

I depositi di ghiaccio ipogei della Grotta dello Specchio e del Castelletto di Mezzo (Dolomiti di Brenta, Trentino): morfologia, età ed evoluzione recente

Andrea BORSATO^{1*}, Renza MIORANDI¹ & Onelio FLORA²

¹Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, I-38100 Trento

²Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine, Via Weiss 2, I-34127

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: borsato@mtsn.tn.it

RIASSUNTO - *I depositi di ghiaccio ipogei della Grotta dello Specchio e del Castelletto di Mezzo (Dolomiti di Brenta, Trentino): morfologia, età ed evoluzione recente* - Si presentano le misurazioni morfologiche, glaciologiche, termometriche e le analisi del trizio di due depositi di ghiaccio ipogei nelle Dolomiti di Brenta (Trentino occidentale), formati per rigelo di acque di percolazione. Sebbene generati da processi termodinamici differenti quali la circolazione d'aria a tubo di vento per la Grotta dello Specchio (ingresso 1930 m s.l.m.) e la trappola d'aria fredda per la Grotta del Castelletto di Mezzo (quota 2435 m s.l.m.), i depositi hanno avuto un'evoluzione simile. Nella Grotta del Castelletto di Mezzo il ghiaccio ha iniziato a formarsi nella prima metà del '500, all'inizio della Piccola Età Glaciale, e ha continuato ad accumularsi al tasso di $4,56 \pm 0,61$ cm anno⁻¹ fino alla fine degli anni '80 (spessore max 20,5 m, volume 2000 m³) quando è iniziata l'ablazione netta del deposito a seguito dell'innalzamento delle temperature estive. Nella Grotta dello Specchio è probabile che la formazione del ghiaccio sia iniziata contemporaneamente a quella del Castelletto di Mezzo, ma in questo caso l'accumulo dev'essere stato discontinuo, con annate o decenni in cui prevaleva l'accumulo alternate a periodi in cui l'ablazione aveva il sopravvento. Le fasi di accumulo/ablazione si sono alternate negli ultimi 500 anni in funzione delle fluttuazioni delle temperature estive fino agli anni '80 (spessore max 4 m, volume 150 m³) quando si è verificata una brusca accelerazione dell'ablazione netta con un abbassamento medio della superficie di $7,5 \pm 4,1$ cm anno⁻¹ nel periodo 1997-2005 e una punta massima di -16,1 cm registrata nel 2003 in concomitanza con l'estate eccezionalmente calda. Per entrambi i depositi l'evoluzione recente è quindi controllata dall'ablazione, direttamente correlata alle temperature estive, mentre l'accumulo annuale è ormai minimo. Pertanto, se le temperature estive non dovessero diminuire rispetto a quelle dell'ultimo decennio, l'ablazione veloce in atto potrebbe portare alla completa estinzione dei depositi nell'arco di pochi decenni.

SUMMARY - *Ice cave deposits of Grotta dello Specchio and Castelletto di Mezzo (Brenta Dolomites, Trentino, Italy): morphology, age and recent evolution* - We discuss the morphology, thermometry, tritium analyses and evolution of ice deposits from two caves in the Brenta Dolomites (Italian Alps). Although related to different thermodynamic processes, such as wind-tube air circulation for Grotta dello Specchio (entrance elevation 1930 m a.s.l.) and cold air trap for Grotta del Castelletto di Mezzo (entrance elevation 2435 m a.s.l.), the two deposits experienced a similar evolution. In Castelletto di Mezzo cave, the ice began to deposit during the first half of the '500, at the beginning of the Little Ice Age, and continuously accumulated at 4.56 ± 0.61 cm year⁻¹ rate until the end of '80s (maximum thickness 20.5 m, volume 2000 m³) when, following the rising of the summer temperatures, net ablation prevailed. It is likely that also at Specchio cave the ice began to form at the same time, but in this case the accumulation was discontinuous, with years/decades with prevailing accumulation alternated with periods when net ablation prevailed. The accumulation/ablation phases have been alternated regularly in the last 500 years, ruled by the summer temperatures, until the '80s (maximum thickness 4 m, volume 150 m³) when the ablation rate accelerated abruptly. The lowering of the ice surface was 7.5 ± 4.1 cm year⁻¹ during the period 1997-2005, with the maximum value of -16.1 cm during 2003 as a consequence of the extremely hot summer. At present, the evolution of the two ice deposits is controlled by the ablation, that is directly correlated with the summer temperatures, while the annual accumulation is minimal. Therefore, if the summer temperature will not diminished, the fast ablation process will led to the complete extinction of the ice deposits within few decades.

Parole chiave: ghiaccio ipogeo, temperature ipogee, trizio, Dolomiti di Brenta, ablazione, paleoclima
Key words: ice cave, cave temperatures, tritium, Brenta Dolomites, ablation, palaeoclimate

1. INTRODUZIONE

Le Dolomiti di Brenta, situate nel settore nord-occidentale del Trentino tra la Catena Adamello-Presanella e il Massiccio della Paganella, rappresentano una delle più importanti aree carsiche del Trentino-Alto Adige e si estendono da NNE a SSW per 42 km su un'area di 400 km². Esplorazioni sistematiche, condotte prevalentemente ad opera dei gruppi speleologici di Arco e Lavis, hanno portato alla scoperta di più di 500 cavità, tra le quali la Grotta di Collalto, che ha un'estensione massima rilevata di più di 5 km, l'Abisso dello Statale, che ha una profondità massima di circa 400 m, e il complesso dei Lasteri, che ha uno sviluppo complessivo di 3,5 km (Borsato 1991a, 2001a; Borsato & Zambotto 1994; Borsato *et al.* 2000; Ischia 2004). Il nucleo centrale del massiccio, culminante con Cima Tosa (quota 3173 m s.l.m.), è caratterizzato da diversi piccoli ghiacciai di circo (Bombarda & Parisi 1997) e diverse decine di cavità che ospitano depositi stagionali e/o perenni di ghiaccio o firn (Borsato 1991b; Borsato 2001a; Ischia 2004). In un prossimo contributo (Ischia & Borsato in stampa) verranno presentate le conoscenze riguardo ai più importanti depositi di ghiaccio ipogeo, ai loro aspetti glaciologici e alla morfologia delle cavità che li ospitano. Nel presente lavoro si illustrano le misurazioni morfologiche, glaciologiche e termometriche di due importanti depositi di ghiaccio ipogei ubicati nelle Dolomiti di Brenta (Trentino Occidentale): la Grotta dello Specchio e la Grotta del Castelletto di Mezzo.

2. MATERIALI E METODI

Le misure di temperatura e umidità relativa lungo l'asse delle cavità sono state eseguite attraverso un termometro/psicrometro a mercurio Spige (range da -20 a +50°C precisione ±0,2°, risoluzione 0,1°). Per le registrazioni in continuo si sono utilizzati datalogger Optic StowAway della ONSET (range da -5 a +37°C, precisione ±0,2°, risoluzione 0,15°).

Il campionamento del ghiaccio è stato realizzato utilizzando chiodi da ghiaccio in acciaio, con i quali è stato possibile estrarre circa 0,4 litri di ghiaccio da una serie di fori (da 2 a 4) praticati all'interno dello stesso strato. I campioni, successivamente fusi a temperatura ambiente all'interno delle stesse bottiglie in plastica utilizzate per il campionamento, sono stati quindi filtrati in laboratorio per eliminare l'eventuale particolato presente.

La misura del contenuto di trizio (sottoforma di molecole HTO) dei campioni di ghiaccio è stata determinata con il metodo del conteggio a liquido scintillante, utilizzando un contatore a scintillazione per particelle β modello "Low Level Scintillation

Counter LKB Quantulus" del Laboratorio di Geochimica Isotopica dell'Università di Trieste.

Lo strumento misura il processo di decadimento in conteggi per minuto (CPM), che vengono trasformati in unità trizio utilizzando la seguente formula:

$$1) \quad U.T. = \frac{CPM_{(campione)} - CPM_{(H_2O_{morta})}}{F.A.} \times 52$$

dove CPM_(H₂O_{morta}) si riferisce a un campione d'acqua privo di trizio che permette di valutare il segnale di fondo dello strumento; F.A. rappresenta il fattore di arricchimento del processo di concentrazione elettrolitica; 52 rappresenta una costante che tiene conto dell'efficienza totale.

3. LA GROTTA DELLO SPECCHIO

La Grotta dello Specchio (longitudine 10°57'00" E, latitudine: 46°10'00" N, quota 1930 m s.l.m.) si apre in prossimità del Passo dei Camosci ai margini del piccolo altipiano dei Lasteri sopra Molveno all'interno della formazione dei Calcari Grigi del Lias (Borsato 1991a). La cavità, scoperta ed esplorata dal Gruppo Speleologico CAI-SAT Lavis nel 1989, si apre poco al di sotto della Cima del Palon di Tovre (quota 2011,5 m s.l.m.) e si inoltra in direzione E al di sotto dell'altipiano dei Lasteri (sviluppo 920 m; dislivello -71 m). Dall'angusto ingresso un breve e stretto meandro conduce a un ampio pozzo profondo 13 m (Pozzo del Ghiaccio), alla base del quale si dipartono due meandri subparalleli lunghi un centinaio di metri, che immergono a bassa pendenza verso E fino a congiungersi in un unico meandro che conduce, dopo 200 m, alla sala di crollo terminale (Fig. 1). Questa sala è probabilmente connessa con la superficie esterna attraverso un ingresso alto, come suggerito dalle correnti d'aria presenti.

3.1. Il deposito di ghiaccio del Pozzo del Ghiaccio

Alla base del Pozzo del Ghiaccio è presente un deposito stratificato (lunghezza max 17,5 m; ampiezza max 3,8 m, spessore max 4 m) creato dallo stillicidio delle acque di percolazione, che durante l'inverno e la primavera formano numerose stalattiti e colonne alte fino a 3 m nella parte orientale del pozzo. Dalla base delle colonne, la massa gelata alimenta il deposito fluendo anche nel sottostante meandro, dove forma cascate di ghiaccio e due laghetti ghiacciati. In questa parte della grotta il ghiaccio tende a essere sublimato e rifuso in estate e solo sporadici resti di ghiaccio sono presenti nel tardo autunno.

Nel 1989 il deposito del Pozzo di Ghiaccio occupava completamente la base del pozzo, con una superficie superiore inclinata (5-20°) verso sud e un volume stimato di 150 m³ (Borsato 1991a). La parte

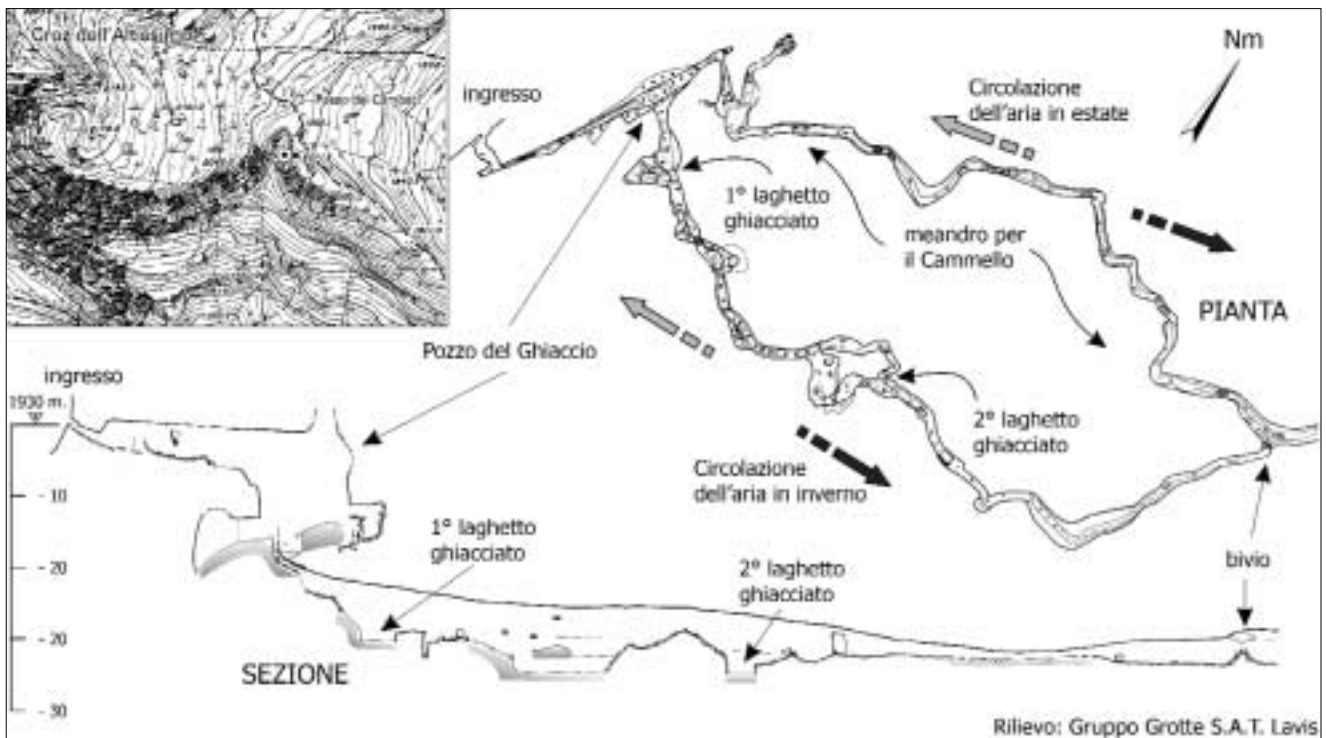


Fig. 1 - Ubicazione ingresso (da CTP scala 1:10.000) e rilievo parziale della Grotta dello Specchio con la posizione dei depositi di ghiaccio (da Borsato 1991a, modificato).

Fig. 1 - Entrance location (from CTP scale 1:10.000) and partial map of Grotta dello Specchio with the position of the ice deposits (modified from Borsato 1991a).

centrale del deposito era tagliata da una marmitta scavata durante l'estate dalle acque di stillicidio provenienti dalla volta e dalle correnti d'aria che fluiscono dalle parti interne della grotta (Fig. 2).



Fig. 2 - Grotta dello Specchio, 07.1989: la marmitta di ablazione alla base del Pozzo del Ghiaccio.

Fig. 2 - Grotta dello Specchio, 07.1989: the ablation pothole at the base of Pozzo del Ghiaccio.

Lungo la marmitta si osserva la stratificazione e la struttura interna dei primi 2,5 m di ghiaccio. La stratificazione è evidenziata sia da cambiamenti cristallografici – la maggior parte dello strato è formata da grossi cristalli poliedrici, mentre il livello millimetrico che separa uno strato dall'altro è costituito da cristalli più piccoli – sia da sottili livelli di impurità detritiche sotto forma di particolato argilloso-limoso (Fig. 3).



Fig. 3 - Grotta dello Specchio, 09.07.1997: il lato N della marmitta di ablazione alla base del Pozzo del Ghiaccio. L'asta sulla sinistra misura 1,40 m.

Fig. 3 - Grotta dello Specchio, 09.07.1997: the N-side of the ablation pothole at the base of Pozzo del Ghiaccio. The meter bar on the left is 1.4 m high.

Nell'estate 1997 lungo la parete N è stato possibile misurare 49 strati il cui spessore variava da 1,5 a 14 cm, con un valore medio di $4,94 \pm 2,95$ cm.

3.2. Temperatura e circolazione d'aria

La presenza di un'entrata alta connessa alla sala di crollo terminale innesca nella grotta una circolazione d'aria a tubo di vento; inoltre, durante l'estate l'intera cavità è attraversata da una forte corrente che fluisce dall'interno verso l'ingresso che funge da ingresso "freddo". In questa stagione la temperatura diminuisce regolarmente da $2,7 \pm 0,2$ °C fino a $0,2 \pm 0,2$ °C nel tratto interessato dai depositi di ghiaccio (Fig. 4). È da notare che la temperatura della parte interna della grotta è in equilibrio con la temperatura media annua alla superficie (Borsato 2001b) e che pertanto l'anomalia termica in estate è determinata esclusivamente dalla presenza della massa ghiacciata. La corrente d'aria si inverte durante il semianno invernale, quando la temperatura esterna è inferiore a quella della cavità, raffreddando i due meandri e congelando le acque di percolazione fino a circa 200 m dall'ingresso.

Nel periodo 1997-1999 si sono registrate ogni 2 ore le temperature dell'aria nel meandro iniziale a 15 m dall'ingresso (Fig. 5 in alto) e successivamente alla base del Pozzo del Ghiaccio (Fig. 5 in basso). Le serie termometriche sono state confrontate con le temperature esterne registrate al Rifugio Graffer (stazione

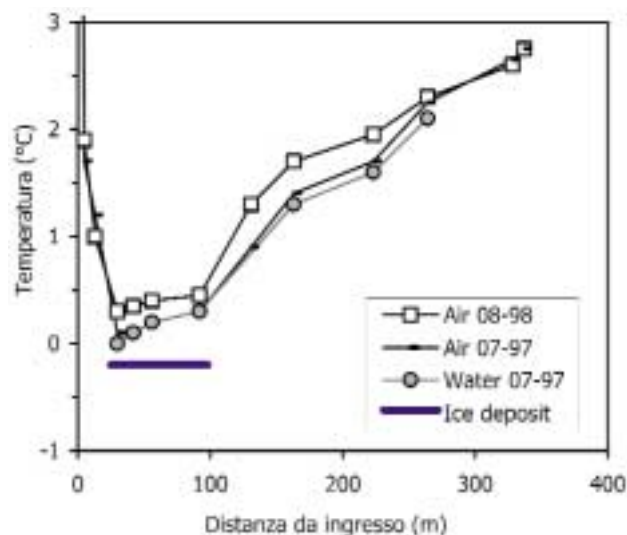


Fig. 4 - Misure di temperatura estive lungo la galleria principale della Grotta dello Specchio. Il tratto interessato dai depositi di ghiaccio, che determina un raffreddamento di $2,5$ °C, è segnato con tratto grosso,

Fig. 4 - Summer temperature distribution along the main gallery of Grotta dello Specchio. The part with ice deposits, that cause a cooling of $2,5$ °C, is marked by a bold horizontal line.

PAT, quota 2263 m s.l.m.). Lungo il meandro iniziale, dal 1.08.97 al 31.07.98 la temperatura media annua è stata di $-0,51 \pm 2,10$ °C, determinata soprattutto dalle basse temperature del semianno invernale (novembre-aprile: media $-1,82 \pm 2,18$ °C) quando la corrente d'aria è diretta verso l'interno della cavità. In questo periodo la temperatura segue da presso le fluttuazioni esterne, attenuandone di circa la metà i picchi positivi e negativi. Nel semianno estivo (maggio-ottobre) la direzione della corrente d'aria si inverte verso l'esterno e la temperatura ipogea, pertanto, non risente delle fluttuazioni esterne, ma è stabile intorno a $0,78 \pm 0,84$ °C, con brevi picchi positivi che corrispondono a picchi negativi della temperatura esterna. In realtà, i picchi negativi in superficie corrispondono a periodi di pioggia: l'infiltrazione delle acque meteoriche, la cui temperatura media è sempre superiore a quella ipogea, provoca un riscaldamento notevole la cui perturbazione può protrarsi per alcuni giorni, con conseguente accelerazione dell'ablazione del deposito di ghiaccio. L'annata successiva (1998-99) alla base del Pozzo del Ghiaccio la temperatura media annua è stata di $-0,70 \pm 1,24$ °C (Fig. 5, in basso), con valori nel semianno invernale (novembre-aprile) di $-1,63 \pm 1,12$ °C, e di $0,21 \pm 0,37$ °C nel semianno estivo (maggio-ottobre). In questo caso, l'attenuazione delle fluttuazioni esterne durante il semianno invernale è molto più pronunciata, sia per la maggior distanza dall'ingresso (30 m), sia per l'inerzia termica della sala dovuta alla presenza del deposito di ghiaccio.

Confrontando i record delle due annate si può affermare che la formazione del ghiaccio è probabilmente concentrata nel tardo autunno (fine ottobre e novembre), quando le temperature esterne scendono ripetutamente sotto gli 0 °C ma il suolo e l'epicarso al di sopra della cavità non sono ancora congelati e permettono l'infiltrazione delle acque piovane e la fusione delle nevicate precoci.

3.3. Misure glaciologiche ed evoluzione morfologica del deposito

A partire dall'estate 1997 fino all'estate 2005 si è effettuato un programma di misurazioni per monitorare la posizione della superficie ghiacciata e la variazione nelle dimensioni della marmitta, utilizzando appositi segnali sulle pareti del pozzo. Nella tabella 1 e in figura 6 sono riportate le misurazioni eseguite: per lo spessore del deposito si è assegnato il valore di 1,0 m alla prima misurazione del 09.07.1997 e si è inserito anche il valore dell'agosto 1989 desunto dal rilievo topografico (soggetto pertanto a una certa imprecisione). Contemporaneamente si è mappata in quattro annate differenti la morfologia del deposito in funzione del ritiro del ghiaccio e dell'apertura di marmitte e cunicoli di ablazione (Fig. 7).

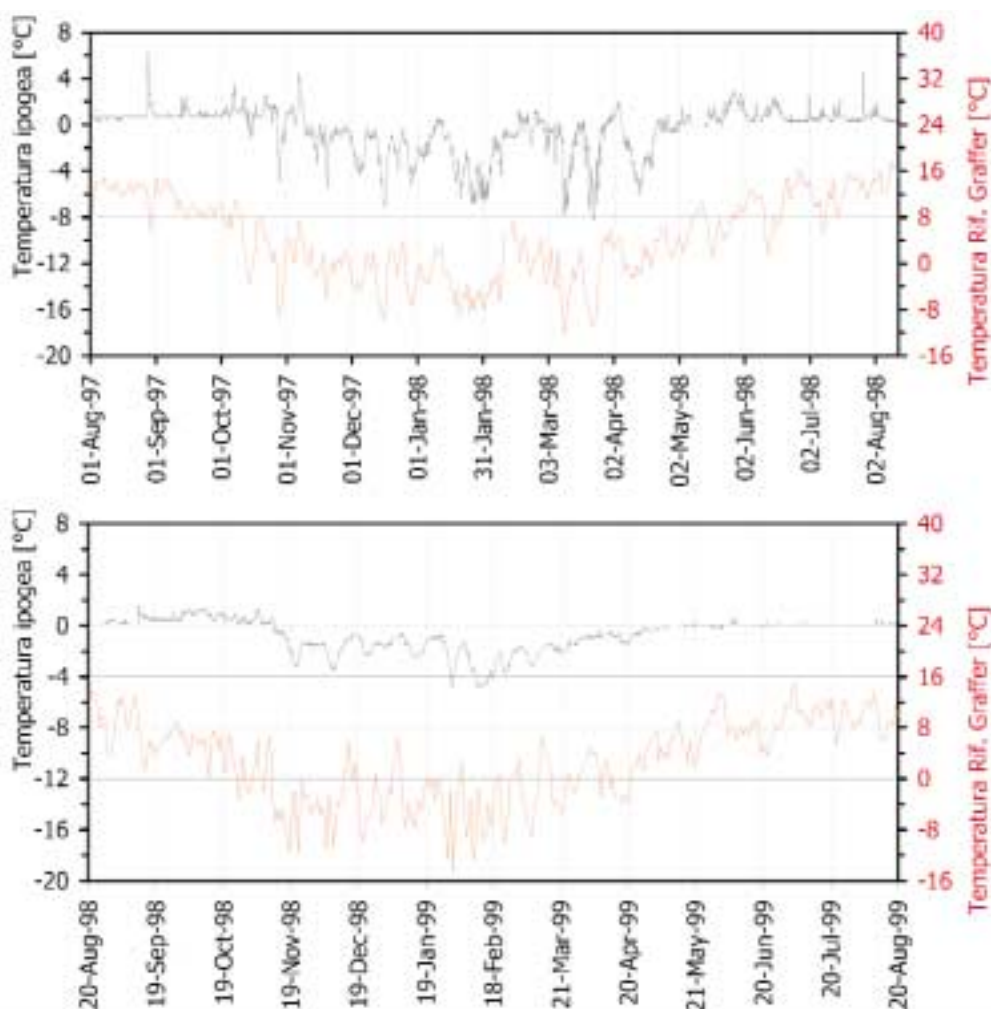


Fig. 5 - In alto: temperatura dell'aria a 15 m dall'ingresso della Grotta dello Specchio (linea nera: tempo di acquisizione 2 ore, media mobile su 6 ore) confrontata con la temperatura dell'aria al Rif. Graffer (rete P.A.T., quota 2263 m s.l.m. – valori medi giornalieri) per il periodo agosto '97 - agosto '98. In basso: temperatura dell'aria alla base del Pozzo del Ghiaccio nella Grotta dello Specchio (linea nera: tempo di acquisizione 2 ore, media mobile su 6 ore) confrontata con la temperatura dell'aria al Rif. Graffer (rete P.A.T., quota 2263 m s.l.m. – valori medi giornalieri) per il periodo agosto '98 - agosto '99.

Fig.5 - Above: Air temperature at 15 m from the entrance of Grotta dello Specchio (black line: acquisition time 2 hours, average over 6 hours) compared with the air temperature at Rif. Graffer (P.A.T. network, elevation 2263 m s.l.m. – daily means) for the period August '97 - August '98. Below: Air temperature at the base of Pozzo del Ghiaccio in Grotta dello Specchio (black line: acquisition time 2 hours, average over 6 hours) compared with air temperature at Rif. Graffer (P.A.T. network, elevation 2263 m a.s.l. – daily means) for the period August '98 - August '99.

Nel complesso, l'ablazione del deposito è proceduta senza interruzioni durante gli 8 anni del monitoraggio (16 anni dal momento del rilievo topografico), con un abbassamento medio della superficie di $7,5 \pm 4,1$ cm all'anno nel periodo 1997-2005. L'abbassamento della superficie non è avvenuto in maniera uniforme, ma si è assistito a un'ablazione accelerata della porzione N del deposito, mentre presso il lato meridionale l'ablazione è stata molto meno drammatica.

Nella figura 8 sono riportati i valori annuali di abbassamento della superficie del deposito (calcolati

mediamente da agosto all'agosto successivo) e del contemporaneo aumento delle dimensioni della marmitta. Si può notare un regolare aumento dell'ablazione durante la fine degli anni '90 da 3 a $7,5$ cm anno^{-1} , valori costanti intorno ai $7-8$ cm anno^{-1} tra il 1999 e il 2004, e il valore estremo di $16,1$ cm registrato nell'anno 2003.

L'evoluzione della superficie del deposito e l'allargamento della marmitta di ablazione negli anni 1989, 1997 e 2005 sono visualizzati nelle figure 9, 10 e 11. Innanzitutto, osservando la prima fascia ricca in inclusioni argilloso-limose (corrispondente alla som-

Tab. 1 - Grotta dello Specchio. a) Distanze in verticale della superficie del deposito di ghiaccio (riferite al valore 100 cm del 09.07.1997) e dimensioni della marmitta di ablazione; le misure del 11.10.1989 sono desunte dal rilievo topografico originale. b) Abbassamento annuo della superficie del ghiaccio e incremento dimensionale della marmitta.

Tab. 1 - Grotta dello Specchio. a) Vertical distances of the ice surface (referred to the value of 100 cm at 09.07.1997) and dimensions of the ablation pothole; measurements of 11.10.1989 are reconstructed from the original cave map. b) Annual lowering of the ice surface and increase of the ablation pothole.

(a)

Punto	Data										
	11/10/89	09/07/97	20/08/98	26/08/99	31/10/99	18/08/00	10/08/01	02/09/02	21/10/03	22/09/04	24/09/05
Parete E, zona Sud [A-B]		100	104,2	112,5	115,5	119	126,7	133,3	146	157	163,5
Parete Sud [C-D]		100	100,2	104,5	107,5	109,5	115,8	120,8	137	142	141
Parete W, zona Sud [E-F]		100	104,8	113,5	117	122	130,8	139,5	155,5	159	156
Parete W, centro [G-H]		100	108,0	115,5	122	128,2	--	--	--	--	--
Parete W, zona Nord [J-K]		100	107,5	116,2	120,5	128	138,6	149,5	169	175	179,5
Media [A-B-C-D-E-F-J-K] (cm)	75	100	104,2	111,7	115,1	119,6	128,0	135,8	151,9	158,3	160,0
Diametro E-W marmitta (cm)	235	325	336	348	358	363	375	388	420	432	440
Diametro N-S marmitta (cm)	350	457	470	487	491	514	536	549	592	616	636

(b)

	Periodo										
	1989-97	1997-98	1998-99	1999-00	2000-01	2001-02	2002-03	2003-04	2004-05	Media 97-05	
Abbassamento annuo (cm)	-3,1	-4,2	-7,5	-7,9	-8,3	-7,8	-16,1	-6,4	-1,7	-7,5 ±4,1	
Aumento annuo N-S marmitta (cm)	13,4	13,0	17,0	27,0	22,0	13,0	43,0	24,0	20,0	22,4 ±9,7	
Aumento annuo E-W marmitta (cm)	11,3	11,0	12,0	15,0	12,0	13,0	32,0	12,0	8,0	14,4 ±7,4	

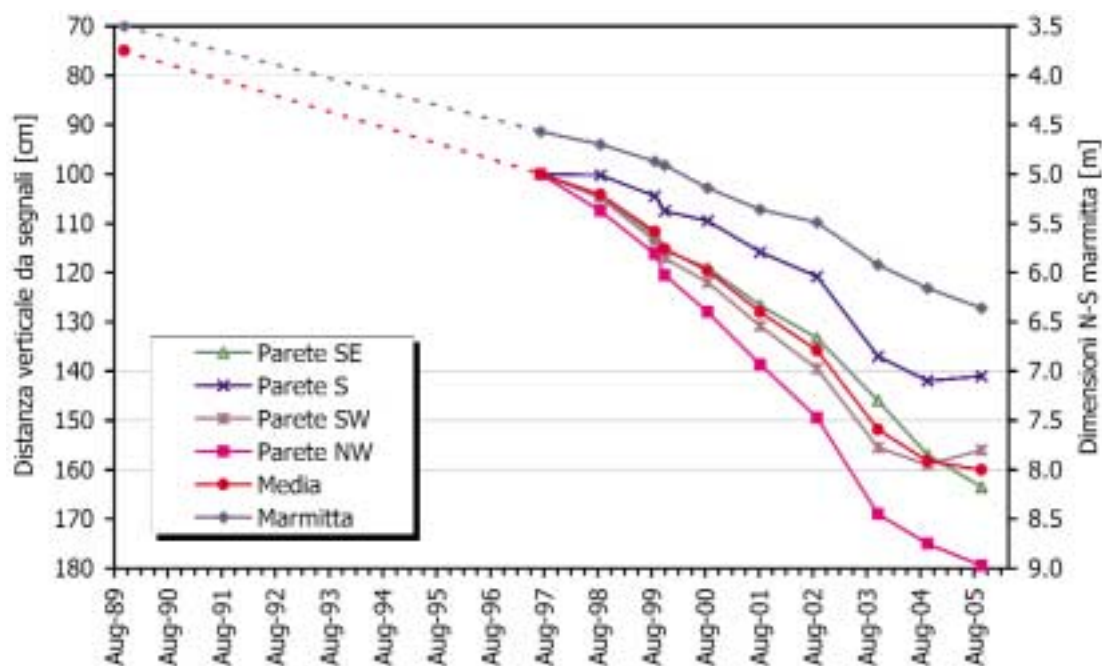


Fig. 6 - Pozzo del Ghiaccio della Grotta dello Specchio: distanza verticale della superficie ghiacciata da segnali di riferimento per il periodo 1989-2005 (il valore 100 cm corrisponde al 09.07.1997) comparati al diametro N-S della marmitta di ghiaccio. I valori dell'agosto 1989 sono ricostruiti dal rilievo originale della grotta.

Fig. 6 - Ice deposit in Grotta dello Specchio: position of the ice surface with respect to reference markers for the period 1989-2005 (the value 100 cm correspond to 09.07.1997) compared with the N-S diameter of the ice pothole. The values of August 1989 were reconstructed from the original cave map.

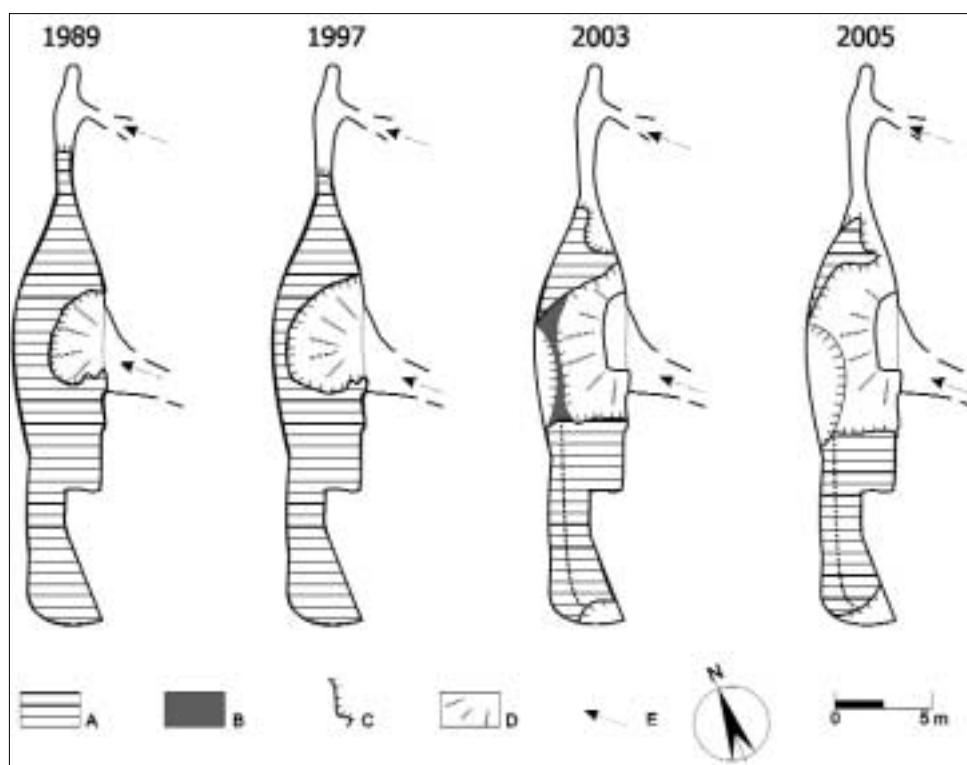


Fig. 7 - Evoluzione del deposito di ghiaccio della Grotta dello Specchio dal 1989 al 2005. A) Superficie del deposito di ghiaccio; B) ponte di ghiaccio; C) scarpata nel ghiaccio; D) marmitta scavata nel ghiaccio (le frecce indicano la pendenza); E) direzione della corrente d'aria in estate.

Fig. 7 - Evolution of the ice deposit in Grotta dello Specchio for the period 1989-2005. A) Surface of the ice deposit; B) ice bridge; C) ice escarpment; D) ice pothole (the arrows point downslope); E) summer air current direction.

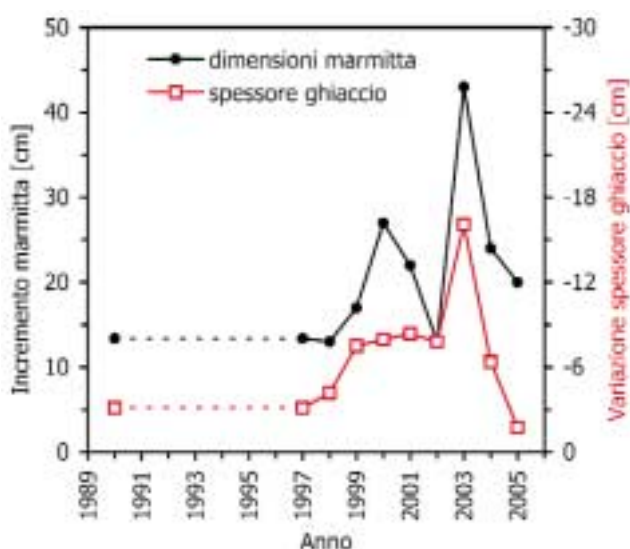


Fig. 8 - Incremento annuale del diametro N-S della marmitta nel deposito di ghiaccio della Grotta dello Specchio confrontato con la variazione dello spessore complessivo del deposito. I valori dell'agosto 1989 sono ricostruiti dal rilievo originale della grotta.

Fig. 8 - Annual increase of the N-S diameter of the pothole in the ice deposit at the base of Pozzo del Ghiaccio compared with the annual variation of the ice thickness. The values of August 1989 were reconstructed from the original cave map.

mità dell'asta graduata nella figura 3), si può notare che l'abbassamento della superficie è dovuto interamente all'ablazione superficiale. Nel 1997 (Fig. 10) la marmitta aveva quasi completamente eroso il deposito da parte a parte e solamente uno stretto ponte di ghiaccio largo 0,55 m collegava l'estremità N a quella S. Nel 2001 il ponte veniva completamente eliso, dividendo in due parti la porzione superiore del deposito, e contemporaneamente si apriva sul lato W una seconda marmitta larga 0,5 m comunicante con un pozzo scavato tra roccia e ghiaccio profondo 4 m. Da questa marmitta si è individuato, a partire dall'anno successivo, un condotto del diametro di 1,5 m scavato tra ghiaccio e roccia nella porzione SW del deposito (Fig. 12).

A seguito dell'ablazione eccezionale del 2003, la morfologia del deposito di ghiaccio è cambiata radicalmente, isolando di fatto il deposito in due tronconi e lasciando poche speranze sulle possibilità di conservazione del ghiaccio negli anni a venire. Nonostante ciò, all'inizio di settembre del 2005 un brusco calo della temperatura esterna provocò una nevicata precoce al di sopra dei 1600 m e, nel corso della visita del 24 settembre, si poté osservare la presenza di uno strato di ghiaccio di neoformazione che ammantava il deposito soprattutto nella sua parte

meridionale (Fig. 13). La formazione di ghiaccio si è propagata in tutte le direzioni a partire dalla sommità del deposito, sia sul lato N (Fig. 14) ma soprattutto verso l'estremità S, dove ha formato un'articolata rete di festoni e stalattiti (Figg. 15, 16) che alimentano a loro volta una colata sul pavimento del cunicolo.

Sebbene non si siano effettuate analisi isotopiche per la datazione del deposito di ghiaccio (come realizzate invece per la Grotta del Castelletto di Mezzo), dalle misure della marmitta di ablazione è possibile determinare il momento di apertura della stessa, feno-



Fig. 9 - Grotta dello Specchio, 07.1989: la base del Pozzo del Ghiaccio con il deposito e la marmitta di ablazione.

Fig. 9 - Grotta dello Specchio, 07.1989: the base of Pozzo del Ghiaccio with the ice deposit and the ablation pothole.



Fig. 10 - Grotta dello Specchio, 09.07.1997: la base del Pozzo del Ghiaccio con il deposito e la marmitta di ablazione. L'asta sulla sinistra misura 1,40 m.

Fig. 10 - Grotta dello Specchio, 07.1989: the base of Pozzo del Ghiaccio with the ice deposit and the ablation pothole. The meter bar on the left is 1,4 m high.



Fig. 11 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: il lato N della marmitta di ablazione alla base del Pozzo del Ghiaccio. In basso a sinistra si nota l'estremità N della seconda marmitta.

Fig. 11 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: the N-side of the ablation pothole. In the lower left corner it is possible to observe the second pothole.



Fig. 12 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: il lato S del deposito di ghiaccio con il cunicolo apertosi nel 2002.

Fig. 12 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: the S-side of ice deposit with the new passage opened in 2002.



Fig. 13 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: il lato S del deposito alla base del Pozzo del Ghiaccio con la coalescenza delle 2 marmitte. Sulla parete della marmitta E (a sinistra) si nota un blocco di roccia incluso nel ghiaccio ricoperto da una colata spessa 3 cm di ghiaccio di neoformazione, che ricopre anche il detrito alla sommità del deposito.

Fig. 13 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: the S-side of the ice deposit with the coalescence of the two potholes. On the E-side (left) it is possible to observe a rock fragment coated by a newly formed 3 cm-thick ice flow, that covered also the debris layer atop the ice deposit.



Fig. 14 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: il lato S della marmitta W. Sulla destra del deposito stratificato si notano due festoni verticali di recente formazione che vanno ad alimentare la colata di ghiaccio trasparente alla base. L'asta misura 1 m.

Fig. 14 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: the S-side of W pothole. The old stratified ice is coated by two newly formed columns that fed the transparent basal ice. The meter bar is 1 m high.



Fig. 15 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: estremità S del deposito di ghiaccio. Alla sommità del deposito si nota uno strato di 2-3 cm di neoformazione che alimenta una serie di drappeggi sul lato verticale del deposito.

Fig. 15 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: the S-end of the ice deposit. Atop the stratified ice is present a 2-3 cm-thick newly formed ice layer that fed the drapery on the vertical wall.



Fig. 16 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: estremità S del deposito di ghiaccio con una serie di festoni e stalattiti di neoformazione sul lato aggettante del deposito.

Fig. 16 - Grotta dello Specchio, 24.09.2005: the S-end of the ice deposit with several ice draperies and stalactites along the overhanging wall.

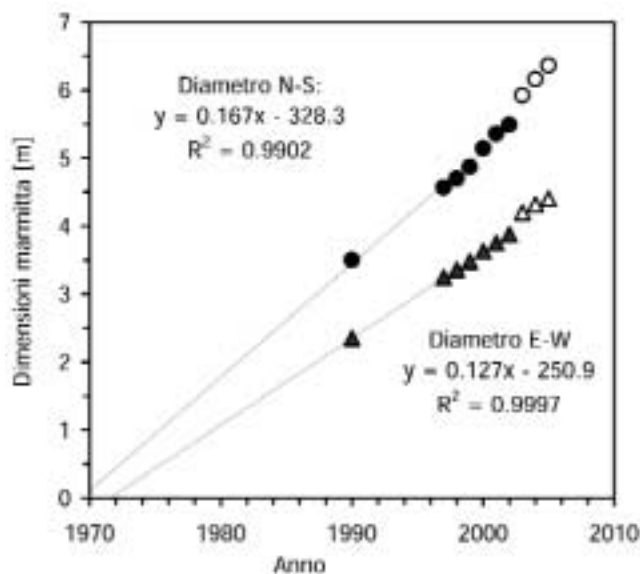


Fig. 17 - Evoluzione dei diametri N-S e E-W della marmitta nel deposito di ghiaccio della Grotta dello Specchio. I valori dell'agosto 1989 sono ricostruiti dal rilievo originale della grotta. Le linee di regressione non tengono conto dei valori successivi al 2002 (simboli vuoti) che includono l'anomalia dell'anno 2003.

Fig. 17 - Evolution of the N-S and the E-W diameters of the pothole in the ice deposit at the base of Pozzo del Ghiaccio. The values of August 1989 were reconstructed from the original cave map. The regression lines do not take into account the values after 2002 (open symbols) that include the year 2003 anomaly.

meno che ha innescato l'ablazione accelerata del deposito e il passaggio da una fase di accumulo prevalente a una fase in cui l'ablazione annua superava l'accumulo. Considerando i diametri N-S e E-W si può infatti osservare che, escludendo l'anomalia del 2003 e le annate successive, vi è stato un aumento lineare nelle dimensioni della marmitta (Fig. 17) di 15,8 e 12,7 cm anno⁻¹ (diametri N-S e E-W rispettivamente). Ammettendo un incremento analogo per il periodo precedente, si può ricostruire intorno all'anno 1970 il momento di effettiva apertura della marmitta. Prima di quell'anno il meandro principale della grotta doveva essere quasi completamente ostruito dal ghiaccio, sebbene la circolazione d'aria a tubo di vento doveva essere assicurata dal meandro parallelo che parte dall'estremità N del Pozzo del Ghiaccio.

4. LA GROTTA DEL CASTELLETTO DI MEZZO

Scoperta nel 1964 (Gruppo Grotte di Fondo, 1968), la Grotta del Castelletto di Mezzo (longitudine 10°53'26" E, latitudine: 46°11'34" N, quota 2435 m

s.l.m.) si apre in prossimità del Rifugio Tuckett e si sviluppa per 1005 m (dislivelli -50 +24 m) all'interno della cima omonima (quota 2611,4 m s.l.m.). La cavità, scavata nella formazione della Dolomia Principale del Norico, è costituita da un complesso reticolo di meandri blandamente inclinati (tra 8° e 20°) verso l'interno della cavità stessa e sovrapposti a una galleria principale (Fig. 18). Quest'ultima (punti da 1 a 4 in Fig. 18), con uno sviluppo di 200 m, presenta morfologie singenetiche e vadose e immette attraverso un ampio pozzo in una sala terminale chiamata "Duomo", a -50 m di profondità dall'ingresso (Ischia 1987).

4.1. Il deposito di ghiaccio del "Duomo"

Il "Duomo", l'ambiente più vasto di tutta la cavità, è un'ampia sala di crollo lunga 40 m, larga fino a 15 m e alta da 20 a 30 m, con il pavimento ricoperto da blocchi di frana. La parte settentrionale della sala è occupata da un considerevole deposito di ghiaccio (Figg. 18, 19) alimentato dal rigelo di acque di percolazione attraverso tre meandri tributari che danno luogo a due distinte colate. Nel 1987, secondo Ischia (1987), la forma e il volume del ghiacciaio erano sostanzialmente simili a quelle del 1965: il ghiacciaio formava un'ampia lingua alta fino a 22 m che occupava completamente la parte settentrionale della sala, con un fronte di 10-12 m e una lunghezza massima di 30 m, per un volume totale stimato di 2000 m³. Alla sommità del deposito era presente la caratteristica cupola di ghiaccio che alimentava il lago ghiacciato, a partire dal quale la superficie del deposito si inclinava progressivamente verso il centro della sala, dove il ghiaccio formava una parete stratificata pressoché verticale alta 17 m. La fronte del deposito, su entrambi i lati orientale e occidentale, appariva staccata dalla roccia per un tratto di circa 10 m formando due sale laterali (Ischia 1987; punto 6 in Fig. 18).

Durante le esplorazioni del 1997, sebbene la fronte del ghiacciaio apparisse simile alla situazione del 1965 e del 1987 (Figg. 20, 21), la morfologia sommitale del deposito risultava piuttosto diversa: alla sommità del laghetto ghiacciato il deposito appariva staccato di qualche cm dalla parete e, in corrispondenza della confluenza dei due meandri occidentali, si era formata una marmitta del diametro di 2 m e profonda altrettanto. La stessa cupola di ghiaccio era incisa dall'acqua di stillicidio e al suo interno si sviluppava una marmitta di 2 m di diametro e profonda 2,5 m (Figg. 22, 23). Dalla base della marmitta partiva uno stretto mulinello scavato interamente nel ghiaccio che portava alla sommità della saletta laterale scavata alla base nel deposito (punto 6 in Fig. 18).

Lungo la marmitta scavata nella cupola sommitale (Fig. 24) e sui due fianchi laterali alla base del deposito (Fig. 25), è possibile osservare la stratifica-

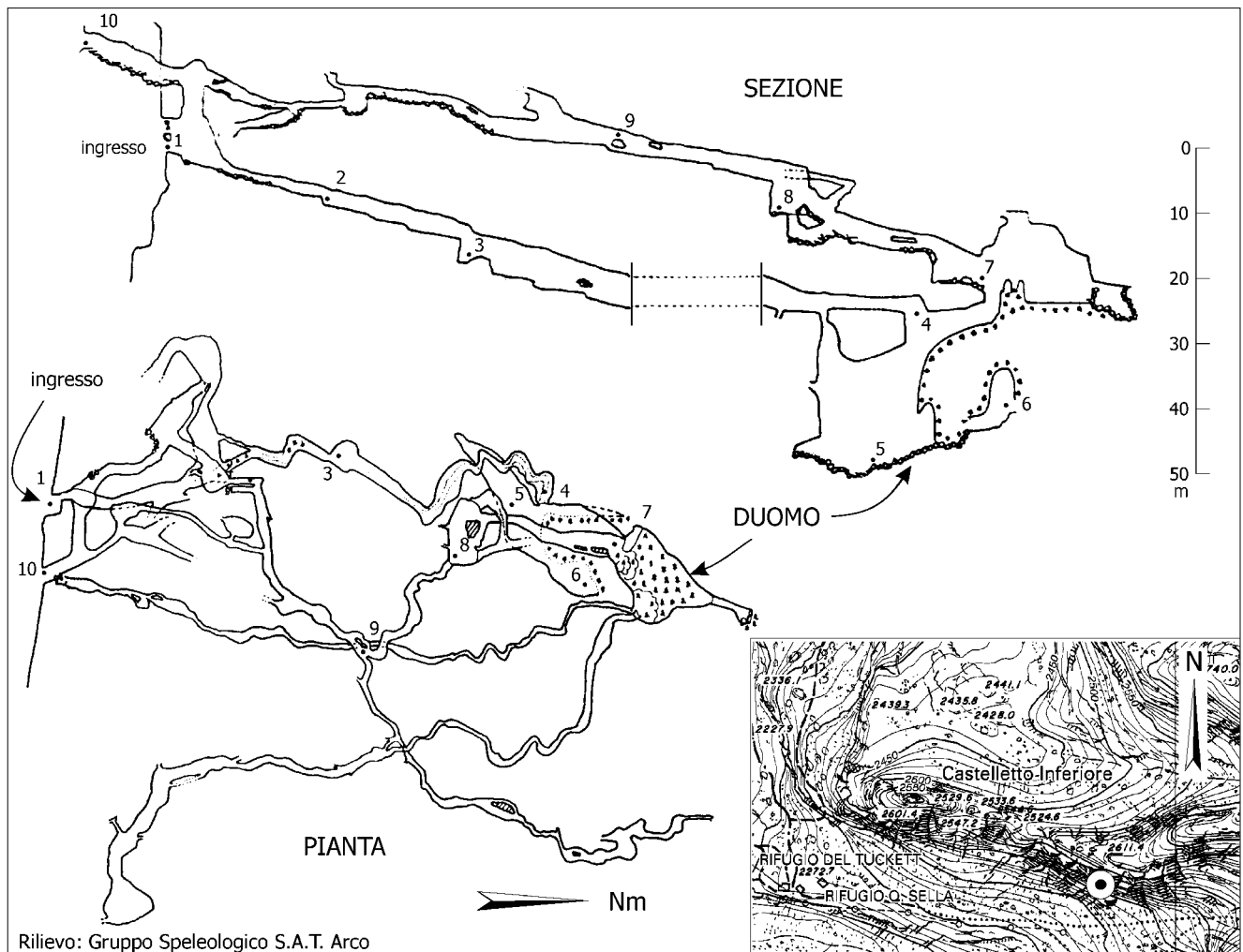


Fig. 18 - Ubicazione ingresso (da CTP scala 1:10.000) e rilievo semplificato della Grotta del Castelletto di Mezzo con la posizione del deposito di ghiaccio (da Ischia 1987, modificato).

Fig. 18 - Entrance location (from CTP scale 1:10,000) and simplified map of Grotta del Castelletto di Mezzo with the location of the ice deposit (from Ischia 1987, modified).

Tab. 2 - Grotta del Castelletto di Mezzo. a) Distanze in verticale della superficie del deposito di ghiaccio (riferite al valore 100 cm del 25.07.1997) e della sua fronte. b) Abbassamento annuo della superficie e arretramento frontale del ghiaccio.

Tab. 2 - Grotta del Castelletto di Mezzo. a) Vertical distances of the ice surface (referred to the value of 100 cm at 25.07.1997) and position of the glacial front. b) Annual lowering and frontal retreat of the ice deposit.

(a)

Punto	Data					
	25/07/97	28/08/98	24/10/98	14/08/99	27/08/00	29/07/01
Marker 1 - Sud	100	112,0	115,0	121,0	130,5	140,0
Marker 2	100	117,0	123,0	133,0	145,0	159,0
Marker 3	100	121,0	125,0	134,0	144,0	159,0
Marker 4	100	122,0	128,0	137,0	148,0	166,0
Marker 5 - Nord	100	117,5	122,0	136,5	150,0	167,0
Media marker 1-5	100	117,9	122,6	132,3	143,5	158,2
Distanza fronte da segnali (cm)	127,5	129,9	129,6	129,9	130,2	131,5

(b)

	Periodo				
	1997-98	1998-99	1999-00	2000-01	Media 97-01
Abbassamento annuo (cm)	-17,9	-14,4	-11,2	-14,7	-14,6 ±2,7
Arretramento frontale annuo (cm)	-2,4	-0,3	-0,7	-1,6	-1,2 ±0,9

zione e la struttura interna del ghiaccio. Tutto il deposito è ben stratificato, con strati spessi da 1,5 a 8 cm evidenziati da cambiamenti cristallografici: la maggior parte degli strati è formata da grossi cristalli poliedrici, mentre i livelli millimetrici che separano uno strato dall'altro sono costituiti da cristalli più piccoli che danno al livello un risalto opaco. In alcuni di questi sottili livelli sono pure presenti impurità detritiche sottoforma di particolato argilloso-limoso. Non sono invece presenti inclusi clastici, se non nelle prossime vicinanze della pareti rocciose. In corrispondenza delle zone con molti interstrati limoso-argillosi si possono osservare anche strati condensati e strati lenticolari che testimoniano episodi di interruzione o ablazione all'interno del deposito.

Alla base del deposito, sui fianchi delle due camere laterali, lo spessore medio degli strati è di $4,25 \pm 0,55$ cm, mentre lungo la marmitta sommitale è di $4,86 \pm 0,67$ cm. Utilizzando la media di questi due valori, si può valutare lo spessore medio degli strati intorno a $4,56 \pm 0,61$ cm. Considerando l'intero spessore del deposito misurato in corrispondenza della cupola (20,5 m nel 1997), lo spessore medio calcolato corrisponderebbe pertanto a 449 ± 60 strati.

Depositi stagionali di ghiaccio si trovano anche lungo tutti i meandri fino a inizio estate, quando è ancora possibile osservare le colate di ghiaccio che dai meandri fluiscono verso il Duomo.

4.2. Temperatura e circolazione d'aria

Nelle estati 1997 e 1998 si effettuarono due serie di misure termometriche lungo la galleria principale fino alla base del Duomo (Fig. 26). Sia la temperatura che l'umidità relativa mostrano un'attenuazione esponenziale dei valori dall'ingresso fino al Duomo, dove l'aria è satura di umidità e la temperatura intorno a $0,3$ °C. Il Duomo, grazie alla presenza della massa ghiacciata, funge da trappola di aria fredda, mentre una debole circolazione a tubo di vento interessa la complessa rete di meandri superiori.

Nel periodo 1997-2000, ogni 2 ore si sono registrate le temperature dell'aria alla base del Duomo (punto 5 in Fig. 18) e lungo la galleria principale a 25 m dall'ingresso (punto 2 in Fig. 18), e confrontate con le temperature esterne registrate al Rifugio Graffer (stazione PAT, quota 2263 m s.l.m.). Durante la prima annata, dal 1.10.97 al 1.10.98, la temperatura media lungo il meandro è stata di $-0,33 \pm 1,31$ °C, mentre alla base del Duomo di $0,19 \pm 0,07$ °C; solo per brevi periodi, concentrati tra febbraio e metà marzo, le temperature sono state inferiori a 0 °C (Fig. 27 in alto). È interessante notare che lungo il meandro la temperatura media annua è molto più bassa che al Duomo: ciò è dovuto all'intrusione di aria fredda durante il semianno invernale (novembre-maggio), causata

dalle oscillazioni della temperatura esterna. In questo periodo la temperatura esterna è solitamente inferiore alla temperatura della cavità (media ipogea $-1,11 \pm 1,31$ °C) e ciò determina l'aspirazione dell'aria verso l'interno della cavità e il conseguente raffreddamento della stessa. Confrontando le temperature medie giornaliere interne ed esterne (Fig. 28), si nota che lungo il meandro le oscillazioni esterne vengono attenuate di un fattore 5,2, cioè a una variazione di ± 1 °C in superficie corrisponde una variazione di $\pm 0,19$ °C nella grotta.

La correlazione tra le due serie di temperatura mostra un coefficiente di correlazione $r^2 = 0,60$, sebbene il coefficiente più elevato ($r^2 = 0,65$) si verifichi inserendo un ritardo di 24 ore nelle temperature ipogee, e per un ritardo di 48 ore il coefficiente scenda a 0,56: in questo tratto di cavità si registra pertanto un'inerzia nella temperatura dell'aria di circa 24 ore. Viceversa, durante il semianno estivo (giugno-ottobre) la temperatura esterna è più calda di quella ipogea e il flusso d'aria, seppure di debole entità, è diretto verso l'esterno e mantiene di fatto la temperatura del meandro costante intorno a $0,75 \pm 0,41$ °C.

Nel periodo settembre 1998 - agosto 2000 le registrazioni di temperatura si sono effettuate solamente alla base del Duomo. Grazie alla migliore risoluzione del datalogger ($\pm 0,15$ °C), è stato possibile evidenziare con maggior dettaglio il periodo di raffreddamento invernale caratterizzato da temperature inferiori a 0 °C (Fig. 27 in basso). Il raffreddamento è iniziato a partire da metà dicembre, con un ritardo quindi di circa un mese e mezzo rispetto al raffreddamento in superficie. Il periodo con temperature inferiori a 0 °C si è protratto da febbraio a inizio aprile per il 1999 e da febbraio a metà marzo per il 2000. Si può pertanto arguire che la formazione di ghiaccio avvenga prevalentemente durante i mesi di febbraio e marzo.

4.3. Misure glaciologiche

A partire dall'estate 1997 fino al 2001 si è effettuato un programma di misurazioni per monitorare l'evoluzione del deposito di ghiaccio: alla sommità del deposito, sul lato W del lago ghiacciato, si sono posizionati dei marker per misurare le variazioni nello spessore. Analogamente, alla fronte del ghiacciaio, si sono scelti dei punti di riferimento da cui misurare le variazioni frontali della lingua glaciale. I risultati delle misurazioni sono riportate nella tabella 2 e nella figura 29, dalle quali si può notare che, nonostante la posizione della fronte glaciale sia rimasta nel tempo sostanzialmente invariata, lo spessore del ghiaccio è diminuito di $-14,6 \pm 2,7$ cm all'anno. La riduzione dello spessore del ghiaccio risulta accelerata durante il periodo estivo (vedi misure del 1998) e è avvenuta in maniera differenziata lungo il deposito, con abbassamenti massimi all'estremità N (16,8 cm



Fig. 19 - Grotta del Castelletto di Mezzo: la fronte del ghiacciaio del Duomo nel giugno 1965 (da Gruppo Grotte di Fondo 1968)

Fig. 19 - Grotta del Castelletto di Mezzo: the glacial front in Duomo chamber in June 1965 (from Gruppo Grotte di Fondo 1968).



Fig. 20 - Grotta del Castelletto di Mezzo: la fronte del ghiacciaio del Duomo il 25.07.1997.

Fig. 20 - Grotta del Castelletto di Mezzo 25.07.1997: the glacial front in Duomo chamber.

anno⁻¹) e più ridotti (10,0 cm anno⁻¹) sul lato S in prossimità della confluenza dei meandri.

La situazione è poi cambiata drammaticamente dopo l'estate 2003, anomalmente calda; durante la visita nel 2005 il deposito appariva decisamente ridotto e scavato in più punti con nicchie e marmitte di ablazione (Sighel *et al.* in stampa).

4.4. *Analisi del deposito di ghiaccio: contenuto in Trizio, età ed evoluzione*

Nel luglio 1997 si è proceduto al campionamento della parte sommitale del deposito, utilizzando la sezione naturale della marmitta profonda 2,48 m scavata all'interno della cupola sommitale. Attraverso l'uso di chiodi da ghiaccio in acciaio si sono prelevati 30 campioni (di circa 0,4 litri di ghiaccio ciascuno) alla distanza di 8-10 cm l'uno dall'altro, ogni 1-2 strati (Fig. 30). I campioni, convertiti in acqua, sono stati filtrati e se ne è misurata la conducibilità elettrica; nel 2000, di sedici campioni si è inoltre analizzato il contenuto in trizio presso il Dipartimento di Scienze



Fig. 21 - Grotta del Castelletto di Mezzo: la fronte della colata di ghiaccio del Duomo il 25.07.1997. Sulla sinistra si nota una delle camere scavate tra il deposito di ghiaccio e la roccia.

Fig. 21 - Grotta del Castelletto di Mezzo 25.07.1997: the glacial front in Duomo chamber with the chamber carved in the ice along the rock wall.



Fig. 22 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: sommità del deposito di ghiaccio con la superficie del lago ghiacciato e la cupola.

Fig. 22 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: the top of the ice deposit with the ice lake and the ice dome.



Fig. 23 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: la cupola di ghiaccio alla sommità del deposito. I fori alla sommità e a lato della cupola adducono alla marmitta profonda 2,5 m e al toboga ghiacciato che scende fino alla base del deposito.

Fig. 23 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: the top of the ice deposit with the ice dome. The holes in the dome led to the 2,5 m-deep pothole and to the toboggan carved until the bottom of the ice deposit.

Geologiche Ambientali e Marine dell'Università di Trieste (Fig. 31).

Le misure di conducibilità elettrica mostrano un andamento bimodale: si osservano una serie di campioni con valori tra 20 e 40 $\mu\text{S cm}^{-1}$, che caratterizzano soprattutto i 35 cm sommitali, alternati a valori tra 80 e 120 $\mu\text{S cm}^{-1}$. I valori più bassi sono tipici dell'acqua di fusione nivo-glaciale e caratterizzano solitamente gli strati più puliti. Viceversa, i valori intorno a 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$, simili a quelli dell'acqua ipogea di percolazione lenta, sono caratteristici degli strati più contaminati. Sebbene nel campionamento si sia cercato di evitare gli interstrati più ricchi in particolato detritico, è comunque evidente che l'alta conducibilità elettrica misurata in questi campioni deriva dalla ridissoluzione – a seguito della fusione del ghiaccio nelle bottiglie – del particolato presente all'interno del ghiaccio.

Il contenuto in trizio varia da 3 UT (nella parte più profonda del deposito, tra -1,85 e -2,4 m dalla superficie) a un massimo di 48 e 49 UT (rispettivamente a -0,32 m e -0,78 m dalla superficie). Essendo l'andamento della temperatura e i periodi di forma-



Fig. 24 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: stratificazione del ghiaccio all'interno della marmitta scavata nella cupola sommitale.

Fig. 24 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: the ice stratification on the flank of the pothole at the top of the ice deposit.

zione del ghiaccio tipicamente stagionali, è evidente che la stratificazione del ghiaccio riflette una ciclicità annuale: è pertanto possibile trasformare il numero progressivo degli strati in anni, e confrontare i valori di trizio del ghiaccio con il record di riferimento delle acque meteoriche di Vienna (IAEA/WMO 2004), tenuto conto del decadimento radioattivo dei valori rispetto all'anno di misura dei campioni di ghiaccio.

Facendo corrispondere i picchi del trizio nel ghiaccio con i picchi del trizio del record di Vienna del 1963 (test nucleari) e degli anni '70, è stato possibile datare al 1981 la superficie del deposito al momento del campionamento (luglio 1997), mentre il punto più profondo campionato (-2,45 m) corrisponderebbe al 1931 (Fig. 32). Inoltre, utilizzando il numero di strati stimati dell'intero deposito (449 ± 60) si può valutare intorno all'anno 1532 ± 60 l'inizio della formazione del deposito, ammettendo che la formazione di strati di ghiaccio sia stata continua e che eventi di fusione non abbiano eliso una parte degli strati accumulati. Analogamente, utilizzando un semplice modello lineare che ammetta che la forma-



Fig. 25 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: stratificazione del ghiaccio alla base della colata del Duomo.
Fig. 25 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: the ice stratification at the base of the ice deposit.

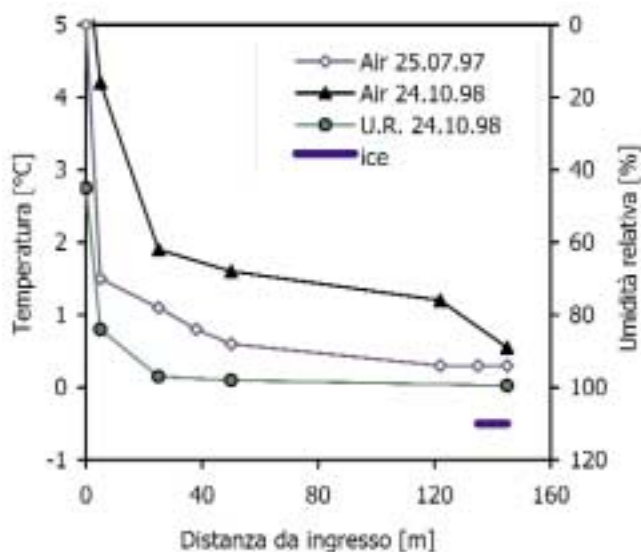


Fig. 26 - Umidità relativa e temperature estive lungo il meandro principale della Grotta del Castelletto di Mezzo.

Fig. 26 - Summer relative humidity and air temperature measurements along the main gallery of Grotta del Castelletto di Mezzo.

zione di ghiaccio sia proseguita con l'accumulo di uno strato annuale di 4,86 cm fino all'annata in cui è iniziata l'ablazione netta del deposito ai tassi misurati (-14,6 cm all'anno), deriva che la diminuzione di spessore del deposito è iniziata nel 1993. È comunque più verosimile che l'ablazione del deposito sia iniziata anni prima, probabilmente nella seconda metà degli anni '80, con valori di ablazione netta annua via via crescenti in funzione del progressivo innalzamento delle temperature medie estive.

È interessante inoltre notare come i valori di trizio precedenti il 1960 non siano intorno all'unità - come ci si dovrebbe aspettare se i singoli strati di ghiaccio si fossero formati completamente nell'annata corrispondente -, ma mostrino una diminuzione esponenziale dal picco a -0,78 m fino ad attestarsi intorno a 2-3 UT al di sotto di -1,85 m. Questa parte del deposito appare pertanto "contaminata" dagli strati immediatamente superiori: è probabile che durante l'ablazione una parte dell'acqua di fusione si sia infiltrata nel deposito attraverso i contatti intracristallini e successivamente rigelata modificando parzialmente il contenuto in trizio degli strati sottostanti. È possibile che questa contaminazione si sia sviluppata soprattutto lungo i fianchi della marmitta dove attualmente la fusione del ghiaccio in estate, a opera delle acque di stillicidio, risulta accelerata.

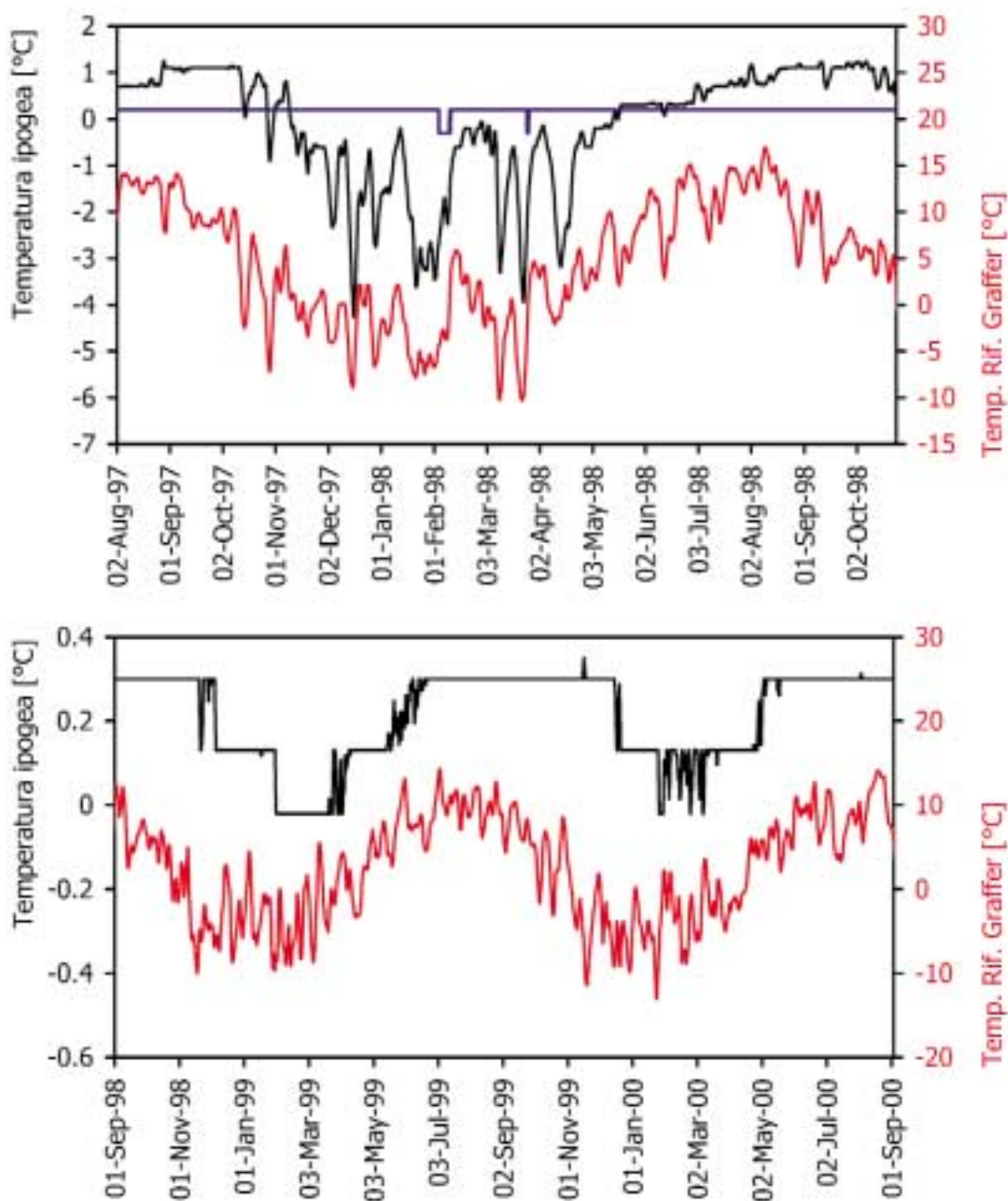


Fig. 27 - In alto: temperature dell'aria alla base del Duomo (in nero) e a 20 m dall'ingresso (in blu) della Grotta del Castelletto di Mezzo (tempo di acquisizione 2 ore, media mobile su 24 ore) confrontate con la temperatura dell'aria al Rif. Graffer (rete PAT, quota 2263 m s.l.m. – media su 3 punti dei valori medi giornalieri) per il periodo agosto '97 - ottobre '98.

In basso: temperatura dell'aria alla base del Duomo (in nero, tempo di acquisizione 2 ore, media mobile su 24 ore) confrontate con la temperatura dell'aria al Rif. Graffer (rete PAT, quota 2263 m s.l.m. – media su 3 punti dei valori medi giornalieri) per il periodo settembre '98 - agosto '00.

Fig. 27 - Above: Air temperature at the base of Duomo chamber (black line: acquisition time 2 hours, average over 24 hours) and at 20 m from the entrance of Grotta del Castelletto di Mezzo (blue) compared with air temperature at Rif. Graffer (PAT network, elevation 2263 m s.l.m. – 3 points average of the daily means) for the period August '97 - October '98.

Below: Air temperature at the base of Duomo chamber (black line: acquisition time 2 hours, average over 24 hours) compared with the air temperature at Rif. Graffer (PAT network, elevation 2263 m a.s.l. – 3 points average of the daily means) for the period September '98 - August '00.

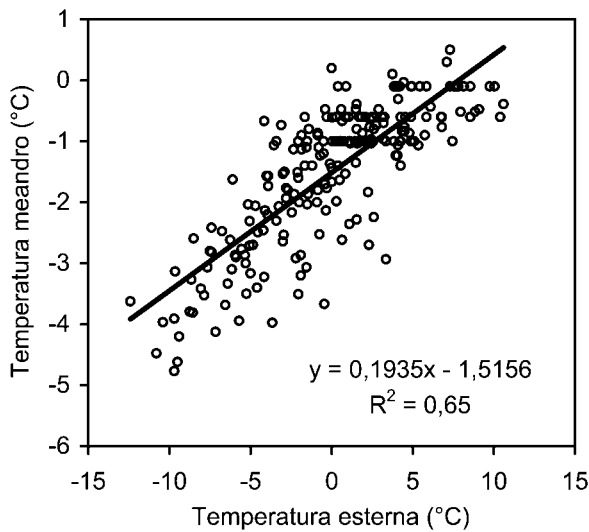


Fig. 28 - Confronto tra temperatura media giornaliera dell'aria al Rif. Graffer (rete PAT, quota 2263 m s.l.m.) e temperatura media dell'aria registrata a 20 m dall'ingresso della Grotta del Castelletto di Mezzo per il periodo agosto '97 - ottobre '98. La serie delle temperature ipogee è ritardata di un giorno.

Fig. 28 - Correlation between surface air mean daily temperature at Rif. Graffer (PAT network, elevation 2263 m a.s.l.) and mean daily temperature recorded 20 m from the entrance at Grotta del Castelletto di Mezzo for the interval August '97 - October '98. The second set is offset by 24 hours in order to achieve the best correlation.



Fig. 30 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: campionamento del ghiaccio nella marmitta scavata alla sommità del deposito del Duomo.

Fig. 30 - Grotta del Castelletto di Mezzo, 25.07.1997: ice sampling within the pothole at the top of the deposit in the Duomo chamber.

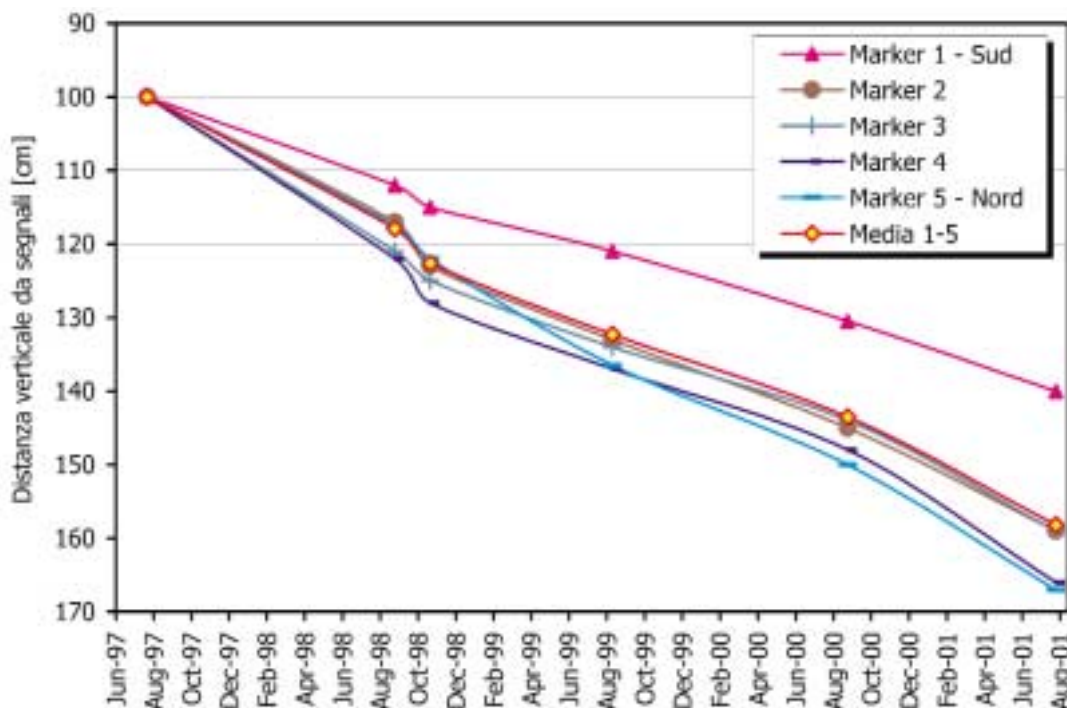


Fig. 29 - Posizione della superficie superiore del deposito di ghiaccio della Grotta del Castelletto di Mezzo lungo la parete W del Duomo rispetto a segnali di riferimento da 1 (il più meridionale) a 5 (il più settentrionale). Tutti i valori di 100 cm si riferiscono al 25.07.1997.

Fig. 29 - Position of the ice surface along the W-wall of Duomo chamber in Grotta del Castelletto di Mezzo with respect to reference markers (1= southernmost; 5=northernmost). The values 100 cm refer to 25.07.1997.

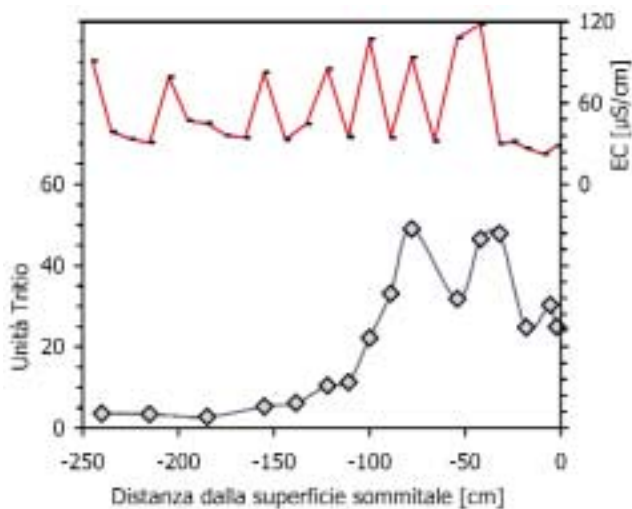


Fig. 31 - Conducibilità elettrica e contenuto in trizio della parte sommitale (2,5 m) del deposito di ghiaccio della Grotta del Castelletto di Mezzo.

Fig. 31 - Electrical conductivity and tritium analyses of the 2.5 m topmost part of Grotta del Castelletto di Mezzo ice deposit.

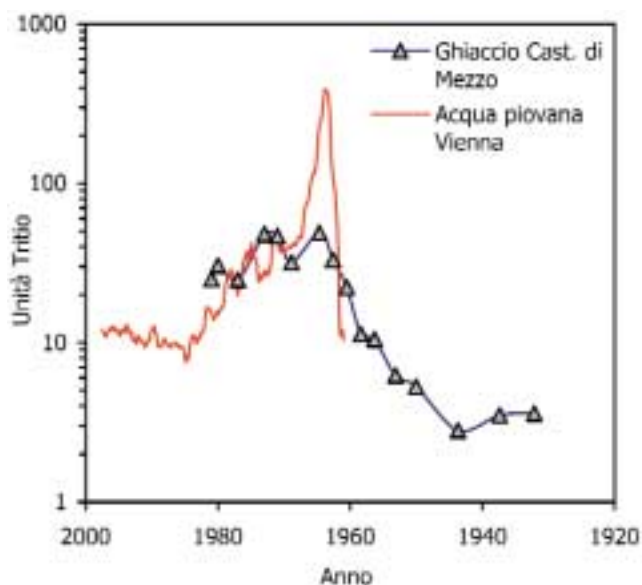


Fig. 32 - Contenuto in trizio della parte sommitale (2,5 m) del deposito di ghiaccio della Grotta del Castelletto di Mezzo confrontato con i valori di trizio delle acque meteoriche a Vienna (IAEA/WMO, 2004). L'età del deposito è determinata dal conteggio dei singoli strati annuali, e correlando le analisi del ghiaccio con il picchi del trizio degli anni '60 e '70.

Fig. 32 - Tritium analyses of the 2.5 m topmost part of Grotta del Castelletto di Mezzo ice deposit, compared to the Vienna rainwater tritium signature (IAEA/WMO, 2004). The age of the ice deposit was calculated by annual layers counting and by fitting the 60s and 70s peaks of meteoric water record.

5. MECCANISMI DI FORMAZIONE E ABLAZIONE DEI DEPOSITI DI GHIACCIO

5.1. La formazione e ablazione del ghiaccio nella Grotta dello Specchio

La presenza di un accumulo cospicuo di ghiaccio di rigelo nella Grotta dello Specchio, che si apre a una quota relativamente bassa, può sembrare in prima analisi un'anomalia: infatti, se osserviamo la distribuzione delle cavità nelle Dolomiti di Brenta che ospitano depositi di ghiaccio permanenti, si nota che la Grotta dello Specchio è quella che si apre alla quota più bassa (Fig. 33). Basse quote, inferiori a 1500 m s.l.m., si attestano nell'area alpina (cfr. Gleria & Zampieri 1983; Maire 1990; Meneghel 1996; Baldo 1997) e nel Giura svizzero (Luetscher *et al.* 2005) per depositi alimentati da cumuli di neve, specie in aree a forte nevosità, ma sono estremamente rari i casi di ghiaccio di rigelo.

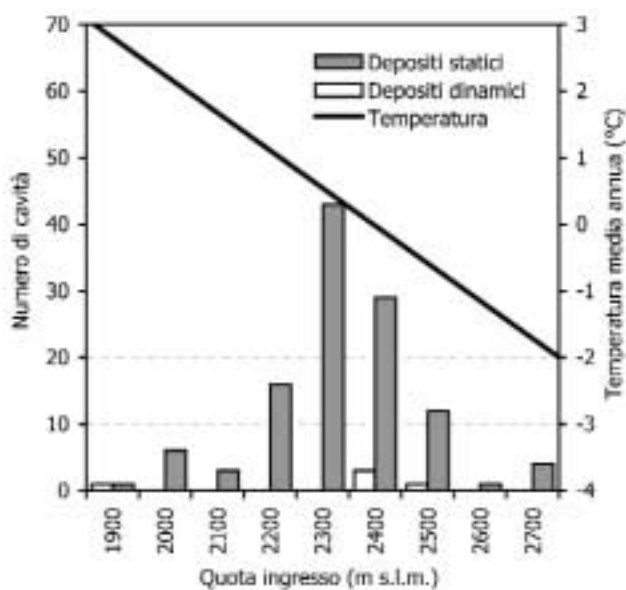


Fig. 33 - Distribuzione delle grotte con depositi di ghiaccio dinamici e statici nelle Dolomiti di Brenta in funzione della quota di ingresso della cavità, confrontate con la temperatura media annua teorica in superficie.

Fig. 33 - Distribution of ice-hosting caves in the Brenta Dolomites as a function of the cave entrance elevation, compared with the theoretical mean annual surface temperature.

Di fatto, il deposito del Pozzo del Ghiaccio deve la sua presenza alla concomitanza di diversi fattori.

- 1) La circolazione d'aria a tubo di vento che raffredda energicamente la cavità, soprattutto in prossimità del suo ingresso "freddo" (Badino 1995; Borsato 2003; Luetscher & Jeannin 2004). Infatti,

anche senza la presenza del ghiaccio, la temperatura media annua teorica del Pozzo del Ghiaccio dovrebbe risultare di circa $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (valore calcolato ammettendo una temperatura media per il semestre estivo di $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, coincidente con la temperatura della parte più interna della cavità). La circolazione a tubo di vento produce pertanto un'anomalia termica di $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ senza il contributo del ghiaccio, e di $-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ considerando l'inerzia termica del ghiaccio.

- 2) La presenza di un vasto ambiente in corrispondenza dell'ingresso "freddo" dove si può accumulare un considerevole volume di ghiaccio.
- 3) L'apertura dell'ingresso sul lato N di uno stretto canalone, situazione che diminuisce le temperatura media annua all'esterno e rende più efficiente la circolazione d'aria fredda nei mesi invernali.
- 4) La presenza di numerosi stillicidi sulla volta del Pozzo del Ghiaccio e la posizione solatia del versante soprastante che, facilitando la fusione della neve in autunno e in pieno inverno, assicura l'alimentazione del deposito nel periodo freddo.

Essendo i fattori 2) e 3) invariati nel corso degli ultimi secoli, i meccanismi che attualmente controllano l'accumulo e l'ablazione del ghiaccio all'interno della Grotta dello Specchio sono la circolazione d'aria a tubo di vento, e la quantità e distribuzione delle nevicate specie nel tardo autunno.

L'ablazione del ghiaccio è un fenomeno predomi-

nante negli ultimi 16 anni. Essendo la velocità e la temperatura della corrente d'aria funzione della differenza termica tra esterno e interno, l'ablazione del deposito dovrebbe essere direttamente correlata con la temperatura estiva in superficie. Il confronto con le misure termiche in superficie permette di verificare questa ipotesi. Si è utilizzato a questo proposito lo studio di Eccel (2006) riguardante la stazione meteorologica di Tovel (quota 1177 m s.l.m.), situata nella parte settentrionale delle Dolomiti di Brenta, dove nel trentennio 1975-2004 la temperatura media annua è aumentata di $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, passando da $4,6$ a $6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un incremento annuo di $0,046\text{ }^{\circ}\text{C}$; nello stesso intervallo temporale le temperature medie estive (giugno-agosto) sono aumentate di $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, passando da $12,7$ a $15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un incremento annuo di ben $0,079\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Eccel 2006). Questa escursione così forte, registrata peraltro in altre stazioni meteorologiche del Trentino (Bellin & Zardi 2004), è dovuta al fatto che il trentennio analizzato inizia con un periodo fresco e arriva agli anni 2000 eccezionalmente caldi. In particolare, Eccel (2006) sottolinea che "tra i valori estivi spicca quella del 2003, una stagione assolutamente da record, non solo in Trentino, ma più in generale [...] in tutto l'arco alpino; l'anomalia positiva nei confronti dei dieci anni più recenti è di ben $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ". Confrontando l'andamento delle temperature medie estive a Tovel con l'ablazione dei depositi di ghiaccio dello Specchio e del Castelletto di Mezzo, la correlazione appare evidente (Fig. 34).

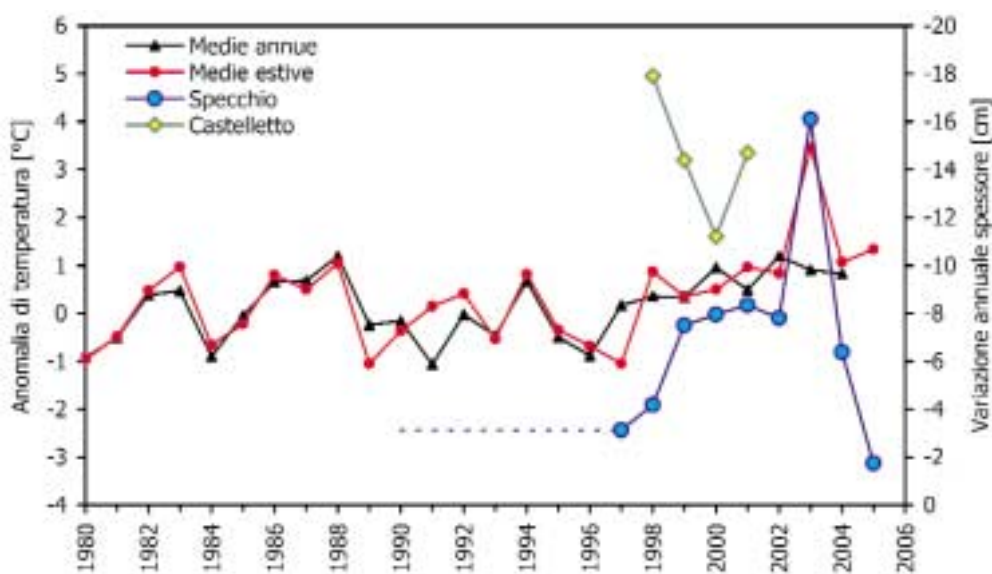


Fig. 34 - Anomalie delle temperature medie annue e medie estive (giugno-agosto) alla stazione del Lago di Tovel (quota 1177 m s.l.m. – da Eccel 2006) confrontate con le variazioni annuali dello spessore del ghiaccio dei depositi delle grotte del Castelletto di Mezzo e dello Specchio.

Fig. 34 - Mean annual and mean summer (June-August) temperature anomalies at Lake Tovel meteorostation (elevation 1177 m a.s.l. – from Eccel 2006) compared with the annual variation of the ice thickness in the deposits of Castelletto di Mezzo and Specchio caves.

L'osservazione che la quasi totalità dell'ablazione del deposito nel periodo di osservazione sia avvenuta in superficie suggerisce, inoltre, che il flusso di calore proveniente dalla roccia (Badino 1995) non eserciti un ruolo primario nel bilancio di massa del deposito. Questo fatto è dovuto soprattutto al fatto che la temperatura della roccia del Pozzo del Ghiaccio, in conformità all'esposizione settentrionale della parete, dovrebbe essere di 0,5 °C, con uno scarto minimo rispetto alla temperatura di congelamento.

La riduzione della formazione di ghiaccio negli ultimi 16 anni può essere collegata anche alla riduzione degli apporti nevosi, soprattutto durante il tardo autunno, periodo estremamente sensibile per la formazione del ghiaccio di rigelo (Maire 1990).

Eccettuato l'evento del settembre 2005, non è stato possibile osservare la formazione di ghiaccio in tutto il periodo di monitoraggio e, pertanto, non ci è possibile descriverne il meccanismo con precisione. Comunque, data la forte dinamicità termica del Pozzo del Ghiaccio, controllata direttamente dalla circolazione a tubo di vento, risulta evidente come la cavità non sia in grado di tamponare periodi prolungati di riscaldamento relativo. Ciò significa che la conservazione degli strati di ghiaccio annuali non deve essere stata continua e che il deposito deve aver conosciuto periodi di accumulo alternati ad annate o periodi pluriannuali nei quali l'ablazione aveva il sopravvento elidendo completamente lo strato di ghiaccio formatosi nel semestre freddo e intaccando in alcuni punti anche gli strati sottostanti. Questo meccanismo spiega la presenza di numerosi interstrati argilloso-limosi lungo l'intero deposito e la geometria lenticolare di alcuni strati che sono di fatto elisi completamente o in parte. La maggior sensibilità del deposito della Grotta dello Specchio alle variazioni di temperatura esterna è testimoniata anche dall'alta variabilità dello spessore dei singoli strati (cfr. § 3.1).

Il forte trend di ablazione in atto lascia supporre una completa sparizione della parte N del deposito nell'arco di pochi anni, mentre la porzione S potrebbe sopravvivere per qualche decennio.

5.2. *La formazione e ablazione del ghiaccio nella Grotta del Castelletto di Mezzo*

Grazie alle analisi del trizio effettuate nella parte sommitale del deposito e al conteggio degli strati annuali, è possibile affermare che il deposito di ghiaccio della Grotta del Castelletto di Mezzo ha iniziato ad accumularsi a partire dalla prima metà del '500, periodo coincidente con l'inizio del periodo freddo della Piccola Età Glaciale (Wanner *et al.* 2003). La grotta ha diversi ingressi tra i quali si instaurano delle deboli correnti d'aria a tubo di vento. Il Duomo, però, è ubicato nella parte più profonda della grotta, sufficientemente distante dall'ingresso da non risentire se

non in maniera molto attenuata delle variazioni termiche esterne: questa situazione fa sì che la sala si comporti essenzialmente da trappola d'aria fredda. Data la posizione della sala, una volta innescato il processo di accumulo di ghiaccio all'inizio della Piccola Età Glaciale, il deposito deve aver funzionato da volano termico, favorendo il continuo accumulo anche durante annate con temperature al di sopra della media. La formazione del ghiaccio ipogeo poteva essere facilitata anche dalla presenza di un nevaio al di sopra della cavità, le cui acque di fusione concorrevano a raffreddare l'ammasso roccioso e ad alimentare la percolazione durante l'autunno e la primavera, periodi nei quali la formazione di ghiaccio è enfatizzata (cfr. Maire 1990; Luetscher *et al.* 2005).

Lo spessore del deposito ha continuato pertanto a crescere regolarmente di 4,6 cm all'anno fino alla seconda metà degli anni '80 o ai primi anni '90, raggiungendo uno spessore massimo di 20,5 m nella sua parte centrale. Sul finire degli anni '80, con il succedersi di diverse estati più calde della media a seguito del riscaldamento globale in atto (Wanner *et al.* 2003; Eccel 2006), è iniziata di fatto l'ablazione del deposito, con la formazione di una marmitta e un pozzo a mulinello nella parte centrale del deposito stesso, in corrispondenza di stillicidi provenienti dalla volta. L'ablazione media, misurata in -14,6 cm all'anno nel periodo 1997-2001, è correlabile alle variazioni della temperatura media estiva all'esterno (Fig. 34), sebbene il breve periodo di osservazione non consenta di corroborare statisticamente questa affermazione come per la Grotta dello Specchio. In ogni caso, la brusca accelerazione dell'ablazione nell'estate 2003 è chiaramente connessa all'eccezionale caldo estivo, e nell'estate 2005 lo spessore medio appariva ridotto di circa 5 m rispetto ai rilievi del 1987 (Sighel *et al.* in stampa). L'accelerata ablazione del deposito potrebbe essere in relazione all'innescamento di una circolazione d'aria a tubo di vento nel Duomo in seguito al ritiro del ghiaccio dalle pareti della sala che può aver liberato dal ghiaccio delle fessure comunicanti con l'esterno. Infatti, depositi di ghiaccio legati a situazioni di trappole di aria fredda non sono sensibili agli estremi della temperatura esterna come osservato per i depositi di ghiaccio ipogei del Giura svizzero, dove il bilancio di massa dei depositi ghiaccio ipogeo è legato soprattutto alle temperature e alla nevosità invernale (Luetscher *et al.* 2005).

6. CONCLUSIONI

Sebbene dovuti a processi termodinamici molto differenti quali la circolazione d'aria a tubo di vento per la Grotta dello Specchio e la trappola d'aria fredda per il Castelletto di Mezzo, i due depositi di ghiaccio, entrambi dovuti al rigelo di acque di percolazio-

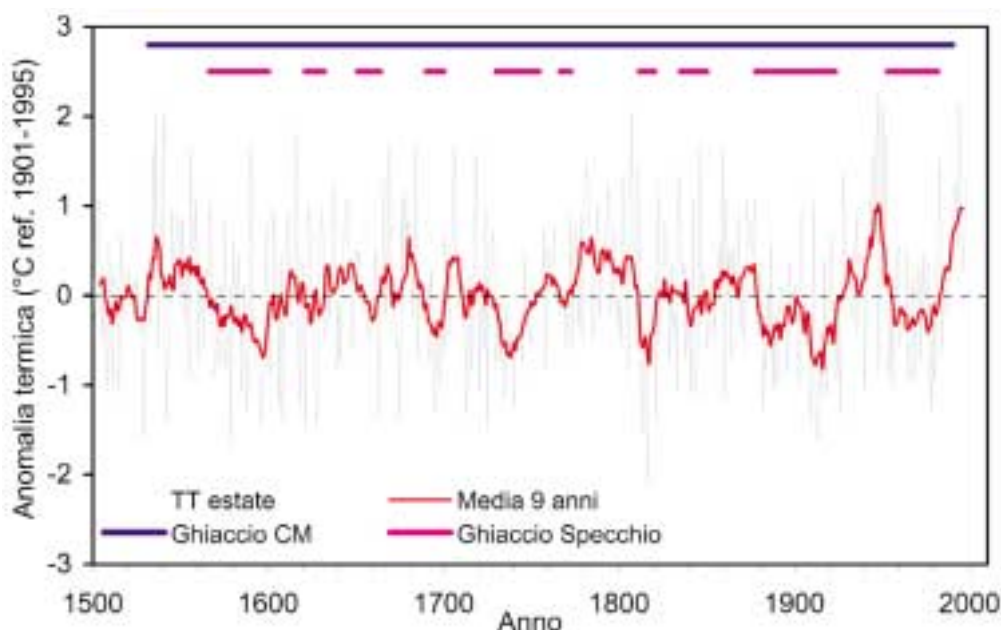


Fig. 35 - Anomalia termica dei mesi estivi (giugno, luglio, agosto) rispetto alla media del periodo 1901-1995, ricostruita per l'arco alpino negli ultimi 500 anni (da Wanner *et al.* 2003). In alto il tratto continuo riporta il periodo di formazione del ghiaccio nella Grotta del Castelletto di Mezzo e il tratto discontinuo i supposti periodi di accumulo di ghiaccio nella Grotta dello Specchio.

Fig. 35 - Summer (June, July, August) temperature anomaly with respect to the average 1901-1995 value, reconstructed for the European Alps during the last 500 years (from Wanner *et al.* 2003). At the top the continuous line represents the interval of ice accumulation at Grotta del Castelletto di Mezzo, whereas the discontinuous line represents the inferred ice accumulation periods at Grotta dello Specchio.

ne, hanno avuto una simile evoluzione recente. Il deposito del Castelletto di Mezzo ha iniziato a formarsi nella prima metà del '500, all'inizio del periodo freddo della Piccola Età Glaciale, e ha continuato ad accumularsi regolarmente al tasso di $4,56 \pm 0,61$ cm anno⁻¹ fino alla fine degli anni '80 quando è iniziata di fatto l'ablazione del deposito (Fig. 35). È interessante notare come anche per i depositi ipogei del Giura svizzero la riduzione accelerata del ghiaccio sia iniziata intorno al 1989 (Luetscher *et al.* 2005).

Sebbene non vi siano datazioni del deposito della Grotta dello Specchio, essendo l'accumulo del ghiaccio connesso direttamente alle temperature esterne, è plausibile che la sua formazione sia iniziata contemporaneamente a quella del Castelletto di Mezzo. A differenza di quest'ultimo, però, l'accumulo di ghiaccio nella Grotta dello Specchio dev'essere stato discontinuo, con annate o decenni in cui prevaleva l'accumulo alternate a periodi in cui l'ablazione aveva il sopravvento. Queste fasi di accumulo/ablazione si devono essere alternate più o meno regolarmente negli ultimi 500 anni, in funzione soprattutto delle fluttuazioni delle temperature medie estiva (Fig. 35), fino alla fine degli anni '80 quando si è verifica-

ta una brusca accelerazione dell'ablazione netta.

Per entrambi i depositi, pertanto, l'evoluzione recente è controllata dall'ablazione annua, contrariamente a quanto osservato per i depositi di ghiaccio ipogei del Giura svizzero alimentati direttamente dall'accumulo di neve dall'esterno, dove il bilancio di massa è controllato dall'accumulo annuale di neve-ghiaccio e non dall'ablazione (Luetscher *et al.* 2005).

Pertanto, è chiaro che per i due depositi studiati sia in atto un processo di ablazione veloce e irreversibile, se si considera l'attuale tendenza al riscaldamento globale, che può portare alla loro completa estinzione nell'arco di pochi decenni, come sta succedendo ai ghiacciai in superficie situati alle quote più basse (Bombarda & Parisi 1997; Carturan *et al.* 2005).

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato in parte eseguito all'interno dalla ricerca AQUAPAST finanziata dalla Provincia Autonoma di Trento.

Si ringraziano A. Caldini, C. Nardelli e M. Michelazzi (Gruppo Speleologico SAT Lavis) per il supporto fornito durante il campionamento di ghiac-

cio alla Grotta del Castelletto di Mezzo; R. Zandonati (Museo Tridentino di Scienze Naturali) per l'esecuzione dei disegni; E. Eccel (Istituto Agrario di San Michele all'Adige) per l'utilizzo dei dati meteorologici di Tovel; H. Wanner (Institute of Geography, Climatology and Meteorology, University of Bern, Switzerland) per la ricostruzione delle temperature nelle Alpi negli ultimi 500 anni. I dati trizio della stazione di Vienna del GNIP Database (<http://isohis.iaea.org>) sono a cura del International Atomic Energy Agency, Vienna. Un sentito ringraziamento a V. Maggi (Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università di Milano – Bicocca) per la revisione dell'articolo.

BIBLIOGRAFIA

- Badino G., 1995 - Fisica del clima sotterraneo. *Mem. Ist. Ital. Speleol.*, 7, serie II: 136 pp.
- Baldo M., 1997 - Grotte con ghiaccio sull'Altopiano dei Sette Comuni. Tesi di Laurea inedita, Università degli Studi di Padova: 100 pp.
- Bellin A. & Zardi D. (a cura di), 2004 - Analisi climatologica di serie storiche delle precipitazioni e temperature in Trentino. *Quaderni di idronomia montana*, 23: 256 pp.
- Bombarda R. & Parisi B., 1997 - I ghiacciai (vedrette) delle Dolomiti di Brenta: cento trent'anni di frequentazione e osservazioni. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 20: 299-304.
- Borsato A., 1991a - La Grotta dello Specchio: nuova cavità del complesso carsico dei Lasteri (Gruppo di Brenta, Trentino occidentale). In: Angelini B., Borsato A. & Mogna L., (a cura di) - Atti IX Conv. Reg. Spel. Trent.-A. Adige, Lavis, 1989. *Natura Alpina*, 42 (2-3): 7-25.
- Borsato A., 1991b - I pozzi superficiali del Pian della Nana (Dolomiti di Brenta, Trentino). In: Angelini B., Borsato A. & Mogna L., (a cura di) - Atti IX Conv. Reg. Spel. Trent. - A. Adige, Lavis, 1989. *Natura Alpina*, 42 (2-3): 91-102.
- Borsato A., 2001a - Grotte e carsismo nella zona dei XII Apostoli (Gruppo di Brenta - Trentino). In: Gruppo Grotte "E. Roner" di Rovereto (a cura di), Atti XI Conv. Reg. Spel. Trent. - A. Adige, Rovereto, 1997. Ed. Osiride (Rovereto): 33-65.
- Borsato A., 2001b - Misure di temperatura in grotte del Trentino. In: Associazione Gruppi Speleologici Piemontesi (a cura di), Atti del XVIII Congresso Nazionale di Speleologia, Chiusa di Pesio, Cuneo, ottobre, 1998: 151-154.
- Borsato A., 2003 - Meteorologia ipogea in cavità della Paganella (Trentino). In: Atti 19° Congresso Nazionale di Speleologia, Bologna, 27-31 Agosto 2003: 157-168.
- Borsato A. & Zambotto P., 1994 - L'esplorazione speleologica in Trentino Alto-Adige nell'ultimo ventennio (1972-1992). *Natura Alpina*, 44 (1993), 4: 1-17.
- Borsato A., Terzan P. & Caldini A., 2000 - L'Abisso dei Lasteri Bassi nel Gruppo di Brenta. *Natura Alpina*, 51 (1): 1-9.
- Carturan L., Seppi R., Bezzi R. & Paoli A., 2005 - Il bilancio di massa dei ghiacciai dolomitici ad alimentazione mista: il caso del Ghiacciaio d'Agola (Dolomiti di Brenta, Trentino). *Materiali*, rivista del Dip. Geogr. Univ. Padova, 28 (2005): 58-60.
- Eccel E., 2006 - Climatologia del Lago di Tovel nel periodo di indagine del progetto "SALTO" (2001-2004) e considerazioni sulle tendenze climatiche. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Biol.*, 81 (2004), Suppl. 2: 259-263.
- Gleria E. & Zampieri D., 1983 - Depositi di ghiaccio ipogeo nell'Altopiano dei Sette Comuni (Prealpi Vicentine, Italia). In: Atti Convegno Int. Sul Carso di Alta Montagna, Imperia 1982: 462-473.
- Gruppo Grotte di Fondo, 1968 - La Grotta del Castelletto di Mezzo. *Natura Alpina*, 19 (3): 91-101
- IAEA/WMO, 2004 - Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessibile a: <http://isohis.iaea.org>
- Ischia N., 1987 - Non ha più segreti la Grotta del Castelletto. *Boll. S.A.T.*, L (4): 147-148
- Ischia M., 2004 - Il carsismo superficiale e profondo nel Gruppo di Brenta (un aggiornamento). In: Perissinotto M.L. (a cura di), Atti Speleodolomiti - 1° Convegno Nazionale sulla Speleologia in Area Dolomitica. Rivamonte Agordino (BL), 24-25 maggio 2003: 95-124.
- Ischia M. & Borsato A., (in stampa) - Depositi di ghiaccio nelle cavità delle Dolomiti di Brenta. In: Atti XIII Conv. Reg. Spel. Trent. - A. Adige, Villazzano, ottobre 2005.
- Luetscher M. & Jeannin P.Y., 2004 - Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. *Terra Nova*, 16 (6): 344-350.
- Luetscher M., Jeannin P.Y. & Haeberli W., 2005 - Ice caves as an indicator of winter climate evolution: a case study from the Jura Mountains. *The Holocene*, 15, 7: 982-993.
- Maire R., 1990 - La haute montagne calcaire. *Karstologia, Memoires*, 3: 507-519.
- Meneghel M., 1996 - Ice in caves in Veneto region. Alpine Caves: alpine karst systems and their environmental context, Asiago (Italy), 1992. Congress proceedings: 299-302.
- Sighel D., Sebastiani P., Sebastiani R., Stenico P. & Ischia M., (in stampa) - Aggiornamento del rilievo della cavità, in particolare presso il deposito di ghiaccio nella sala del fondo, a seguito del suo consistente ritiro. In: Atti XIII Conv. Reg. Spel. Trent. - A. Adige, Villazzano, ottobre 2005.
- Wanner H., Luterbacher J., Casty C., Böhm R. & Xoplaki E., 2003 - Variabilität von Temperatur und Niederschlag in den europäischen Alpen seit 1500. *Jahrbuch 2003, Universität Bern, Gebirge im Wandel: Aktuelle Dynamik und Langzeitsignale*: 61-76.