

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali
Università degli Studi di Padova - Viale dell'Università, 16 - 35020 - Legnaro, Padova
luca.carturan@unipd.it

Istituto di Scienze Polari
Consiglio Nazionale delle Ricerche - Via Torino, 155 – 30172 Mestre VENEZIA

BILANCIO DI MASSA GEODETICO DEI GHIACCIAI DEL TRENTINO TRA IL 2015 E IL 2022

RELAZIONE FINALE



Responsabile: Dott. Luca Carturan
Elaborazioni a cura di: Dott. Fabrizio de Blasi

Contenuti della relazione

Executive summary	pag. 3
1. Metodologia di lavoro	pag. 4
1.1. Valutazione dell'errore residuo in area stabile	pag. 4
1.2. Calcolo del bilancio di massa geodetico	pag. 4
2. Risultati	pag. 5
2.1. Gruppo del Cevedale	pag. 6
2.2. Gruppo della Presanella	pag. 7
2.3. Gruppo dell'Adamello	pag. 8
2.4. Gruppo di Brenta	pag. 9
2.5. Gruppo della Marmolada	pag. 10
2.6. Gruppo delle Pale di San Martino	pag. 11
3. Osservazioni conclusive	pag. 12
Riferimenti bibliografici	pag. 14
Appendice	pag. 15

Executive summary

Questa relazione descrive la metodologia di lavoro utilizzata per la quantificazione del bilancio geodetico tra gli anni 2015 e il 2022 sui ghiacciai della Provincia Autonoma di Trento, e i risultati derivanti dalle elaborazioni.

I dati utilizzati provengono da rilievi aerei con sensori ortofotografici realizzati dalla Provincia Autonoma di Trento (PAT) nei mesi di settembre del 2015 e del 2022; sono state usate le perimetrazioni dei singoli ghiacciai eseguite da Luca Carturan (Università degli studi di Padova), Fabrizio de Blasi (Istituto di Scienze Polari del CNR) e Roberto Seppi (Università di Pavia).

I metodi di calcolo utilizzati sono codificati nella recente letteratura scientifica internazionale e in particolare rispettano le prescrizioni del World Glacier Monitoring Service, con sede a Zurigo in Svizzera. La procedura ha consentito di caratterizzare dal punto di vista qualitativo i due modelli digitali del terreno e quantificare l'errore residuo derivante dal loro confronto multi-temporale.

Nel complesso i due modelli digitali sono risultati di qualità adeguata per il calcolo del bilancio geodetico nel periodo considerato, visto che nella gran parte dei casi l'errore residuo è sub-metrico mentre le variazioni altimetriche cui sono state soggette le aree glacializzate sono state di svariati metri, o decine di metri.

Nel periodo analizzato il bilancio di massa è risultato negativo per tutti i ghiacciai analizzati, con una considerevole accelerazione nel tasso di perdita di massa rispetto al periodo antecedente al 2015. Le perdite di massa sono avvenute a tutte le quote, anche a quelle più elevate. Particolarmente penalizzati risultano essere gli apparati glaciali più estesi e con superficie semi pianeggiante, collocati quasi interamente al di sotto del limite delle nevi persistenti, particolarmente numerosi ed estesi sul gruppo dell'Adamello.

Anche se i piccoli ghiacciai dei gruppi di Brenta, Pale e Marmolada beneficiano di condizioni topografiche e microclimatiche localmente favorevoli (sovralimentazione valanghiva, riparo orografico e copertura detritica), nel contesto climatico attuale o in un futuro ancora più caldo tutti i ghiacciai sono destinati a scomparire o a perdere gran parte della massa residua.

Viste le rapide variazioni glaciali in atto, e considerando le indicazioni degli organismi internazionali che coordinano questo tipo di monitoraggi, è auspicabile che questa tipologia di monitoraggio possa proseguire anche in futuro con cadenza almeno quinquennale.

1. Metodologia di lavoro

1.1. Valutazione dell'errore residuo in area stabile

Per valutare la qualità dei modelli digitali del terreno (DEM) rilevati negli anni 2015 e 2022 è stato utilizzato un approccio che prevede la quantificazione delle differenze di quota tra i due DEM in zone stabili, al di fuori dei ghiacciai. Ipotizzando che nel periodo di tempo dal 2015 al 2022 queste zone non abbiano subito modificazioni altimetriche apprezzabili, è possibile ricavare l'errore residuo medio e la sua deviazione standard a partire dal raster di differenza di quota tra i due DEM, detto 'Dem of differences' (DoD).

Ai fini di questa valutazione, le aree stabili sono state identificate come porzioni di territorio coperte da entrambi i DEM, esterne alla massima estensione dei ghiacciai nel periodo considerato, e non soggette a modificazioni altimetriche dovute a processi geomorfologici (ad esempio frane o colate detritiche) oppure all'accumulo locale di neve in anni particolarmente nevosi. Queste zone sono state identificate sul DoD mediante riconoscimento di anomalie positive o negative spazialmente aggregate.

Sono state escluse da questa analisi anche le zone troppo ripide (pendenze superiori a 75°), dove la neve non può accumularsi né trasformarsi in firn o ghiaccio, che non sono quindi rappresentative delle aree glacializzate.

Le differenze di quota in area stabile tra il DEM 2022 e il DEM 2015 hanno tipicamente distribuzione di tipo gaussiano. Il valore medio di queste differenze varia tra -0.15 m (gruppo del Brenta) e 0.16 m (Pale di S. Martino), con una deviazione standard compresa tra 0.19 m (Presanella) e 0.33 m (gruppo della Marmolada).

L'errore medio è stato sottratto dal DoD prima di procedere ai calcoli di bilancio geodetico sui ghiacciai, mentre la deviazione standard esprime l'errore residuo sul singolo pixel (risoluzione 0.5 m). La deviazione standard, quindi, dà un valore di incertezza valido per zone molto piccole, mentre all'aumentare dell'estensione spaziale queste differenze tendono in larga misura a compensarsi. Va inoltre considerato che tale errore esprime l'incertezza residua sull'intero periodo 2015-2022, e quindi ai fini del calcolo del bilancio geodetico medio annuo va diviso per il numero di anni, cioè sette.

1.2. Calcolo del bilancio di massa geodetico

Il bilancio di massa geodetico medio annuale per i singoli ghiacciai, in metri di equivalente d'acqua, è stato calcolato con la relazione:

$$\dot{M} = \frac{\Delta V \cdot \rho}{\bar{A}} \cdot t^{-1}$$

dove la variazione volumetrica ΔV , moltiplicata per una densità ρ pari a 850 kg/m³ (Huss, 2013), viene divisa per l'area media \bar{A} (semisomma tra area 2015 e area 2022) e il numero di anni tra il 2015 e il 2022, cioè 7.

In una fase di riduzione areale come quella attuale, la variazione volumetrica è data generalmente da:

$$\Delta V = \overline{\Delta z} \cdot A_i$$

cioè si moltiplica la variazione altimetrica media tra 2015 e il 2022 ($\overline{\Delta z}$) per l'area iniziale del ghiacciaio A_i , cioè quella del 2015. Nel caso specifico analizzato si sono però riscontrati alcuni casi in cui, localmente, il perimetro del 2022 eccedeva quello del 2015. Non si è quindi utilizzata l'area iniziale (2015) per i calcoli di variazione volumetrica, ma è stata fatta un'unione (merge) delle due aree 2015 e 2022.

2. Risultati

I risultati del lavoro vengono presentati sotto forma di tabelle riassuntive che riportano la variazione altimetrica media e il bilancio geodetico per ogni corpo glaciale, suddivisi per gruppo montuoso o sottogruppo. Vengono brevemente commentati i risultati più interessanti. Si rimanda all'Appendice per le figure con la distribuzione spaziale delle differenze di quota. In Figura 1 si riporta un esempio di DoD nell'area della Presanella.

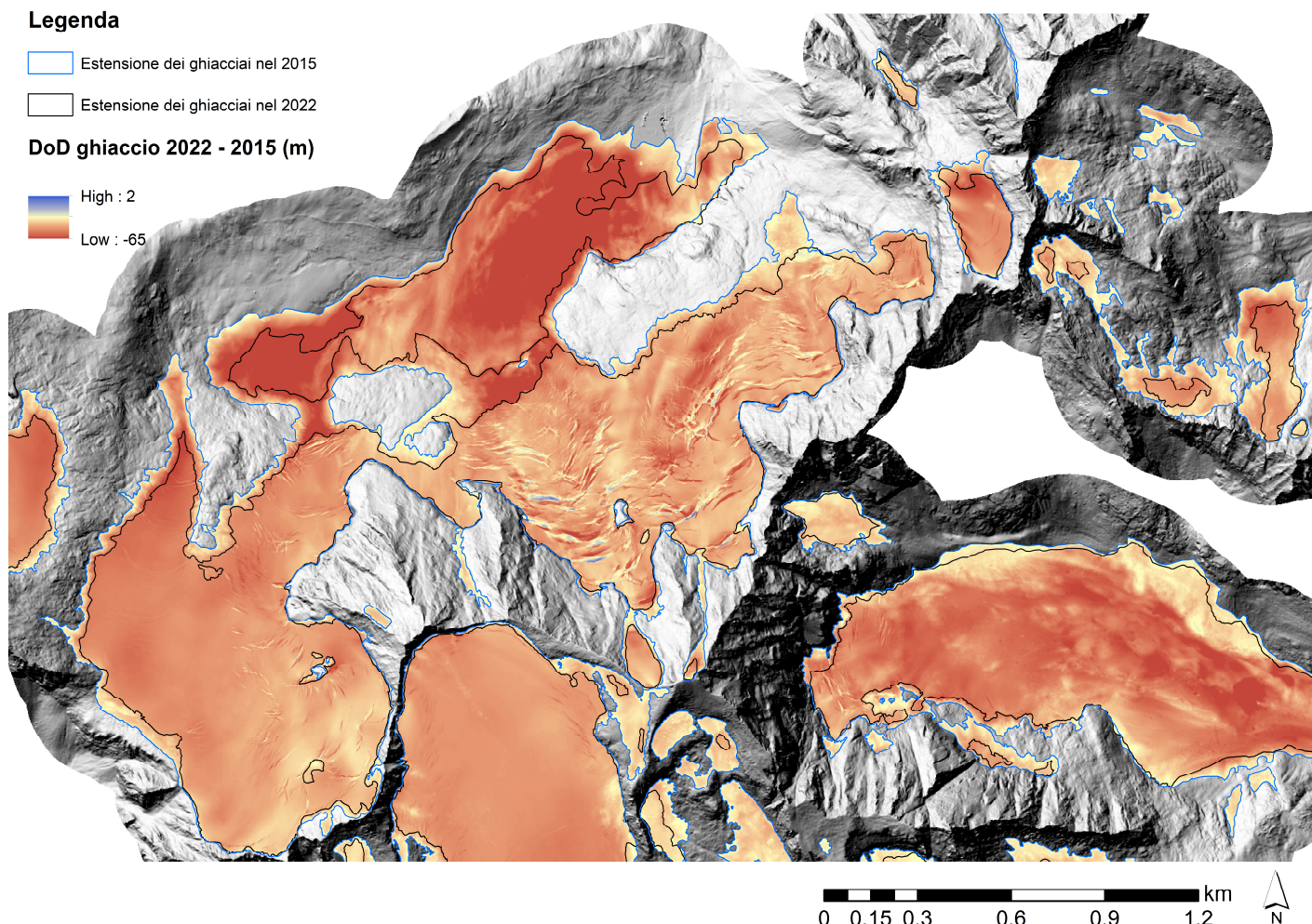


Figura 1 - Variazioni di quota tra gli anni 2015 e il 2022 sui ghiacciai attorno a cima Presanella.

I colori tendenti al rosso scuro indicano aree che hanno subito forte assottigliamento, superiore a 21 m. Queste aree si trovano solitamente sui settori inferiori dei ghiacciai, in particolare su quelli di maggiori dimensioni, con alimentazione diretta, e con lingue vallive ormai stagnanti e prive di alimentazione. Il comportamento è simile quello dei lembi di ghiaccio morto ormai abbandonati dai ghiacciai in fase di ritiro.

I colori tendenti al rosso più chiaro e al giallo indicano invece assottigliamenti più modesti, inferiori a 6 m, e si trovano nelle zone superiori dei ghiacciai oppure sui corpi glaciali più piccoli e in localizzazione riparata. Queste zone si stanno assottigliando più lentamente e indicano che persiste localmente una certa alimentazione, anche se insufficiente a garantire un bilancio di massa in pareggio, oppure si tratta di zone di alta quota soggette ad assottigliamento dovuto alla dinamica del ghiacciaio. In alcuni casi le perdite di massa sono ridotte a causa di processi locali come accumulo di detrito o di neve da valanga, oppure ombreggiamento da parte di ripide pareti rocciose.

2.1. Gruppo del Cevedale

Tabella 1 - Variazioni altimetriche totali mediate sulla superficie dei singoli ghiacciai del gruppo del Cevedale e loro bilancio geodetico medio annuo tra il 2015 e il 2022. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Codice CGI	Corpo glaciale	Status 2022	Superficie Merge 2022-2015 (ha)	Var. altimetrica media 2015-2022 (m)		Bilancio geodetico dal 2015 al 2022 (m w.e.)	
				media	errore	media	errore
705.0	Saent	Esistente	5.6	-1.41	± 0.14	-0.19	± 0.02
685.0	Tre Signori	Esistente	8.1	-2.31	± 0.16	-0.32	± 0.02
692.0	Vioz w	Esistente	12.4	-4.19	± 0.22	-0.62	± 0.03
696.0	Vallenaia	Esistente	15.8	-4.36	± 0.20	-0.63	± 0.02
693.0	Vioz centrale	Esistente	13.1	-4.48	± 0.20	-0.71	± 0.02
697.0	Rossa	Esistente	84.2	-6.61	± 0.20	-0.89	± 0.02
690.0	Taviela	Esistente	40.1	-6.31	± 0.22	-0.91	± 0.03
686.0	Villacorna	Esistente	13.3	-5.93	± 0.22	-0.92	± 0.03
689.0	Cadini	Esistente	17.3	-6.07	± 0.22	-0.93	± 0.03
687.0	Valpiana	Esistente	42.0	-6.62	± 0.22	-1.04	± 0.03
698.0	Venezia	Esistente	128.2	-8.02	± 0.20	-1.05	± 0.02
710.0	Sternai	Esistente	12.9	-8.25	± 0.16	-1.14	± 0.02
699.0	La mare	Esistente	364.0	-8.75	± 0.20	-1.16	± 0.02
691.0	Saline	Esistente	27.5	-8.73	± 0.22	-1.16	± 0.03
688.0	Orsi	Esistente	69.0	-9.44	± 0.22	-1.36	± 0.03
701.0	Careser	Esistente	145.9	-11.70	± 0.14	-1.91	± 0.02
711.0	Sassoni Sternai	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto

In media l'intera superficie glacializzata ha perso tra il 2015 e il 2022 8.4 m di spessore, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -1.16 m w.e. Il tasso annuo di perdita di massa è aumentato del 41% rispetto al periodo 2003-2015, indicando una forte accelerazione della fusione glaciale dopo il 2015. Tutti i ghiacciai hanno avuto bilancio negativo.

Il ghiacciaio del Careser si conferma quello con bilancio più negativo, ma forte perdite di massa si notano anche sui ghiacciai degli Orsi, Saline, La Mare, Sternai, Venezia e Valpiana. Tra questi si annoverano ghiacciai che hanno tuttora un'area piuttosto estesa, come quello de La Mare, ma che sono privi di copertura detritica e ombreggiamento da parte del rilievo circostante.

I corpi glaciali interessati da minore fusione sono quelli di Saent, Tre Signori, Vioz Occidentale e Vallenaia. Questi ghiacciai o glacionevati si caratterizzano soprattutto per l'abbondante copertura detritica, che li protegge efficacemente dall'irraggiamento solare e li isola termicamente dall'atmosfera, dove il detrito è più spesso.

Il ghiacciaio Sassoni di Sternai, ancora esistente nel 2015, può essere considerato del tutto estinto.

2.2. Gruppo della Presanella

Tabella 2 - Variazioni altimetriche totali mediate sulla superficie dei singoli ghiacciai del gruppo della Presanella e loro bilancio geodetico medio annuo tra il 2015 e il 2022. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Codice CGI	Corpo glaciale	Status 2022	Superficie Merge 2022-2015 (ha)	Var. altimetrica media 2015-2022 (m)		Bilancio geodetico dal 2015 al 2022 (m w.e.)	
				media	errore	media	errore
PRE41	Ricolonda	Esistente	4.3	-2.08	± 0.19	-0.28	± 0.02
668.0	Passo Cagalatin	Esistente	2.7	-2.21	± 0.19	-0.30	± 0.02
669.0	Corno Giner	Esistente	4.7	-2.40	± 0.19	-0.33	± 0.02
666.0	Baselga	Esistente	1.8	-2.69	± 0.19	-0.37	± 0.02
642.0	Quattro cantoni	Esistente	4.2	-2.57	± 0.19	-0.46	± 0.02
676.0	Quota 3165	Esistente	6.4	-3.66	± 0.19	-0.49	± 0.02
667.0	Caldoni	Esistente	4.7	-3.00	± 0.19	-0.55	± 0.02
679.0	Cercen n	Esistente	10.9	-3.78	± 0.19	-0.56	± 0.02
672.0	Corni Venezia	Esistente	19.1	-4.10	± 0.19	-0.60	± 0.02
674.0	Cima Palu	Esistente	8.0	-4.37	± 0.19	-0.61	± 0.02
643.0	Monte Nero	Esistente	12.4	-3.53	± 0.19	-0.66	± 0.02
641.0	Nardis E	Esistente	10.9	-5.12	± 0.19	-0.76	± 0.02
681.0	Busazza E	Esistente	49.5	-6.56	± 0.19	-0.93	± 0.02
684.0	Presena W	Esistente	33.5	-6.15	± 0.19	-0.94	± 0.02
675.0	Scarpaco W	Esistente	12.6	-6.60	± 0.19	-1.01	± 0.02
682.0	Busazza W	Esistente	18.1	-7.38	± 0.19	-1.09	± 0.02
646.0	Cornisello S	Esistente	17.5	-6.47	± 0.19	-1.17	± 0.02
683.0	Presena E	Esistente	48.0	-8.17	± 0.19	-1.20	± 0.02
677.0	Passo Stavel	Esistente	7.4	-9.23	± 0.19	-1.30	± 0.02
644.0	Amola	Esistente	98.5	-10.33	± 0.19	-1.36	± 0.02
678.0	Presanella	Esistente	265.7	-10.36	± 0.19	-1.40	± 0.02
640.0	Nardis W	Esistente	135.9	-10.66	± 0.19	-1.51	± 0.02
647.0	Cornisello N	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto

In media l'intera superficie glacializzata ha perso tra il 2015 e il 2022 8.8 m di spessore, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -1.24 m w.e. Si tratta quasi di un raddoppiamento nel tasso annuo di perdita di massa, che rispetto al periodo 2003-2015 risulta del 90% più negativo. Rispetto al gruppo del Cevedale, quindi, i ghiacciai della Presanella hanno subito un'accelerazione più forte della fusione rispetto al periodo pre-2015. Tutti i ghiacciai hanno avuto bilancio negativo.

Anche in questo caso i ghiacciai con maggiori perdite di massa sono quelli di maggiori dimensioni, in particolare Nardis Occidentale, Presanella, Amola e Presena Orientale. Tra i ghiacciai più grandi, quello con bilancio meno negativo è il Busazza Orientale, che è in parte coperto di detrito ma soprattutto è ben ombreggiato dal rilievo circostante e fortemente alimentato dalle valanghe.

Tutti i corpi glaciali con bilancio meno negativo risultano essere glacionevati o piccoli ghiacciai totalmente coperti da detrito, in gran parte esposti a nord e fortemente alimentati da valanghe. Nel periodo considerato è avvenuta l'estinzione completa del piccolo ghiacciaio Settentrionale di Cornisello.

2.3. Gruppo dell'Adamello

Tabella 3 - Variazioni altimetriche totali mediate sulla superficie dei singoli ghiacciai del gruppo dell'Adamello e loro bilancio geodetico medio annuo tra il 2015 e il 2022. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Codice CGI	Corpo glaciale	Status 2022	Superficie Merge 2022-2015 (ha)	Var. altimetrica media 2015-2022 (m)		Bilancio geodetico dal 2015 al 2022 (m w.e.)	
				media	errore	media	errore
636.0	Crozzon Fargorida W	Esistente	3.0	-2.91	± 0.20	-0.42	± 0.02
626.0	Cima Danerba	Esistente	5.0	-2.60	± 0.32	-0.43	± 0.04
621.0	Carè Alto SW	Esistente	6.4	-3.22	± 0.20	-0.51	± 0.02
620.0	Carè Alto w	Esistente	7.4	-3.50	± 0.20	-0.51	± 0.02
624.0	Cop di Casa	Esistente	2.8	-3.19	± 0.32	-0.53	± 0.04
627.0	Cima Bissina N	Esistente	4.2	-3.67	± 0.32	-0.62	± 0.04
619.0	Passo Folletto W	Esistente	27.9	-4.64	± 0.20	-0.63	± 0.02
631.0	Carè Alto S	Esistente	3.5	-4.33	± 0.20	-0.70	± 0.02
616.0	Corno Cavento SW	Esistente	9.4	-5.35	± 0.20	-0.86	± 0.02
625.0	Cop di Breguzzo	Esistente	4.7	-5.16	± 0.32	-1.02	± 0.04
ADA21	Vescovo	Esistente	3.5	-6.54	± 0.32	-1.05	± 0.04
618.0	Monte Folletto SW	Esistente	7.1	-5.82	± 0.20	-1.06	± 0.02
614.0	Val di Fumo	Esistente	21.7	-6.24	± 0.20	-1.08	± 0.02
632.0	Carè Alto E	Esistente	14.3	-8.35	± 0.20	-1.21	± 0.02
617.0	Monte Folletto NW	Esistente	10.8	-7.82	± 0.20	-1.24	± 0.02
635.0	Fargorida	Esistente	39.6	-8.92	± 0.20	-1.46	± 0.02
633.0	Niscli	Esistente	25.0	-9.87	± 0.20	-1.73	± 0.02
639.0	Mandrone	Esistente	1570.6	-13.90	± 0.20	-1.79	± 0.02
634.0	Lares	Esistente	406.7	-12.87	± 0.20	-1.79	± 0.02
637.0	Lobbia	Esistente	580.1	-13.64	± 0.20	-1.82	± 0.02
638.0	Lobbia Alta	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto

Come già osservato nel periodo tra il 2003 e il 2015, i tassi di riduzione altimetrica e di bilancio geodetico sul gruppo dell'Adamello sono sensibilmente superiori rispetto a Cevedale e Presanella. In media l'intera superficie glacializzata ha perso tra il 2015 e 2022 13.2 m di spessore, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -1.75 m w.e. Si tratta di un aumento del 73% nel tasso annuo di perdita di massa, rispetto al periodo antecedente al 2015.

Qui più che altrove è molto evidente il fatto che i ghiacciai con bilancio più negativo sono quelli di dimensioni maggiori, mentre i corpi glaciali più piccoli hanno bilanci meno negativi. Le forti perdite di massa subite dai ghiacciai più estesi dipendono dalle loro caratteristiche geometriche, e in particolare dal fatto che esistono ancora ampie aree glacializzate semi pianeggianti a quote piuttosto basse, sistematicamente sotto il limite delle nevi e quindi con alimentazione nulla o trascurabile, che fondono in-situ.

A differenza dei ghiacciai più piccoli e/o ripidi, che scompaiono o si ritirano rapidamente a quote più elevate o in zone protette da pareti rocciose e alimentate da valanghe, queste aree glaciali a scarsa pendenza sono ancora

piuttosto spesse e questo spiega la loro persistenza nonostante i forti tassi di ablazione (Appendice 3). Superficie semipianeggiante, scarso range altimetrico, elevati spessori nella parte medio-bassa del ghiacciaio, forti assottigliamenti su gran parte della superficie, sono tutti elementi di elevata vulnerabilità e sensibilità climatica per questi ghiacciai (Carturan et al., 2020).

Il piccolo corpo glaciale della Lobbia Alta risulta essere totalmente estinto nel periodo considerato.

2.4. Gruppo di Brenta

Tabella 4 - Variazioni altimetriche totali mediate sulla superficie dei singoli ghiacciai del gruppo di Brenta e loro bilancio geodetico medio annuo tra il 2015 e il 2022. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Codice CGI	Corpo glaciale	Status 2022	Superficie Merge 2022-2015 (ha)	Var. altimetrica media 2015-2022 (m)		Bilancio geodetico dal 2015 al 2022 (m w.e.)	
				media	errore	media	errore
BRE35	Sassara	Esistente	2.0	-1.15	± 0.19	-0.14	± 0.02
BRE30	Pestacapre	Esistente	2.3	-1.41	± 0.19	-0.18	± 0.02
BRE29	Val Gelada	Esistente	6.5	-1.64	± 0.19	-0.20	± 0.02
BRE34	Preson	Esistente	2.8	-2.25	± 0.19	-0.28	± 0.02
660.0	Sacco	Esistente	5.0	-2.89	± 0.19	-0.36	± 0.02
659.0	Dodici Apostoli	Esistente	6.7	-3.74	± 0.19	-0.52	± 0.02
649.0	Vallesinella	Esistente	7.2	-4.16	± 0.19	-0.56	± 0.02
652.0	Brentei	Esistente	3.9	-4.59	± 0.19	-0.63	± 0.02
658.0	Pra Fiori	Esistente	6.5	-4.28	± 0.19	-0.75	± 0.02
656.0	Camosci	Esistente	23.2	-5.57	± 0.19	-0.76	± 0.02
654.0	Bocca Brenta	Esistente	4.0	-3.83	± 0.19	-0.78	± 0.02
653.0	Fulmini	Esistente	8.5	-5.47	± 0.19	-0.78	± 0.02
651.0	Brenta Superiore	Esistente	3.5	-4.92	± 0.19	-0.86	± 0.02
650.0	Brenta Inferiore	Esistente	16.6	-5.47	± 0.19	-0.93	± 0.02
661.0	Ambiez	Esistente	10.2	-7.50	± 0.19	-0.96	± 0.02
655.0	Crozzon	Esistente	10.9	-6.76	± 0.19	-1.20	± 0.02
657.0	Agola	Esistente	19.6	-10.97	± 0.19	-1.55	± 0.02
662.0	Tosa Alta	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto
663.0	Tosa Bassa	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto
664.0	Roma	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto	Estinto

In media l'intera superficie glacializzata ha perso 5.7 m di spessore tra il 2015 e il 2022, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.83 m w.e. Anche in questo caso c'è stata una forte accelerazione del tasso di riduzione dei ghiacciai, con un bilancio di massa che mediamente è risultato dell'80% più negativo rispetto al periodo pre-2015. Come già osservato in precedenza, sul gruppo di Brenta il tasso di riduzione è sensibilmente inferiore rispetto ai vicini gruppi dell'Adamello e Presanella, perché i corpi glaciali residui sono di piccole dimensioni e localizzati in condizioni topografiche che favoriscono ombreggiamento e alimentazione valanghiva.

Anche in questo caso, i ghiacciai di dimensioni maggiori sono quelli soggetti a bilanci di massa mediamente più negativi, essendo la loro superficie ancora troppo estesa al di fuori dei siti più favorevoli per ombreggiamento e

alimentazione valanghiva, nonché priva di copertura detritica (ad esempio sul ghiacciaio d'Agola). Un'importante eccezione è costituita dal ghiacciaio dei Camosci, attualmente il più esteso del gruppo di Brenta, che ha un bilancio leggermente meno negativo della media in virtù di un buon ombreggiamento, alimentazione da valanghe e soprattutto estesa copertura di detrito.

Nel periodo in oggetto tre corpi glaciali, già fortemente ridotti a placche irregolari nel periodo precedente al 2015, si sono estinti completamente: Vedretta Roma, Tosa Alta e Tosa Bassa.

2.5. Gruppo della Marmolada

Tabella 5 - Variazioni altimetriche totali mediate sulla superficie dei singoli ghiacciai del gruppo della Marmolada e loro bilancio geodetico medio annuo tra il 2015 e il 2022. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Codice CGI	Corpo glaciale	Status 2022	Superficie Merge 2022-2015 (ha)	Var. altimetrica media 2015-2022 (m)		Bilancio geodetico dal 2015 al 2022 (m w.e.)	
				media	errore	media	errore
946.0	Uomo	Esistente	8.4	-2.91	± 0.45	-0.38	± 0.05
942a	Placche Vernel	Esistente	2.0	-3.07	± 0.20	-0.57	± 0.02
945.0	Vernale	Esistente	2.5	-3.16	± 0.20	-0.57	± 0.02
943.0	Vernel	Esistente	4.2	-5.15	± 0.20	-0.82	± 0.02
942.0	Marmolada W	Esistente	22.1	-6.29	± 0.20	-0.92	± 0.02
941.0	Marmolada Principale	Esistente	134.6	-7.58	± 0.20	-1.07	± 0.02

In media l'intera superficie glacializzata ha perso 7.0 m di spessore tra il 2015 e il 2022, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -1.00 m w.e. Il tasso di riduzione è più che raddoppiato rispetto al periodo precedente al 2015. Anche nel gruppo della Marmolada i ghiacciai più estesi presentano bilancio più negativo rispetto a quelli più piccoli, in questo caso ridotti a placche alimentate da valanghe e fortemente ombreggiate.

Il ghiacciaio Principale della Marmolada ha subito un'ulteriore consistente riduzione areale lungo tutto il suo margine inferiore, come già osservato tra il 2003 e il 2015. Tuttavia nel periodo successivo al 2015 si osservano riduzioni areali anche sul settore superiore, in particolare nella calotta di Punta Penia e sul settore nei pressi di Punta Rocca, da cui si è staccata l'ice avalanche del luglio 2022.

Questo comportamento è coerente con l'accelerazione nel tasso di fusione, così come quantificata dai bilanci geodetici, e testimonia una transizione verso condizioni più critiche per la sopravvivenza del ghiacciaio, visto che se la tendenza fosse verso il raggiungimento di un nuovo equilibrio, il margine superiore non dovrebbe modificarsi (Pelto, 2006 e 2010).

Rispetto al report precedente, è stato inserito anche il piccolo ghiacciaio di cima Uomo, che sebbene appaia estinto in realtà persiste sotto una spessa coltre di detrito. Si tratta tuttavia di una massa glaciale totalmente inattiva.

2.6. Gruppo delle Pale di San Martino

Tabella 6 - Variazioni altimetriche totali mediate sulla superficie dei singoli ghiacciai del gruppo delle Pale di San Martino e loro bilancio geodetico medio annuo tra il 2015 e il 2022. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Codice CGI	Corpo glaciale	Status 2022	Superficie Merge 2022-2015 (ha)	Var. altimetrica media 2015-2022 (m)		Bilancio geodetico dal 2015 al 2022 (m w.e.)	
				media	errore	media	errore
PAL04	Busa camosci	Esistente	3.8	-3.84	± 0.22	-0.51	± 0.03
PAL05b	Vezzana	Esistente	1.7	-3.74	± 0.22	-0.52	± 0.03
948.0	Pala	Esistente	4.1	-5.72	± 0.22	-0.74	± 0.03
947.0	Travignolo	Esistente	20.4	-6.76	± 0.22	-0.94	± 0.03
950.0	Fradusta	Esistente	5.7	-5.97	± 0.22	-1.01	± 0.03

In media l'intera superficie glacializzata ha perso 6.1 m di spessore tra il 2015 e il 2022, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.86 m w.e. Questo valore è simile a quello dei ghiacciai nel gruppo di Brenta, e come in quel caso c'è stato un aumento dell'80% nel tasso di perdita di massa. E' molto evidente anche in questo caso la distinzione tra corpi glaciali localizzati in siti favorevoli all'accumulo di neve da valanga e con protezione orografica, che presentano valori di bilancio meno negativi (Busa dei Camosci, Vezzana, Pala) e il residuo glaciale della Fradusta, che pur essendo esposto a nord è a prevalente alimentazione diretta e localizzato a quota piuttosto bassa, inferiore all'attuale limite delle nevi persistenti (Appendice 6).

Il comportamento del ghiacciaio del Travignolo è notevole, perché il suo bilancio medio annuo è passato da -0.33 m w.e. nel periodo precedente al 2015 a -0.94 m w.e. nel periodo post-2015, quasi triplicando il tasso di perdita di massa, nonostante l'esposizione favorevole e la forte alimentazione valanghiva.

3. Osservazioni conclusive

In base ai risultati dei calcoli di bilancio geodetico, il periodo compreso tra gli anni 2015 e 2022 è stato caratterizzato da un'accelerazione del tasso di fusione dei ghiacciai nella provincia di Trento. L'aumento del tasso di perdita di massa varia dal 41% nel gruppo del Cevedale al 104% nel gruppo della Marmolada (tasso più che raddoppiato) rispetto al periodo compreso tra il 2003 e il 2015. Tutti i ghiacciai analizzati hanno avuto un bilancio negativo, a differenza del periodo precedente quando alcuni piccoli glacionevati alimentati da valanghe avevano beneficiato di annate particolarmente nevose come il 2009, 2013 e 2014. La tabella che segue fornisce un riepilogo dei risultati, riportando i valori medi per gruppo montuoso e per l'intera superficie glacializzata.

Tabella 7 - Valori medi di variazione altimetrica e bilancio geodetico medio annuo tra il 2015 e il 2022. I gruppi montuosi sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Gruppo montuoso	Superficie Merge 2022-2015 (ha)	Var. altimetrica media 2015-2022 (m)		Bilancio geodetico dal 2015 al 2022 (m w.e.)	
		media	errore	media	errore
Brenta	143.2	-5.67	± 0.19	-0.83	± 0.02
Pale	35.8	-6.06	± 0.22	-0.86	± 0.03
Marmolada	173.7	-7.01	± 0.33	-1.00	± 0.04
Cevedale	972.8	-8.38	± 0.21	-1.16	± 0.03
Presanella	780.8	-8.82	± 0.19	-1.24	± 0.02
Adamello	2754.7	-13.17	± 0.26	-1.75	± 0.03
Intera area glacializzata	4861.1	-11.02	± 0.24	-1.49	± 0.03

Il valore di bilancio geodetico medio annuo per l'intera area glacializzata della Provincia di Trento (-1.49 m w.e.) risente della distribuzione spaziale delle superfici glaciali, in gran parte collocate nel gruppo dell'Adamello dove si trovano i ghiacciai più grandi del Trentino. Questo fa sì che nella media provinciale questi ghiacciai siano maggiormente rappresentati, e quindi il valor medio è marcatamente più negativo rispetto ad altri gruppi montuosi glacializzati come Presanella e Cevedale.

L'accelerazione nel tasso di perdita di massa risente di annate particolarmente sfavorevoli, in particolare tra il 2016 e 2020 e, soprattutto, nel 2022 quando a nevicate invernali particolarmente scarse è seguita un'estate caldissima. Questa accelerazione non è tuttavia esclusiva del Trentino, o dell'arco alpino, ma è stata riscontrata a livello globale (Zemp et al., 2025). Questi autori hanno quantificato che l'arco alpino europeo è la regione con il bilancio medio più negativo tra tutte le regioni glacializzate del mondo, escludendo Antartide e Groenlandia. Tra il 2000 e il 2023 il bilancio medio annuo dei ghiacciai sulle Alpi Europee è stato di -1.06 ± 0.04 m w.e., valore che risulta simile a quello calcolato in questo lavoro per i gruppi della Marmolada e del Cevedale, anche se in un periodo più penalizzante per i ghiacciai (2015-2022), rispetto al precedente (2003-2015).

I risultati indicano condizioni di maggior disequilibrio e vulnerabilità per i grandi ghiacciai del gruppo dell'Adamello, caratterizzato dalla presenza di estese superfici glaciali semi pianeggianti, localizzate sotto l'attuale limite delle nevi persistenti, con scarso range altimetrico e senza protezione orografica o copertura detritica. In base alla morfologia superficiale è possibile stimare spessori tuttora significativi su queste aree (Huss e Farinotti, 2012) e una loro scarsa dinamica. Questo si traduce in un maggior tempo di risposta rispetto a ghiacciai con dimensioni simili ma più ripidi, e quindi con maggiore dinamica e spessori più ridotti nella parte bassa, come ad esempio nel gruppo del Cevedale o sulla Marmolada.

I piccoli ghiacciai collocati in contesti topografici favorevoli, con ombreggiamento da parte del rilievo circostante, estesa e spessa copertura detritica e alimentazione valanghiva, sono caratterizzati da un bilancio di massa meno negativo. Va tuttavia evidenziato che non si tratta di corpi glaciali attivi, ma di residui la cui persistenza nel contesto climatico attuale è prolungata dalle condizioni localmente meno sfavorevoli.

Vista la generalizzata e forte riduzione volumetrica e areale, riscontrabile a tutte le quote, e la forte accelerazione nel processo di riduzione dei ghiacciai rispetto al periodo pre-2015, è probabile che al mantenersi delle condizioni climatiche attuali, o in seguito ad un ulteriore rialzo termico, tutti i ghiacciai del Trentino siano destinati a scomparire o perdere gran parte della massa in tempi più o meno rapidi. La velocità di estinzione risente delle caratteristiche geometriche dei corpi glaciali (in primis lo spessore residuo) e della loro collocazione topografica, in grado di accelerare (nel caso di bassa quota ed esposizione meridionale) oppure rallentare (nel caso di alta quota ed esposizione settentrionale, specie se con alimentazione valanghiva ed elevato ombreggiamento) il processo di estinzione.

Il confronto multi temporale di modelli digitali del terreno consente non solo di caratterizzare il comportamento dei ghiacciai su scala regionale, ma anche di validare le serie di misura di bilancio di massa ottenute con altre metodologie. La tabella che segue mostra il confronto tra bilancio geodetico e bilancio glaciologico per i ghiacciai trentini sui quali esiste sovrapposizione temporale tra i due metodi.

Tabella 8 - Confronto tra valori medi annui di bilancio geodetico (questo lavoro) e bilancio glaciologico su tre ghiacciai monitorati in Provincia di Trento, tra il 2015 e il 2022.

Ghiacciaio	Bilancio geodetico (m w.e.)	Bilancio glaciologico (m w.e.)
La Mare	-1.21	-1.18
Careser	-1.91	-2.03
Mandrone	-1.79	-1.74 (2019-2022)

Considerando le possibili fonti di errore per entrambe le metodologie (Zemp et al., 2013) è possibile dire che i risultati ottenuti con il bilancio geodetico e con il bilancio glaciologico sono sostanzialmente uguali. Sul ghiacciaio del Mandrone il confronto è parziale perché copre solo 4 su 7 anni, tuttavia sugli altri due ghiacciai questi 4 anni rappresentano bene la media dell'intero periodo dal 2015 al 2022.

E' da rimarcare infine il fatto che due di questi tre ghiacciai, selezionati per la misurazione del bilancio di massa con metodo glaciologico, sono quelli con bilancio geodetico più negativo tra tutti i corpi glaciali dei rispettivi gruppi montuosi: Careser per il Cevedale e Mandrone per l'Adamello. Il ghiacciaio de La Mare, invece, è abbastanza rappresentativo del valore medio di bilancio per il gruppo del Cevedale E' evidente in questo caso l'utilità del metodo geodetico per valutare la rappresentatività spaziale delle misure con metodo glaciologico.

Riferimenti bibliografici

Carturan, L., Rastner, P., & Paul, F. (2020). *On the disequilibrium response and climate change vulnerability of the mass-balance glaciers in the Alps*. *Journal of Glaciology*, 66(260), 1034-1050.

Huss, M. and Farinotti, D. (2012). *Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe*. *Journal of Geophysical Research* 117(F4), F04010.

Huss, M. (2013). *Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change*. *The Cryosphere*, 7, 877–887.

Kaser, G., Fountain, A.G. and Jansson, P. (2003). *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers with particular attention to low latitude characteristics*. A Contribution to the UNESCO HKH-Friend Programme, Paris, France, 107 pp.

Østrem, G. and Brugman, M. (1991). *Mass balance measurement techniques. A manual for field and office work*. National Hydrology Research Institute (NHRI) Science Report, 4, Saskatoon, Canada, 224 pp.

Pelto, M. S. (2006). *The current disequilibrium of North Cascade Glaciers*. *Hydrological Processes*, 20, 769–779.

Pelto, M. S. (2010). *Forecasting temperate alpine glacier survival from accumulation zone observations*. *The Cryosphere*, 4, 67–75.

Sommer, C., Malz, P., Seehaus, T. C., Lippl, S., Zemp, M., & Braun, M. H. (2020). *Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21 st century*. *Nature communications*, 11(1), 1-10.

Zemp, M. and 16 others (2013). *Reanalysing glacier mass balance measurement series*. *Cryosphere*, 7, 1227–1245.

Zemp, M., Jakob, L., Dussaillant, I., Nussbaumer, S. U., Gourmelen, N., Dubber, S., et al. (2025). *Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023*. *Nature*, 639(8054), 382–388.


APPENDICE


Si riportano in appendice le immagini relative alle variazioni di quota tra l'anno 2015 e 2022 su tutti i ghiacciai della Provincia Autonoma di Trento. Le immagini sono suddivise per gruppo montuoso come segue:

Appendice 1 - Gruppo del Cevedale	pag. 16
Appendice 2 - Gruppo della Presanella	pag. 18
Appendice 3 - Gruppo dell'Adamello	pag. 19
Appendice 4 - Gruppo di Brenta	pag. 20
Appendice 5 - Gruppo della Marmolada	pag. 21
Appendice 6 - Gruppo delle Pale di San Martino	pag. 22


Appendice 1 - Gruppo del Cevedale

Legenda

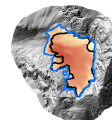
 Estensione dei ghiacciai nel 2015

 Estensione dei ghiacciai nel 2022

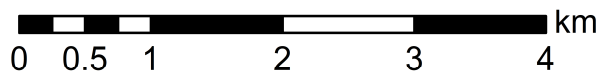
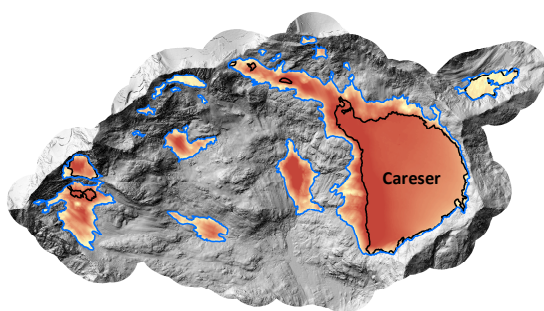
DoD ghiaccio 2022 - 2015 (m)

 High : 2
Low : -65


Sternai




Sassoni di Sternai

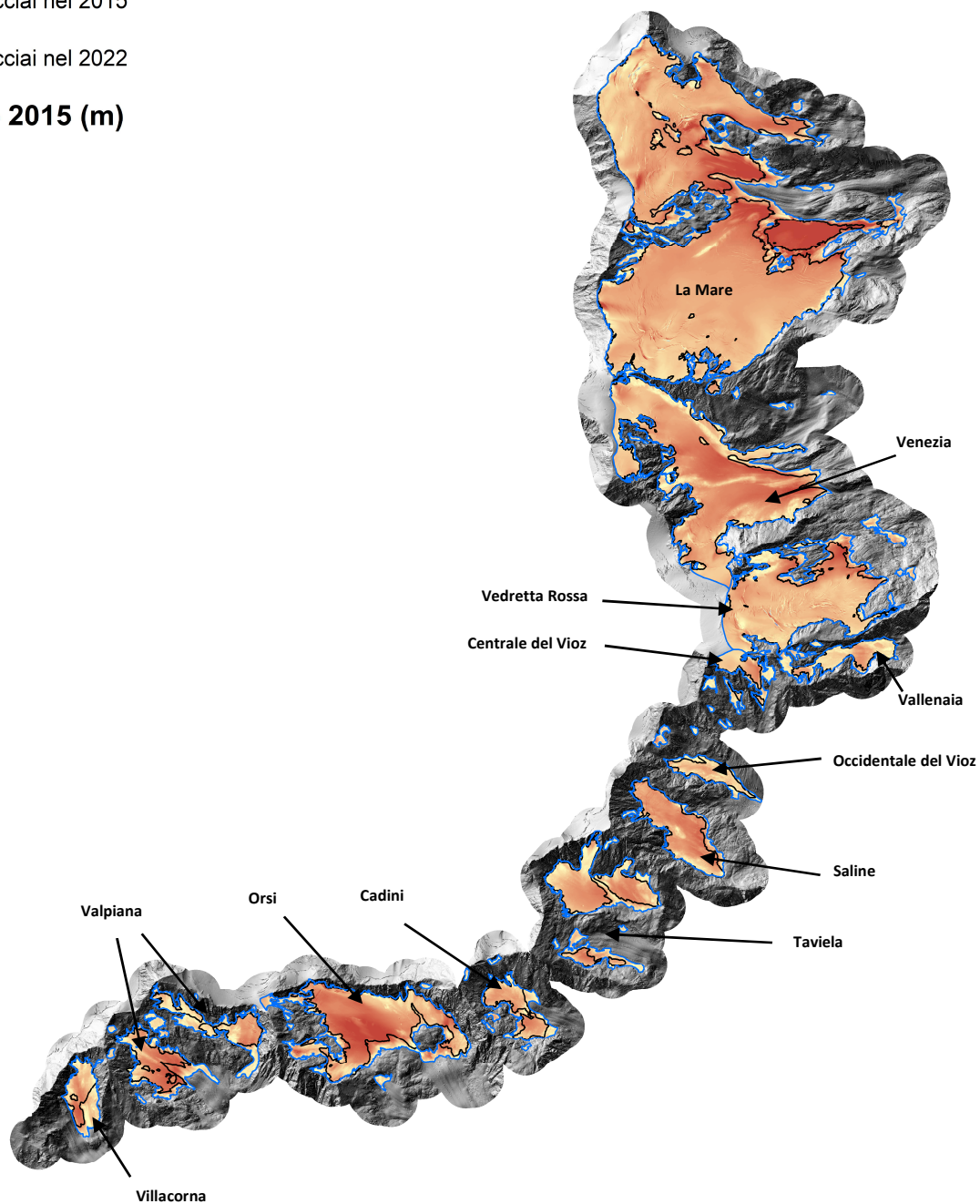
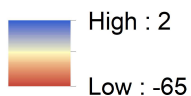


Legenda

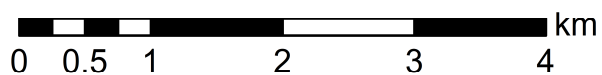
 Estensione dei ghiacciai nel 2015

 Estensione dei ghiacciai nel 2022

DoD ghiaccio 2022 - 2015 (m)





Nord-Orientale del Corno dei Tre Signori




Appendice 2 – Gruppo della Presanella

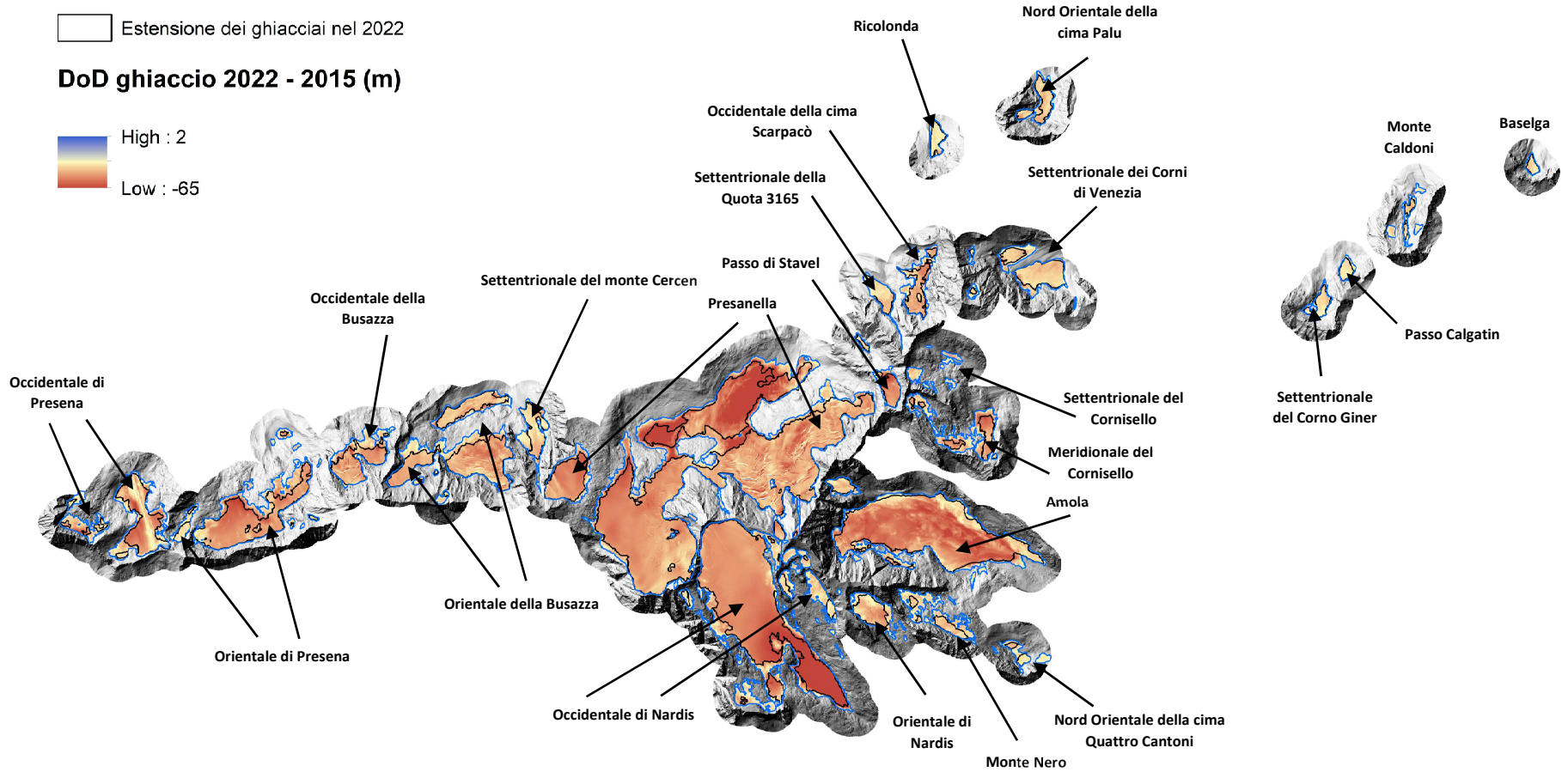
Legenda

 Estensione dei ghiacciai nel 2015

 Estensione dei ghiacciai nel 2022

DoD ghiaccio 2022 - 2015 (m)

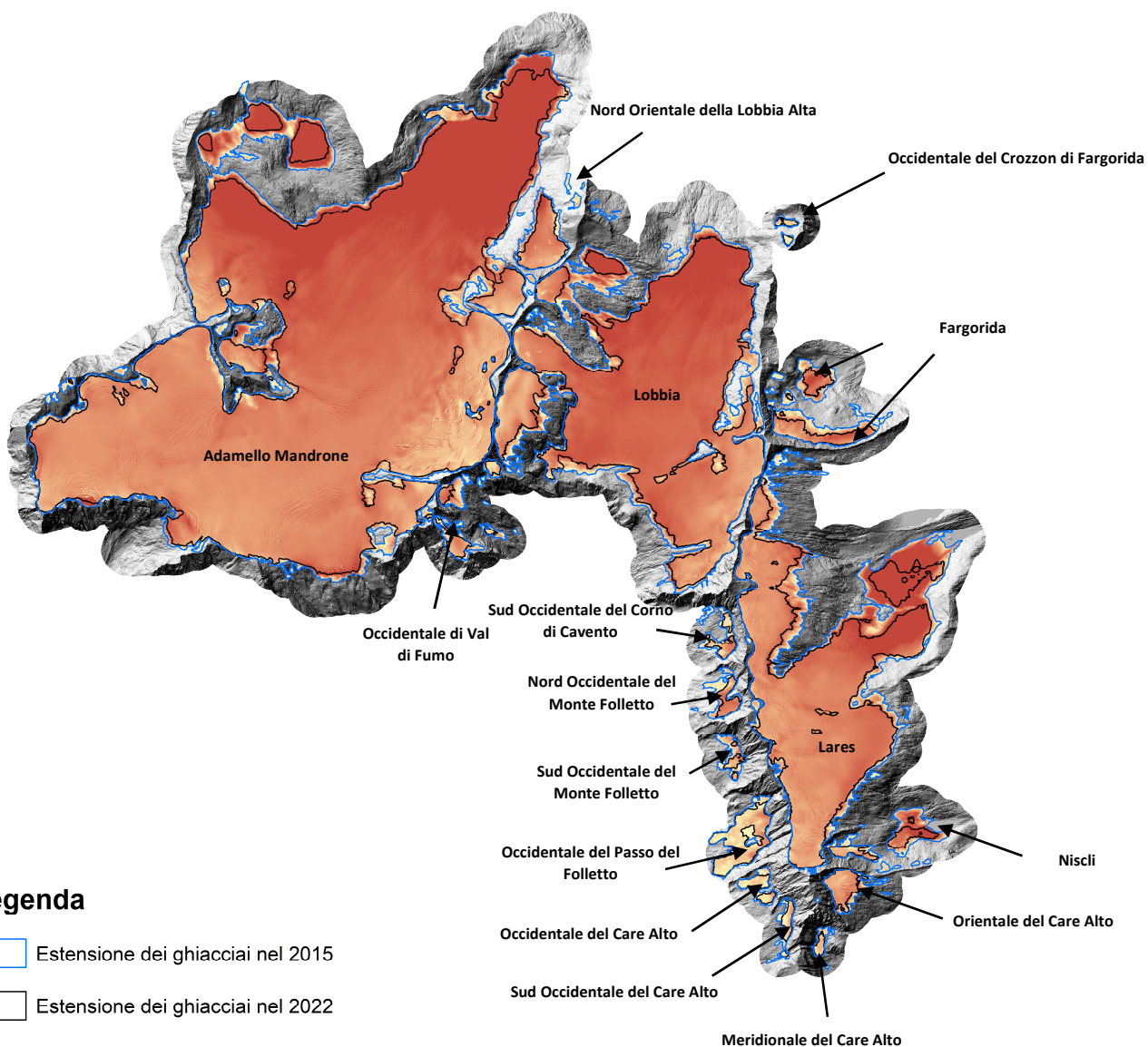
 High : 2
Low : -65



0 0.5 1 2 3 4 km



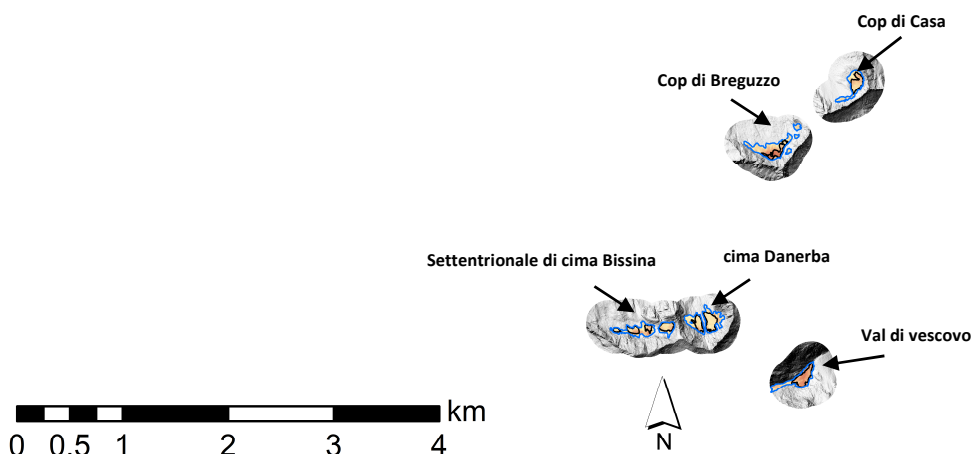
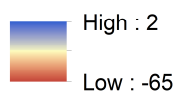
Appendice 3 - Gruppo dell'Adamello



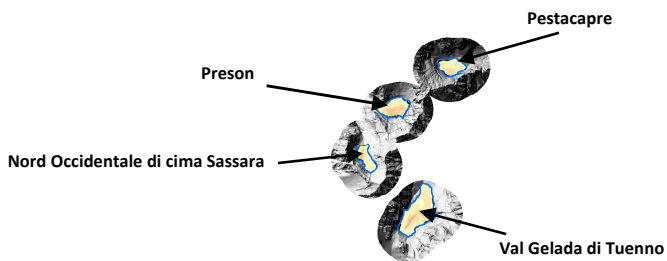
Legenda

- Estensione dei ghiacciai nel 2015
- Estensione dei ghiacciai nel 2022

DoD ghiaccio 2022 - 2015 (m)



Appendice 4 - Gruppo di Brenta

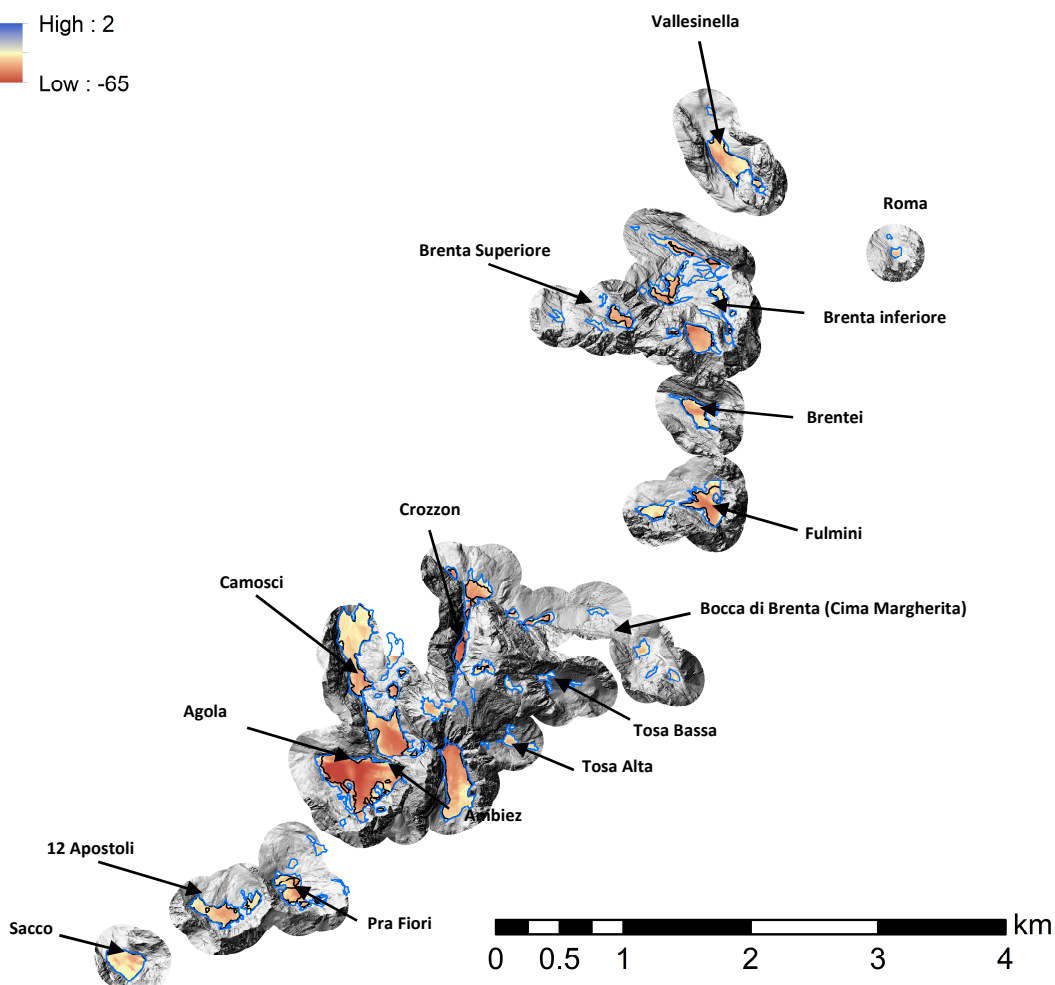
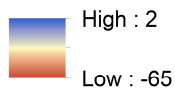


Legenda

Estensione dei ghiacciai nel 2015


Estensione dei ghiacciai nel 2022


DoD ghiaccio 2022 - 2015 (m)




Appendice 5 - Gruppo della Marmolada

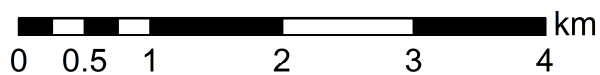
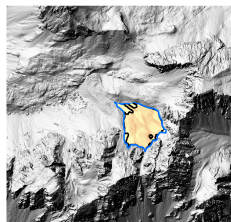
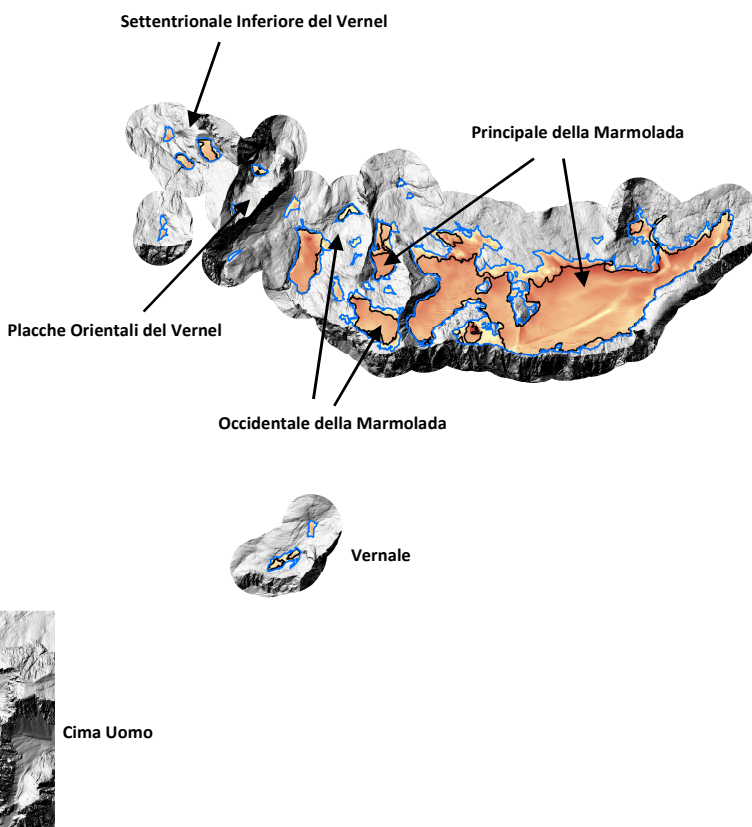
Legenda

 Estensione dei ghiacciai nel 2015

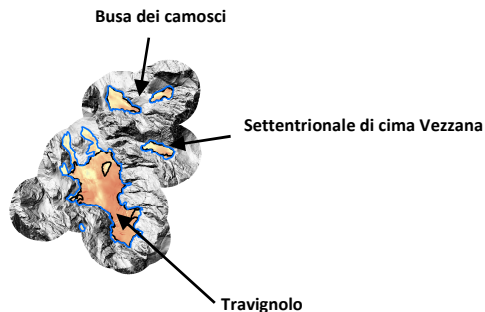
 Estensione dei ghiacciai nel 2022

DoD ghiaccio 2022 - 2015 (m)

 High : 2
Low : -65



Appendice 6 - Gruppo delle Pale di San Martino



Legenda

Estensione dei ghiacciai nel 2015

Estensione dei ghiacciai nel 2022

DoD ghiaccio 2022 - 2015 (m)

