

Esperienze di contrasto e mitigazione dei cambiamenti climatici: il ghiacciaio della Marmolada

Mauro Varotto - Prof. associato, Dipartimento di Scienze Storiche Geografiche e dell'Antichità dell'Università di Padova

Francesco Ferrarese - Tecnico di elaborazione dati, Dipartimento di Scienze Storiche Geografiche e dell'Antichità dell'Università di Padova

Il ghiacciaio della Marmolada, per la sua posizione, la morfologia e l'estensione si candida felicemente sia come rappresentativo della situazione di molti dei 900 ghiacciai italiani sia come osservatorio e studio di uno degli elementi più sensibili alle variazioni climatiche. Una lunga serie di studi e misurazioni per ricostruire l'evoluzione della superficie e del volume del ghiacciaio nell'ultimo secolo permettono di delineare con buona accuratezza l'andamento della sua evoluzione, tanto da poter azzardare date di eventuale estinzione dell'apparato glaciale in 15-30 anni. A fronte di questa situazione l'articolo analizza l'efficacia della salvaguardia dell'accumulo nevoso stagionale tramite l'impiego di teli geotessili di protezione dall'irraggiamento. Attività, questa, già avviata da un decennio in Marmolada, più per esigenze di fruizione di impianti sciistici che per mera salvaguardia del ghiacciaio.

Introduzione

I ghiacciai in Italia e le tendenze evolutive generali

Le previsioni sul glacialismo alpino presentate nel recente dossier del Centro Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici (Spano et al., 2020), con la preannunciata scomparsa di larghissima parte dei ghiacciai alpini prima della fine di questo secolo, sono un dato allarmante che influenzerà la nostra vita in modo diretto. Il *global warming* sta colpendo infatti in maniera

particolare l'arco alpino, con un aumento medio di temperatura di circa 2°C registrato nel corso dell'ultimo secolo rispetto a valori che si attestano attorno ad 1 °C nell'emisfero nord (Spano et al., 2020). Il termometro più fedele e preciso nel restituirci quanto sta avvenendo ad alta quota a seguito del riscaldamento planetario è dato dagli apparati glaciali, che risultano in complessivo arretramento dalla seconda metà dell'Ottocento, ma con una fase di forte accelerazione soprattutto negli ultimi trent'anni,

periodo in cui la temperatura è tornata a crescere ad un ritmo sostenuto, più ancora di quanto fosse accaduto nel periodo "caldo" precedente, tra 1920 e 1950.

Nel *Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani* (Smiraglia e Diolaiuti, 2015) vengono descritti complessivamente 903 ghiacciai - dei 3770 di tutto l'arco alpino - che occupano un'area di 368 km² e rappresentano uno stock di 116 miliardi di metri cubi d'acqua dolce. Si tratta, comunque, di ghiacciai di dimensione piuttosto ridotta (in media 0,4 km²

Cambiamenti climatici

per apparato glaciale): i ghiacciai con area maggiore di 1 km² sono il 9,4% del totale e coprono una superficie del 68%. Solo tre ghiacciai appartengono alla classe areale più estesa (oltre 10 km²): il Ghiacciaio dell'Adamello tra Lombardia e Trentino, il Ghiacciaio dei Forni in Lombardia, il Ghiacciaio del Miage sul Monte Bianco in Valle d'Aosta; questi coprono il 10,3% dell'intera superficie glacializzata nazionale (Smiraglia e Diolaiuti, 2015, p. 28).

Il confronto tra i dati attuali e quelli della rilevazione precedente ad opera del CNR e del Comitato Glaciologico Italiano (1959-1962) registra una riduzione della copertura dei ghiacciai superiore al 30%, scendendo da 526 a 368 km²; la banca dati del *World Glacier Inventory* segnala per lo stesso periodo una riduzione areale del 27%, ciò che evidenzia come sul versante italiano la riduzione del glacialismo sia leggermente più accentuata rispetto alla media dell'intera catena alpina. La crescita di numero degli apparati glaciali in Italia (dagli 835 apparati del primo Catasto ai 903 attuali) è pura apparenza, poiché le 68 unità in più rivelano la frammentazione tipica delle fasi di deglaciazione, in cui la suddivisione di ghiacciai ampi e complessi genera più sottobacini separati.

Un ghiacciaio rappresentativo: la Marmolada

In questo quadro complessivo il ghiacciaio della Marmolada, il più esteso delle Dolomiti e uno dei più studiati ghiacciai delle Alpi, è rappresentativo di una vulnerabilità generalizzabile a buona parte degli apparati glaciali delle Alpi, per due motivi:

i) le caratteristiche fisiche del ghiacciaio in questione;

ii) le importanti implicazioni sociali ed economiche che tale evoluzione è destinata a produrre sul territorio circostante.

La configurazione fisica del ghiacciaio principale della Marmolada (classificato al numero 941 del Catasto dei Ghiacciai Italiani) ha dimensioni medio-piccole (1,2 km² di superficie) ed è situato a quote relativamente basse, esteso altimetricamente per 700 m tra i 2650 m s.l.m. della fronte orientale di Serauta e i 3343 m s.l.m. di Punta Penia; la sua evoluzione recente ha portato alla frammentazione e suddivisione in distinti sottobacini di un corpo del ghiacciaio originariamente ampio ed articolato, ma già nettamente separato dai più ridotti apparati glaciali del Gruppo, alcuni dei quali già estinti.

Il secondo motivo che rende la Marmolada un caso esemplare riguarda le interazioni con la presenza antropica: la Marmolada è uno dei ghiacciai simbolo delle Alpi proprio per la stratificazione di significati, usi e funzioni ad esso associati in un lungo succedersi di eventi che si perdono nella dimensione leggendaria della "Regina delle Dolomiti" (Carton e Varotto, 2011): si pensi ai camminamenti della Città di Ghiaccio realizzati tra 1916 e 1917 dalle truppe austriache durante il primo conflitto mondiale, alla epopea alpinistica e sciistica che ne fece per Dino Buzzati la "montagna perfetta", al primo slalom gigante dell'intera cerchia alpina tenutosi sul ghiacciaio nel 1935, alla prima seggiovia in Italia realizzata nel 1947, all'antistante progetto di invaso e sfruttamento idroelettrico che portò alla costruzione della diga di Fedaia nel 1952, alla grandiosa funivia verso la cima della Marmolada (Punta Rocca) inaugurata nel 1970, alle battaglie ambientali che hanno visto protagonisti sul finire degli anni Ottanta Reinhold

Messner e l'associazione Mountain Wilderness, per non parlare della trentennale contesa confinaria tra Veneto e Trentino, fino alla recente iscrizione del Gruppo della Marmolada tra i 9 beni seriali delle Dolomiti Patrimonio Naturale dell'Umanità UNESCO il 26 giugno 2009. Un ghiacciaio dunque che non è solo manifestazione fisica ma potente icona simbolica, terreno di scontro e confronto tra realtà territoriali e opposti modelli di sviluppo, in particolare oggi a fronte delle drammatiche sfide del cambiamento climatico.

Evoluzione del ghiacciaio della Marmolada

Premessa

Quantificare la superficie glaciale della Marmolada con discreta precisione è operazione possibile a partire solo da fine '800. Inevitabilmente, però, un arco di tempo di più di un secolo deve considerare supporti di natura diversa comprendenti carte geografiche antiche, carte topografiche e tecniche moderne, foto aeree, ortofoto, modelli digitali del terreno derivati e diretti. Ciascuna di queste rappresentazioni è stata inserita in un sistema informativo geografico, in modo da renderle georiferite e quindi confrontabili tra loro. L'inevitabile errore che genera quest'attività è stato comunque documentato: normalmente esso decresce se il documento è più recente, essendo via via migliorate le capacità tecniche di raccolta dei dati. I limiti di accuratezza (1) delle fonti elencate in seguito non mettono comunque minimamente in discussione il trend generale di arretramento e diminuzione del ghiacciaio, che appare chiaramente dall'analisi di tutte le misure.

(1) Tutti i documenti utilizzati per calcolare l'estensione del ghiacciaio sono stati georiferiti o - se lo erano già - hanno subito una verifica di posizione. Gli errori quadratici medi hanno espresso un'ampia variabilità in funzione del supporto: dai 121 m dei fotogrammi aerei (non ancora rettificati) a scala maggiore, fino ai pochi metri delle carte più recenti. La base di riferimento è stata la tavoletta F. 11 II NE "Monte Marmolada", edizione 3/1963. La funzione di trasformazione adottata è stata la Spline transformation che, con un numero sufficiente di punti, costringe alla coincidenza tutti i punti di ancoraggio. Per questo sono stati scelti il maggior numero possibile di punti (da 13 a 52), disposti attorno o all'interno del ghiacciaio. L'errore introdotto comunque non inficia i risultati piuttosto evidenti e univoci di questa analisi temporale.

Le fonti più antiche (1800-1900)

La *Campagna di cartografia militare austro-ungarica del 1875* è una delle prime fonti geometricamente attendibili del ghiacciaio della Marmolada, probabilmente la fonte della prima stima di estensione del ghiacciaio, 495 ha, fornita dal Richter (1888) (Meneghel, 2011). La Carta, a scala 1:25.000, fu redatta tra il 1869 e il 1887 (2): al di là dell'incertezza di alcune misure geometriche, questo documento offre riferimenti molto interessanti come la quota minima del ghiacciaio (2380 m s.l.m.), posta esattamente sulla fronte centrale tra le creste di Sass de le Undes e Sass de le Doudes. Le versioni precedenti, tra cui è da segnalare la prima levata del 1798-1805, non permettono una lettura uguale sia nelle quote sia nella geometria del corpo glaciale, che appare difficilmente delimitabile nel suo disegno: comunque esso appare poco più esteso, in accordo anche con le osservazioni che le prime Commissioni sul glacialismo puntualizzarono: un'acme nel 1818-25 e una fase di ritiro generale dei ghiacciai dal 1855-1856 fino a circa il 1870 (Zanon, 1985). Da questa carta si è ottenuta un'estensione del ghiacciaio di circa 476 ha.

Del 1888, invece, è la *prima levata IGMI (Istituto Geografico Militare Italiano) a scala 1:25.000*. La tavoletta 11 II NE illustra la Marmolada solo nel territorio italiano, secondo il confine che divideva il Tirolo dai possedimenti veneziani, limite che in anni più vicini a noi fu oggetto di dispute tra i due confinanti proprio per la gestione e "proprietà" del ghiacciaio. Questa carta topografica, che presenta degli errori di interpretazione e disegno piuttosto notevoli, è disegnata con le nuove norme cartografiche che prevedono l'altitudine rappresentata a curve di livello e una nuova simbologia per il disegno in bianco

e nero, atta a semplificare la lettura, migliorando l'immediatezza del disegno e la quantità di informazioni. L'estensione del ghiacciaio misurabile dalla carta riguarda solo la parte più orientale, la lingua di Serauta: il disegno traccia una fronte che, con un percorso però diverso, si pone tra la linea di fronte del 1880 (terza levata austro-ungarica) e quella del 1905 (Carta di Leo Aegerter).

Le fonti della prima metà del '900

Nel 1905 venne edita la carta topografica in scala 1:25.000 della Marmolada disegnata dalla felicissima mano di Leo Aegerter (1875-1953), edita dal *Deutscher und Österreichischer Alpenverein (DuÖAV)*, una carta che ancora oggi colpisce per precisione, leggibilità e intuitività del disegno (Figura 1). Il documento è redatto usando i nuovi canoni cartografici: rappresentazione a

curve di livello, intensificazione dei punti misurati (quote di triangolazione), maggiore distinzione dei temi rappresentati (prati, boschi, falde detritiche, morfologie rocciose, superfici glaciali etc.); inoltre, si avvale dei colori bianco (di sfondo), nero, seppia e celeste per ulteriore distinzione dei temi. La carta per accuratezza geometrica non è paragonabile alle edizioni successive e la sua georeferenziazione ha richiesto l'uso di un notevole numero di punti di ancoraggio (poco più di 50) in modo da rendere preciso il confronto con le levate successive. Il poligono del ghiacciaio, disegnato tramite digitalizzazione a schermo, risulta esteso 412 ha.

Dopo le edizioni del 1888 e del 1910, non considerate qui per l'incertezza del disegno, il nostro Istituto Geografico Militare appronta nel 1917 un'altra "tavoletta" per le truppe di stanza sul ghiacciaio, anch'essa con palesi errori sulla parte austro-ungarica

Figura 1 - Stralcio dalla Carta topografica della Marmolada (*Karte der Marmolata*) in scala 1:25.000 realizzata nel 1905 da Leo Aegerter per il Deutscher und Österreichischer Alpenverein (DuÖAV): evidente la linea di confine, allora confine di stato



(2) La carta è visualizzabile online nel webgis <https://maps.arcanum.com/en/>, per la Marmolada al punto: <https://maps.arcanum.com/en/map/thirdsurvey25000/?layers=129&bbox=1315388.2396689036%2C5850318.161633743%2C1328277.4335634916%2C5854140.0130480025>.

Cambiamenti climatici

del ghiacciaio. Utile, invece, al nostro studio è l'edizione del 1927 in cui la topografia viene ridisegnata. L'estensione del ghiacciaio di questa levata ha misura 416 ha, poco più della levata austro-ungarica del 1905. Ciò che rende interessante questo confronto è che i 4 ha di estensione in più si realizzano proprio nei vari tratti della fronte glaciale, suggerendo, così, un lieve avanzamento del ghiacciaio.

Dal 1945 sono disponibili foto aeree zenitali che hanno dato il via alla realizzazione di carte aerofotogrammetriche (Lilesand et al., 2015). Queste foto furono eseguite sulla Marmolada il 14 settembre, momento ideale per definire l'estensione del ghiacciaio, in concomitanza con il periodo di massima fusione annuale. Il ghiacciaio a quest'epoca misura 331 ha ed è pressoché coincidente a quello di nove anni dopo (1954), anch'esso fotografato in piena estate.

Dal 1950 ad oggi

Nel 1954 il volo GAI ha reso per la prima volta disponibile una serie di foto aeree coeve per tutta Italia (1954-55). Su questi fotogrammi si è basata la nuova edizione della Tavoletta IGM (1959). Le successive versioni su carta stampata delle Tavolette (1963 e 1986) hanno mantenuto questo dato senza variazioni. Anche le carte a scala più piccola (1:100.000 e 1:50.000) non presentano aggiornamenti nell'estensione del ghiacciaio, riportando la situazione della tavoletta più vicina per data di edizione. Tutte queste, pertanto, riportano un ghiacciaio esteso su 330 ha al 1954.

La Carta Tecnica Regionale del Veneto, edita nel 1983 ma disegnata sul rilievo aerofotogrammetrico del 1981, misura una copertura del ghiacciaio di 240 ha. La Carta Tecnica Provinciale del Trentino, qui disponibile dal 1996, non riporta un limite della copertura glaciale sufficientemente leggibile. Nel Trentino, però, sono disponibili

anche le ortofoto di tale data e da esse è possibile ricavare una estensione del ghiacciaio di 237 ha.

A seguito della Legge 16 maggio 1970, n. 281 inizia la raccolta delle foto aeree in archivi regionali o provinciali e, a volte, la loro elaborazione in ortofoto, soprattutto dal 2000 in poi. La Regione del Veneto, per la Marmolada, dopo il volo del 1981 dispone di una ripresa estiva del 1991, in cui si può ben apprezzare e misurare la copertura glaciale. La quota più bassa di ripresa (4300 m s.l.m. contro i 7500 del 1981) permette una miglior risoluzione dell'immagine anche se aumentano le distorsioni del *relief displacement* (Lilesand et Al., 2015). I fotogrammi utilizzati sono a colori e mostrano una zona di accumulo - caratterizzata da neve non compattata dal caratteristico colore bianco, diversa dal grigio, grigio-azzurro del ghiaccio non coperto - ridotta a meno di un quarto della superficie totale. L'estensione del ghiacciaio nel 1991 è di 241 ha. Dal 2000 sono disponibili almeno con cadenza triennale ortofoto commissionate da vari enti, su supporti già georiferiti. Le ortofoto del 2000, riprese in condizioni estive ottimali senza neviccate recenti, forniscono un dato di copertura di 205 ha; da notare come in tutti e tre i settori (fronte occidentale, centrale e orientale) il ritiro stia evidenziando placche isolate alimentate da sottili lingue, insufficienti a garantire la persistenza di questi piccoli apparati frontali. Nel 2003 una ripresa eccellente fornisce un quadro di facile interpretazione: la copertura del ghiacciaio misura 180 ha. Anche le ottime ortofoto del 2006, riprese verso fine estate, consentono una facile lettura dell'intero corpo glaciale e della parte di accumulo drasticamente insufficiente ad alimentare la formazione di nuovi strati di ghiaccio. L'estensione totale qui è di 171 ha. Le ortofoto del 2009 e del 2012 non consentono una lettura ben definibile della copertura glaciale,

causa l'abbondante neve ancora presente. Nel 2010 è stata tuttavia realizzata una ripresa LiDAR (*Light Detection And Ranging*) di tutti i gruppi delle Dolomiti rientranti nella *World Heritage List* dell'UNESCO. Di questi dati è stato messo a disposizione il Modello Digitale del Terreno, la cui accuratezza ha permesso un'ottima lettura della massa glaciale, corrispondente a 165 ha. Il successivo supporto leggibile con sicurezza è l'ortofoto del 2015, a 20 cm di risoluzione, che fornisce un'estensione di 150 ha. Nel 2017, la base fotografica di *Google Earth* (www.google.earth.com) fornisce un'ottima restituzione del ghiacciaio, anche se completamente coperta di neve recente, estesa 126 ha. Nel 2018 l'ortofoto triennale a disposizione della Regione del Veneto, ancora a 20 cm di risoluzione, fornisce un'eccellente misura del ghiacciaio esteso 123 ha.

Oltre ai valori direttamente calcolati per questo lavoro, si sono considerati anche altri dati da letteratura, e precisamente i 307 ha di estensione del 1962 forniti dal Comitato Glaciologico Italiano, e i 289 ha del 1966 misurati dall'ENEL (Meneghel, 2011; Zanon, 1990). Di questi due dati, tuttavia, conosciamo il valore e non la geometria, sono quindi utili per la ricostruzione quantitativa nel tempo, non per la zonazione delle zone in ritiro o avanzamento.

Evoluzione del ghiacciaio negli ultimi 140 anni

In Tabella 1 e in Figura 2 si può apprezzare l'andamento nell'ultimo secolo della copertura glaciale della Marmolada. Partendo dal 1880 e giungendo attraverso le tappe considerate al 2018, il ghiacciaio si è ridotto del 74%, mentre dal 1927 si è ridotto del 70%. La tendenza inesorabile al ritiro è evidente, anche se si manifesta con andamento oscillante, come mostrano i dati dei periodi 1905-1927, 1945-1954 e 1982-1996, intervalli in cui si verifica una sostanziale stabilità,

Tabella 1 - Estensione in ettari del ghiacciaio della Marmolada e quota minima della fronte dal 1880 al 2018. I valori in percentuale si riferiscono al 1905, prima fonte accurata e affidabile

Anno	area (ha)	quota minima (m s.l.m.)	estensione in % al 1905
1880	476	2380	115.5
1905	412	2415	100.0
1927	416	2400	101.0
1945	331	2440	80.3
1954	330	2440	80.1
1962	307		74.5
1966	289		70.1
1981	240	2490	58.3
1991	241	2490	58.5
1996	237	2495	57.5
2000	205	2555	49.8
2003	180	2575	43.7
2006	171	2620	41.5
2010	165	2620	40.0
2015	150	2620	36.4
2017	126	2635	30.6
2018	123	2640	29.9

se non un leggero aumento, delle dimensioni areali del ghiacciaio. A questi periodi di stasi si alternano momenti di ritiro della superficie e della massa: dal 1927 al 1945, dal 1954 al 1981, dal 1996 al 2003 e dal 2015 al 2017. I dati misurati si dispongono in maniera lineare se ordinati in funzione del tempo (anno del rilievo). Ne consegue, su tutto il periodo considerato, un modello lineare (equazione della retta) con elevato coefficiente di determinazione (0.966) che ci indica una perdita media di superficie di 2,5 ha/anno.

È un valore che, se si confermasse anche con un andamento oscillatorio, lascerebbe

circa 50 anni di esistenza al ghiacciaio. Se però analizziamo le fasi di ritiro che questi dati ci illustrano, possiamo osservare come la fase di regressione stia accelerando, vuoi per il cambiamento del clima, vuoi per la riduzione di massa glaciale. Il grafico in figura 4 mostra parte degli stessi dati di tabella 1 e figura 2. Qui, però sono stati considerati i valori che si allineano in una fase di ritiro continuo e, accanto ad essi, riportiamo la tendenza lineare della riduzione che gli stessi registrano.

Come si vede, la perdita annua durante le fasi di ritiro tende ad aumentare man mano che dal 1880 ci avviciniamo ai

giorni nostri. Mentre la perdita media di superficie dal 1880 al 1905 si attesta sulla tendenza generale del periodo, cioè circa 2.5 ha/anno, nel periodo 1927-1945 si registra una perdita quasi doppia, ovvero 4.7 ha/anno. Il ritiro sembra rallentare leggermente negli anni 1954-1981, dove si ha un valore di 3.4 ha/anno di superficie, comunque maggiore alla media annua del modello di perdita totale del periodo complessivo analizzato. Gli ultimi due periodi, dal 1996 al 2003 e dal 2015 al 2018 hanno registrato una perdita di superficie media rispettivamente di 8 ha/anno e di quasi 9.5 ha/anno. Questo a testimoniare un aumento quasi costante delle fasi di ritiro degli ultimi 50 anni: è uno dei dati più significativi, che mette in luce l'accelerazione che sta subendo questa fase (terminale?) del ghiacciaio.

Anche il volume della massa glaciale è stato quantificato, grazie a i lavori e dal modello di spessore del ghiacciaio (ARPAV, 2004) ottenuto da misure georadar. Inoltre, dai modelli digitali del terreno (DTM) in nostro possesso che si riferiscono agli anni 1954, 1981, 2006 e 2010 abbiamo creato un andamento della perdita di volume attraverso quattro date di misurazione (tabella 2).

Mentre i modelli delle prime due date sono derivati da curve di livello e punti quotati, i due più recenti sono risultati da misurazioni dirette LiDAR (*Light Detection And Ranging*) che forniscono una grande quantità di misure, in questo caso fino a 8 quote per m². Come si vede nel grafico di figura 5, l'evoluzione della massa glaciale, pur fermandosi a questi soli quattro rilievi, conferma, da un lato, la tendenza al ritiro con la medesima costanza dei dati di superficie, mostrando una forte correlazione tra area e volume, dall'altro lato illustra una minore perdita di massa, rispetto a quella di superficie.

Cambiamenti climatici

Fig. 2 - Evoluzione dell'estensione del ghiacciaio della Marmolada dal 1880 al 2018. Le misure si dispongono in modo decrescente con tre fasi di rallentamenti e/o lievissimi avanzamenti. Riportata l'equazione della retta col suo coefficiente di determinazione, essa ci indica che dal 1880 al 2018 la perdita media di superficie è stata di 2.5 ha all'anno

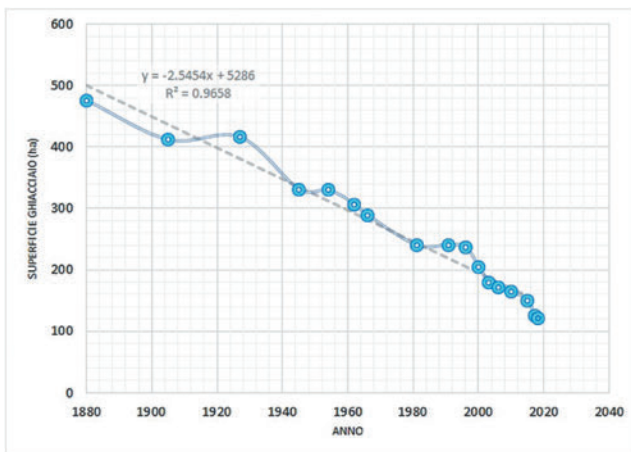
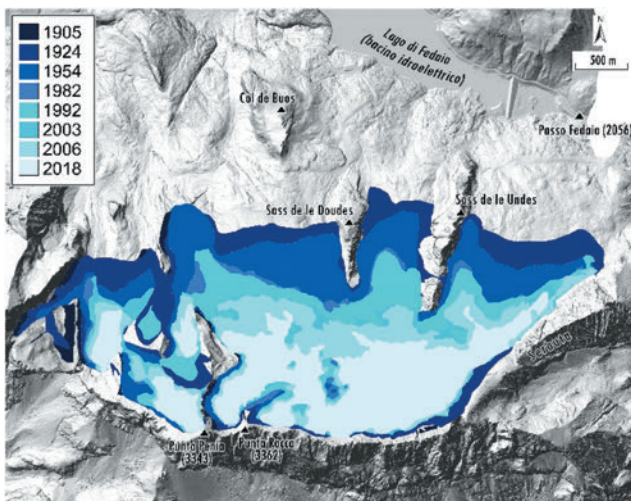


Fig. 3 - Il ghiacciaio della Marmolada in 9 rappresentazioni della sua estensione, dal 1905 (blu scuro) al 2018 (celeste più chiaro). Oltre alla drammatica riduzione (perdita di circa il 70% di superficie) si noti anche la separazione in più apparati distinti, anche in forza dell'emersione di vaste "finestre" rocciose



Discussione sulla riduzione del ghiacciaio

Se consideriamo il modello della tendenza lineare (equazione della retta: $y = -2.55325x + 5259$, dove y è l'estensione e x l'anno) potremmo prevedere di raggiungere lo zero, ovvero la scomparsa totale del ghiacciaio, nel 2065: uno zero assoluto, però, è poco probabile in quanto placche di nevato o glacio-nevato resisteranno a lungo protette dall'ombra delle più alte creste di Serauta o Punta Rocca, ma in tali condizioni non si parlerebbe più di ghiacciaio. Se consideriamo tuttavia come modello la tendenza al ritiro del periodo 2015-2018, con una perdita media di 9,5 ha/anno, l'esaurimento completo si avrebbe già nel 2031. Ma a questo da una parte si oppone l'andamento oscillante nel tempo - risultante da tutte le osservazioni - tra fasi di ritiro e stasi/avanzamento, in forza di più o meno brevi periodi climatici di riscaldamento e raffreddamento; dall'altra parte sono da considerare anche le variabili topografiche poiché l'andamento del substrato roccioso svolge un ruolo fondamentale, caratterizzando il ghiacciaio con spessori localmente diversi: questo ruolo morfologico si è mostrato già fondamentale nella variazione della velocità di ritiro delle fronti, come indicano le misurazioni annuali del Comitato Glaciologico Italiano, con accelerazioni differenziali che hanno portato alla rapida estinzione della fronte centrale tra il Sass de le Undes e il Sass de le Doudes (Mattana e Varotto, 2010) e che oggi presenta le quote frontali più elevate nonostante raggiungesse addirittura le quote più basse del ghiacciaio a fine Ottocento, in forza dell'abbondante alimentazione proveniente dalla parte più alta del bacino di accumulo. È da notare, in figura 2, come quello che era un corpo unico, in forza delle trasfluenze dell'abbondante copertura, almeno dal 1945 è scisso in due corpi principali -

Fig. 4 - Le fasi di ritiro del ghiacciaio, dal 1880 al 2018, come appaiono se si mettono in relazione le misure di superficie con l'anno di rilievo delle stesse. Sono riconoscibili cinque fasi di ritiro che tendono ad aumentare progressivamente la perdita media annua in ettari di superficie, il coefficiente di x nell'equazione della retta riportata per ogni fase.

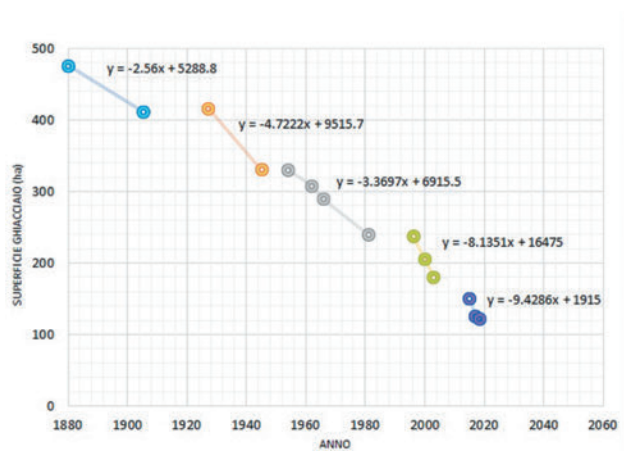


Tabella 2 - Dati di volume del ghiacciaio della Marmolada ricavati da modelli digitali del terreno. Il dato è meno preciso di quello areale, ma illustra chiaramente l'andamento della massa del ghiacciaio.

Anno	area (ha)	volume (ha x 100)	volume %	spessore medio (m)
1954	330	97.56	100.0	29.5
1981	240	68.27	70.0	28.4
2006	171	29.10	29.8	17.0
2010	165	26.69	27.4	16.2

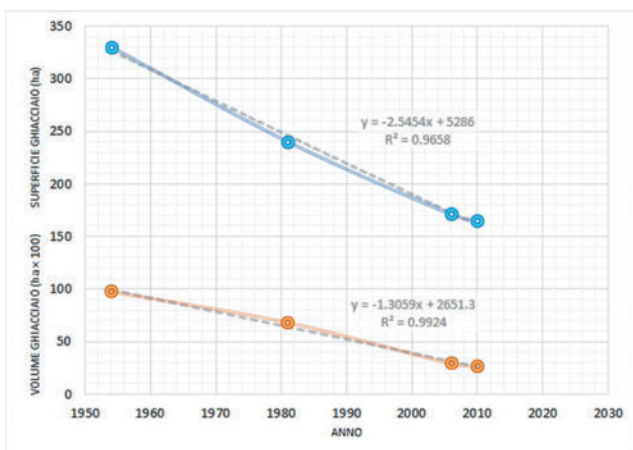
discriminati dalla quota più alta di Punta Penia (3343 m s.l.m.) - e, dal 2000, in quattro corpi distinti, di cui quello principale si estende ad est di Punta Rocca (3265 m s.l.m.): ognuno di essi ha risposte autonome alle variazioni climatiche, per molteplici fattori: quote leggermente diverse, bacini di alimentazione diversamente estesi, diversa esposizione all'irraggiamento solare e non ultimo l'effetto "fornello" delle sempre più vaste aree di roccia affiorante, fattore questo corresponsabile delle fasi di ritiro accelerate (vedi figure 3 e 5). Per la concorrenza di tutte queste variabili, ad oggi è difficile prevedere una data certa di estinzione del ghiacciaio. Quello che sembra certo, invece, con il progredire del riscaldamento climatico, è che anche il ghiacciaio più esteso - da Punta Rocca (3265 m s.l.m.) alla catena di Serauta - è destinato a dividersi in ghiacciai minori (Santin et al., 2019).

A conforto delle considerazioni emerse dall'analisi dei valori di superficie, si è ritenuto opportuno mettere a confronto la tendenza evolutiva della massa del ghiacciaio a partire dalla ricostruzione di un modello digitale del substrato roccioso ricavato dai dati finora disponibili (3). I dati dei volumi calcolati sono illustrati in tabella 2. Da questi valori si ottiene una tendenza lineare che, nonostante i soli quattro dati, fornisce un coefficiente di determinazione molto alto ($R^2 = 0,992$): l'andamento indica una perdita stimata in 1,3 milioni di metri cubi all'anno tra neve e ghiaccio. Se si dovesse confermare

(3) I dati volumetrici sono stati reperiti elaborando un modello digitale del terreno (DTM) a partire dall'altimetria delle Tavole IGM derivate da aerofotogrammetria su foto del 1954, dall'altimetria della Carta Tecnica Regionale del Veneto su aerofotogrammetria del 1981, da volo LiDAR della Provincia Autonoma di Trento del 2006, da volo LiDAR fornito per la Fondazione Dolomiti Unesco dal Geoportale Nazionale del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare del 2010. I dati, differenti per metodologia d'estrazione e per risoluzione, sono stati messi a confronto sulle parti comuni, non coperte da ghiacciaio, per calcolarne l'errore quadratico medio, fornendo un valore di 5.3 m di altitudine tra il 1954 e il 1981, di 32 m tra il rilievo LiDAR del 2006 e il modello del 1981, di 0.7 m tra i due rilievi LiDAR del 2006 e 2010. L'errore maggiore si realizza, come atteso, tra le altimetrie di ultima generazione (LiDAR), che mappano con continuità tutta la superficie, e i modelli derivati da punti quotati e curve di livello, ottenuti da misure discrete e non continue. A questi dati vanno accostati il Modello di profondità del ghiacciaio calcolato tramite georadar nel 2005 da ARPA Veneto e quello misurato da Santin et al. (2019).

Cambiamenti climatici

Fig. 5 - Misure di area, in blu, e di volume, in arancione, del ghiacciaio in quattro anni dove le stesse sono disponibili.



questo modello ($y = -1.306x + 2651.3$, dove y è il volume e x l'anno), l'estinzione del ghiacciaio si avrebbe attorno al 2031, singolare e casuale coincidenza con uno dei modelli tendenziali di riduzione di superficie. È interessante notare anche la correlazione tra area e volume, che nelle quattro date mostra un coefficiente di determinazione sempre elevato ($R^2 = 0,981$) e indicherebbe una perdita di 0.43 m^3 di ghiaccio o neve per 1 m^2 di superficie. Come a dire che la perdita di poco più di 2 m^2 di superficie comporta la perdita di 1000 litri di acqua immagazzinata nel ghiacciaio. Queste tendenze confermano quanto previsto dagli studi recentemente pubblicati da Santin et al. (2019) che, analizzando con georadar la massa di 140 ha di ghiacciaio negli anni 2004 e 2014, hanno osservato una riduzione di circa il 30% in volume e circa il 22% di superficie, un valore che si avvicina alla riduzione da noi misurata per l'intera estensione del ghiacciaio tra 2003 e 2015 (17%). Gli autori sostengono l'imminente divisione del ghiacciaio in più

corpi glaciali distinti, che tenderanno tuttavia ad una maggior resilienza, protetti da condizioni orografiche favorevoli al più lungo mantenimento della massa restante (Santin et al., 2019). Sulla base di queste considerazioni essi indicano nel 2050 la data di probabile estinzione del ghiacciaio se si confermasse l'attuale tendenza climatica.

Le previsioni, dunque, indicano i prossimi ultimi dieci o trent'anni di vita del ghiacciaio; ma la questione non sembra cambiare molto: la persistenza di falde glacializzate nei settori più protetti dalle linee di cresta comporterebbe inevitabilmente una declassazione da ghiacciaio a glacionevato. Nel quadro dell'andamento climatico attuale non è da escludersi anche un'accentuazione dei fenomeni di riscaldamento, come del resto indicano le temperature delle stazioni meteorologiche disponibili dal 1994 in prossimità del ghiacciaio e gestite dall'ARPA Veneto (4). In particolare, confrontando i dati delle stazioni di Punta Rocca (posta a 3250 m s.l.m.), seconda cima della Marmolada, e di Malga Ciapèla (a 1475 m s.l.m. ai piedi del massiccio sul suo lato

orientale), si evidenzia un'accentuazione della tendenza all'aumento delle temperature a quota più alta: applicando un modello di tendenza lineare, le temperature massime a Malga Ciapèla tendono ad aumentare di $0,02$ gradi all'anno (le medie e le minime rispettivamente di $0,04$ e $0,06$ gradi all'anno), a Punta Rocca le temperature medie e massime, pur con forti oscillazioni, presentano una tendenza all'aumento di circa $0,06$ gradi all'anno e le minime di $0,07$ gradi all'anno.

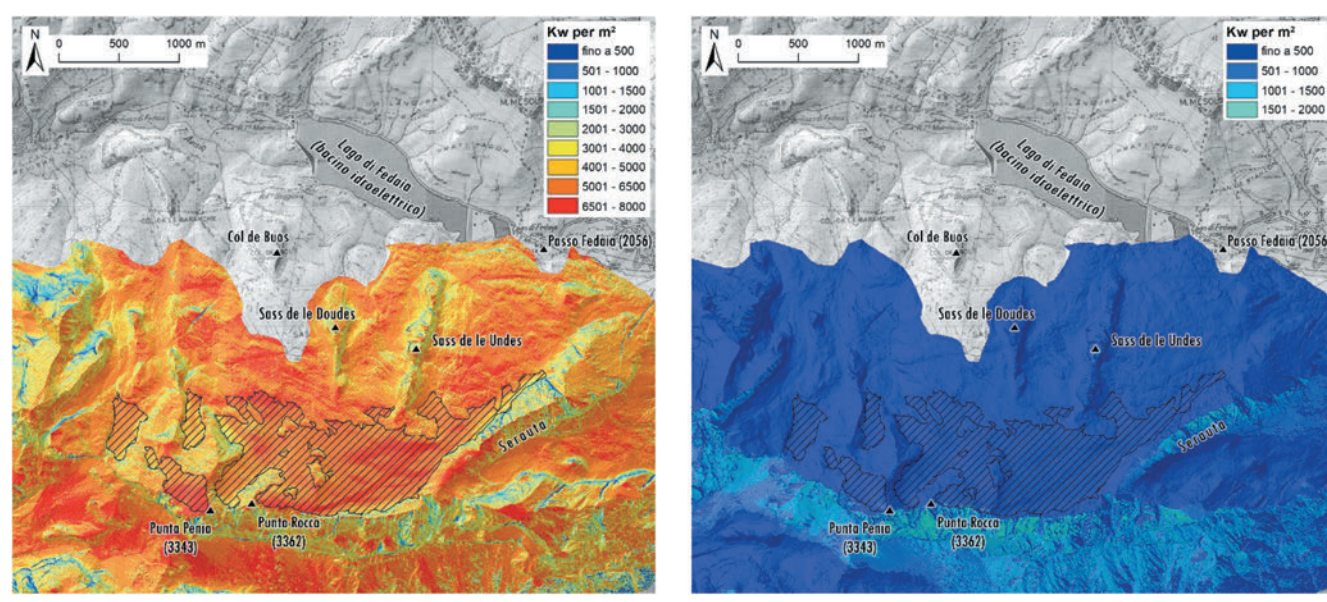
Questi dati confermano le previsioni generali di un riscaldamento più accentuato, con il progredire di quota, nell'area alpina rispetto alla media globale e mediterranea (Spano et al., 2020). All'andamento di queste temperature, seppur non così accentuate nel loro valore medio, ha risposto il ghiacciaio con fasi di accelerazione del ritiro: una corrispondenza che sembra prevalere su altre variabili, come la copertura nuvolosa che condiziona l'irraggiamento solare, la quantità di precipitazioni sia invernali che estive, l'accumulo di valanga - questo del tutto trascurabile per la Marmolada (ARPAV, 2020). Invece, la riduzione dello spessore e soprattutto l'emersione di estese zone di roccia che iniziano ad anastomizzare il flusso del ghiacciaio, contribuendo con la maggiore capacità termica a diffondere l'accumulo di temperatura derivante dall'irraggiamento solare, possono essere tra le cause principali dell'accelerazione della fusione che abbiamo osservato.

Conclusioni: proteggere il ghiacciaio?

Sul ghiacciaio che possiamo definire morente si confrontano attualmente due visioni diverse dell'economia di montagna, di turismo e di rapporti con l'ambiente alpino. Da un lato la visione *business as*

(4) <https://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/open-data/clima>.

Fig. 6 - Energia potenziale dell'irraggiamento solare nel giorno del solstizio d'estate, a sinistra, e quella relativa al solstizio d'inverno, a destra. Il valore è espresso come kw per m² durante il giorno. Il retinato obliquo indica l'estensione del ghiacciaio. Si noti la scarsa protezione derivante dall'ombra delle creste o dei versanti, tanto che in estate il ghiacciaio è esposto ai valori più alti di irraggiamento.



usual di chi continua ad investire su impianti di risalita e piste da sci, sempre più dipendenti da sistemi di protezione o innevamento artificiale, dall'altra chi (ispirato dalla drammatica fase di arretramento delle fronti glaciali ma anche dalla recente pandemia) ritiene che questo modello economico sia ormai insostenibile e auspica che le politiche e gli investimenti seguano nuove direzioni. Sul primo versante si legge la volontà di sfruttamento sciistico del ghiacciaio della Marmolada (5), limitatamente al periodo invernale e primaverile, poiché dal 2007 lo sci estivo sul ghiacciaio ha smesso di essere praticato. A questo si deve il recente - e non poco contestato - progetto di prolungamento dello storico impianto di risalita Fedaia-Pian dei Fiacconi, dismesso nel

2019, che da ipotesi progettuale dovrebbe attraversare il ghiacciaio e collegare gli impianti di risalita del versante trentino con quelli veneti che giungono a Punta Rocca. In ciò si inserisce l'intervento sempre più cospicuo di protezione, con teli geotessili, della neve d'annata da parte della Società Funivie Marmolada SpA. Sull'onda della pionieristica esperienza dei primi teli geotessili installati sulle Alpi svizzere dal 2004, e in Italia per la prima volta sul ghiacciaio del Presena nel 2008, la copertura protettiva del ghiacciaio in Marmolada è iniziata con la posa di 2000 m² di teli nell'estate 2013, ed è giunta nel 2020 ad una copertura di circa 38.000 m² in corrispondenza del percorso di discesa della pista da sci verso la fronte orientale di Serautia (figura 8). L'intervento di copertura, definito soluzione

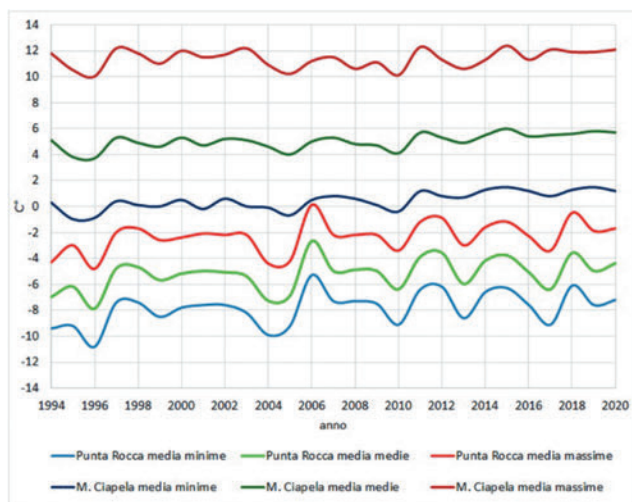
vantaggiosa non solo per la società funiviaria ma anche per l'ambiente, otterrebbe lo scopo di ridurre l'effetto dell'insolazione estiva e risparmiare il movimento di mezzi e l'uso di impianti d'innevamento, risparmiando circa tremila litri di gasolio e l'immissione di 3600 kg di anidride carbonica in atmosfera, oltre al risparmio di energia per addurre l'acqua necessaria all'innevamento programmato, stimato in circa 20.000 kwh. Questa procedura ovierebbe, almeno in parte, ai danni già indotti nella zona di accumulo del ghiacciaio dal movimento mezzi e neve per il ripascimento della pista da sci per cui scaturì anche una causa legale conclusasi con una condanna (Casanova, 2011, pag. 322) (6). Un intervento commentato da molti organi di stampa come operazione "salva

(5) https://www.elbec.it/it/blog/10_E-guerra-in-Marmolada.

(6) C. Maiolini, *Marmolada sfregiata? Una pista scavata nel ghiaccio, un coro di no: il ghiacciaio è una risorsa da tutelare*, <https://www2.muse.it/pubblicazioni/8/56a/NAMarmolada.pdf>.

Cambiamenti climatici

Fig. 7 - Andamento delle temperature in due stazioni meteorologiche situate in cima e ai piedi del massiccio della Marmolada (rispettivamente Punta Rocca e Malga Ciapèla). Pur con oscillazioni anche forti, si legge dall'andamento di questi valori come la tendenza degli ultimi 5 anni è al riscaldamento e ciò maggiormente in alta quota.



ghiacciaio" (7), senza considerare che la superficie interessata dai teli è ben altra cosa rispetto alla superficie complessiva del ghiacciaio (38.000 m² di teli in Marmolada corrispondono a meno del 3% della superficie complessiva del ghiacciaio). La stessa retorica salvifica si ritrova negli altri ghiacciai trentini interessati da questi interventi di protezione, che sul ghiacciaio del Presena sono cresciuti da 40.000 m² nel 2014 ai 100.000 m² dell'estate 2019 (8). A fare luce sull'efficacia relativa delle coperture geotessili per "salvare" i ghiacciai è l'articolo recentemente pubblicato dagli studiosi svizzeri Huss et al. (2021), in cui si

misura il volume di ghiaccio salvato ogni anno in Svizzera grazie alle coperture geotessili, corrispondenti a 300.000 m³ nel 2019: si tratta di una quantità "insignificante", pari allo 0,02% del ghiaccio da fusione annuale. Altro aspetto controverso è il costo dell'operazione: una cifra che oscilla tra 700.000 e 900.000 franchi svizzeri di investimenti effettuati nel 2019 per evitare la fusione di 0,18 km² di ghiaccio. Si tratta di interventi efficienti e proficui a scala locale per salvare la copertura nevosa di una pista da sci, ma insostenibili e costosissimi a scala maggiore: è stato calcolato che ricoprire tutti i ghiacciai svizzeri costerebbe

annualmente oltre un miliardo di franchi, e anche questa misura riuscirebbe solo a rallentare il ritiro, senza poterlo bloccare a lungo termine e senza considerare le ripercussioni sul paesaggio e sull'ambiente (9). Lo stesso Huss, forte dell'esperienza sui teli geotessili, si è convinto che il solo modo efficace di salvaguardare i ghiacciai sia la riduzione dell'emissione di gas serra, l'unico fattore in cui possiamo realmente intervenire. Almeno al momento, i teli geotessili hanno raggiunto lo scopo di garantire l'apertura autunnale anticipata degli impianti e delle piste da sci. Più che di provvidenziali interventi di salvataggio dei ghiacciai, si tratta di operazioni finalizzate al salvataggio di un settore economico già fortemente indiziato di insostenibilità per l'utilizzo di fondi pubblici e risorse idriche ed energetiche sempre maggiori (Hahn, 2004; Associazione Dislivelli, 2015; Varotto, 2020, pag. 132 ss., Legambiente, 2021), destinate a crescere ulteriormente in uno scenario climatico sempre più caldo.

In conclusione, è da citare come a questo tipo di interventi si è contrapposta in tempi recenti una filosofia diversa, incarnata da Guido Trevisan, ingegnere e gestore del Rifugio Pian dei Fiacconi ai piedi del ghiacciaio della Marmolada, promotore del documento *Marmolada 2020: per uno sviluppo sostenibile* (10), che ha visto l'adesione di Mountain Wilderness, di intellettuali e realtà associative. L'obiettivo del documento è rendere quel che resta del ghiacciaio ancora una volta "pioniere" di una nuova visione del turismo e dell'economia,

(7) Gli articoli che collegano l'installazione di teli geotessili con il "salvataggio" del ghiacciaio in rete sono molti, qui riportiamo solo alcuni stralci significativi: "Per cercare di rallentare la fusione del ghiacciaio Presena, ghiacciaio del gruppo della Presanella, in Trentino-Alto Adige, anche quest'anno sono stati stesi enormi teloni bianchi per proteggere il ghiaccio dal sole durante i mesi estivi" (<https://www.lifegate.it/teli-salvare-ghiacciaio-presena-scioglimento/>); "Una tecnica che, in 12 anni, ha permesso di ridurre del 52% l'ablazione ossia la perdita di massa da un ghiacciaio" (https://www.nonsprecare.it/teli-geotessili-per-salvare-ghiacciai?refresh_cens); "Teloni geotessili per preservare il ghiacciaio Presena. Enormi teli stesi al confine tra Valle Camonica e Val di Sole. Servono a contrastare l'arretramento della superficie dei ghiacci. In 12 anni ottenuta una riduzione dell'ablazione del 52%": https://www.repubblica.it/ambiente/2020/06/15/news/teloni_geotessili_per_preservare_il_ghiacciaio_presena-259266579/; <https://www.montagna.tv/36839/teli-salva-ghiacciaio-nel-futuro-della-marmolada/>.

(8) https://www.repubblica.it/ambiente/2020/06/15/news/teloni_geotessili_per_preservare_il_ghiacciaio_presena-259266579/.

(9) <https://www.slf.ch/it/news/2021/coprire-i-ghiacciai-e-efficace-ma-caro.html>.

(10) <https://gognablog.sherpa-gate.com/marmolada-2020-per-uno-sviluppo-sostenibile/>.

Fig. 8 - Operazioni di rimozione delle coperture geotessili alla fine della stagione estiva in prossimità della fronte di Serauta, quota 2700 m s.l.m.



Fig. 9 - Confronto tra il ghiacciaio ripreso nel 1915 (in alto) e nel 2018 (in basso). Le foto danno idea di quanto nella mappa di figura 3 è rappresentato in planimetria dai due estremi dei valori in legenda: blu scuro (1905) e celeste più chiaro (2018).



così come dalla Marmolada è partito, con il primo impianto di risalita costruito nel 1947 dalla ditta Graffer, il modello degli impianti di risalita e dello sci di massa, che raggiunge qui il suo apice tra gli anni Settanta e Ottanta per poi essere esportato nelle vicine vallate dolomitiche. Lo spunto a questa visione è stato fornito dalla chiusura nel 2019 della storica bidonvia Fedaia-Pian dei Fiacconi, dalla distruzione del rifugio da parte di una valanga, dall'esperienza pandemica che ha ridotto del 90% l'afflusso di turisti stranieri, ma ha lasciato spazio ad una fruizione alternativa di questi luoghi, garantendo ugualmente la sopravvivenza delle attività commerciali. In quest'ottica si inserisce anche il Museo di Geografia dell'Università di Padova, che dal 2019 ha trasformato l'annuale campagna di misura del ghiacciaio in un momento di formazione e comunicazione aperto alla partecipazione pubblica, inaugurando la prima esperienza di campagna glaciologica partecipata a livello nazionale (11). La crisi del ghiacciaio può essere l'occasione per avviare un modello di fruizione della montagna meno impattante ed energivoro, che esuli dalle logiche dei grandi numeri e del sovraffollamento favorito da impianti di risalita sempre più capaci e veloci, puntando su un turismo lento, stagionalmente distribuito, che faccia propri gli obiettivi di valorizzazione del patrimonio culturale, di sostenibilità climatica e rispetto dell'ambiente da estendere non solo alle aree "core", ma soprattutto alle aree "buffer" del Patrimonio UNESCO (Varotto, 2012).

Bibliografia

- ARPA Veneto, "Temi ambientali/Neve/I ghiacciai delle Dolomiti", Portale di ARPA

(11) <https://www.musei.unipd.it/it/museo-geografia-marmolada-2020>.

Cambiamenti climatici

- Veneto, <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/neve/menu-vecchio/i-ghiacciai-delle-dolomiti>, 2004, consultato nel 2005.
- ARPA Veneto, "WEBGIS Valanghe: Portale Cartografico del Sistema Informativo Valanghe Veneto", 2020, <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/neve/webgis-valanghe>, consultato in giugno 2021.
 - Associazione Dislivelli, *Cara neve: ma quanto ci costi?*, 2015.
 - <http://www.dislivelli.eu/blog/cara-neve-ma-quanto-ci-costi.html>.
 - A. Bosellini, *Geologia delle Dolomiti*, Athesia, Trento, 1996.
 - A. Carton e M. Varotto (a cura di), *Marmolada*, Cierre edizioni-Dipartimento di Geografia "G. Morandini", Università di Padova, 2011.
 - L. Casanova, "L'equilibrio compromesso", in A. Carton e M. Varotto (a cura di), *Marmolada*, Cierre edizioni-Dipartimento di Geografia "G. Morandini", Università di Padova, 2011, pagg. 314-324.
 - G. Corna Pellegrini, *Pianeta blu. Paesaggi e atmosfere nel mondo*, Unicopli, Milano 2009.
 - T.M. Lillesand, R.M. Kiefer, J.W. Chipman, *Remote sensing & image interpretation*, 7th ed., Wiley, 2015.
 - P. Gianolla, *Il libro di roccia*, in A. Carton e M. Varotto (a cura di), *Marmolada*, Cierre edizioni-Dipartimento di Geografia "G. Morandini" Università di Padova, 2011, pagg. 20-47.
 - F. Hahn, *Innevamento artificiale nelle Alpi*, 2004.
 - "Una relazione specifica", Cipra, <https://www.cipra.org/it/pubblicazioni/2709>.
 - M. Huss, U. Schwyn, A. Bauder, D. Farinotti, *Quantifying the overall effect of artificial glacier melt reduction in Switzerland, 2005-2019*, in *Cold Regions Science and Technology*, 184, 2021.
 - Legambiente, C. Apostolo, V. Bonardo, E. Cozzarini, P. Fagioli, E. Querro (a cura di), "Nevediversa 2021. Il turismo invernale nell'epoca della transizione ecologica tra conflitti, discordanze e preoccupazioni, ma anche buone pratiche e nuove speranze", https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/03/NeveDiversa_2021.pdf.
 - U. Mattana e M. Varotto, "Il ritiro del ghiacciaio della Marmolada nell'ultimo trentennio", in *Le Alpi Venete*, 64,1, 2010, pagg. 68-75.
 - M. Meneghel, "Storia di un ghiacciaio", in A. Carton e M. Varotto (a cura di), *Marmolada*, Cierre edizioni-Dipartimento di Geografia "G. Morandini" Università di Padova, 2011, pagg. 76-97.
 - I. Santin, R.R. Colucci, M. Žebre, M. Pavan, A. Cagnati, E. Forte, "Recent evolution of Marmolada glacier (Dolomites, Italy) by mean of ground and airborne GPR surveys", in *Remote Sensing of Environment*, 235, 2019.
 - C. Smiraglia e G. Diolaiuti, *Il Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani*, Ev-K2-CNR Edizioni, Bergamo 2015.
 - D. Spano, V. Mereu, V. Bacciu, S. Marras, A. Trabucco, M. Adinolf, G. Barbato, F. Bosello, M. Breil, M.V. Chiriaco, G. Coppini, A. Essenfelder, G. Galluccio, T. Lovato, S. Marzi, S. Masina, P. Mercogliano, Mysiak, S. Noce, J. Pal, A. Reder, G. Rianna, A. Rizzo, M. Santini, E. Sini, A. Staccione, V. Villani, J.M. Zavatarelli, *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia*, 2020.
 - M. Varotto, "Oltre il recinto Unesco: le sfide del territorio dolomitico", in M. Varotto, B. Castiglioni, *Di chi sono le Alpi? Appartenenze politiche, economiche e culturali nel mondo alpino contemporaneo*, Padova University Press, Padova, 2012, pagg. 285-294.
 - M. Varotto, *Montagne di mezzo. Una nuova geografia*, Einaudi, Torino, 2020.
 - G. Zanon, "L'attuale tendenza evolutiva dei ghiacciai delle Alpi italiane", in *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 8, 1985, pagg. 85-96.
 - G. Zanon, *I ghiacciai del Veneto*, Regione Veneto, Canova editore, Dosson di Casier (TV), 1990.
- Si ringrazia il Geoportale Nazionale e il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare per la cessione dei dati LiDAR ripresi nel 2010 sulla Marmolada**