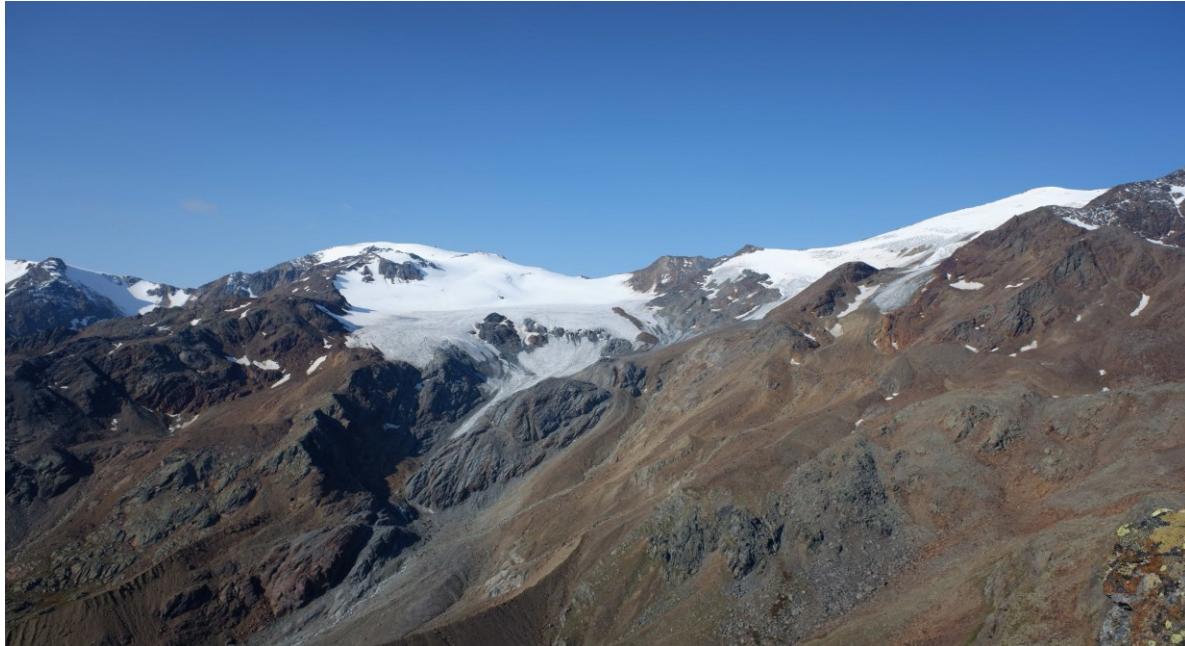


**UNIVERSITA' DI PADOVA**

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali - Viale dell'Università, 16 - 35020 - Legnaro, Padova

Dipartimento di Geoscienze - Via Gradenigo, 6 - 35131 - Padova

Tel. +39 0498272680

luca.carturan@unipd.it**ELABORAZIONE DI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO
CON FINALITA' DI ANALISI MULTI-TEMPORALE DELLE
VARIAZIONI GLACIALI****RELAZIONE FINALE**

Responsabile della convenzione: 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. 6
1.3. Elaborazioni sul ghiacciaio del Mandrone	pag. 7
2. Risultati	pag. 8
2.1. Gruppo del Cevedale	pag. 9
2.2. Gruppo della Presanella	pag. 10
2.3. Gruppo dell'Adamello	pag. 12
2.4. Gruppo di Brenta	pag. 13
2.5. Gruppo della Marmolada	pag. 14
2.6. Gruppo delle Pale di San Martino	pag. 15
3. Osservazioni conclusive	pag. 16
Riferimenti bibliografici	pag. 18
Appendice	pag. 19

Executive summary

Questa relazione descrive la metodologia di lavoro utilizzata per la quantificazione del bilancio geodetico tra gli anni 2003 e 2015 sui ghiacciai della Provincia Autonoma di Trento, e i risultati derivanti dalle elaborazioni.

I dati utilizzati provengono da rilievi aerei con sensori lidar e ortofotografici realizzati dalla Provincia Autonoma di Trento (PAT) nei mesi di settembre del 2003 e del 2015; sono state usate le perimetrazioni dei singoli ghiacciai eseguite da Alberto Trenti (PAT), Christian Casarotto (Museo delle Scienze di Trento) 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 decisamente trascurabile (sub-metrico) se confrontato con le importanti variazioni altimetriche cui sono state soggette le aree glacializzate.

Nel periodo analizzato il bilancio di massa geodetico è risultato negativo per la quasi totalità dei ghiacciai, ad esclusione di alcuni piccoli glacionevati alimentati da valanghe che hanno beneficiato di annate particolarmente nevose come il 2009, 2013 e 2014. 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. Al contrario, i piccoli ghiacciai dei gruppi di Brenta, Pale e Marmolada beneficiano di condizioni topografiche e microclimatiche localmente favorevoli per sovralimentazione valanghiva, riparo orografico e copertura detritica.

Il confronto multi-temporale di modelli digitali del terreno si è confermato come un metodo particolarmente adatto per la caratterizzazione delle dinamiche glaciali su scala regionale, e per la verifica e validazione di metodi di misura più intensivi come quello glaciologico. Viste le rapide variazioni glaciali in atto, e in base alle indicazioni degli organismi internazionali che coordinano questo tipo di monitoraggi, è auspicabile che si possa proseguire anche in futuro con la determinazione del bilancio geodetico su scala regionale con frequenza quinquennale o al più decadale.

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 2003 e 2015 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 2003 al 2015 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°), che non sono rappresentative delle aree glacializzate, in quanto dove il terreno è molto ripido la neve non può accumularsi né trasformarsi in firn o ghiaccio.

Sono state infine escluse alcune piccole aree di ombra Lidar, cioè le zone non direttamente rilevabili mediante Lidar che presentavano morfologia interpolata in modo automatico, e quindi non corrispondente alla morfologia reale.

Le differenze di quota in area stabile tra il DEM 2015 e il DEM 2003 hanno tipicamente distribuzione di tipo gaussiano. Il valore medio di queste differenze varia tra 0.02 m (gruppo del Cevedale) e 0.77 m (Pale di S. Martino), con una deviazione standard compresa tra 0.33 m (sottogruppo del Vernale) e 1.01 m (Adamello).

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 (di lato 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 2003-2015, e quindi ai fini del calcolo del bilancio geodetico medio annuo va diviso per il numero di anni, cioè dodici.

La figura 1 mostra, come esempio, l'area in cui è stato quantificato l'errore residuo per i ghiacciai del gruppo della Marmolada. Sul settore più occidentale si osserva una distribuzione spaziale dell'errore 'a fasce', con direzione est-ovest, attribuibile ad un non perfetto allineamento delle strisciate. Ai bordi delle strisciate la differenza di quota risulta comunque inferiore ai 0.40 m, ed è quindi dello stesso ordine di grandezza della deviazione standard dell'errore così come quantificata sull'intera area (0.57 m). La figura 2 fornisce un esempio di distribuzione di frequenza dell'errore sul singolo pixel, sempre per il gruppo della Marmolada.

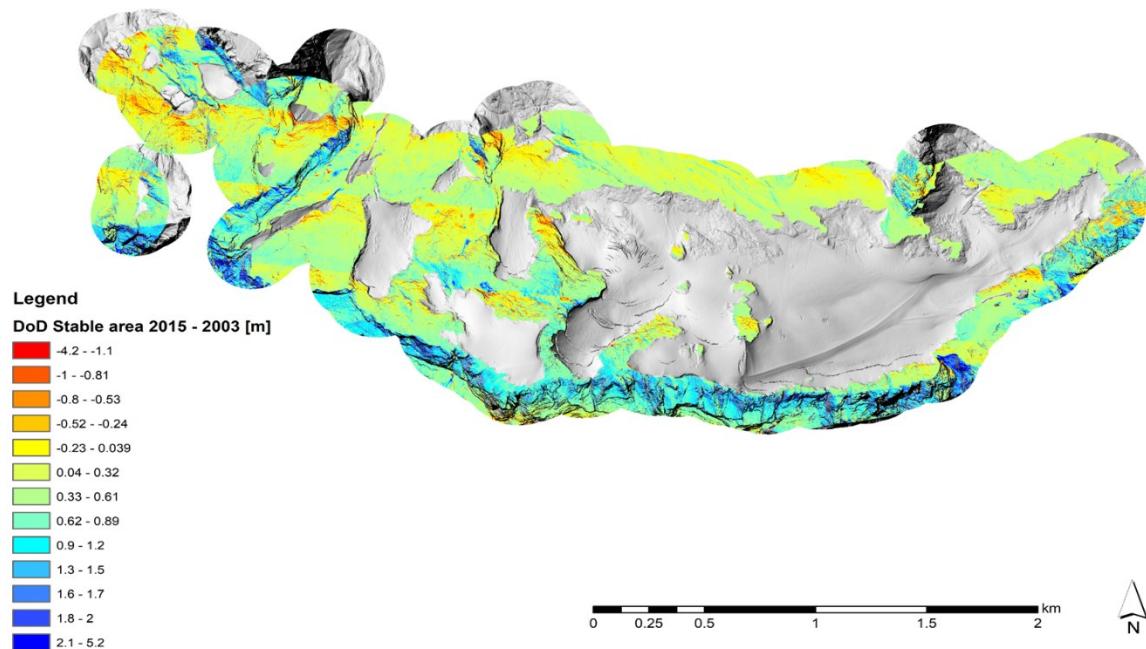


Figura 1 - Differenze di quota tra i DEM 2015 e 2003 sulle zone stabili al di fuori dei ghiacciai, nel gruppo della Marmolada.

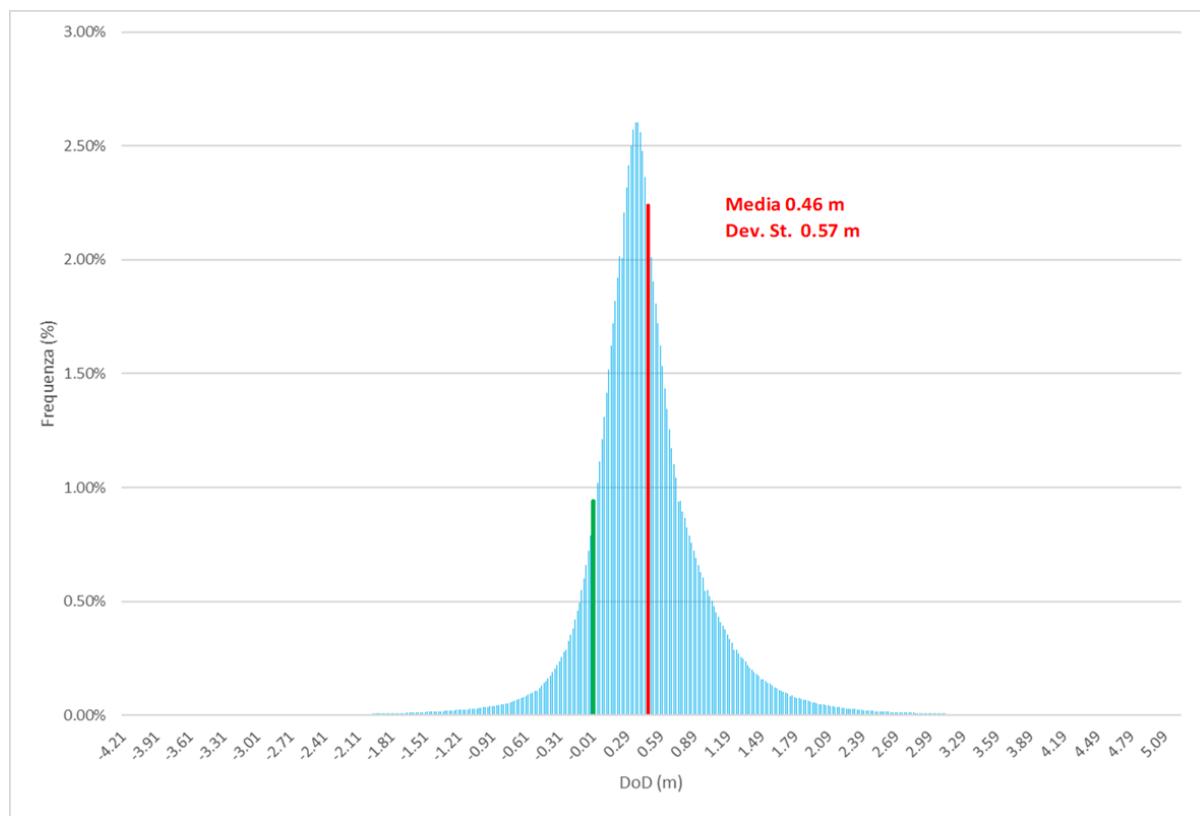


Figura 2 - Distribuzione delle differenze di quota tra i DEM 2015 e 2003 sulle zone stabili al di fuori dei ghiacciai, nel gruppo della Marmolada. La linea verde indica differenze nulle, quella rossa indica la differenza media nell'area considerata.

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/m^3 (Huss, 2013), viene divisa per l'area media \bar{A} (semisomma tra area 2003 e area 2015) e il numero di anni tra il 2003 e il 2015, cioè 12.

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

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

cioè si moltiplica la variazione altimetrica media tra 2003 e 2015 ($\bar{\Delta z}$) per l'area iniziale del ghiacciaio A_i , cioè quella del 2003. Nel caso specifico analizzato si sono però riscontrati alcuni casi in cui, localmente, il perimetro del 2015 eccedeva quello del 2003, a causa di placche di firn accumulate tra il 2013 e il 2014. Non si è quindi utilizzata l'area iniziale (2003) per i calcoli di variazione volumetrica, ma è stata fatta un'unione (merge) delle due aree 2003 e 2015. La figura 3 mostra un esempio che chiarisce questo concetto.

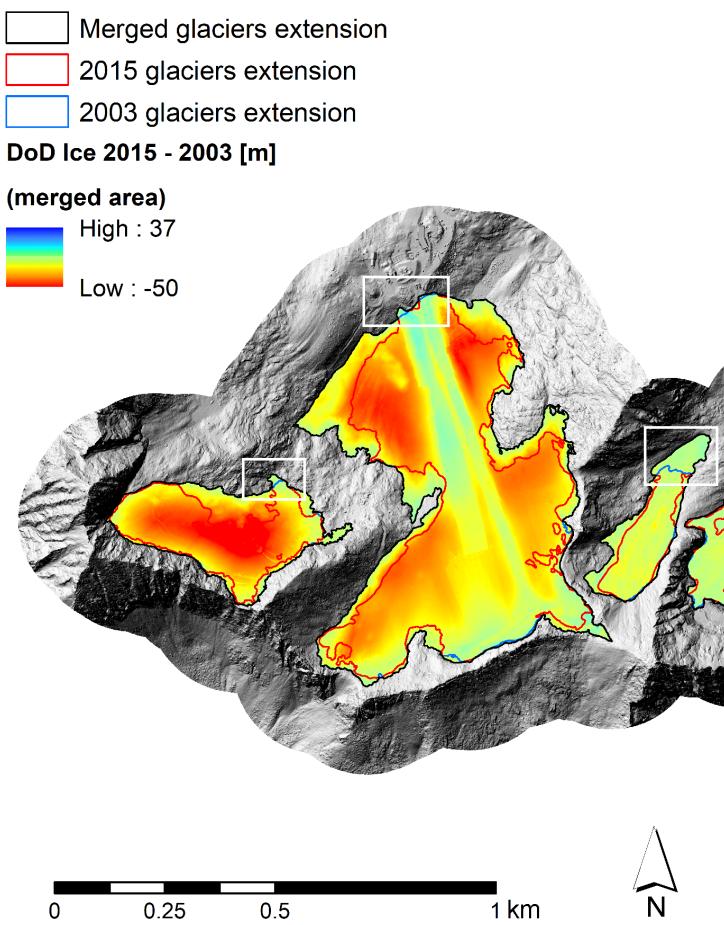


Figura 3 - Variazioni altimetriche tra il 2003 e il 2015 sui ghiacciai in area Presena. I riquadri bianchi indicano tre zone dove il perimetro 2015 eccede il perimetro 2003. Per questo motivo la variazione volumetrica è calcolata sull'unione (merge) delle due aree.

1.3. Elaborazioni sul ghiacciaio del Mandrone

Il ghiacciaio del Mandrone rappresenta un caso particolare in quanto la copertura del Lidar 2003 è limitata al solo settore frontale (area in blu in figura 4). Si è quindi utilizzato un DEM rilevato nel 2007 per il calcolo del bilancio geodetico. Pur coprendo un periodo più breve rispetto agli altri ghiacciai, il confronto tra DEM 2007 e 2015 consente comunque di quantificare il bilancio sull'intera superficie del ghiacciaio più esteso delle Alpi italiane.

Sfortunatamente il DEM 2007 (linea rossa in figura 4) presenta un gradino di 6.4 m sulla lingua del Mandrone, derivante dal fatto che la porzione inferiore del ghiacciaio è stata rilevata in un periodo diverso. Incrociando le informazioni disponibili (limiti del ghiacciaio da immagini LANDSAT e Lidar 2009 della Provincia Autonoma di Trento, che copre il settore centrale e inferiore del ghiacciaio) è stato possibile verificare che questa porzione corrisponde al volo Lidar 2009 che è stato usato per ricavare il DEM della Provincia Autonoma di Trento (linea verde in Figura 4).

Il gradino del DEM 2007 è quindi stato eliminato calcolando una funzione che mette in relazione le variazioni altimetriche tra 2007 e 2009 e la quota nel tratto in comune AB, in figura 4, e applicandola al tratto BC per 'sollevare' il suddetto gradino e riportare la superficie glaciale alle condizioni del 2007. Fatto ciò, si è proceduto analogamente a quanto fatto sugli altri ghiacciai, con l'unica differenza relativa al periodo considerato, pari ad otto invece che dodici anni.

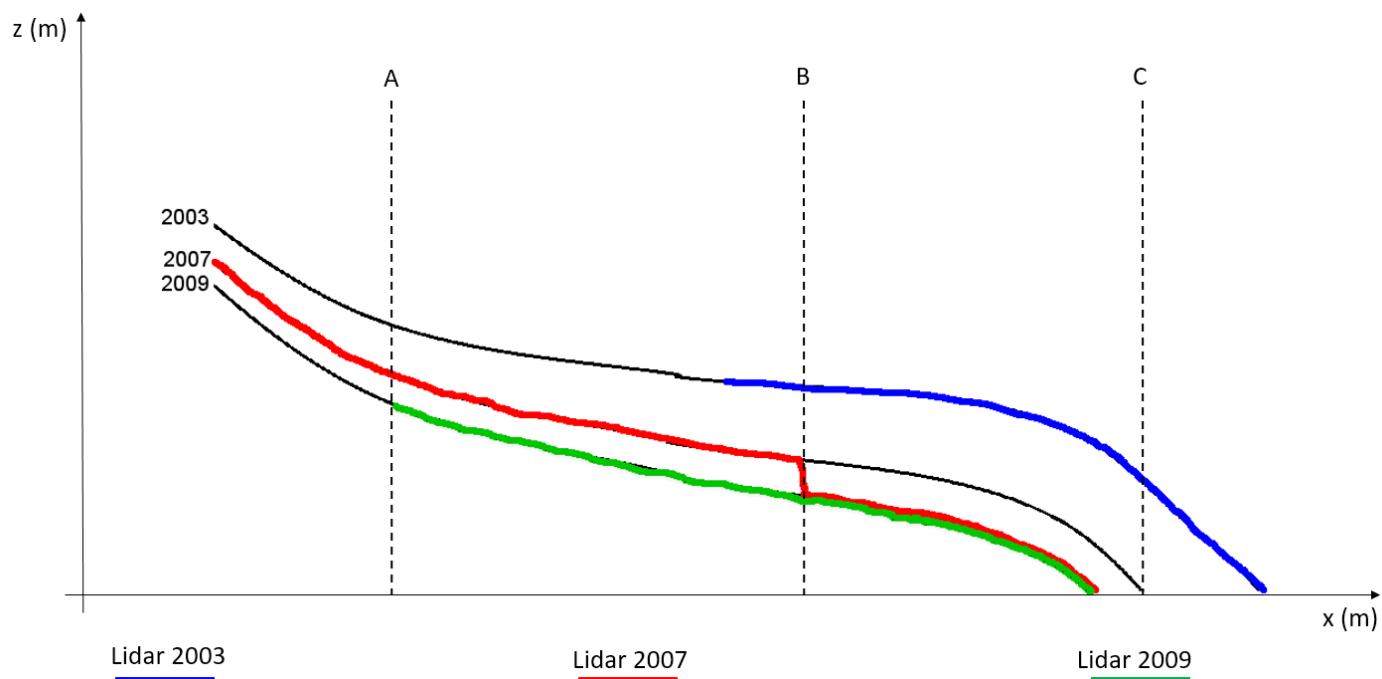


Figura 4 - Copertura spaziale dei DEM Lidar disponibili per il ghiacciaio del Mandrone, lungo il suo profilo longitudinale (idealizzato). Il Lidar 2007, utilizzato per i calcoli di bilancio geodetico, copre l'intero ghiacciaio ma presenta un gradino sulla parte inferiore.

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 5 si riporta un esempio di DoD nell'area della Presanella.

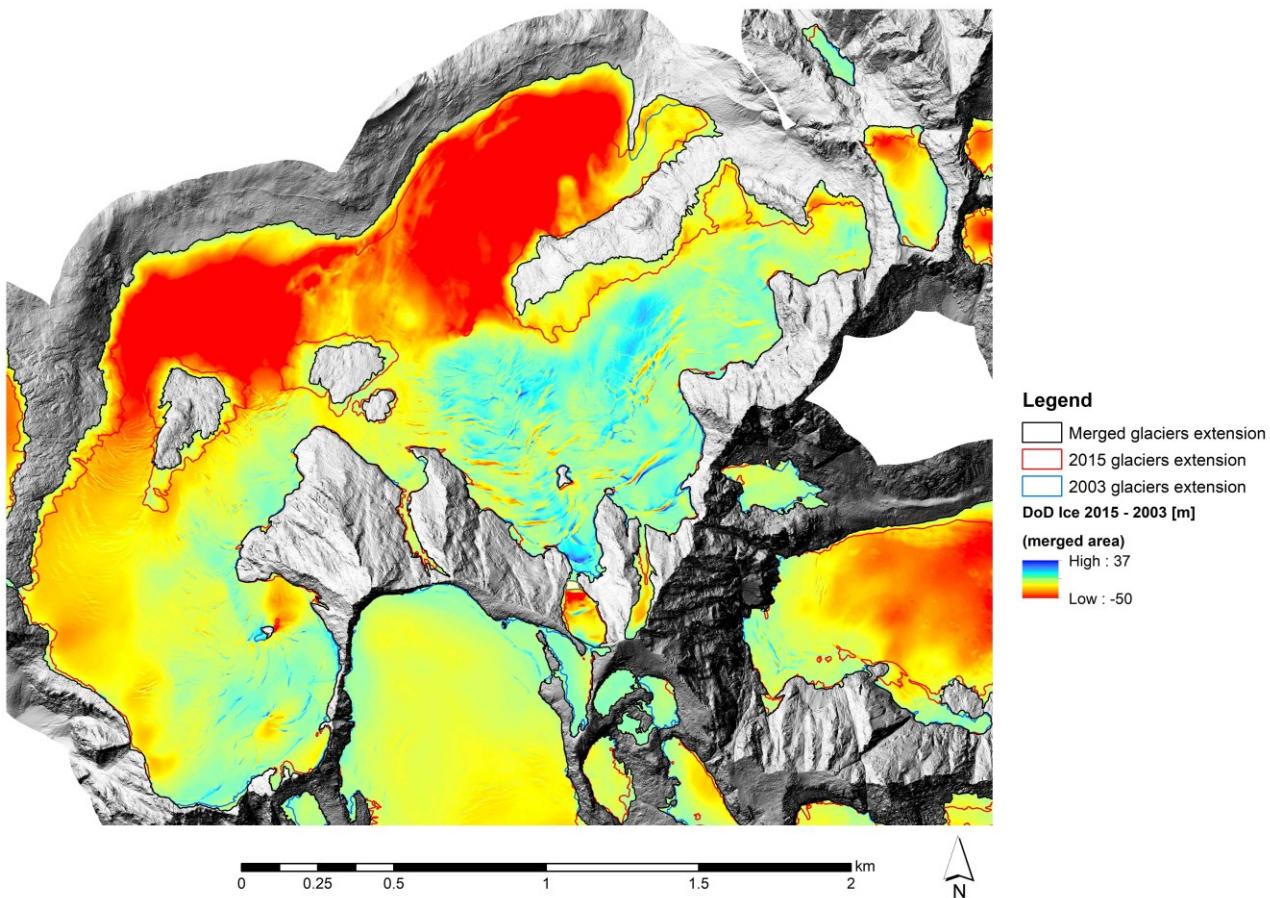


Figura 5 - Variazioni di quota tra gli anni 2003 e 2015 sui ghiacciai attorno a cima Presanella.

I colori arancio e rosso scuro indicano aree che hanno subito forte assottigliamento, superiore a 15 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 giallo indicano invece assottigliamenti più modesti, inferiori a 8 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.

I colori tendenti all'azzurro o al blu, infine, indicano siti o corpi glaciali che nel periodo in considerazione hanno subito un piccolo inspessimento (al massimo qualche metro), perché localizzati ad alta quota e/o perché beneficiano di sovraccumuli di neve da vento o da valanghe. Alcune recenti annate particolarmente nevose hanno favorito questi processi, come si può vedere ad esempio sull'area glacializzata ai piedi della parete nord della Presanella.

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 2003 e il 2015. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Ghiacciaio	Status 2015	Superficie merge 2003-2015 (ha)	Variazione altimetrica dal 2003 al 2015 (m)		Bilancio geodetico dal 2003 al 2015 (m w.e.)	
			media	deviazione standard	media	errore
Vioz centrale II	Esistente	1.5	2.11	0.33	0.17	± 0.02
Valpiana II	Esistente	2.1	0.48	0.34	0.04	± 0.02
Sassoni di Sternai	Esistente	3.2	-1.09	0.39	-0.08	± 0.03
Careser II	Estinto	2.0	-1.40	0.31	-0.10	± 0.02
Monte Giumella	Esistente	18.9	-2.53	0.34	-0.19	± 0.02
Corno dei Tre Signori	Esistente	9.2	-2.85	0.32	-0.22	± 0.02
La Mare II	Esistente	2.3	-2.58	0.33	-0.23	± 0.02
Vioz centrale I	Esistente	8.7	-3.08	0.33	-0.23	± 0.02
Taviela III	Estinto	1.4	-3.47	0.34	-0.25	± 0.02
Saènt di fuori	Esistente	6.8	-3.38	0.31	-0.28	± 0.02
Colle Vioz	Esistente	1.6	-4.43	0.34	-0.39	± 0.02
Vallenaia	Esistente	13.3	-5.28	0.33	-0.42	± 0.02
La Mare III	Estinto	3.3	-6.18	0.33	-0.44	± 0.02
Taviela I	Esistente	33.1	-7.00	0.34	-0.53	± 0.02
Vedretta Rossa	Esistente	99.1	-6.94	0.33	-0.54	± 0.02
La Mare I	Esistente	406.6	-8.24	0.33	-0.62	± 0.02
Venezia	Esistente	134.5	-8.28	0.33	-0.62	± 0.02
Orsi II	Esistente	3.9	-7.16	0.34	-0.66	± 0.02
Saline	Esistente	32.7	-8.70	0.34	-0.68	± 0.02
Vioz ovest I	Esistente	9.0	-7.60	0.34	-0.69	± 0.02
Taviela II	Esistente	12.3	-8.12	0.34	-0.73	± 0.02
Sternai I	Esistente	14.5	-10.35	0.39	-0.82	± 0.03
Orsi I	Esistente	84.5	-10.51	0.34	-0.82	± 0.02
Villacorna est	Esistente	17.0	-10.39	0.34	-0.83	± 0.02
Cadini	Esistente	18.9	-10.24	0.34	-0.84	± 0.02
Valpiana I	Esistente	29.9	-11.18	0.34	-0.96	± 0.02
Careser I	Esistente	282.6	-17.60	0.31	-1.67	± 0.02

In media l'intera superficie glacializzata ha perso tra il 2003 e il 2015 10.2 m di spessore, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.82 m w.e. Questi valori risentono delle forti perdite subite dal ghiacciaio del Careser che è di gran lunga il ghiacciaio con bilancio di massa più negativo, e che viste le sue dimensioni nel 2003 (23% dell'area glacializzata totale) pesa in modo considerevole sui valori medi del gruppo montuoso.

Escludendo questo ghiacciaio si ottengono perdite medie di spessore di 8.1 m e un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.62 m w.e. Come si vede gli altri ghiacciai con dimensioni iniziali superiori a 50 ha (Orsi, Rossa, Venezia, La Mare) hanno bilanci di massa che si aggirano attorno a questo valore, che è probabilmente più rappresentativo delle condizioni medie del gruppo.

Molti ghiacciai presentano rapidi assottigliamenti sulle porzioni inferiori (Appendice 1), il ghiacciaio del Careser praticamente su tutta la sua superficie. E' molto evidente il rapido collasso del settore inferiore del ghiacciaio de La Mare, prossimo al distacco dal settore superiore. Le uniche zone o piccoli corpi glaciali con ridotti inspessimenti si collocano in genere a quote superiori a 3300-3400 m, in corrispondenza di accumuli eolici o valanghivi.

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 2003 e il 2015. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Ghiacciaio	Status 2015	Superficie merge 2003-2015 (ha)	Variazione altimetrica dal 2003 al 2015 (m)		Bilancio geodetico dal 2003 al 2015 (m w.e.)	
			media	deviazione standard	media	errore
Passo Stavel II	Esistente	1.2	1.47	0.37	0.11	± 0.03
Nardis ovest IV	Esistente	2.2	0.88	0.37	0.08	± 0.03
Presena est II	Esistente	1.6	0.5	0.37	0.05	± 0.03
Ricolonda	Esistente	2.0	0.43	0.37	0.04	± 0.03
Nardis ovest II	Esistente	1.8	-0.18	0.37	-0.01	± 0.03
Busazza est I	Esistente	39.2	-0.7	0.37	-0.05	± 0.03
Cima Denza (3165)	Esistente	6.8	-0.78	0.37	-0.06	± 0.03
Cima Scarpacò nord I	Esistente	1.2	-0.99	0.37	-0.08	± 0.03
Amola IV	Esistente	3.8	-1.02	0.37	-0.08	± 0.03
Val Baselga	Esistente	1.7	-1.39	0.37	-0.1	± 0.03
Monte Caldura	Esistente	3.5	-1.93	0.37	-0.15	± 0.03
Passo Cagalatin I	Esistente	3.3	-1.88	0.37	-0.15	± 0.03
Cima Quattro Cantoni	Esistente	3.2	-1.91	0.37	-0.16	± 0.03
Monte Cercen	Esistente	12.8	-2.21	0.37	-0.17	± 0.03
Nardis ovest V	Esistente	6.3	-2.89	0.37	-0.22	± 0.03
Corno Giner nord	Esistente	5.8	-2.84	0.37	-0.22	± 0.03
Busazza superiore	Esistente	1.1	-2.98	0.37	-0.23	± 0.03
Cima Palù	Esistente	6.9	-3.1	0.37	-0.24	± 0.03
Nardis ovest VI	Esistente	3.0	-3.07	0.37	-0.24	± 0.03
Cima Scarpacò ovest	Esistente	13.5	-3.17	0.37	-0.25	± 0.03
Sgualdrina	Esistente	3.9	-3.03	0.37	-0.26	± 0.03
Cornisello nord II	Esistente	3.2	-2.63	0.37	-0.27	± 0.03
Corni di Venezia nord	Esistente	20.3	-4.27	0.37	-0.32	± 0.03
Busazza ovest	Esistente	20.9	-4.32	0.37	-0.33	± 0.03
Busazza est II	Esistente	3.8	-4.73	0.37	-0.38	± 0.03
Monte Nero	Esistente	14.4	-5.22	0.37	-0.48	± 0.03
Passo Stavel I	Esistente	7.1	-6.43	0.37	-0.49	± 0.03
Presena est III	Esistente	47.0	-7.58	0.37	-0.58	± 0.03
Passo Cercen	Esistente	18.8	-7.83	0.37	-0.59	± 0.03
Nardis est	Esistente	12.9	-7.65	0.37	-0.61	± 0.03
Pensile della Presanella	Esistente	2.2	-8.53	0.37	-0.66	± 0.03
Presanella II	Esistente	292.1	-8.75	0.37	-0.68	± 0.03
Cornisello nord I	Esistente	2.3	-8.32	0.37	-0.71	± 0.03
Presena ovest I	Esistente	33.6	-8.95	0.37	-0.72	± 0.03
Nardis ovest III	Esistente	139.1	-10.82	0.37	-0.83	± 0.03
Cornisello sud I	Esistente	19.8	-9.92	0.37	-0.83	± 0.03
Busazza est III	Esistente	3.5	-9.88	0.37	-0.85	± 0.03
Cima Vedretta Nera	Esistente	4.2	-10.62	0.37	-0.87	± 0.03
Corno di Lago Scuro	Esistente	8.1	-13.35	0.37	-1.1	± 0.03
Amola III	Esistente	93.1	-14.8	0.37	-1.12	± 0.03

In media l'intera superficie glacializzata ha perso tra il 2003 e il 2015 8.4 m di spessore, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.65 m w.e. Tra i ghiacciai con maggiori perdite di massa si trovano i più estesi del gruppo (Nardis Ovest III e Presanella II), alcuni ghiacciai in zona Cornisello, e il ghiacciaio d'Amola III, che è estesamente coperto di detrito ma risente del fatto di essere a quota piuttosto bassa (Appendice

2). Anche il ghiacciaio di Presena ovest I è tra quelli che perdono massa più rapidamente, sebbene l'ablazione sia controllata artificialmente mediante copertura di teli geotessili durante la stagione estiva.

Questo gruppo si caratterizza per la presenza di un numero consistente (14) di corpi glaciali che presentano perdite di massa contenute, inferiori a 0.2 m w.e. all'anno, e quattro di essi hanno avuto prevalente inspessimento nel periodo analizzato. Si tratta nella maggioranza di glacionevati con superficie inferiore a 5 ettari, però fa parte di questo gruppo anche il ghiacciaio Busazza est I, che ha un'area di 39 ettari. Caratteristica comune di questi corpi glaciali è quella di beneficiare di sovraccumuli nevosi valanghivi, oppure di essere collocati ad alta quota o in nicchie che risentono di accumulo eolico locale.

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 2003 e il 2015 (*per il ghiacciaio del Mandrone si considera il periodo 2007-2015). I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.*

Ghiacciaio	Status 2015	Variazione altimetrica dal 2003 al 2015 (m)			Bilancio geodetico dal 2003 al 2015 (m w.e.)	
		Superficie merge 2003-2015 (ha)	media	deviazione standard	media	errore
Cima Danerba	Esistente	6.8	0.83	0.55	0.08	± 0.04
Cima Bissina nord II	Esistente	1.9	0.62	0.55	0.06	± 0.04
Cima Bissina nord I	Esistente	4.8	0.59	0.55	0.06	± 0.04
Còp di Casa	Esistente	2.9	-0.31	0.55	-0.03	± 0.04
Carè Alto sud-ovest	Esistente	5.8	-0.57	0.37	-0.05	± 0.03
Val del Vescovo	Esistente	3.6	-0.54	0.55	-0.05	± 0.04
Lobbia Alta	Estinto	1.0	-1.34	0.37	-0.09	± 0.03
Carè Alto sud	Esistente	3.4	-1.31	0.37	-0.10	± 0.03
Passo di Monte Fumo II	Esistente	2.8	-1.45	0.37	-0.11	± 0.03
Carè Alto nord ovest	Esistente	5.5	-2.01	0.37	-0.16	± 0.03
Monte Folletto sud-ovest	Esistente	7.5	-2.60	0.37	-0.20	± 0.03
Val di Fumo ovest II	Esistente	2.5	-2.92	0.37	-0.23	± 0.03
Passo Folletto	Esistente	16.3	-3.96	0.37	-0.36	± 0.03
Monte Folletto nord-ovest	Esistente	11.0	-4.96	0.37	-0.39	± 0.03
Corno di Cavento sud-ovest	Esistente	9.7	-4.75	0.37	-0.39	± 0.03
Còp di Breguzzo nord I	Esistente	5.6	-5.48	0.55	-0.44	± 0.04
Val di Fumo ovest I	Esistente	10.4	-5.84	0.37	-0.44	± 0.03
Carè Alto est	Esistente	17.2	-5.70	0.37	-0.45	± 0.03
Passo di Monte Fumo I	Esistente	9.0	-9.34	0.37	-0.75	± 0.03
Folgorida	Esistente	55.5	-10.34	0.37	-0.89	± 0.03
Lares	Esistente	485.3	-13.19	0.37	-1.03	± 0.03
Lobbia	Esistente	669.0	-14.67	0.37	-1.12	± 0.03
Adamello-Mandrone*	Esistente	1628.2	-11.53	1.01	-1.25	± 0.11
Niscli	Esistente	35.8	-14.80	0.37	-1.28	± 0.03

Se confrontati con i vicini gruppi del Cevedale (escludendo il ghiacciaio del Careser) e della Presanella, i tassi di riduzione altimetrica e di bilancio geodetico sul gruppo dell'Adamello sono sensibilmente superiori. In media l'intera superficie glacializzata ha perso tra il 2003 e il 2015 12.97 m di spessore, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -1.01 m w.e. Includendo il ghiacciaio del Mandrone, per il quale si dispone del bilancio geodetico in un periodo più breve, tra il 2007 e il 2015, il bilancio di massa geodetico medio passa a -1.14 m w.e.

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 sensibilmente meno negativi, e in 11 casi prossimi al pareggio. 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).

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 2003 e il 2015. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Ghiacciaio	Status 2015	Superficie merge 2003-2015 (ha)	Variazione altimetrica dal 2003 al 2015 (m)		Bilancio geodetico dal 2003 al 2015 (m w.e.)	
			media	deviazione standard	media	errore
Crozzon inferiore	esistente	5.4	1.32	0.58	0.11	± 0.04
Sacco	esistente	4.6	0.70	0.58	0.05	± 0.04
Tosa inferiore	esistente	4.4	0.15	0.58	0.01	± 0.04
Cima Margherita	esistente	5.6	-0.15	0.58	-0.01	± 0.04
Cima Sassara	esistente	1.7	-0.16	0.58	-0.01	± 0.04
Brentei	esistente	4.0	-1.19	0.58	-0.09	± 0.04
Preson	esistente	1.7	-1.31	0.58	-0.10	± 0.04
Sfulmini II	esistente	2.3	-1.35	0.58	-0.11	± 0.04
Val Gelada	esistente	3.1	-1.48	0.58	-0.12	± 0.04
Tuckett inferiore	esistente	5.5	-1.66	0.58	-0.14	± 0.04
Crozzon II	esistente	1.4	-2.37	0.58	-0.18	± 0.04
Pestacapre	esistente	1.6	-2.53	0.58	-0.19	± 0.04
Cima Brenta III	esistente	2.5	-2.74	0.58	-0.22	± 0.04
Tuckett superiore	esistente	4.4	-3.06	0.58	-0.24	± 0.04
Prà Fiorì II	estinto	1.4	-3.52	0.58	-0.25	± 0.04
Cima Brenta I	esistente	4.3	-4.30	0.58	-0.32	± 0.04
Vallesinella inferiore	esistente	7.5	-4.16	0.58	-0.33	± 0.04
Brenta superiore	esistente	2.6	-6.36	0.58	-0.49	± 0.04
12 Apostoli	esistente	9.1	-5.87	0.58	-0.49	± 0.04
Ambiez	esistente	8.6	-6.69	0.58	-0.52	± 0.04
Camosci I	esistente	16.6	-8.09	0.58	-0.63	± 0.04
Crozzon III	esistente	5.6	-8.22	0.58	-0.66	± 0.04
Prà Fiorì I	esistente	6.2	-8.71	0.58	-0.72	± 0.04
Sfulmini I	esistente	6.5	-9.71	0.58	-0.75	± 0.04
Agola	esistente	22.2	-12.98	0.58	-1.00	± 0.04

In media l'intera superficie glacializzata ha perso 5.8 m di spessore tra il 2003 e il 2015, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.46 m w.e. Si tratta di tassi di riduzione sensibilmente inferiori rispetto ai vicini gruppi dell'Adamello e Presanella, che si possono spiegare con le condizioni topo-climatiche locali che favoriscono ombreggiamento e alimentazione valanghiva su molti dei corpi glaciali residui.

Le stesse pareti rocciose scaricano detriti che ricoprono porzioni via via più ampie dei ghiacciai e glacionevati, i quali possono rimanere 'quiescenti' per anni sotto strati di detrito che tendono ad aumentare di spessore. Singole annate molto nevose, come il 2009, 2013 e 2014, sono in grado di apportare consistenti accumuli su questi piccoli corpi glaciali, su cui si concentrano le valanghe, facendoli temporaneamente aumentare di volume.

D'altra parte è possibile notare anche in questo caso come 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 Agola, Sfulmini, settore superiore dei Camosci, Appendice 4).

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 2003 e il 2015. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Ghiacciaio	Status 2015	Variazione altimetrica dal 2003 al 2015 (m)		Bilancio geodetico dal 2003 al 2015 (m w.e.)	
		Superficie merge 2003-2015 (ha)	media	deviazione standard	media
Vernel est	Esistente	1.8	-0.03	0.57	0.00
Gran Vernel VI	Esistente	1.3	-0.99	0.57	-0.08
Gran Vernel V	Esistente	2.0	-2.54	0.57	-0.21
Principale della Marmolada IV	Estinto	1.0	-3.81	0.57	-0.27
Vernale	Esistente	2.5	-3.58	0.33	-0.28
Principale della Marmolada II	Esistente	13.0	-5.45	0.57	-0.42
Principale della Marmolada I	Esistente	161.2	-6.29	0.57	-0.50
Principale della Marmolada III	Esistente	6.4	-6.78	0.57	-0.51
Marmolada ovest	Esistente	9.9	-8.20	0.57	-0.61

In media l'intera superficie glacializzata ha perso 6.2 m di spessore tra il 2003 e il 2015, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.49 m w.e. Questi valori sono confrontabili con quelli calcolati per il gruppo di Brenta e sebbene il ghiacciaio più vasto (Principale della Marmolada I) abbia caratteristiche morfologiche piuttosto diverse, gran parte dei corpi glaciali del gruppo della Marmolada sono simili per conformazione e localizzazione topo-climatica a quelli del Brenta, anche per ragioni geologico-litologiche. Essi beneficiano quindi di alimentazione valanghiva, riparo orografico e copertura detritica.

Il ghiacciaio Principale della Marmolada I ha subito una consistente riduzione areale lungo tutto il suo margine inferiore, conseguente alla condizione di disequilibrio (bilancio negativo) ma anche, a differenza dei ghiacciai dell'Adamello, di una superficie piuttosto inclinata e quindi di spessori limitati. Questo ghiacciaio quindi può reagire più rapidamente, ritirandosi a quote più elevate dove le condizioni sono meno sfavorevoli.

La metà superiore del ghiacciaio presenta tassi di riduzione sensibilmente più bassi (Appendice 5), grazie alle quote più elevate, esposizione settentrionale e sovraccumuli eolici nonché valanghivi sul settore vicino a punta Penia. Il margine superiore del ghiacciaio non si è modificato significativamente tra il 2003 e il 2015, e questa è una chiara indicazione che, con condizioni climatiche simili al periodo analizzato, il ghiacciaio non è destinato all'estinzione in tempi brevi (Pelto, 2006 e 2010). In alcune annate durante il periodo di osservazione, come nel 2009, 2013 e 2014, la neve residua copriva a fine estate più del 75% del ghiacciaio, garantendo un bilancio in pareggio o positivo. Queste osservazioni indicano per il ghiacciaio Principale della Marmolada I condizioni di minor disequilibrio rispetto ad altri ghiacciai del Trentino di dimensioni simili o superiori.

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 2003 e il 2015. I ghiacciai sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Ghiacciaio	Status 2015	Superficie merge 2003-2015 (ha)	Variazione altimetrica dal 2003 al 2015 (m)		Bilancio geodetico dal 2003 al 2015 (m w.e.)	
			media	deviazione standard	media	errore
Busa dei Camosci I	Esistente	1.2	2.93	0.54	0.23	± 0.04
Cima Vezzana	Esistente	1.9	0.28	0.54	0.02	± 0.04
Busa dei Camosci II	Esistente	2.6	-0.33	0.54	-0.03	± 0.04
Della Pala	Esistente	4.3	-4.20	0.54	-0.31	± 0.04
Travignolo I	Esistente	20.8	-4.45	0.54	-0.33	± 0.04
Fradusta superiore	Esistente	4.5	-8.34	0.54	-0.71	± 0.04
Fradusta inferiore	Esistente	10.5	-11.17	0.54	-1.31	± 0.04

In media l'intera superficie glacializzata ha perso 5.7 m di spessore tra il 2003 e il 2015, con un bilancio di massa geodetico medio pari a -0.48 m w.e. E' molto evidente 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 poco negativi (o anche positivi per il glacionevato di Busa dei Camosci I), e i due corpi glaciali residui della Fradusta, che pur essendo esposti a nord sono a prevalente alimentazione diretta e localizzati a quota piuttosto bassa, inferiore all'attuale limite delle nevi persistenti (Appendice 6).

Al persistere delle attuali condizioni climatiche è verosimile immaginare la pressoché completa scomparsa di questi due residui dell'ex-ghiacciaio della Fradusta, mentre è probabile che gli altri ghiacciai e glacionevati possano persistere più a lungo, purché ben alimentati dalle precipitazioni nevose.

3. Osservazioni conclusive

In base ai risultati dei calcoli di bilancio geodetico, il periodo compreso tra gli anni 2003 e 2015 è risultato piuttosto sfavorevole per gran parte dei ghiacciai collocati nella Provincia Autonoma di Trento, ad esclusione di alcuni piccoli glaciogenevati alimentati da valanghe che hanno 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 2003 e il 2015. I gruppi montuosi sono ordinati per bilancio geodetico decrescente.

Gruppo	Superficie merge 2003-2015 (ha)	Variazione altimetrica dal 2003 al 2015 (m)		Bilancio geodetico dal 2003 al 2015 (m w.e.)	
		media	deviazione standard	media	errore
Brenta	139	-5.8	0.58	-0.46	± 0.04
Pale	46	-5.7	0.54	-0.48	± 0.04
Marmolada	199	-6.2	0.57	-0.49	± 0.04
Presanella	872	-8.4	0.37	-0.65	± 0.03
Cevedale	1253	-10.2	0.34	-0.82	± 0.02
Adamello	1373	-13.0	0.38	-1.01	± 0.03
Mandrone (2007-2015)	1628	-11.5	1.01	-1.25	± 0.11
Intera area glacializzata	5509	-10.7	0.65	-0.82	± 0.06

Il valore di bilancio geodetico medio annuo per l'intera area glacializzata della Provincia di Trento (-0.82 m w.e.) è in linea con i risultati ottenuti da Sommer et al. (2020), che basandosi su DEM satellitari hanno quantificato per il periodo dal 2000 al 2014 un bilancio geodetico medio annuo pari a -0.81 ± 0.14 m w.e. sulle Alpi Retiche meridionali, che comprendono interamente i gruppi Ortles-Cevedale (incluse le aree lombarde e alto-atesine), Adamello-Presanella e Brenta. Secondo gli stessi autori, in questo periodo il bilancio geodetico medio annuo su tutte le Alpi europee è stato pari a -0.70 ± 0.13 m w.e., mentre su tutte le Alpi italiane è stato pari a -0.60 ± 0.13 m w.e. Pur considerando la lieve differenza nel periodo considerato, nel contesto alpino la provincia di Trento sembra quindi essere un'area con bilanci leggermente più negativi della media.

Sebbene le condizioni di disequilibrio siano generalizzate, è altresì evidente che esistono differenze piuttosto marcate tra gruppi montuosi. Trascurando le specifiche caratteristiche climatiche locali, la cui analisi non fa parte degli obiettivi di questo lavoro, è possibile evidenziare come le caratteristiche geometriche dei singoli ghiacciai, assieme alle caratteristiche geologico-litologiche e morfologiche dei gruppi montuosi, siano chiaramente collegate alla vulnerabilità e al bilancio geodetico.

I risultati indicano condizioni di maggior disequilibrio e vulnerabilità per i 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. 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 nei gruppi montuosi dolomitici (Brenta, Marmolada e Pale di San Martino) presentano tassi di bilancio di massa nettamente meno negativi, poiché in questi gruppi montuosi sono piuttosto numerosi gli apparati glaciali che beneficiano di condizioni topo-climatiche favorevoli legate all'alimentazione valanghiva, copertura detritica e riparo orografico.

I gruppi del Cevedale e della Presanella presentano condizioni intermedie, perché al loro interno si trovano sia ghiacciai ad elevata vulnerabilità (ad esempio il ghiacciaio del Careser che ha caratteristiche morfologiche simili ai pianori glacializzati dell'Adamello) sia ghiacciai con protezione orografica e alimentazione valanghiva (ad esempio i ghiacciai della Busazza) oppure con elevato range altimetrico e aree tuttora sopra il limite delle nevi persistenti (ad esempio le Vedrette Rossa, Venezia, La Mare).

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 quattro ghiacciai monitorati in Provincia di Trento, tra il 2003 e il 2015. *Per il Mandrone il bilancio geodetico è disponibile per il periodo 2007-2015, il bilancio glaciologico per il periodo 2008-2015.*

Ghiacciaio	Bilancio geodetico (m w.e.)	Bilancio glaciologico (m w.e.)
La Mare	-0.62	-0.68
Careser	-1.67	-1.71
Agola	-1.00	-1.37
Mandrone*	-1.28	-0.54

Considerando le possibili fonti di errore per entrambe le metodologie (Zemp et al., 2013) è possibile dire che bilancio geodetico e glaciologico corrispondono sui ghiacciai del Careser e de La Mare, sono diversi ma probabilmente vicino al limite di distinguibilità sul ghiacciaio d'Agola (servirebbero ulteriori analisi sulla serie di bilancio glaciologico, che sono al di fuori degli obiettivi del presente lavoro), mentre sono chiaramente divergenti sul ghiacciaio del Mandrone (pur considerando l'anno in meno disponibile per il bilancio glaciologico).

E' da rimarcare infine il fatto che tre di questi quattro ghiacciai, selezionati per la misurazione del bilancio di massa con metodo glaciologico, sono tra quelli con bilancio geodetico più negativo tra tutti i corpi glaciali dei rispettivi gruppi montuosi: Careser per il Cevedale, Mandrone per l'Adamello, e Agola per il Brenta. E' evidente in questo caso l'utilità del metodo geodetico per valutare la rappresentatività spaziale di misure intensive come quelle glaciologiche, ed eventualmente per individuare nuovi apparati glaciali su cui focalizzare l'attenzione in futuro.

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.

APPENDICE

Si riportano in appendice le immagini relative alle variazioni di quota tra l'anno 2003 e il 2015 su tutti i ghiacciai della Provincia Autonoma di Trento. Le immagini sono suddivise per gruppo montuoso come segue:

Appendice 1 - Gruppo del Cevedale	pag. 20
Appendice 2 - Gruppo della Presanella	pag. 25
Appendice 3 - Gruppo dell'Adamello	pag. 32
Appendice 4 - Gruppo di Brenta	pag. 35
Appendice 5 - Gruppo della Marmolada	pag. 40
Appendice 6 - Gruppo delle Pale di San Martino	pag. 42

Appendice 1 - Gruppo del Cevedale

Legend

 Merged glaciers extension

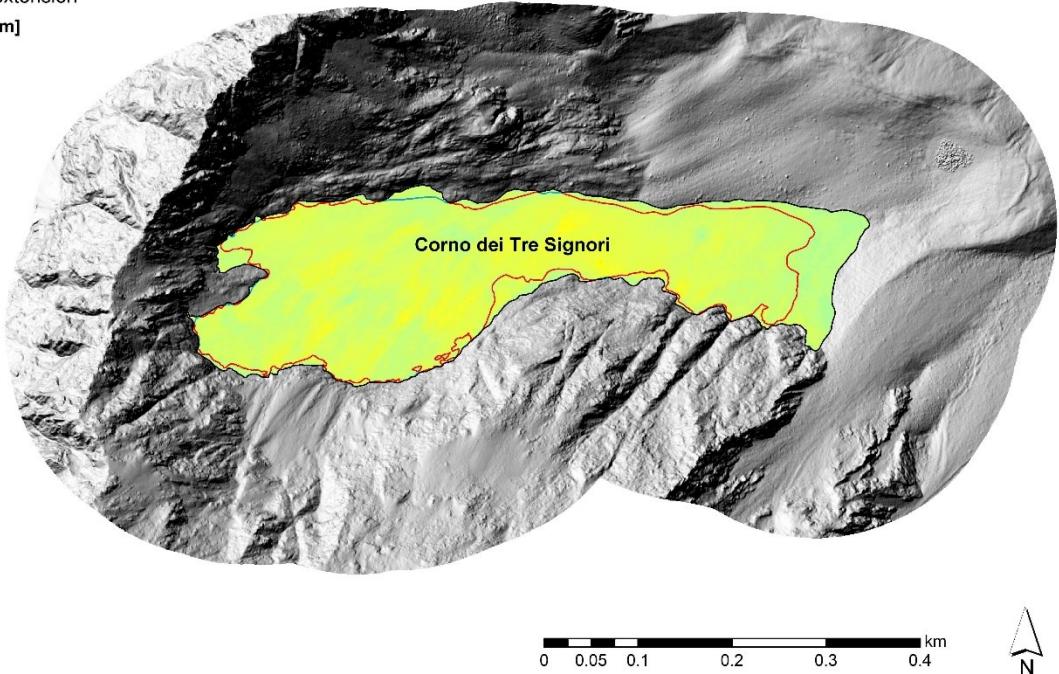
 2015 glaciers extension

 2003 glaciers extension

DOD Ice 2015 - 2003 [m]

 High : 24

 Low : -51



Legend

Merged glaciers extension

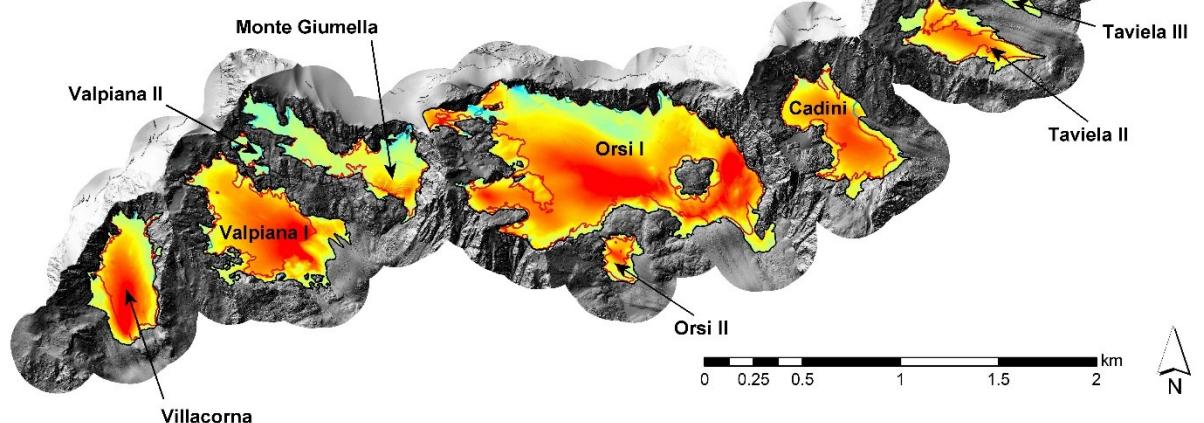
2015 glaciers extension

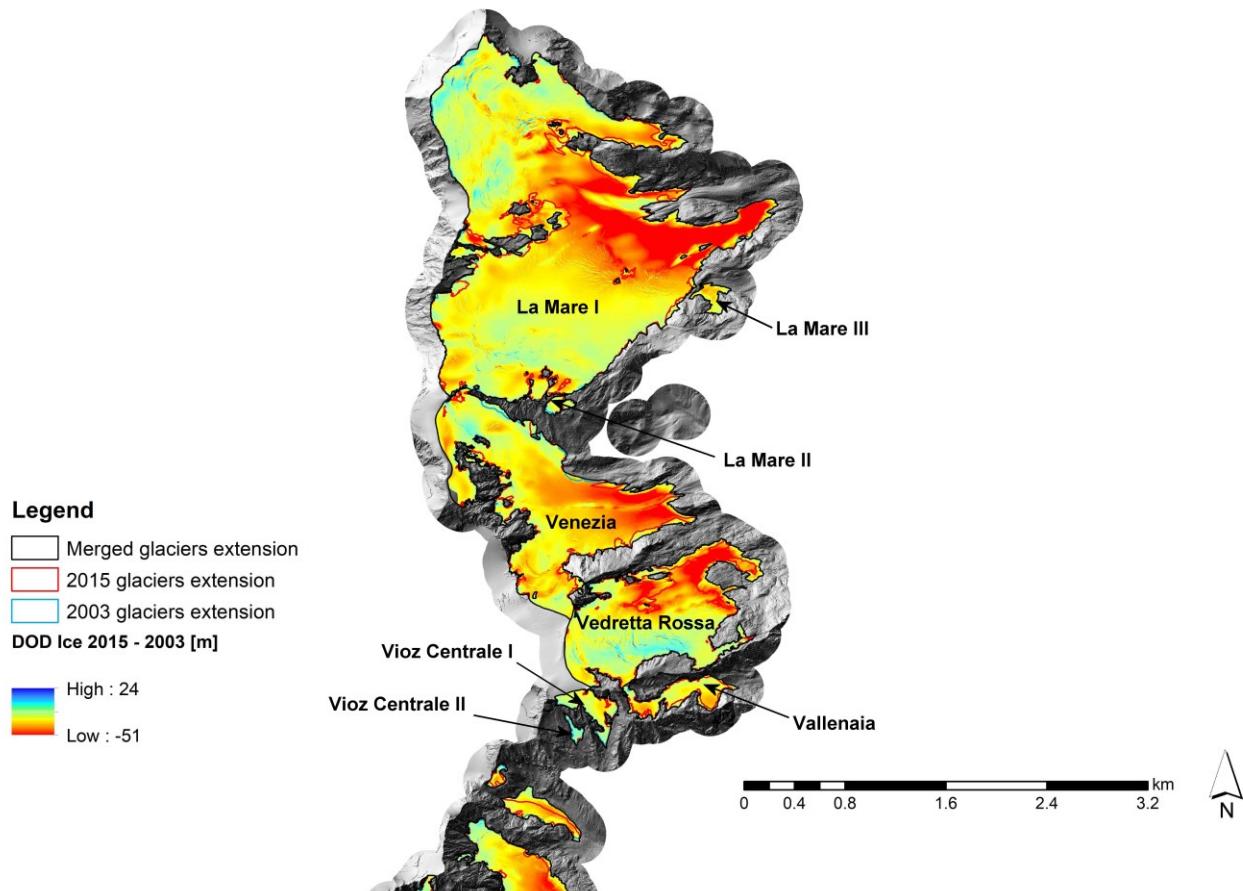
2003 glaciers extension

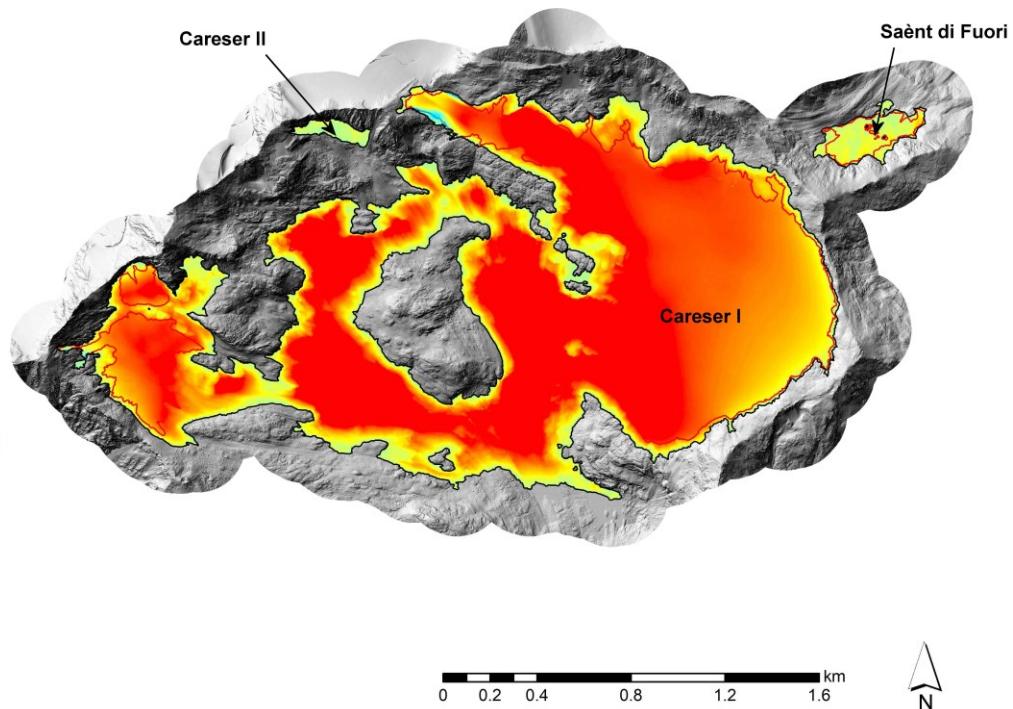
DOD Ice 2015 - 2003 [m]

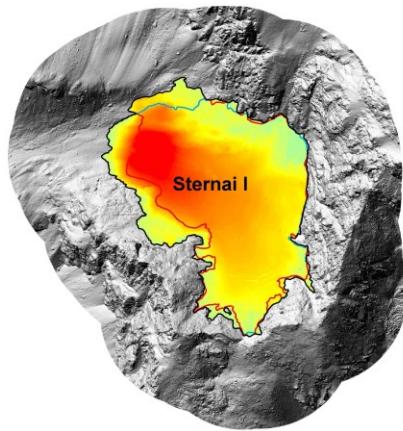
High : 24

Low : -51



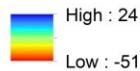




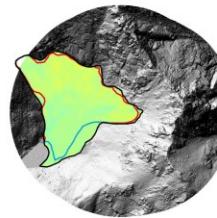
**Legend**

- White box: Merged glaciers extension
- Red box: 2015 glaciers extension
- Cyan box: 2003 glaciers extension

DOD Ice 2015 - 2003 [m]



Sassoni di Sternai



Appendice 2 - Gruppo della Presanella

Legend

Merged glaciers extension

2015 glaciers extension

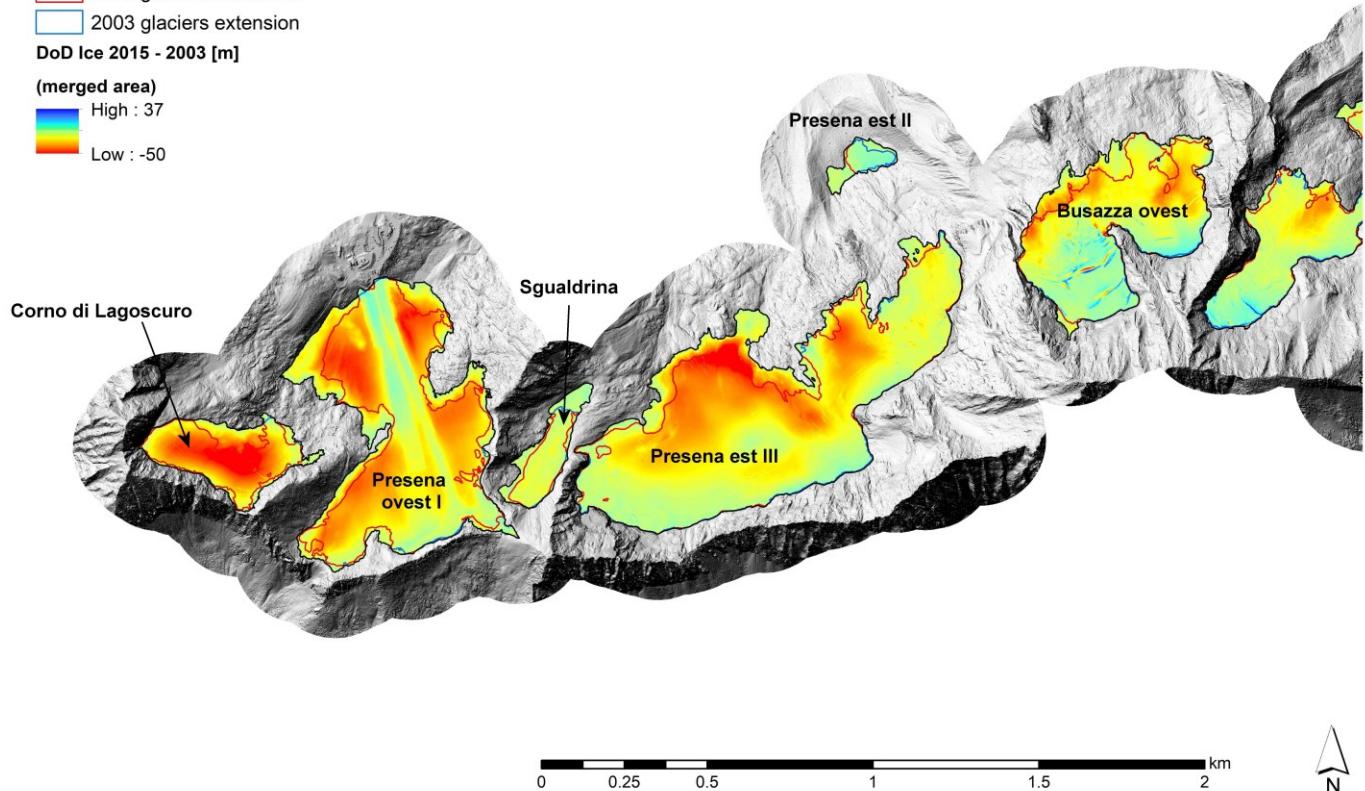
2003 glaciers extension

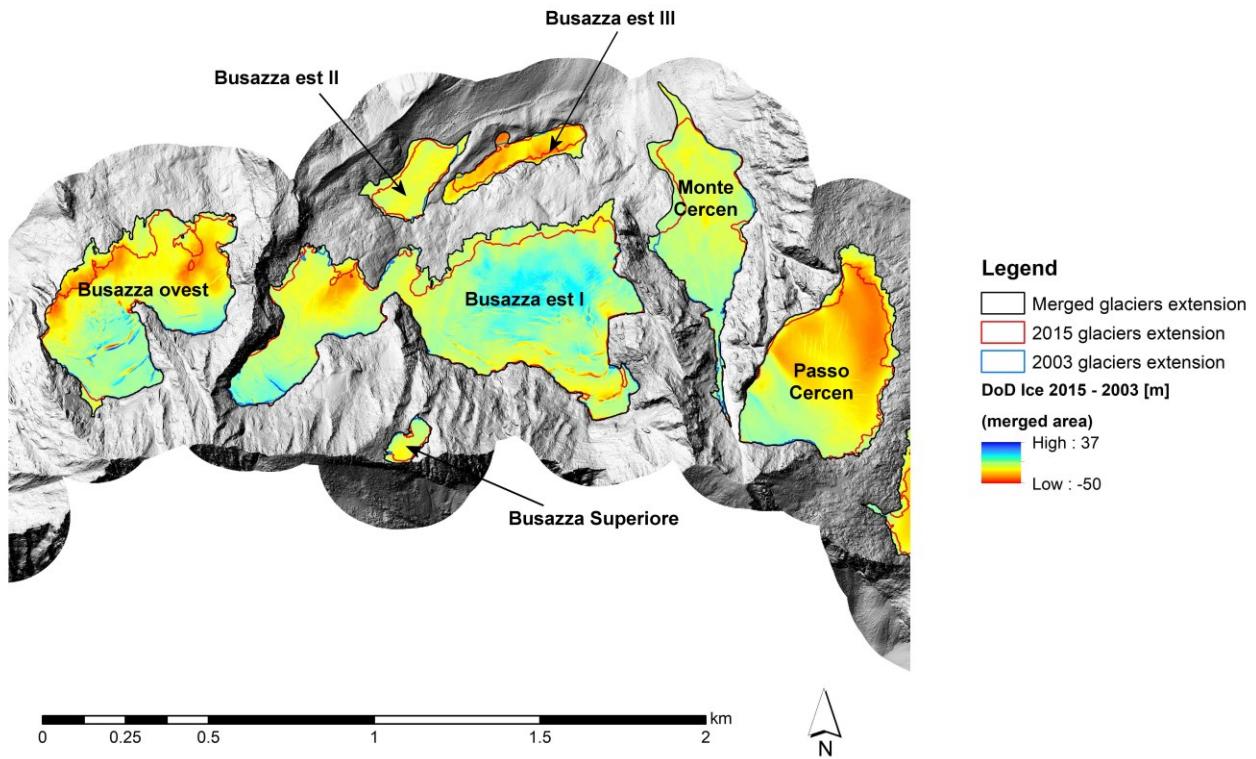
DoD Ice 2015 - 2003 [m]

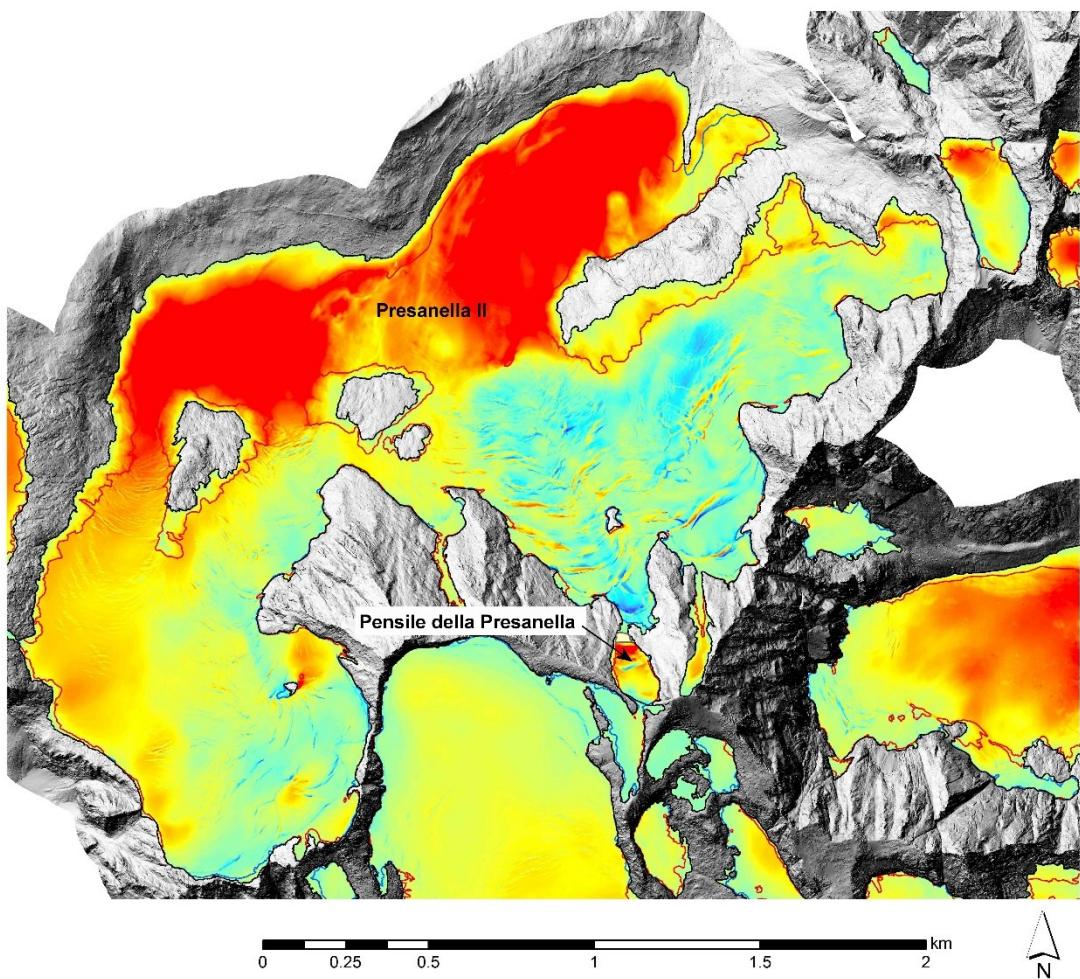
(merged area)

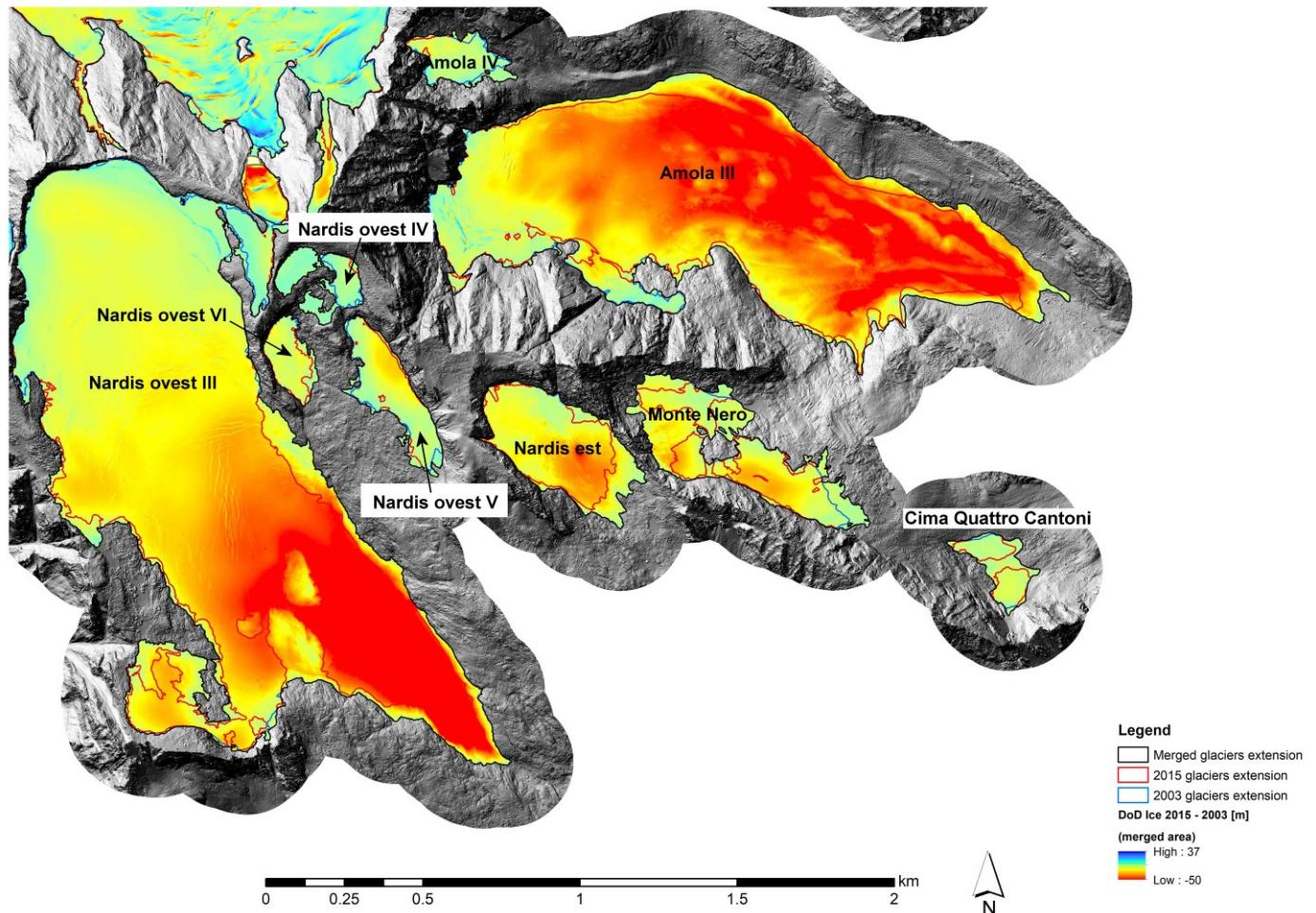
High : 37

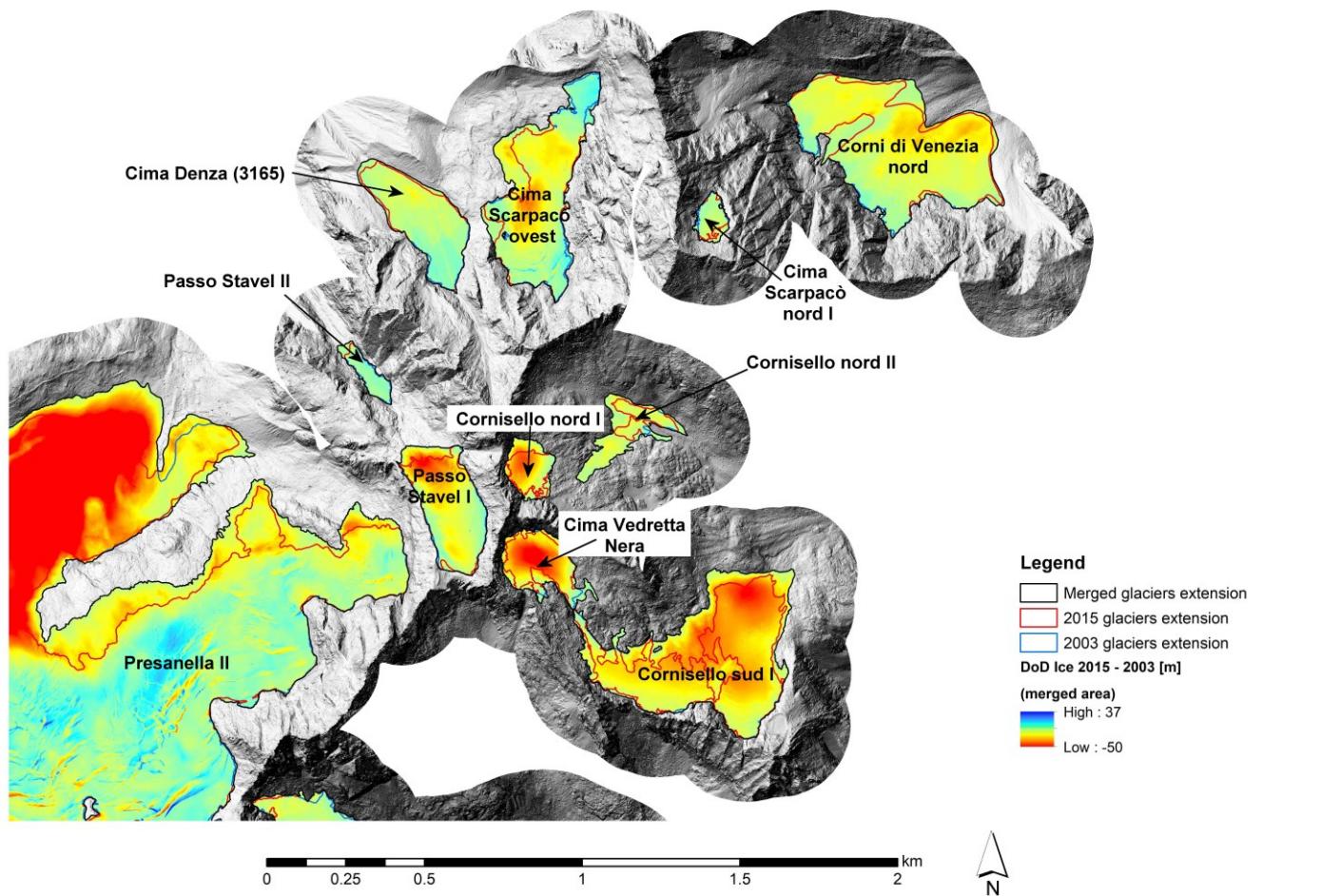
Low : -50

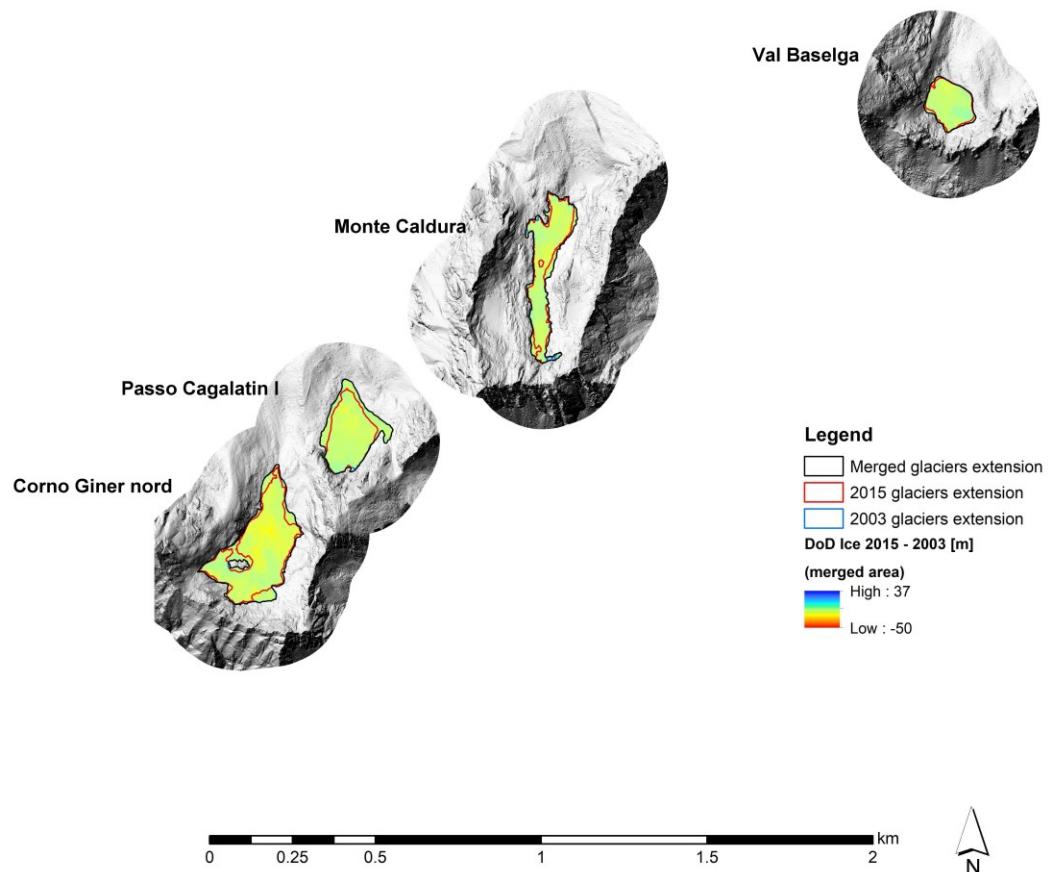


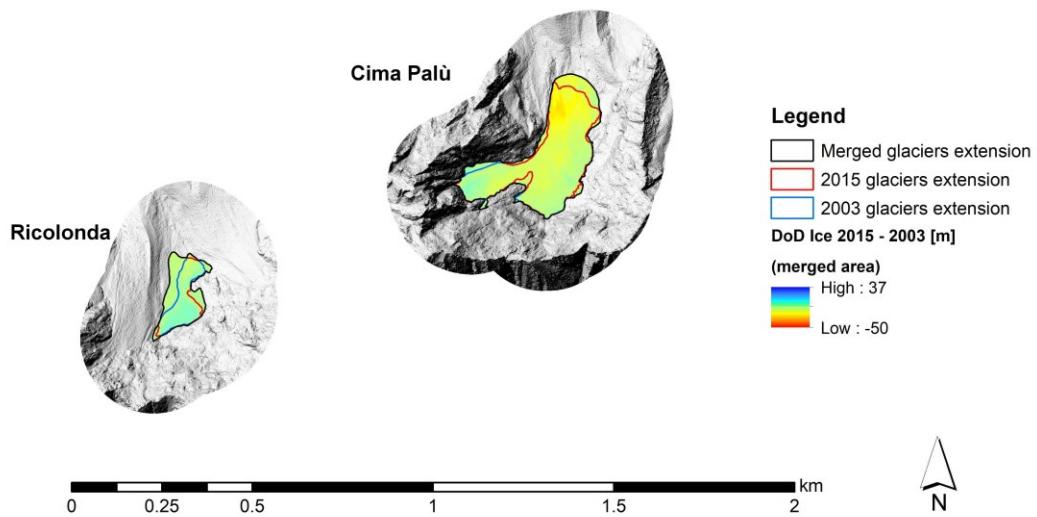




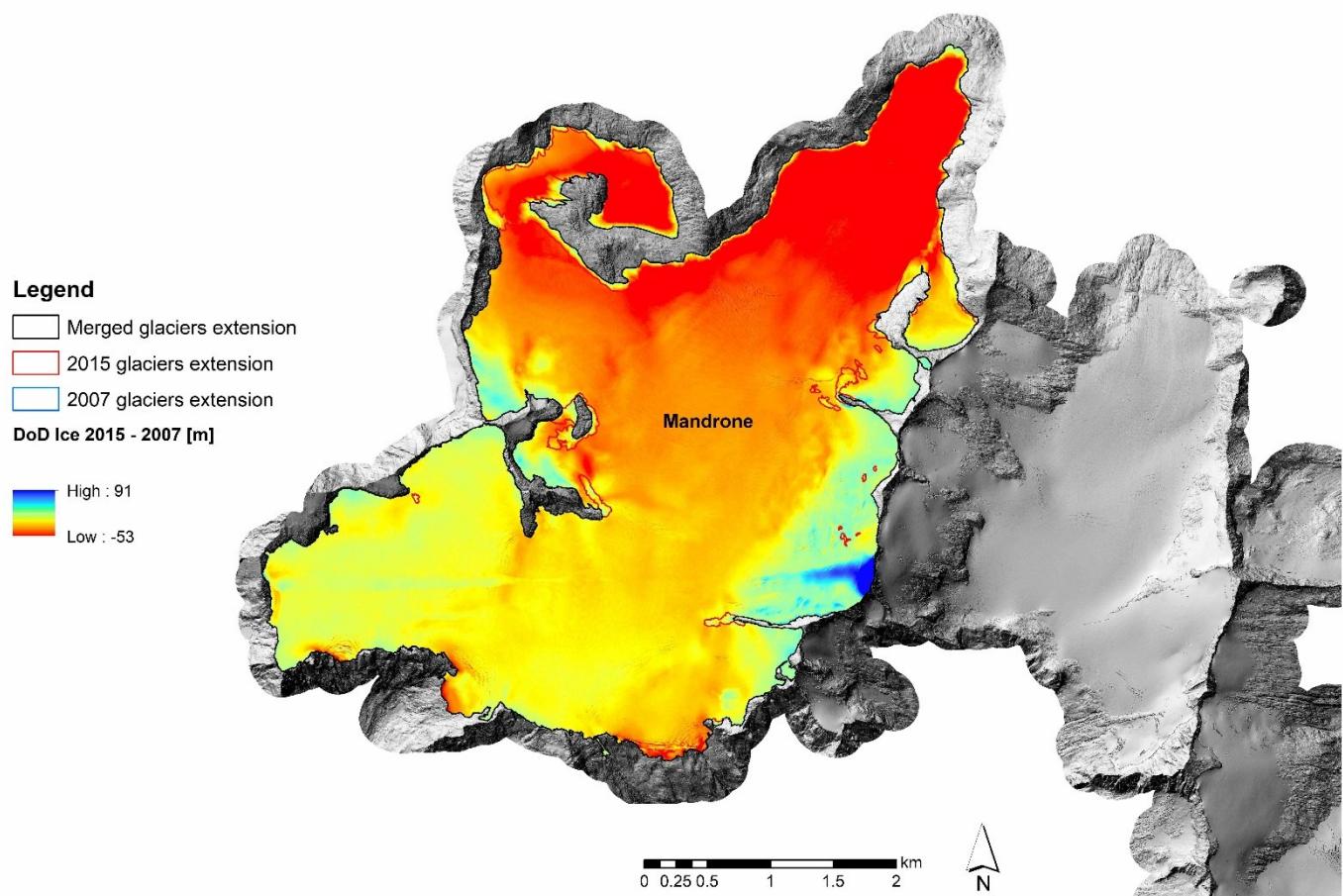


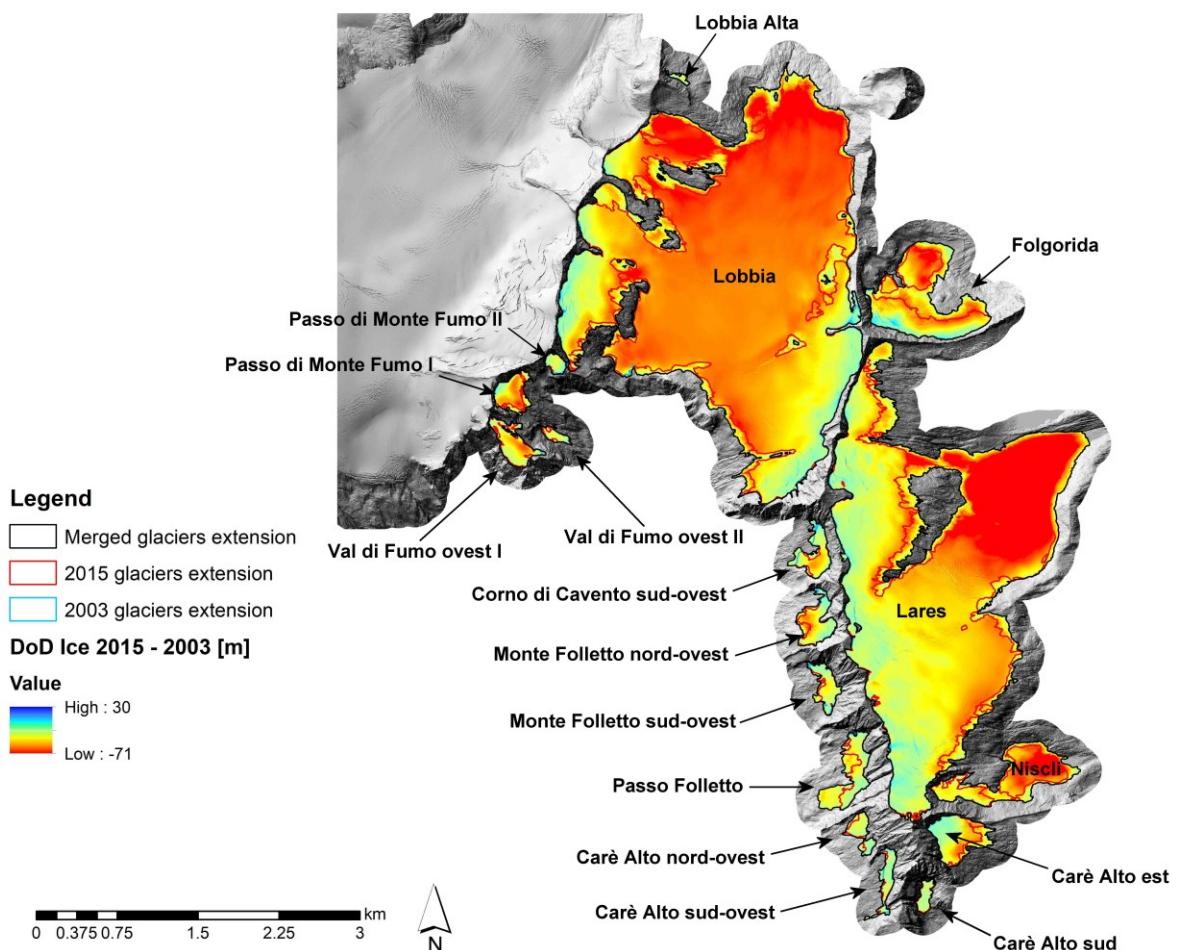


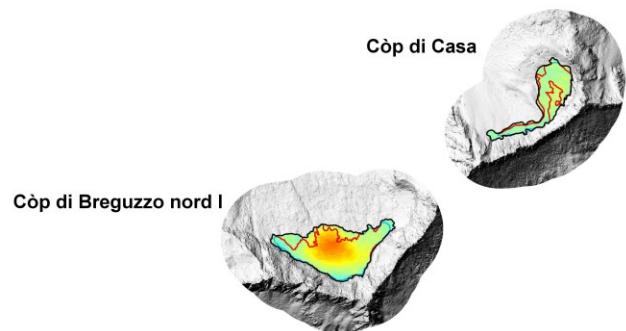




Appendice 3 - Gruppo dell'Adamello





**Legend**

 Merged glaciers extension

 2015 glaciers extension

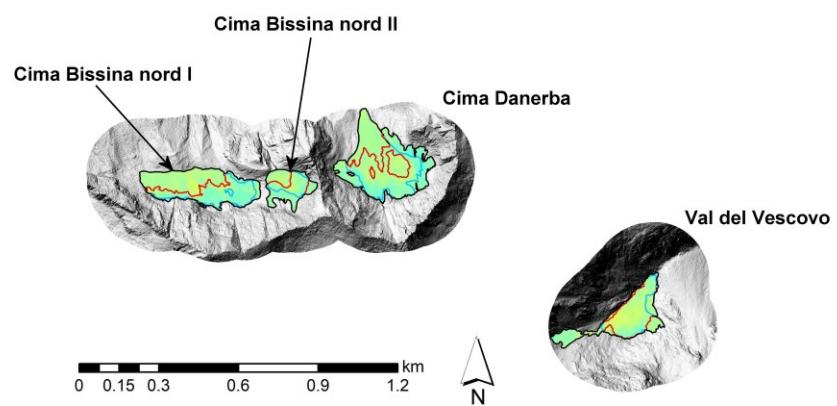
 2003 glaciers extension

DoD Ice 2015 - 2003 [m]

Value

 High : 30

 Low : -71

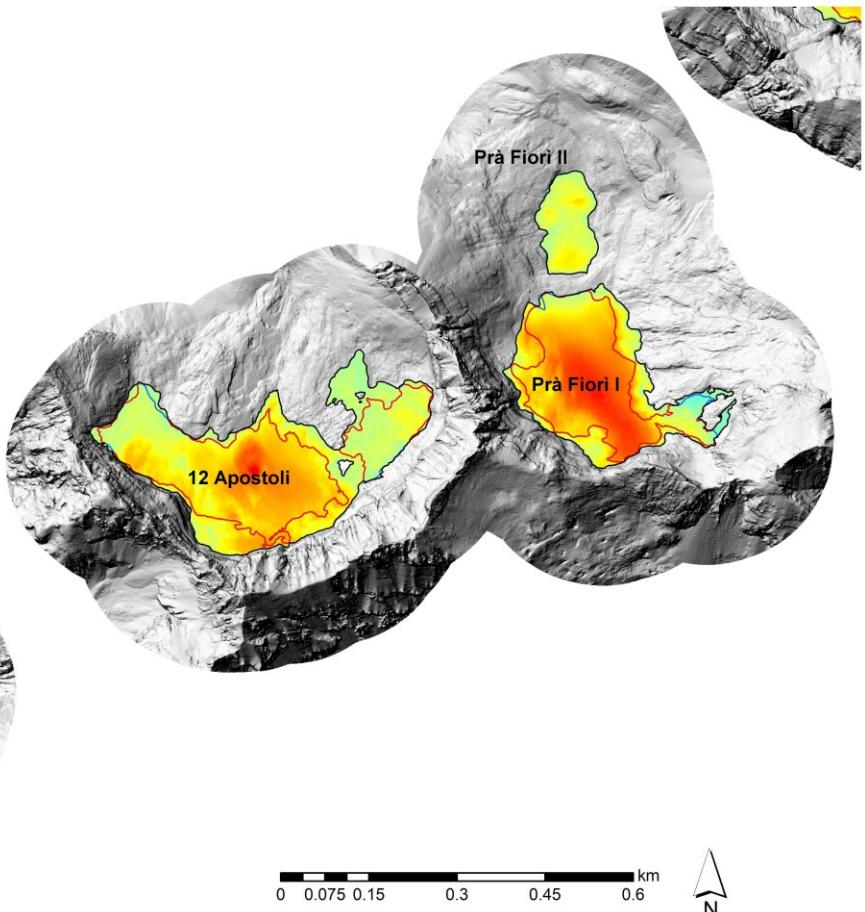
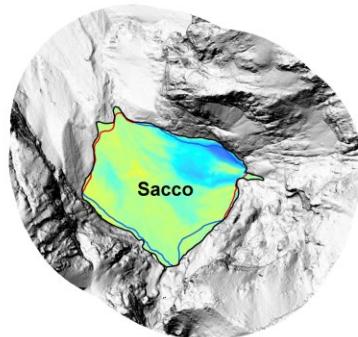


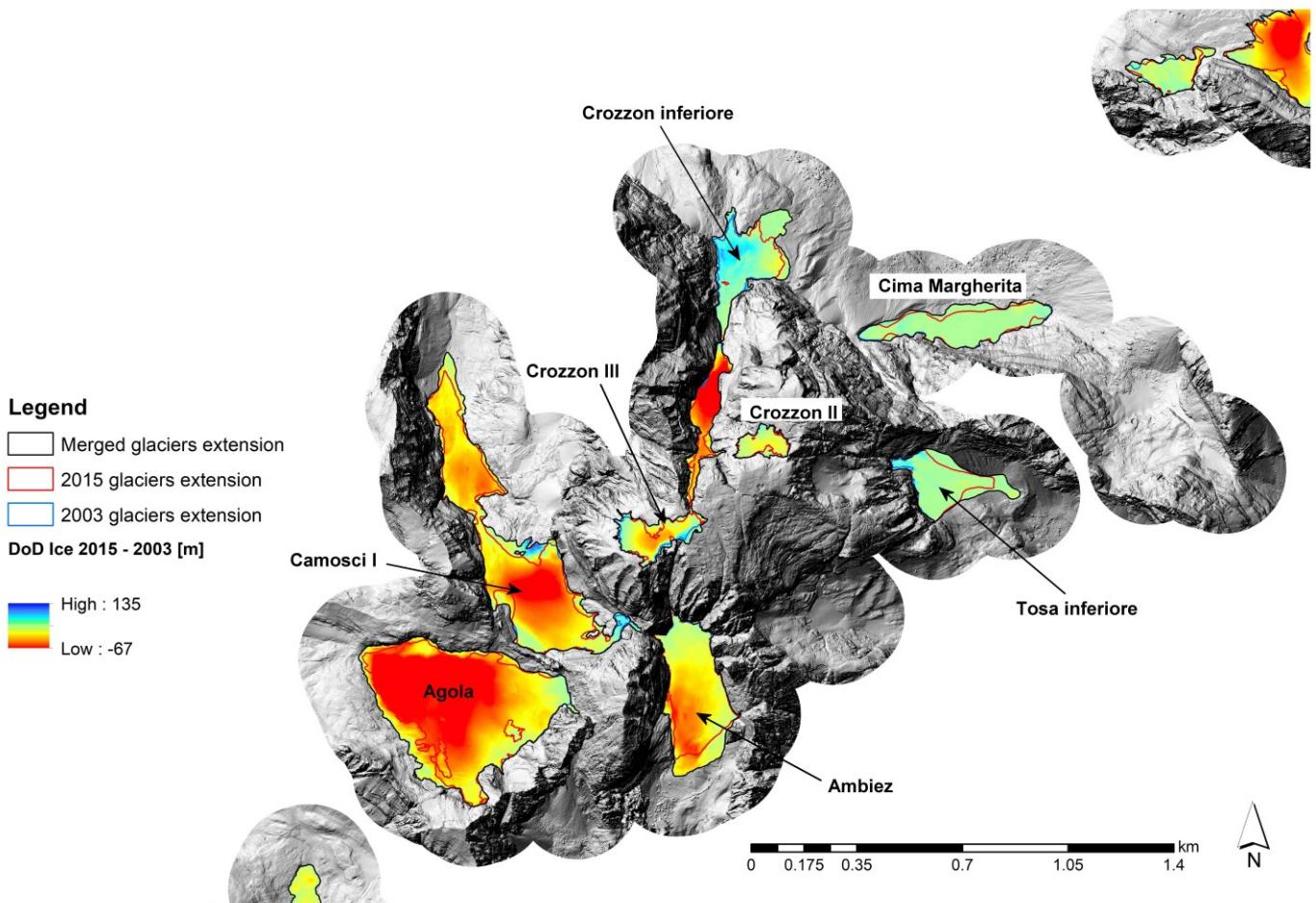
Appendice 4 - Gruppo di Brenta

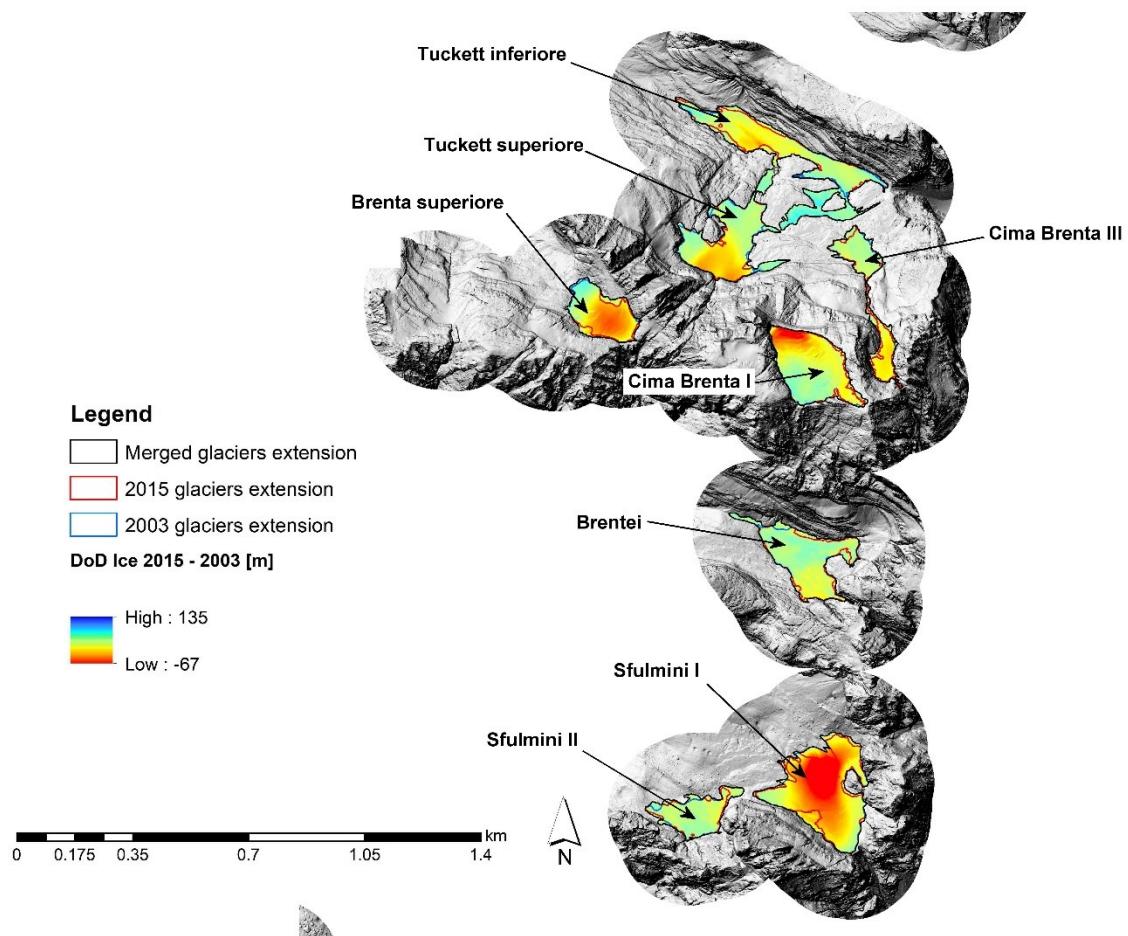
Legend

 Merged glaciers extension 2015 glaciers extension 2003 glaciers extension

DoD Ice 2015 - 2003 [m]

 High : 135
Low : -67

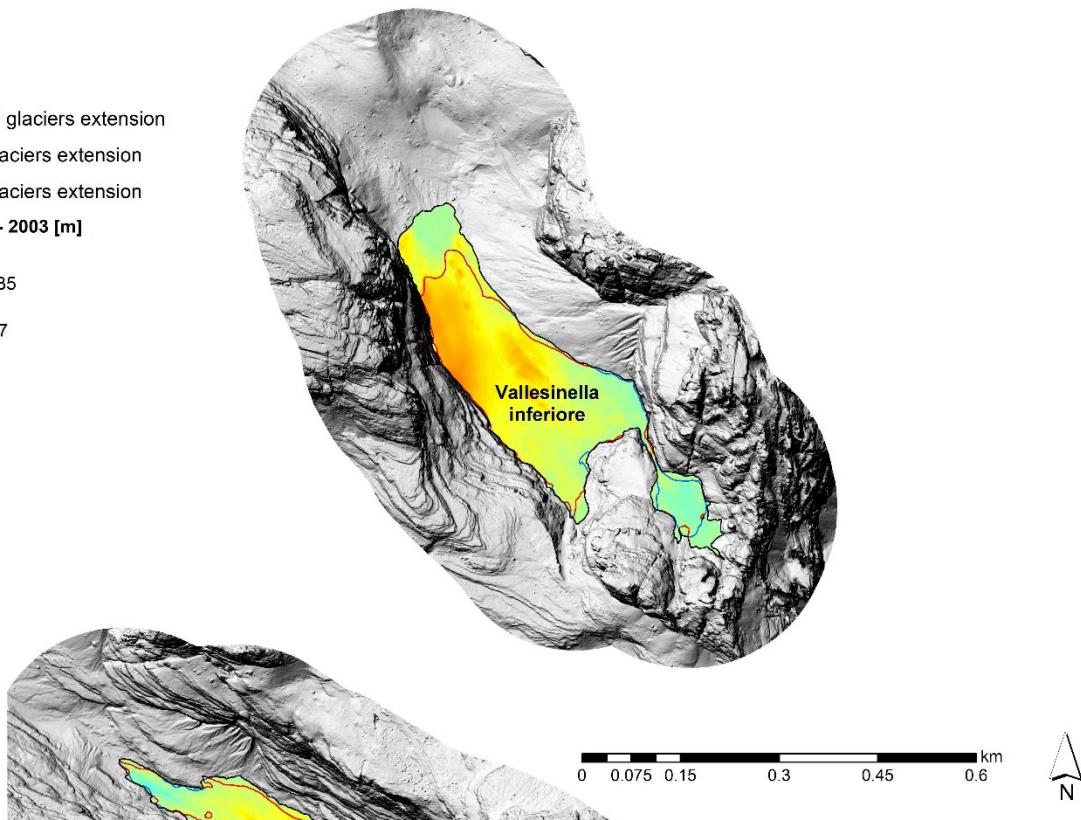


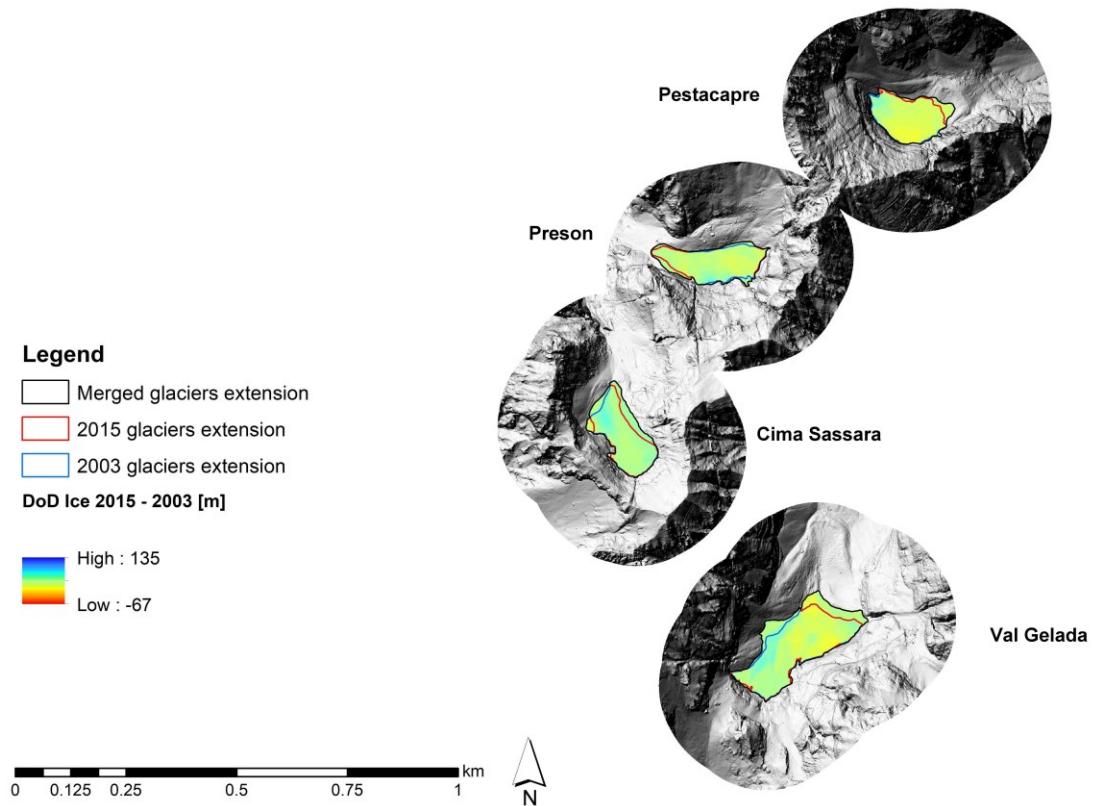


Legend

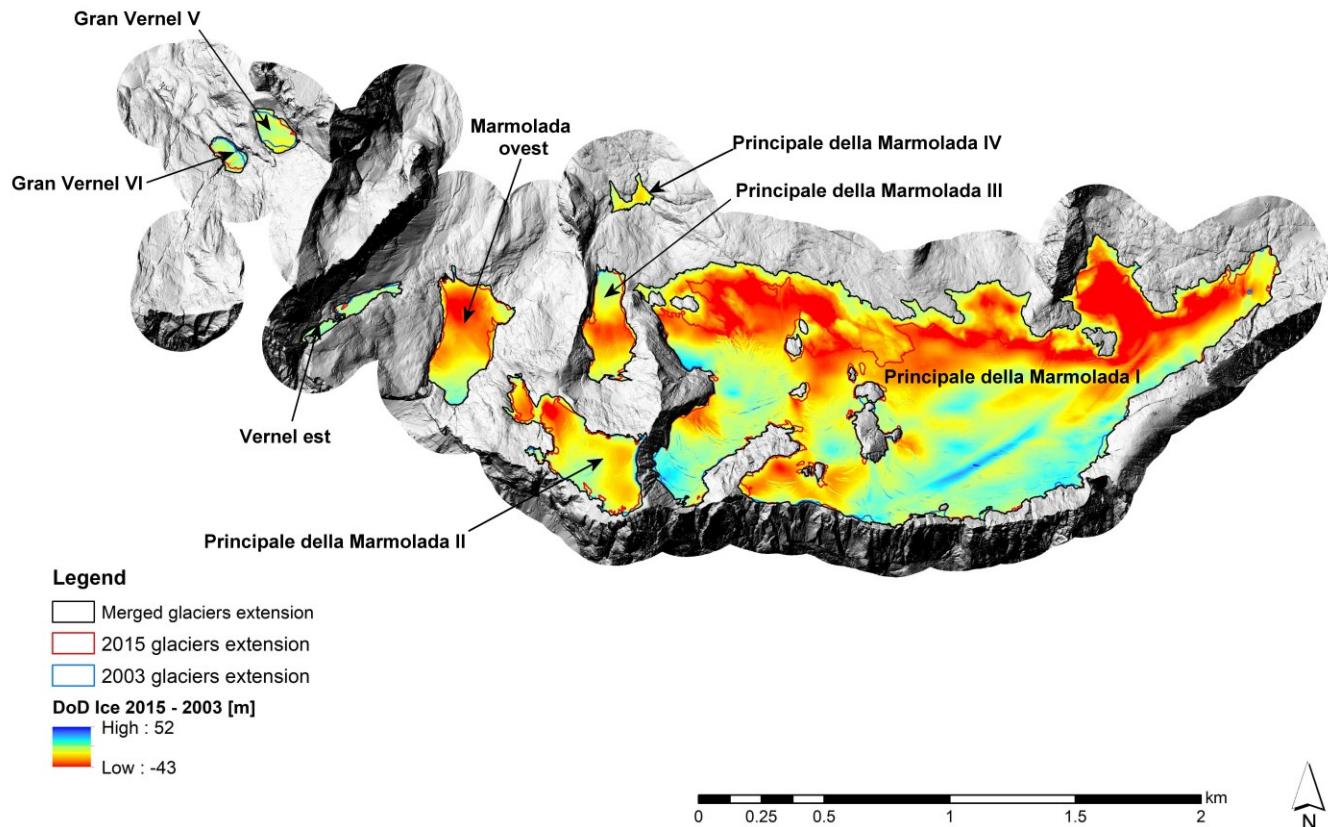
- Merged glaciers extension
- 2015 glaciers extension
- 2003 glaciers extension

DoD Ice 2015 - 2003 [m]

 High : 135
Low : -67



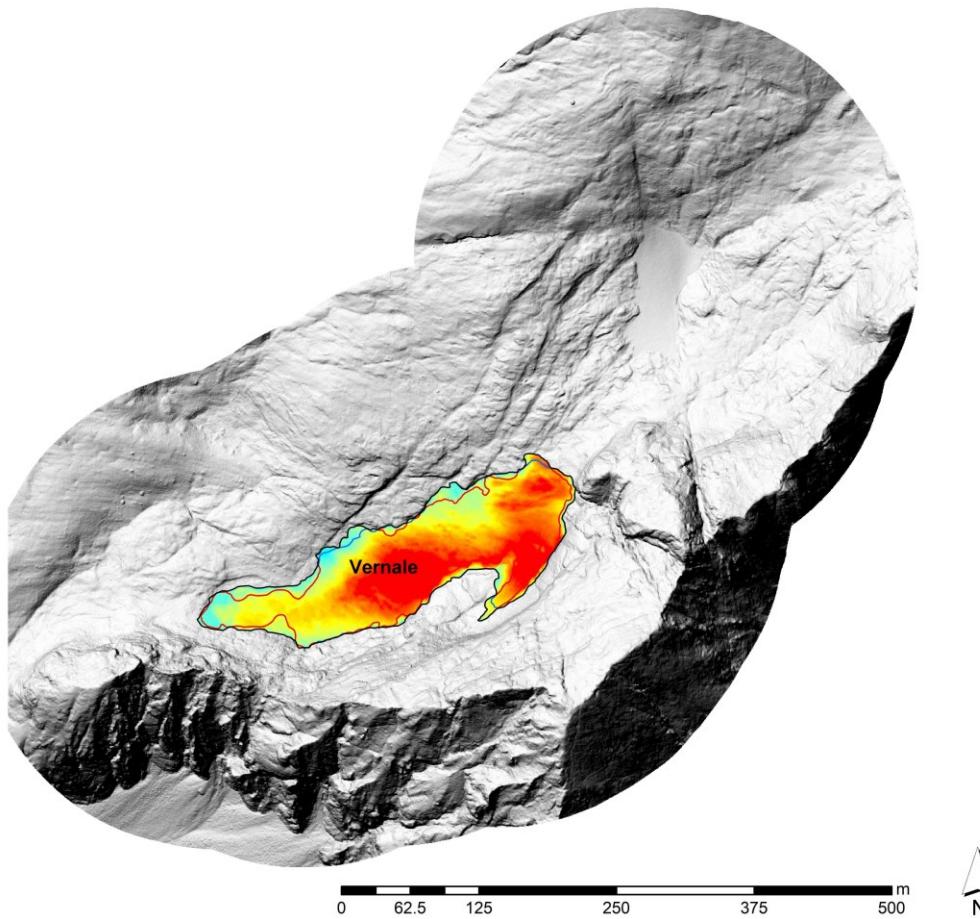
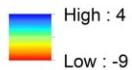
Appendice 5 - Gruppo della Marmolada



Legend

- Merged glaciers extension
- 2015 glaciers extension
- 2003 glaciers extension

DoD Ice 2015 - 2003 [m]



Appendice 6 - Gruppo delle Pale di San Martino

