitato Glaciologico Italiano.

Tra il 2000 ed il 2001 il ghiacciaio è andato soggetto ad una eccezionale trasformazione della velocità di flusso, della geometria e della morfologia superficiale.

Dall'analisi aerofotogrammetrica il Prof. Haeberli dell'Università di Zurigo e i suoi collaboratori hanno stimato in taluni punti del ghiacciaio un sollevamento superiore a 30 metri, che ha comportato talora il sormonto della cresta della morena da parte del ghiacciaio; la velocità di scorrimento è passata da 35 m/anno nel periodo '95-'99 a 110 m/anno nel periodo '99-2001.

Figura 1 Rappresentazione cartografica d'inquadramento del Ghiacciaio del Belvedere (estratto dalla Carta Nazionale della Svizzera)



Figura 2: Planimetria dell'area

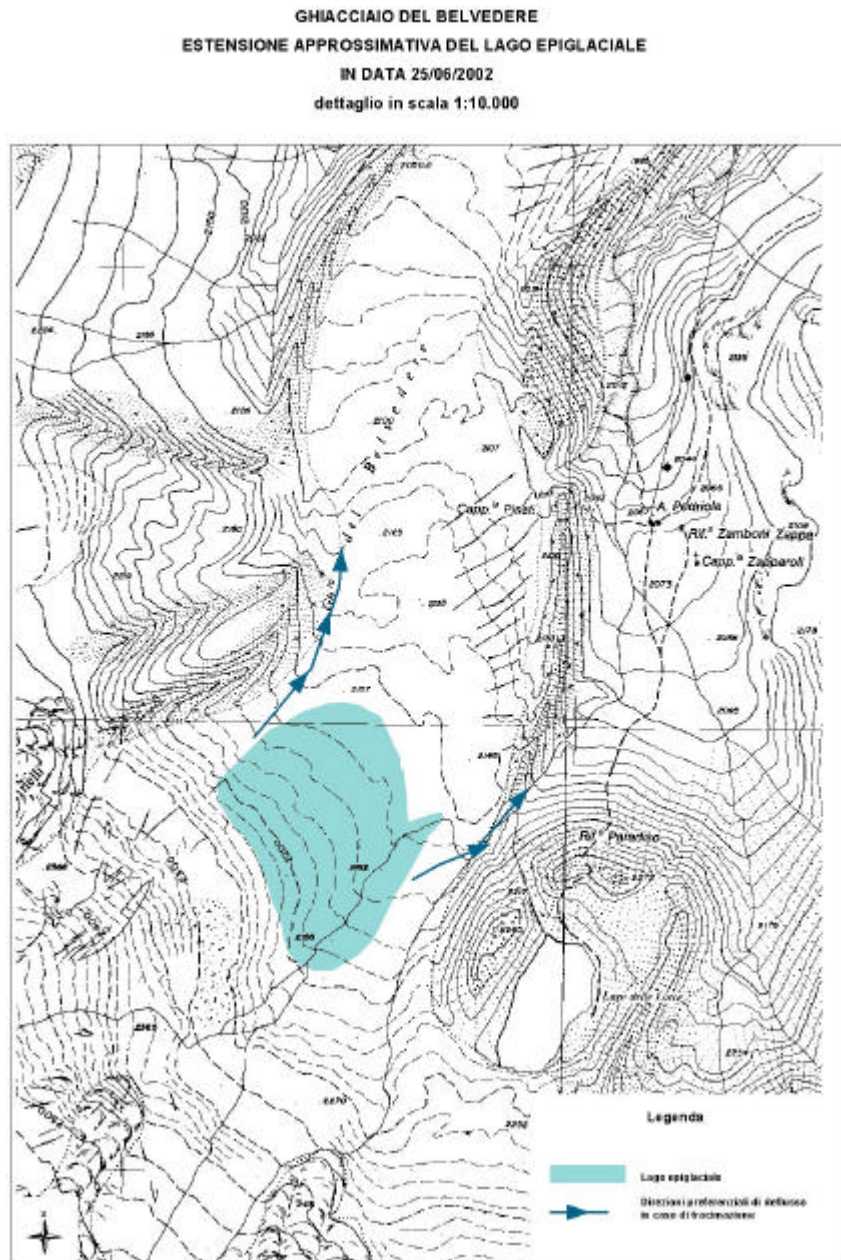


Figura 3: Il lago epiglaciale ripreso in data 25/6/2002 dal rilievo circostante il Lago delle Locce.



Il lago epiglaciale

Già nel corso dell'anno passato si verificò la formazione di laghetti epiglaciali temporanei, nella zona ai piedi del versante del M.Rosa, intorno a quota 2150 m, che furono soggetti a spontaneo svuotamento senza effetti di rilievo.

Dalla scorsa primavera il lago epiglaciale si è progressivamente accresciuto, raggiungendo un'estensione finora mai osservata, stimata in 150.000 mq circa, per una profondità massima misurata di 58 m e di 20 m circa di media, per un volume complessivo di circa 3.000.000 di mc. La misura della profondità del lago è stata effettuata tramite un sistema di ecoscandaglio con GPS.

All'inizio dell'ultima decade di giugno l'innalzamento del livello del lago è risultato superiore a 1 metro in sole 24 ore; questo tasso di crescita è tuttavia sensibilmente diminuito alla fine dello stesso mese, anche in relazione alla conclusione di un periodo caratterizzato da elevate temperature, che sicuramente ha contribuito in modo essenziale all'accrescimento dell'invaso.

Da fine giugno il livello è sceso spontaneamente di circa 4.4 metri.



Una possibile interpretazione

Un fenomeno di "surge" glaciale

Le modificazioni repentine e straordinarie della velocità di flusso e di geometria mostrate dal Ghiacciaio del Belvedere nel corso degli ultimi due anni sono interpretabili come un fenomeno tipo "surge" glaciale, come illustrato in una pubblicazione in corso di stampa del Prof. Haeberli e di tecnici del CNR IRPI.

La disarticolazione della porzione inferiore del tributario principale del ghiacciaio del Belvedere (il Ghiacciaio del M. Rosa) osservata già nell'estate del 2000 pare suggerire un'accelerazione della velocità di flusso, con la formazione di un'enorme seraccata lungo il suo fianco sinistro.

In seguito all'accelerazione del flusso la superficie del Ghiacciaio del Belvedere ai piedi della parete Est del M. Rosa ha subito una compressione e deformazione intense, che si sono progressivamente trasmesse fino al fronte del ghiacciaio e sono evidenziate da una intensa crepacciatura della superficie glaciale e da un suo innalzamento dell'ordine di una trentina di metri.

Le cause dell'innescio di un fenomeno di questo genere non sono chiare, anche se appare verosimile che siano da mettere in relazione ad un innalzamento delle temperature del ghiaccio nella fascia di transizione tra freddo e temperato e ad una conseguente maggiore disponibilità di acqua allo stato liquido, che favorirebbe la lubrificazione del fondo sul quale scorre il ghiaccio.



Aspetti climatici

Considerazioni storiche

Nella storia della Terra una parte importante è assunta dalle glaciazioni, periodi millenari di clima particolarmente freddo in cui i ghiacciai hanno ricoperto interi continenti. Come conseguenza delle variazioni climatiche succedutesi durante il quaternario (da un milione a quindicimila anni fa), le Alpi sono state interessate da tre periodi glaciali, in cui i ghiacciai, con trasfluenza da una valle all'altra, si estendevano fino alle pianure. Tra una glaciazione e l'altra sono trascorsi periodi di clima temperato piuttosto simile a quello attuale, con retrocessione dei ghiacciai e abbandono di materiale morenico.

Durante l'ultimo periodo glaciale, iniziato circa diecimila anni fa, il ghiacciaio del Belvedere allora presente colmava la valle Anzasca con uno spessore del ghiaccio stimato di 1500 metri.

Il ghiacciaio del Belvedere è un ghiacciaio umido-temperato con notevole copertura detritica, caratteristica comune dei ghiacciai alpini: essa diminuisce la riflettività della superficie del ghiacciaio a valle, ma produce isolamento termico rispetto agli scambi di calore latente e sensibile con l'atmosfera. La temperatura superficiale dello strato di detrito è molto inferiore (rilevabile da immagini satellitari nel campo dell'infrarosso) a quella delle rocce circostanti.

Il periodo caldo di giugno 2002: cause ed effetti

Caratterizzazione meteorologica

Prima decade del mese di giugno

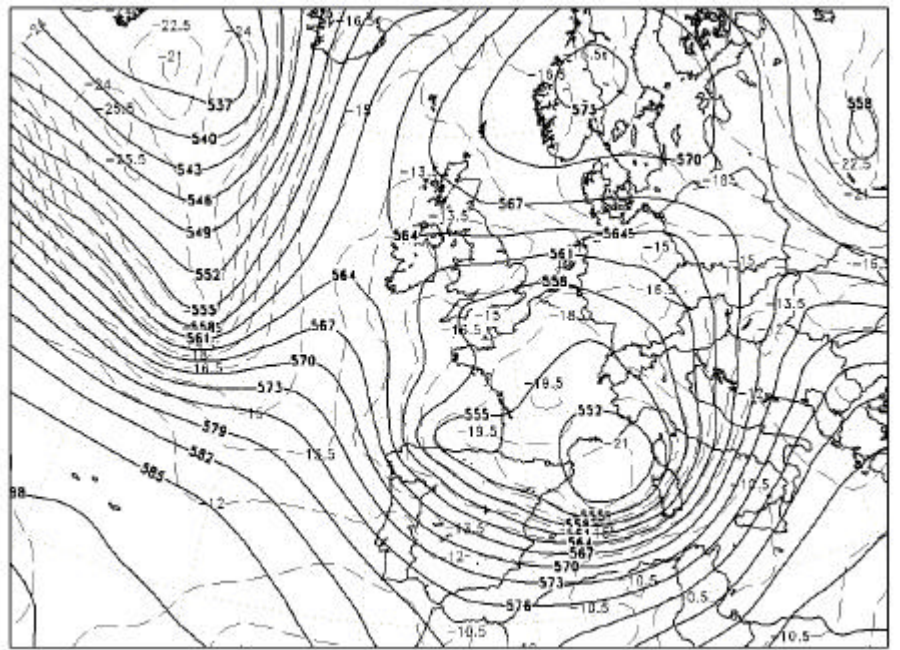
La prima decade del mese di giugno è dominata da condizioni d'elevata instabilità atmosferica sulle regioni mediterranee causata dalla presenza di una vasta area depressionaria d'origine atlantica.

Nei primi giorni del mese le condizioni meteorologiche sono caratterizzate dalla presenza di un promontorio d'origine africana che si estende dal Mediterraneo fino alla Penisola Scandinava e che convoglia, in particolare sulle regioni centro-settentrionali della penisola italiana, correnti calde ed umide.

In seguito una profonda saccatura, estesa dalle Isole Britanniche fino alle coste nord-occidentali dell'Africa, ruota progressivamente il suo asse dalla direzione nord-sud in direzione nord-est, entrando nel Mediterraneo centrale. L'interazione tra il nucleo freddo in quota associato alla saccatura ed il flusso d'aria umida negli strati inferiori dell'atmosfera determina condizioni di marcata instabilità

sulle regioni alpine nord-occidentali con precipitazioni a carattere temporalesco, anche d'elevata intensità (Figura 4).

Figura 4: Altezza di geopotenziale (linea continua) e Temperatura (linea tratteggiata) a 500 hPa il 06/06/2002 ore 12 UTC.



Seconda decade del mese di giugno

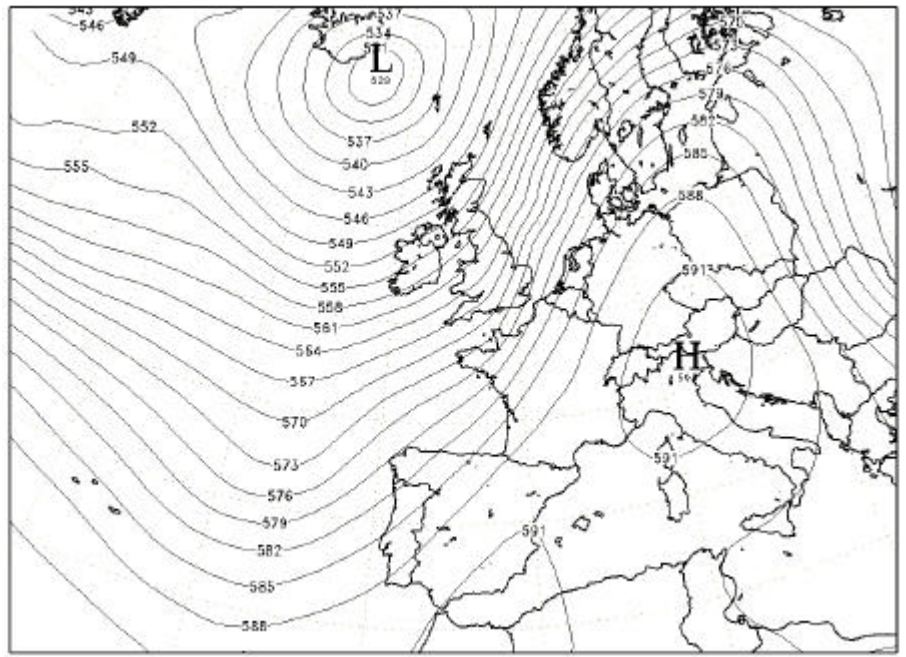
La seconda decade del mese di giugno è caratterizzata da condizioni di tempo stabile e soleggiato su gran parte dell'Europa centro-meridionale, dovuto alla progressiva espansione di una vasta area anticiclonica dalle coste africane fino alla penisola scandinava.

Inizialmente l'asse del promontorio si presenta orientato prevalentemente in direzione sudovest-norddest e la struttura convoglia correnti occidentali-sudoccidentali sull'Italia settentrionale. Successivamente il promontorio si espande, si rafforza e ruota il proprio asse in direzione sud-nord (Figura 5). Il flusso sulle regioni alpine risulta prevalentemente meridionale e ciò determina un forte aumento delle temperature, dello zero termico e dell'umidità relativa nei bassi strati.

Sul Piemonte si registrano temperature elevate, nettamente al di sopra della media del periodo (Figura 6 e Figura 7), con valori massimi che, nelle giornate del 17 e 18 giugno, sono stati prossimi ed in alcuni casi anche superiori a quelli storici dell'ultimo cinquantennio (1951-2001).

Il notevole afflusso di umidità, associato a condizioni di calma di vento ed elevate temperature ha determinato prolungate condizioni di afa sulla pianura Padana.

Figura 5: Altezza di geopotenziale a 500 hPa il 18/06/2002 ore 12 UTC.



Terza decade del mese di giugno

Infine, l'ultima decade del mese di giugno è caratterizzata da un indebolimento dell'area anticiclonica sull'Europa ed un conseguente e successivo transito di deboli saccature sull'arco alpino.

Questa situazione ha avuto come effetto l'apporto di condizioni di instabilità atmosferica sulle regioni nordoccidentali italiane con fenomeni temporaleschi anche di forte intensità ed il ritorno delle temperature su valori tipici del periodo.

Figura 6: Temperature Massime osservate 18/06/2002

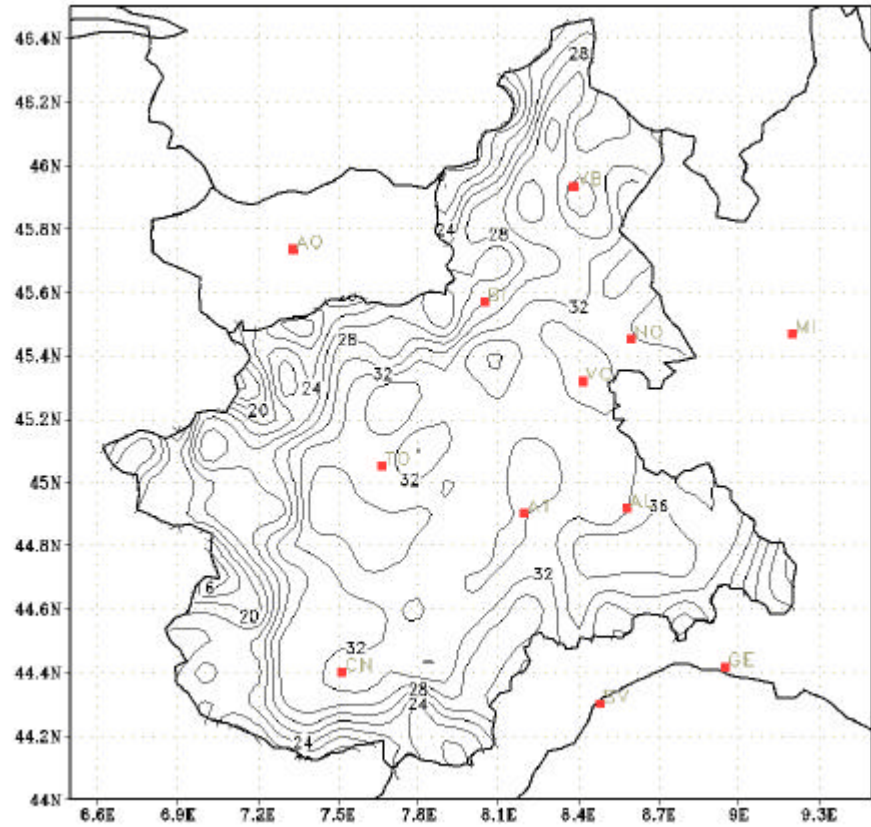
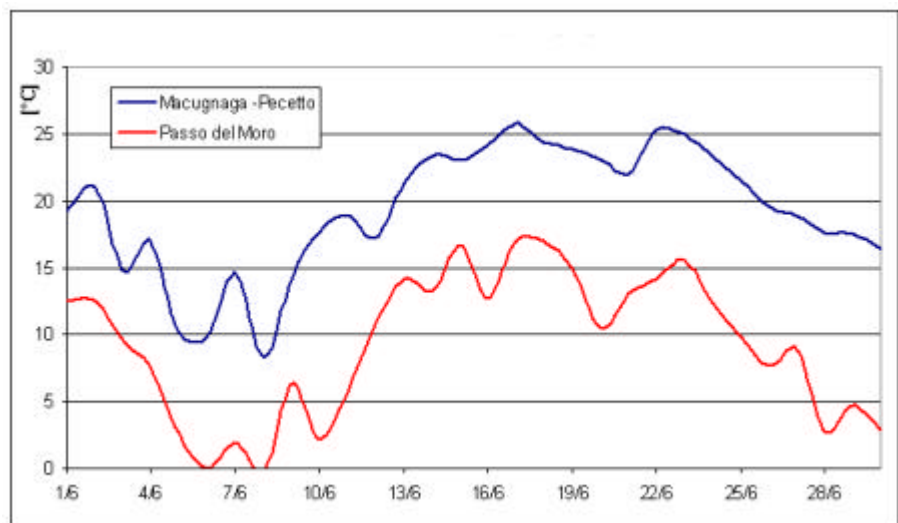


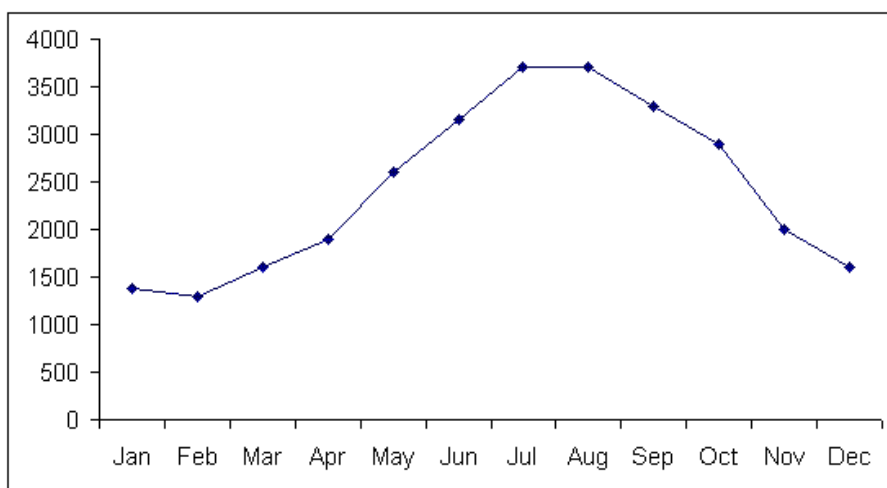
Figura 7: Temperature Massime osservate presso le stazioni di Passo del Moro e Pecetto per il mese di Giugno



Andamento dello zero termico e anomalie climatiche

Il valore dello zero termico significativo dal punto meteorologico e climatologico è il livello più alto in atmosfera dove la temperatura dell'aria raggiunge il valore di 0° C; al di sopra di tale quota la temperatura atmosferica decresce con la quota. Normalmente lo zero termico segue un andamento crescente nel periodo primaverile – estivo per poi diminuire nei mesi autunnali ed invernali. L'andamento climatologico dello zero termico nella zona in esame, basato su 50 anni di analisi (periodo 1948 – 2000), è mostrato nella seguente figura.

Figura 8: Andamento dello zero termico medio (espresso in m) tra gli anni 1948 e 2000



Da tale andamento climatologico si osserva che il valore medio dello zero termico nei mesi di Maggio e Giugno è rispettivamente di 2600 m e 3150 m.

Nel recente periodo di fine Maggio e per tutto il mese di Giugno 2002, la ripetuta occorrenza di un promontorio di alta pressione di origine africana sul bacino del Mediterraneo, ha determinato un significativo spostamento dello zero termico dai valori climatologici.

Di seguito sono riportati i grafici relativi ai mesi di Maggio, Giugno ed inizio Luglio 2001 - 2002 confrontati con la media climatologica:

Figura 9: Zero termico (m) registrato tra il 01/05/2001 ed il 08/07/2001

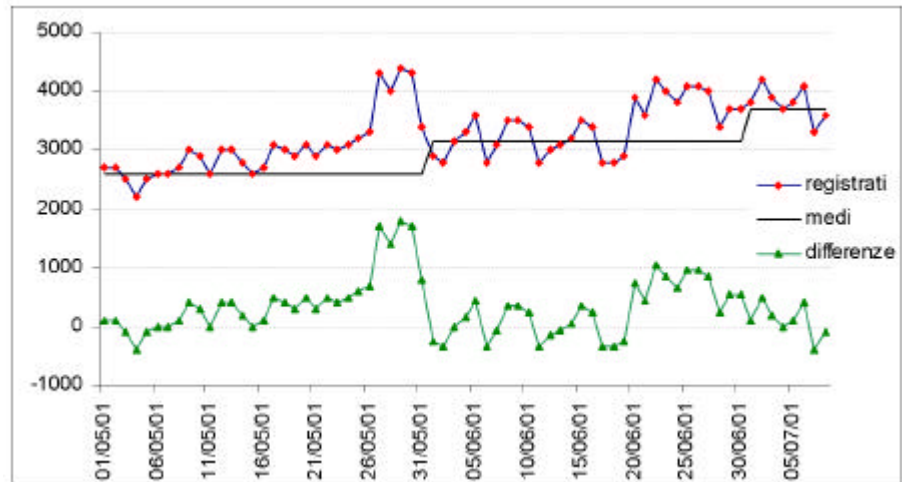
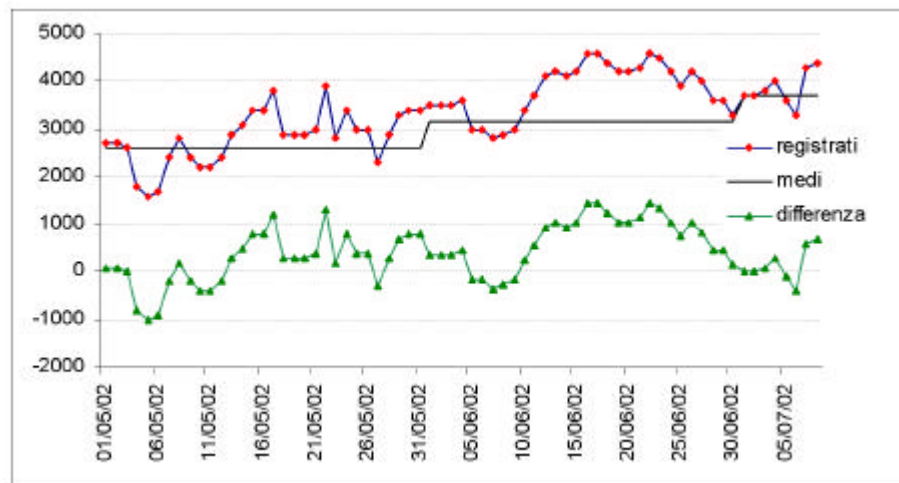


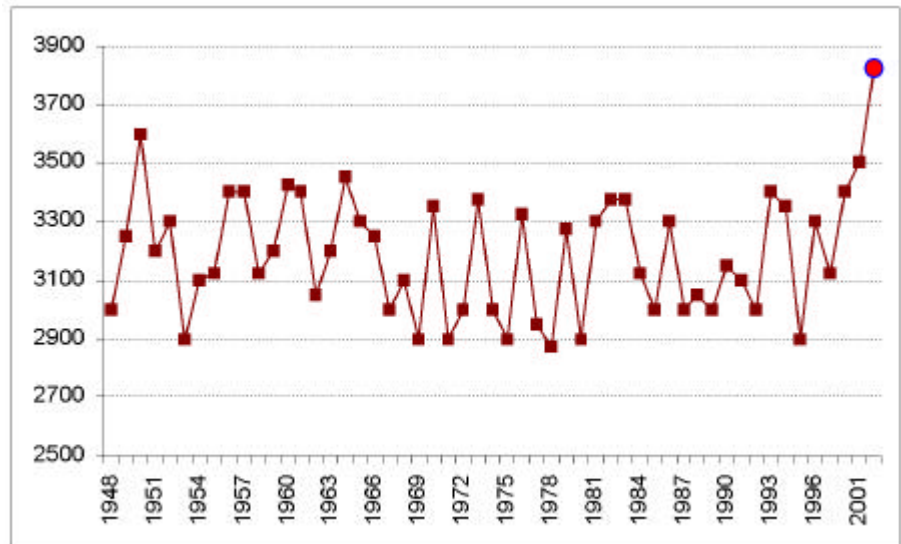
Figura 10: Zero termico (m) registrato tra il 01/05/2002 ed il 08/07/2002



Come si può vedere da Figura 9 e Figura 10, le anomalie significative che si possono riscontrare riguardano i mesi di Maggio 2001 e Giugno 2002, che hanno fatto registrare valori di zero termico ben al di sopra della media climatologica (per 15 giorni consecutivi nel 2001 e 16 giorni consecutivi nel 2002), con un'anomalia positiva media di 440 m nel mese di Maggio 2001 e di 560 m nel mese di Giugno 2002.

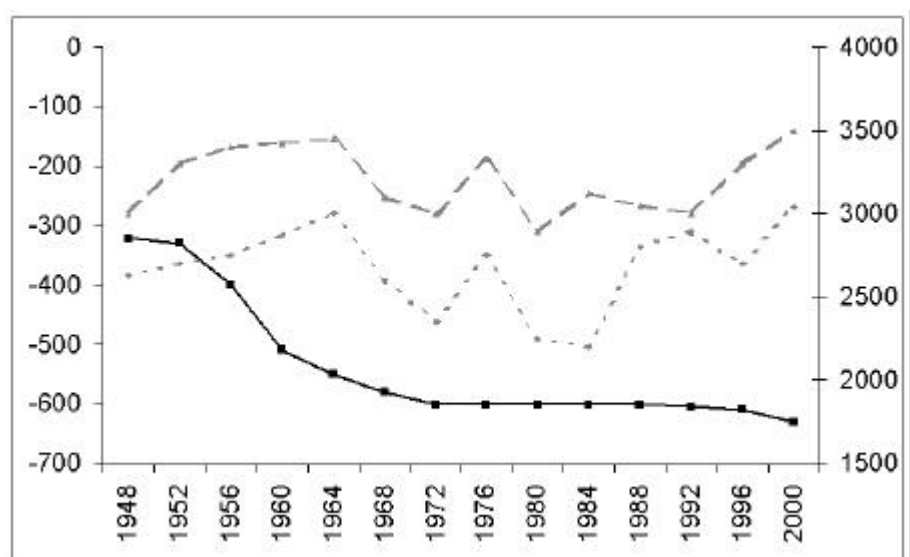
Tale anomalia è confermata dall'andamento dei valori medi mensili dello zero termico registrati nel periodo 1948 – 2002: nell'ultimo anno si è registrato il valore più alto in 54 anni nel mese di Giugno pari a 3830 m (pallino rosso nella Figura 11).

Figura 11: Andamento dei valori medi dello zero termico (m) nel mese di Giugno tra gli anni 1948 e 2002



Ciò suggerisce la possibilità di una correlazione tra l'evento in esame, ed in particolare la formazione dell'acqua del lago epiglaciale, e l'andamento dello zero termico. Si è inoltre analizzata la correlazione tra i valori dello zero termico nel periodo 1948 - 2000 e i dati relativi allo spostamento della fronte del ghiacciaio. Gli andamenti sono riportati nella figura 12.

Figura 12: Confronto tra la posizione della fronte del ghiacciaio Belvedere (linea più scura, scala del grafico in metri, a sinistra) e lo zero termico medio mensile (in metri, scala del grafico a destra) di Maggio (linea puntinata) e Giugno (linea tratteggiata).



Dal confronto degli andamenti di osserva qualitativamente un legame tra la quota dello zero termico e la variazione della fronte, anche se statisticamente non si ottiene alcuna correlazione significativa e comunque inferiore alla correlazione che si ha tra la variazione della fronte e le precipitazioni nel periodo di accumulo tra novembre-marzo.

Ciò non esclude comunque la possibilità che la formazione o l'accrescimento del lago Effimero, fenomeno più rapido dell'arretramento della fronte, siano correlati a tali anomalie nei valori dello zero termico.

E' stato infine considerato l'andamento dei valori medi mensili dello zero termico nei mesi da Maggio ad Agosto; dal fit lineare su tali valori si nota che il coefficiente angolare della retta di interpolazione dei dati è sempre positivo, suggerendo una lieve crescita dello zero termico medio nel cinquantennio che va dal 1948 al 2001-2002.

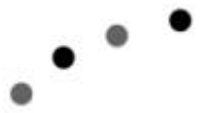
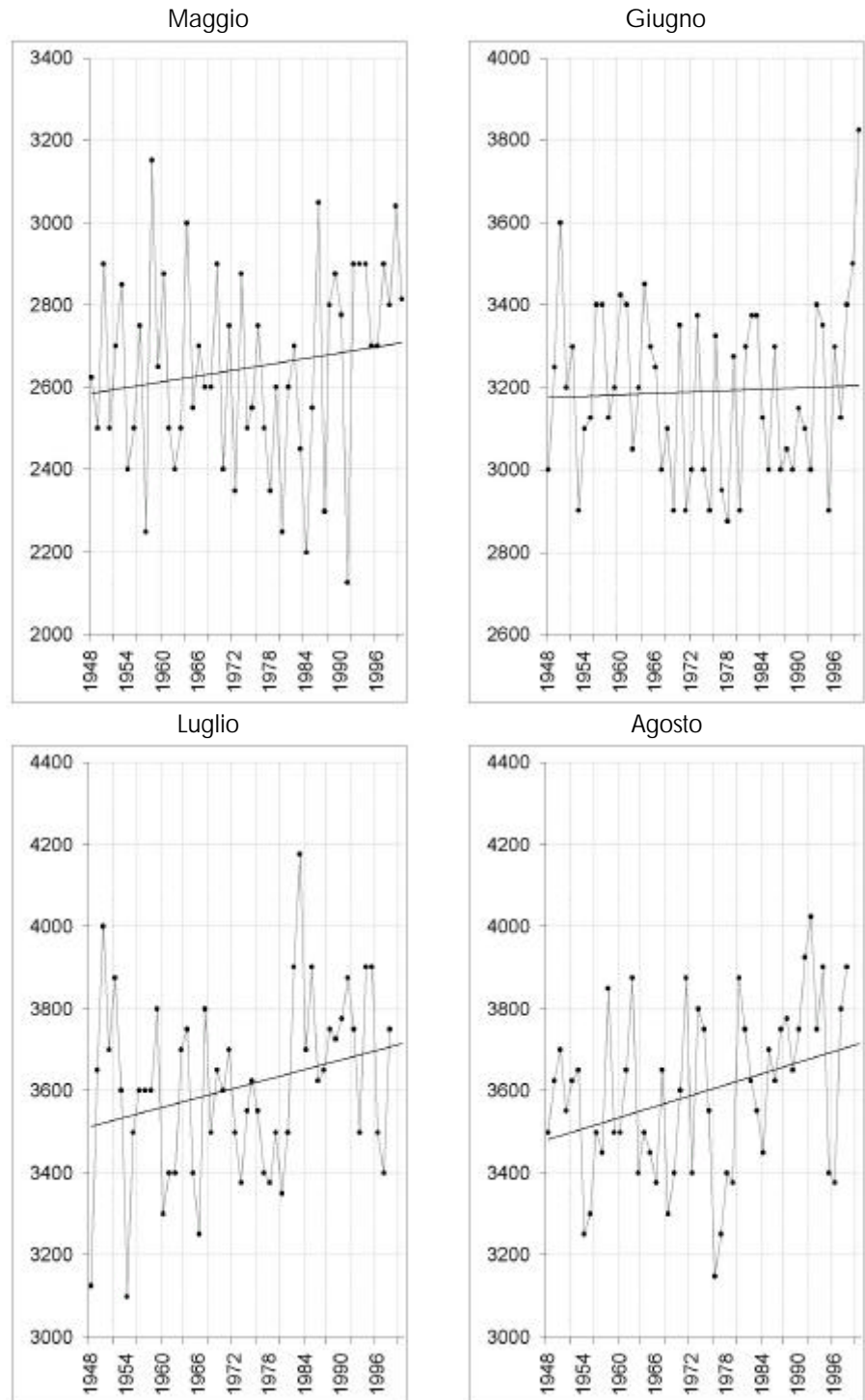


Figura 13: Andamento dei valori di zero termico (m) tra il 1948 ed il 2002



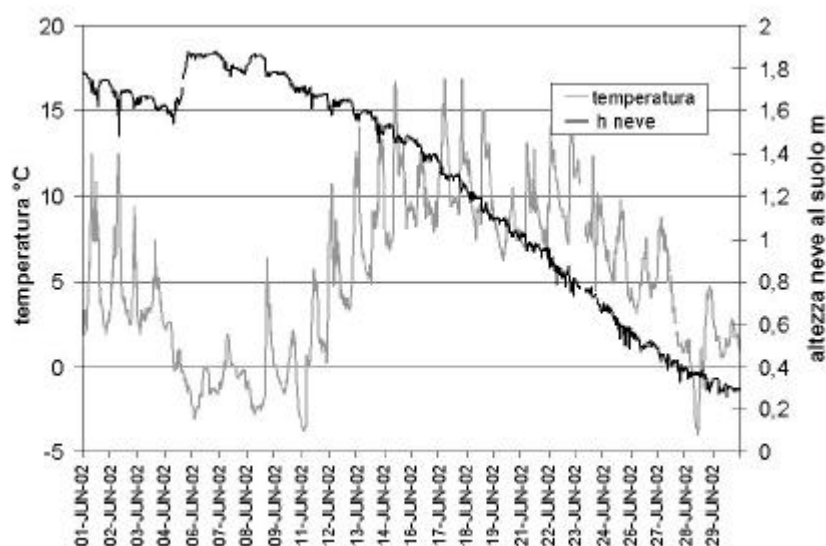
Valutazione dell'effetto della radiazione sulla fusione della neve e del ghiaccio

Al fine di stabilire il contributo idrico al lago epiglaciale, è stata effettuata una stima dell'effetto della radiazione incidente e della temperatura sulla fusione della neve e del ghiaccio di ghiacciaio.

L'esigenza di queste considerazioni nasce dalla necessità di capire quale è stato il meccanismo di formazione dell'acqua che ha riempito il bacino nel mese di giugno, determinando in alcuni giorni un tasso di crescita di circa 1 metro al giorno, e poter effettuare delle ipotesi sugli apporti da attendersi nei prossimi mesi estivi.

Nella figura seguente è riportata la misura della temperatura dell'aria e dell'altezza della neve al suolo nel mese di giugno 2002 rilevata alla stazione di Passo del Moro, a 2820 metri sul livello del mare, sopra Macugnaga. Tale stazione si ritiene essere la più rappresentativa della zona per quanto riguarda le valutazioni medie dell'apporto idrico.

Figura 14: Andamento della temperatura dell'aria e dell'altezza della neve al suolo misurate dalla stazione di Passo del Moro a 2820 m, nel mese di giugno 2002



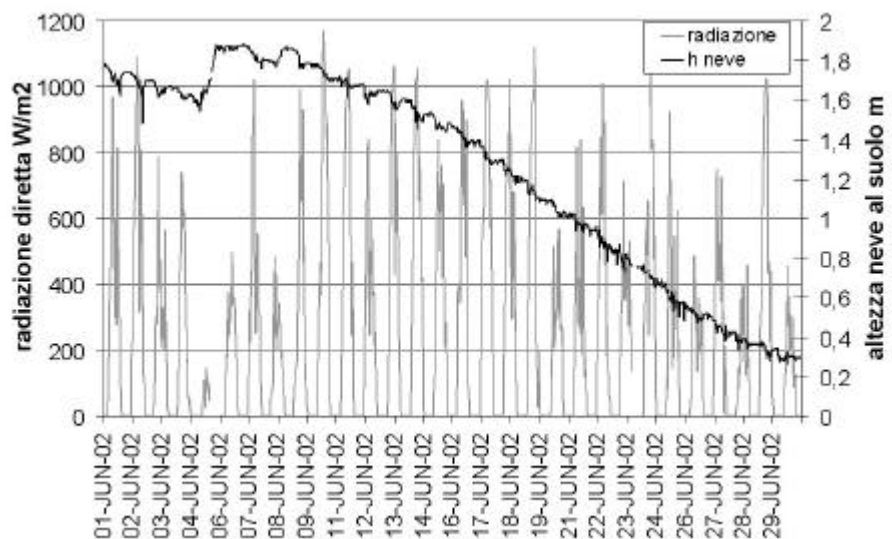
Dalla Figura 14 si osserva una quasi totale fusione del manto nevoso nel mese di giugno che passa da quasi due metri a 20 cm. Ipotizzando di poter considerare uniforme l'altezza della neve al suolo all'inizio di giugno sull'intero bacino di accumulo, di circa 3 Km², ed una densità media della neve al suolo di 500 kg/m³, si hanno circa 5,4 milioni di metri cubi di neve, corrispondenti

approssimativamente a 2.7 milioni di metri cubi di acqua, equivalenti al volume d'acqua misurato sul sito.

L'energia necessaria alla fusione di 5.4 milioni di metri cubi di neve è di circa 8.9×10^{14} J. L'energia giornaliera disponibile, dovuta alla radiazione diretta (valutata mediamente in 530 W/m^2 per 10 ore circa di insolazione), sull'intero bacino di accumulo, in un giorno, è di 3.78×10^{13} J. Tale valore viene ridotto di un fattore 10 nel caso si consideri un'albedo elevato della neve, pari a 0.9; nel caso di neve vecchia possiamo considerare un albedo di circa 0.6. e in tali condizioni sono sufficienti circa 15 giorni di elevato irraggiamento solare per dare luogo alla fusione di tale spessore di manto nevoso.

Questa valutazione è stata effettuata considerando la radiazione diretta come la principale causa della fusione nivale, trascurando, in prima approssimazione, il flusso di calore sensibile. E' comunque da sottolineare che l'elevato valore dello zero termico della seconda decade di giugno ha parzialmente inibito il raffreddamento notturno della neve rendendo disponibile l'energia diurna per la fusione.

Figura 15: Andamento della radiazione e dell'altezza della neve al suolo misurate dalla stazione di Passo del Moro a 2820m, nel mese di giugno 2002



Nella Figura 15, viene presentata la radiazione diretta misurata a Passo del Moro e l'altezza del manto nevoso. Si può notare come la forte e costante insolazione nella seconda decade del mese sia responsabile della fusione della neve che infatti segue un andamento lineare. Un'ultima osservazione è da fare sul contributo giornaliero di acqua dato dalla fusione di ghiaccio in una giornata serena. Tale contributo, in assenza del runoff normale del ghiacciaio e

dell'alimentazione delle portate dei torrenti, sarebbe sufficiente ad aumentare il livello del lago di circa 30 cm al giorno. Si nota quindi che in assenza di neve, il massimo innalzamento possibile del lago (dovuto alla fusione diretta del ghiacciaio) è decisamente inferiore alla quantità osservata nel mese di giugno (fino ad un metro al giorno).



Il rischio legato all'evoluzione del lago e del ghiacciaio

Scenari di rischio

La possibilità che possa verificarsi uno svuotamento improvviso del lago, per tracimazione attraverso la superficie del ghiacciaio o per sifonamento attraverso i canali subglaciali, comporta il pericolo della formazione di un fenomeno di piena improvvisa, che potrebbe svilupparsi come un fenomeno di debris flow e che potrebbe causare danni alle infrastrutture turistiche sia nella zona a monte del Belvedere, sia a valle di esso (seggiovia Pecetto-Burki, locali di servizio e bar, opere di attraversamento del T. Anza ecc).

Alla luce di questo quadro si prospettano alcuni possibili scenari di rischio, legati a possibili diverse evoluzioni del fenomeno di crescita del lago epiglaciale.

Scenario 1: effetti di una tracimazione del lago attraverso depressioni della superficie glaciale.

Una tracimazione improvvisa del lago può essere innescata:

1. dall'apertura di un varco attraverso la superficie del ghiacciaio, in seguito ad un innalzamento del livello del lago
2. dal crollo di masse di ghiaccio e/o di roccia dalla parete Est del monte Rosa, che precipitano repentinamente nel lago provocandone l'esondazione.

Lo scenario di rischio che si può individuare in relazione all'innescato da parte di questi fenomeni varia sostanzialmente in base alla direttrice preferenziale che le acque di esondazione seguirebbero, lungo la morena laterale destra o lungo quella sinistra:

Tracimazione del lago in destra orografica del ghiacciaio:

In questo caso lo sviluppo del fenomeno potrebbe avere conseguenze simili a quelle dell'evento di svuotamento del Lago delle Locce del luglio '79, in quanto il deflusso potrebbe avvenire in parte attraverso la morena laterale destra nel tratto a monte del Rifugio Zamboni o attraverso una varice apertasi nel '79 a valle di esso, per poi proseguire nell'alveo del T. Pedriola, acquistando velocità e quindi capacità di trasporto nel tratto prossimo al rilievo del Belvedere, con la possibilità di divagazioni nel tratto a monte della confluenza del T. Anza; nel corso dell'evento del '79 questa zona fu pesantemente interessata dal deposito di materiale grossolano, che danneggiò alcune parti della stazione intermedia della seggiovia Pecetto-Belvedere.

L'onda di piena potrebbe defluire poi nell'alveo del T. Anza, minacciando abitazioni e tratti viabilità prospicienti la fascia fluviale nel fondovalle principale.

Tracimazione del lago in sinistra orografica del ghiacciaio:

In questo caso lo sviluppo del fenomeno avverrebbe seguendo la morena laterale sinistra, in parte al suo interno, in parte all'esterno; in ogni caso la massa d'acqua confluirebbe nell'alveo principale del T. Anza, intorno a quota 1800, dove attualmente termina la lingua sinistra del ghiacciaio. Da questa quota l'alveo è stato in anni recenti regimato sia con opere spondali (argini in c.a.), sia di fondo, per cui il rischio di tracimazioni in questo tratto andrebbe verificato attraverso apposite verifiche idrauliche delle sezioni d'alveo, ipotizzando portate che dovrebbero essere opportunamente stimate, tenendo in conto una importante frazione di trasporto solido che verrebbe introdotta dall'erosione delle scarpate sovraripide della morena laterale.

La presenza di arginature in c.a. di importanti dimensioni, disposte "a pennello" nella zona a monte dell'abitato di Pecetto intorno a quota 1400 m, dovrebbe sufficientemente salvaguardare il concentrico della frazione nei confronti di eventuali tracimazioni dagli argini lungo l'alveo; resterebbero tuttavia esposte al rischio di coinvolgimento nel fenomeno la stazione di partenza della seggiovia e gli edifici ad essa connessi, oltre a parte all'area del parcheggio prossima al T.Anza. A valle di quest'area l'evento avrebbe effetti analoghi a quelli prospettati nell'ipotesi a), tuttavia è presumibile che la quantità di detrito mobilizzabile potrebbe essere decisamente superiore, e di conseguenza anche l'estensione delle aree coinvolgibili. In entrambi i casi non si può escludere la formazione di invasi temporanei in depressioni tra il ghiacciaio e la morena laterale, il cui sfondamento potrebbe dare luogo a pulsazioni dell'evento di piena.

Figura 16: Il ghiacciaio del Belvedere presso la morena laterale destra ai piedi del Lago delle Locce; sullo sfondo il rifugio Zamboni. L'area esterna alla morena rappresenta una via di deflusso preferenziale delle acque di piena in caso di tracimazione del lago sul lato idrografico destro



Scenario 2: effetti di svuotamento del lago attraverso il circuito idrico sub-glaciale.

Uno svuotamento improvviso del lago attraverso i canali subglaciali non può essere prevista né in termini temporali né di grandezza del fenomeno: esso è tuttavia ipotizzabile, sia in base al fatto che nel corso del 2001 questo fenomeno è già stato osservato, sebbene senza effetti sensibili sul reticolato idrografico proglaciale, a scapito di laghetti temporanei collocati in posizione analoga a quella del lago attuale, sia in relazione al fatto che durante la stagione estiva la fusione del ghiaccio comporta la formazione di crepacci, che possono mettere in connessione il fondo del lago con il circuito idrico sub-glaciale.

L'innescarsi di un fenomeno di questo tipo dovrebbe essere preannunciato da un intorbidimento delle acque emergenti presso le principali sorgenti a valle del ghiacciaio (ad es. quella "del Fontanone" presso l'Alpe Burki, intorno a quota 1500 m) o di quelle che fuoriescono lungo il torrente proglaciale a valle della lingua sinistra del ghiacciaio. Anche la formazione di pozze d'acqua torbida in depressioni presso le morene laterali del ghiacciaio possono essere indizi di circolazione idrica profonda in pressione, che potrebbe anche causare il cedimento improvviso delle scarpate delle morene laterali per fenomeni di saturazione.

Da un punto di vista morfologico, la lingua sinistra sembra essere quella maggiormente predisposta ad ospitare un fenomeno del genere, in quanto il fondo subglaciale risulta più depresso di quello della lingua destra; tuttavia non si può escludere a priori che una rotta glaciale si verifichi ad esempio lungo il margine della morena laterale destra.

In ogni caso, gli effetti del verificarsi di un fenomeno di svuotamento del lago attraverso canali subglaciali sarebbero simili a quelli di una tracimazione incontrollata in superficie, in quanto la fuoriuscita in acqua in pressione dal fondo del ghiacciaio potrebbe comportare l'erosione dei depositi glaciali di fondo dando luogo ad una piena con elevato trasporto solido.

La maggiore pericolosità di questo fenomeno risiede essenzialmente nella sua imprevedibilità, in quanto, anche a fronte di un constatato abbassamento del livello del lago, non sarebbe possibile conoscere il punto ed il momento in cui avverrebbe la fuoriuscita dell'acqua dall'apparato glaciale, né con quale portata.

Considerazioni in merito alla sicurezza

Sulla base degli scenari sopra descritti sono state individuate e perimetrare, dai tecnici della Direzione regionale Servizi Tecnici di Prevenzione, su apposita cartografia le aree potenzialmente esondabili in occasione di un eventuale fenomeno di colata detritica innescata da una tracimazione o da un sifonamento del fondo del lago epiglaciale.

In assenza di dati oggettivi sulle portate prevedibili associate ad una onda di piena di tali caratteristiche, sono state tenute in primaria considerazione la conoscenza degli effetti dell'evento connesso al sifonamento del Lago delle Locce, verificatosi nel luglio del 1979.

La perimetrazione delle aree a rischio è stata estesa all'asta del T. Anza fino alle località Stabioli e Campioli del Comune di Ceppo Morelli, dove si presume che gli effetti associati al deflusso dell'onda di piena siano più sensibili.

Le prime misure precauzionale adottate, anche in funzione di un regolare svolgimento delle operazioni di approntamento del cantiere in quota per la realizzazione del sistema di pompaggio, è stato precluso l'accesso al pubblico all'area del Belvedere a monte dell'abitato di Pecetto, e disposta la chiusura precauzionale della seggiovia Pecetto-Burki, fortemente danneggiata dall'evento del 1979.

Un piano di allertamento, basato su un sistema di monitoraggio visivo dell'evoluzione del lago e del sistema glaciale nel suo complesso, e di

evacuazione per le aree a rischio è stato predisposto dal Dipartimento della Protezione Civile in collaborazione con il Comune

Misure precauzionali sono state adottate per tutta la fascia di pertinenza fluviale lungo l'asta del T. Anza a valle di Macugnaga, in particolare per quanto riguarda la transitabilità dei ponti e in particolare quella dei ponti provvisori nel Comune di Ceppo Morelli, realizzato a seguito dell'alluvione dell'Ottobre 2000.



Prevenzione e monitoraggio – gestione dell'emergenza

Attività di intervento

Il 28 giugno, con decreto prefettizio, viene costituito il Centro Operativo Misto di Macugnaga (COM) coordinato dal Dipartimento Nazionale per la Protezione Civile e composto da tecnici della Regione Piemonte, dalle forze dell'Ordine, Vigili del Fuoco, Forze Armate e Gruppo di volontariato. La funzione tecnico scientifica del COM inizia fin da subito le ricognizioni ed i rilievi dei luoghi per definire un piano di emungimento di portate dal lago in modo da mantenere il livello stabile anche in caso di avverse condizioni meteo-climatiche.

Si prospetta la necessità di impiegare delle pompe idrovore per sollevare l'acqua del lago e, attraverso opportune condotte convogliarla oltre la morena laterale destra ai piedi del lago delle Locce (Figura).

Il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile organizza e dispone l'impiego di risorse umane e strumentali di notevole rilevanza; con l'impiego degli elicotteri ed in particolare dei potenti "Ericson", in grado di sollevare 60 quintali alla volta, viene allestito un cantiere a lato del lago (Figura) e trasportato il materiale ed i mezzi necessari per l'intervento.

Le pompe sono state posizionate nel lago alloggiate su una piattaforma con castello che ne consente il sollevamento e l'immersione in acqua e collegate ai generatori elettrici collocati in posizione di sicurezza sulla morena del lago delle Locce.

Utilizzando i mezzi per la movimentazione della terra si è poi aperta una pista di accesso al lago dalla morena destra su cui sono state posate le condotte per il deflusso delle portate emunte.

La prima pompa è stata attivata il giorno 7 luglio alle ore 20 con il pompaggio di 200 l/s ed ha contribuito alla discesa del livello del lago.



Figura 17: Impiego degli elicotteri per l'approntamento del cantiere.



Piano di monitoraggio

In parallelo alle azioni rivolte alla messa in sicurezza, sono state attivate misure di monitoraggio del lago volte a verificare le variazioni dei volumi d'acqua al fine di controllare i deflussi rilasciati a valle verso Macugnaga nei tre ricettori ovvero il Torrente Anza su lato orografico di sinistra, il Rio Fontanone al centro e in destra il Rio Pedriola.

A partire dal 30 giugno è iniziata una campagna di misura manuale oraria del livello del lago del Belvedere e di controllo visivo delle portate dei ricettori con riguardo alla portata ed alla torpidità.

Inoltre è stato definito un sistema di monitoraggio del ghiacciaio Belvedere e del lago epiglaciale attivato il 10 luglio consistente in:

- una stazione meteo sulla morena frontale del lago delle Locce

- una stazione nivo-pluviometrica sul lago delle Locce

- una stazione di misura del livello del lago epiglaciale

- una stazione idrometrica sul T. Anza a Macugnaga in località precetto

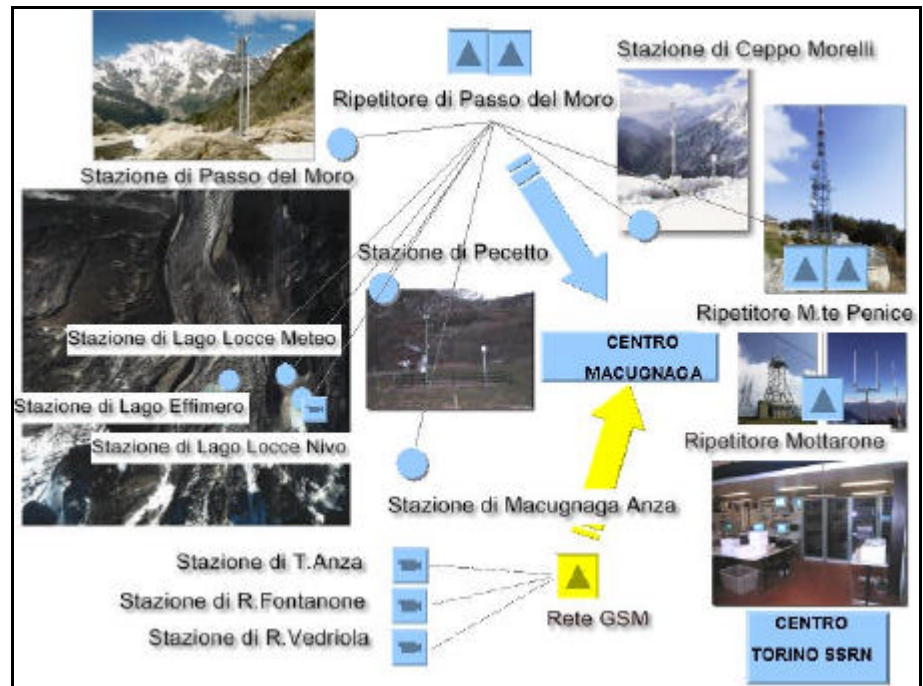
- 3 postazioni fisse mediante fotocamera sui ricettori alimentati dal ghiacciaio Belvedere

- un ripetitore radio a Passo del Moro

- una centrale di monitoraggio per la visualizzazione dei dati e delle immagini a Macugnaga

A tale rete confluiscono inoltre i dati delle stazioni termopluviometriche esistenti della rete regionale di Macugnaga-Pecetto, Passo del Moro e Ceppo Morelli.

Figura 18: Schema del sistema di monitoraggio



I dati delle 7 stazioni idrometeorologiche che compongono la sottorete (Figura) vengono acquisiti ogni 10 minuti dalla nuova centrale installata a Macugnaga, attraverso il nuovo ripetitore installato a Passo del Moro.

Contestualmente la centrale di Torino della Regione (SSRN) continua ad acquisire ogni 30 minuti i dati di tutta la propria rete, comprese le stazioni della sottorete Macugnaga.

Al centro di Macugnaga vengono inoltre trasmesse via rete cellulare GSM le fotografie digitali dalle stazioni dotate di fotocamera (Figura). Le fotografie vengono acquisite e inviate al centro con una frequenza di 5 minuti.

Le misure manuali hanno consentito di rilevare un abbassamento del livello del lago di circa 3 cm/ora nei giorni 29-30 giugno e nei giorni seguenti si sono poi ridotti a 1,5 cm/ora passando a meno di 1 cm/ora a causa delle precipitazioni della seconda settimana di luglio.

Figura 19: Ubicazione delle Fotocamere

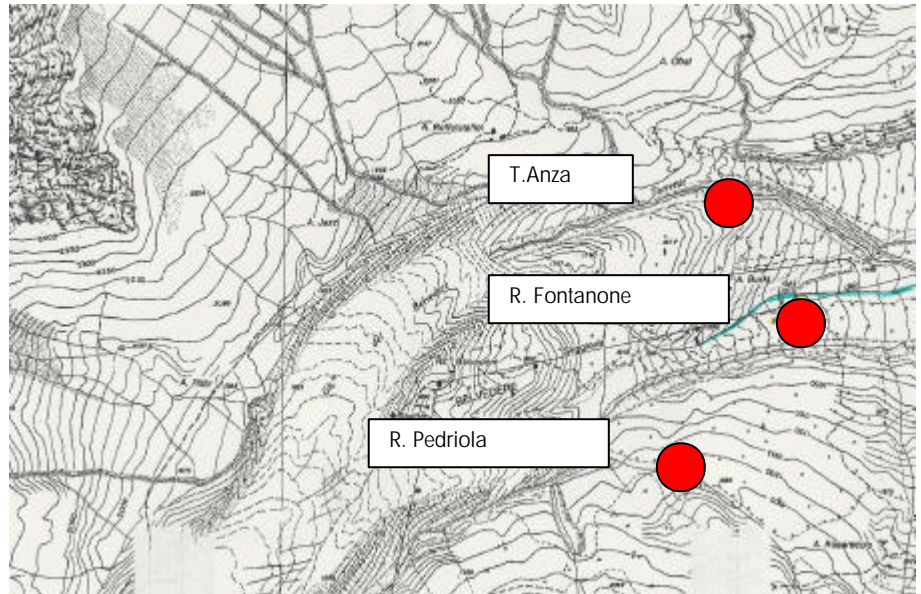
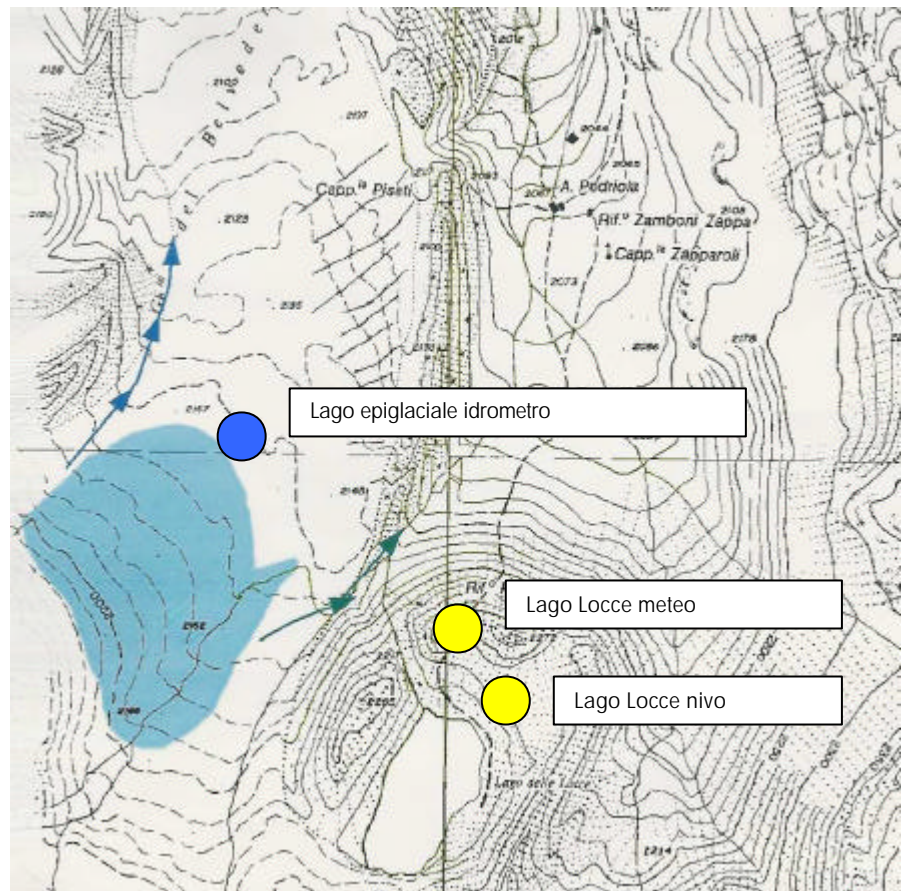


Figura 20: Ubicazione delle Stazioni





L'assistenza meteorologica

A partire dall'ultima settimana di giugno è stato attivato presso la Sala Situazione Rischi Naturali un servizio di previsione meteorologica specifico per la zona delle operazioni. Il servizio consiste nella produzione di due bollettini, uno emesso alle ore 11 con la previsione per il pomeriggio, ed uno alle ore 18 con la previsione per il giorno successivo.

Entrambi i bollettini contengono una sezione relativa alle osservazioni, riportando i dati delle stazioni meteorologiche della rete regionale, relativamente a temperatura, vento, umidità relativa, i dati di altezza dello zero termico e della temperatura di -10°C rilevati dai due radiosondaggi più vicini alla zona di interesse (Milano Linate e Payerne -CH), ed una sezione di previsione, caratterizzata da due parti testuali contenenti l'una la situazione generale a scala sinottica e l'altra la previsione per la giornata successiva in termini di nuvolosità, precipitazione e venti. Inoltre vi sono due riquadri nei quali vengono riportati l'andamento dello zero termico ed i valori di temperatura prevista per il giorno successivo in alcune delle stazioni più vicine al sito di Macugnaga.

La difficile previsione della nuvolosità e della tempistica di passaggi frontali sulla zona circostante il ghiacciaio del Belvedere, dovuta alla complicata orografia della Valle Anzasca, ha reso necessario l'attivazione presso la Sala Situazione Rischi Naturali di un costante monitoraggio della radiazione sul sito di Passo del Moro confrontata con i valori che essa assumerebbe in caso di cielo sereno e della temperatura sul sito di Pecetto.

Il servizio di assistenza meteorologica è attivo 7 giorni su 7 e copre le intere 24 ore della giornata, fornendo, oltre ai bollettini sopra elencati, una eventuale assistenza di previsione a breve termine (nowcasting) sulla valutazione di immagini radar e da satellite, dei dati della rete di monitoraggio della regione Piemonte e modellistiche ed anche a medio termine per la programmazione delle attività di intervento sul sito.



Prospettive evolutive del fenomeno

E' necessario sottolineare che il fenomeno di formazione e sviluppo del lago epiglaciale del Belvedere costituisce un caso quasi unico nelle Alpi e che quindi è difficile, anche da un punto di vista scientifico, prevederne l'evoluzione nel breve o nel lungo periodo; appare tuttavia verosimile che le condizioni per il suo permanere o per una periodica formazione possano restare tali ancora per qualche anno.

Occorre comunque disporre di un quadro conoscitivo sufficientemente approfondito dell'evoluzione del lago, basato sulla valutazione di tutti gli elementi morfologici e climatici che condizionano l'evoluzione del ghiacciaio stesso; d'altronde, la situazione è in continua evoluzione, in relazione sia alle mutazioni nell'assetto dell'apparato glaciale nel suo complesso, sia agli effetti indotti dall'attuazione del piano di emergenza finalizzato alla regolazione artificiale dell'invaso.

Gli stessi fenomeni d'instabilità tipici dell'ambiente alpino d'alta quota (valanghe di neve, crolli di roccia o di seracchi provenienti dalle pendici sovrastanti il lago) e la stessa dinamica interna del ghiacciaio possono modificare in qualsiasi momento le condizioni morfologiche dell'area e di conseguenza il quadro delle condizioni di rischio.

Per tali ragioni risulta fondamentale disporre di un continuo monitoraggio dei parametri climatici, glaciologici e idrometrici che permettono di caratterizzare l'ambiente del Ghiacciaio del Belvedere, al fine di poter basare delle previsioni per gli sviluppi futuri dell'eccezionale fenomeno che interessa quest'area dell'arco alpino occidentale.