

Sedimentazione in ambiente lacustre: studio tramite trappole per sedimento nel Lago di Lavarone (NE Italia)

Maria Letizia FILIPPI^{*}, Christoph SPÖTL², Flavio CORRADINI³, Marco MANDELLI⁴ & Massimiliano TARDIO¹

¹Museo Tridentino Scienze Naturali, Via Calepina 14, 38100 Trento, Italia

²Institut für Geologie und Paläontologie, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Austria

³Dipartimento Risorse Naturali e Ambientali, Istituto Agrario San Michele all'Adige, Via E. Mach 1, 38010 San Michele all'Adige (TN), Italia

⁴Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università di Trento, Mesiano 77, 38050 Trento, Italia

^{*}E-mail dell'Autore per la corrispondenza: filippi@mtsn.tn.it

RIASSUNTO - *Sedimentazione in ambiente lacustre: studio tramite trappole per sedimento nel Lago di Lavarone (NE Italia)* - Il monitoraggio di un ambiente lacustre è fondamentale per capirne il funzionamento attuale e per ottenere informazioni utili per meglio interpretare i dati ricavati dai sedimenti. Nell'ambito del progetto OLOAMBIENT si è eseguito un monitoraggio fisico-chimico del Lago di Lavarone con esposizione di trappole per sedimento da novembre 2004 a maggio 2006, i cui dati sono in parte presentati in questo volume nell'articolo di Corradini *et al.* Si raccolgono nel presente articolo i dati relativi al sedimento deposti nelle trappole, che è stato analizzato dal punto di vista morfologico, mineralogico, geochimico ed isotopico. Questi risultati vengono messi in relazione con alcuni parametri chimico-fisici della colonna d'acqua, unitamente alle analisi isotopiche del carbonio inorganico disciolto. Nel corso del 2005 si sono verificati due picchi del flusso di sedimentazione a maggio e agosto, entrambi caratterizzati dalla presenza di calcite endogenica e silice biogenica. Si è rilevato che la calcite precipita in equilibrio isotopico con il suo *medium* e che la sedimentazione viene influenzata anche dall'apporto detritico, specialmente in occasione di eventi particolari quali disgelo, grandi piogge o interventi antropici (risistemazione delle spiagge artificiali). Tuttavia, il rapporto tra calcite endogenica e carbonato detritico è talmente alto che il segnale isotopico medio rimane molto simile a quello originario.

SUMMARY - *Sedimentation in lacustrine environments: study by means of sediment traps at Lago di Lavarone (NE Italy)* - Monitoring is fundamental to understand how modern lake systems work and to obtain key observations in order to correctly interpret data from lake sediments. Within the frame of the OLOAMBIENT project, a physico-chemical monitoring program was performed in Lago di Lavarone from November 2004 till May 2006, with the help of sediment traps. Part of the data are discussed in this volume in the paper by Corradini *et al.* Here we present data from trapped sediments, analysed from the morphological, mineralogical, geochemical and isotopic point of view. Results are compared with selected chemical-physical parameters of the water column and with $\delta^{13}\text{C}$ analyses of dissolved inorganic carbon. In 2005 we observed two maxima of sediment flux in May and August, both characterized by the presence of endogenic calcite and biogenic silica. Calcite precipitated at isotopic equilibrium with its *medium*. Sediment flux is also influenced by detrital input, particularly during events such as the thawing of the lake, intense precipitation and human interference (beach maintenance). Because of the high ratio of endogenic calcite to detrital carbonate, the yearly mean bulk isotope values are very close to the endogenic calcite ones.

Parole chiave: trappole per sedimento, Lago di Lavarone, monitoraggio, mineralogia, isotopi stabili

Key words: sediment traps, Lago di Lavarone, monitoring program, mineralogy, stable isotopes

1. INTRODUZIONE

Conoscere approfonditamente un lago nel suo stato attuale è estremamente importante per poter meglio interpretare le informazioni contenute nell'archivio dei suoi sedimenti. Tuttavia questa conoscenza richiede

una paziente opera di monitoraggio delle condizioni fisico-chimiche-biologiche della colonna d'acqua, e di quei fattori meteorologici (temperatura, precipitazioni, vento, irraggiamento) che ne influenzano le proprietà. Purtroppo gli studi comprendenti una parte di monitoraggio sono piuttosto rari, in quanto richiedono tempo

ed energie spesso non disponibili all'interno dei progetti di ricerca. Nel quadro del progetto OLOAMBIENT, si è riusciti ad eseguire un monitoraggio annuale sul Lago di Lavarone (autunno 2004-primavera 2006), che ha permesso di caratterizzare il lago in dettaglio, fornendo interessanti chiavi di lettura per i dati provenienti dalle analisi dei sedimenti. I risultati del monitoraggio chimico-fisico delle acque del lago sono presentati nell'articolo-compagno di Corradini *et al.* (2007), cui si rimanda anche per una presentazione dettagliata del lago stesso. Verranno qui presentati e discussi i dati delle trappole per sedimento (Bloesch & Burns 1980), ideate per raccogliere le particelle inorganiche e organiche che si trovano nella colonna d'acqua, in modo da poter studiare i cicli lacustri di produzione algale e di precipitazione minerale. In particolare, questo studio è finalizzato a valutare se la composizione isotopica della calcite che si forma nelle acque del Lago di Lavarone possa essere utilizzata a scopo paleoclimatico nei suoi sedimenti, cosa possibile solo quando questa precipiti in equilibrio isotopico con il suo *medium* e l'eventuale apporto detritico sia trascurabile.

2. AREA DI RICERCA

Il Lago di Lavarone (45°56'10" N 11°15'10" E, vedi Fig. 1A) si trova a 1115 m s.l.m. sull'Altopiano di Folgaria-Lavarone (Trentino occidentale, NE Italia). Dal punto di vista geologico il suo substrato è costituito dai Calcari Grigi di Noriglio del Lias Medio e Inferiore (Foglio Schio, n. 36 della Carta Geologica Italiana). Il lago è di origine carsica, formatosi per progressiva impermeabilizzazione di una dolina: l'alimentazione è legata ad alcune sorgenti sovrastanti (lato occidentale), al ruscellamento superficiale, all'apporto sotterraneo e alle precipitazioni; il deflusso avviene tramite un canale parzialmente rimodellato dall'intervento antropico, che raggiunge un inghiottitoio situato a un centinaio di metri verso NE rispetto al lago (Tomasi 1963, 2004), anch'esso soggetto a manutenzione. Benché non sia mai stato dimostrato da studi specifici, si ritiene che le acque del lago ricompaiono circa 2,6 km a NNO nel vallone di "Vallenpach" e poi ricadano nel Torrente Centa (Battisti & Ricci 1898). Il lago ha una profondità massima di 17 m e una media di 7,4; ha forma ellissoidale irregolare e si sviluppa per un'area complessiva (A) di 51.610 m², mentre il suo bacino imbrifero (B) copre circa 0,6 km², con un conseguente rapporto B/A di 11,6. Il lago è meso-eutrofico e il fosforo rappresenta l'elemento limitante (IASMA 2000); in primavera-estate è caratterizzato da una marcata stratificazione (epilimnio sui 5 m ca.), con rivolgimento primaverile e autunnale da parziale a completo, a seconda degli anni. Rimandiamo al lavoro di Corradini *et al.* (2007) per i dettagli sulle caratteristiche chimico-fisiche delle acque del lago.

Dal punto di vista climatico, l'area dell'Altopiano di Lavarone è una zona temperata-umida relativamente piovosa (media annua 1233 mm di pioggia), con precipitazioni distribuite su due massimi (primaverile e autunnale), come accuratamente descritto nell'articolo di Eccel & Saibanti (2007). Nel periodo di monitoraggio si è verificato un picco di precipitazioni a fine agosto - inizio settembre (Fig. 1B), relativamente anomalo rispetto all'andamento medio citato. La zona dell'altopiano è anche un punto di attrazione turistica notevole per le bellezze paesaggistiche e l'offerta di sport invernali. Nel 2005 è stato superato il mezzo milione di presenze nel settore alberghiero ed extra-alberghiero (dati 2005 APT - Lavarone), di cui oltre il 50% in estate, con un picco massimo ad agosto (189.000 presenze, Fig. 1B). Il Lago di Lavarone, in particolare, è al centro dell'offerta turistica dell'altopiano già da tempo: nel sito dell'APT - Lavarone si legge che "attorno alle sue rive, nei suoi alberghi, si è data appuntamento nel corso della Belle Epoque la bella aristocrazia viennese". Parte delle sue rive, originariamente coperte da tappeti erbosi e canneti, sono state rimodellate/modificate negli anni '50 per creare due spiagge artificiali, che vengono rifornite di sabbia all'inizio di ogni stagione estiva (verso fine maggio).

3. MATERIALI E METODI

Nel novembre del 2004 venne sistemata in corrispondenza della zona più profonda del lago (Fig. 1A) una colonna di trappole per sedimento, montata in modo da avere due coppie di trappole alla profondità rispettivamente di 5 e di 15 m. Le trappole utilizzate sono costituite da due cilindri di PVC trasparente lunghi 70 cm e di diametro 86 mm che terminano in due contenitori intercambiabili della capienza di 2 litri, il tutto montato su una struttura in plastica a spinta idrostatica neutra (modello UWITEC, Fig. 1C, vedi <http://www.uwitec.at>). Il posizionamento degli strumenti, effettuato con la collaborazione del Gruppo Sommozzatori del Corpo Permanente dei Vigili del Fuoco di Trento, è stato eseguito secondo un sistema (modificato da Ohlendorf & Sturm 2001, vedi Fig. 1D) che presenta un duplice vantaggio: preserva la catena di trappole dall'influenza del moto ondoso di superficie e permette il recupero delle stesse senza dover sollevare il peso alla base. Le trappole sono infatti fissate ad un cavo che dalla boa principale, passando attraverso un anello fissato sul peso di ancoraggio sottostante le trappole, arriva alla boa sommersa: al momento del recupero il cavo viene lasciato dalla boa principale, in modo da fare emergere la boa sommersa e poter issare le trappole, evitando così di disturbare il fondo e mantenendo sempre lo stesso punto geografico di campionamento. I contenitori delle trappole sono stati cambiati ogni due settimane,

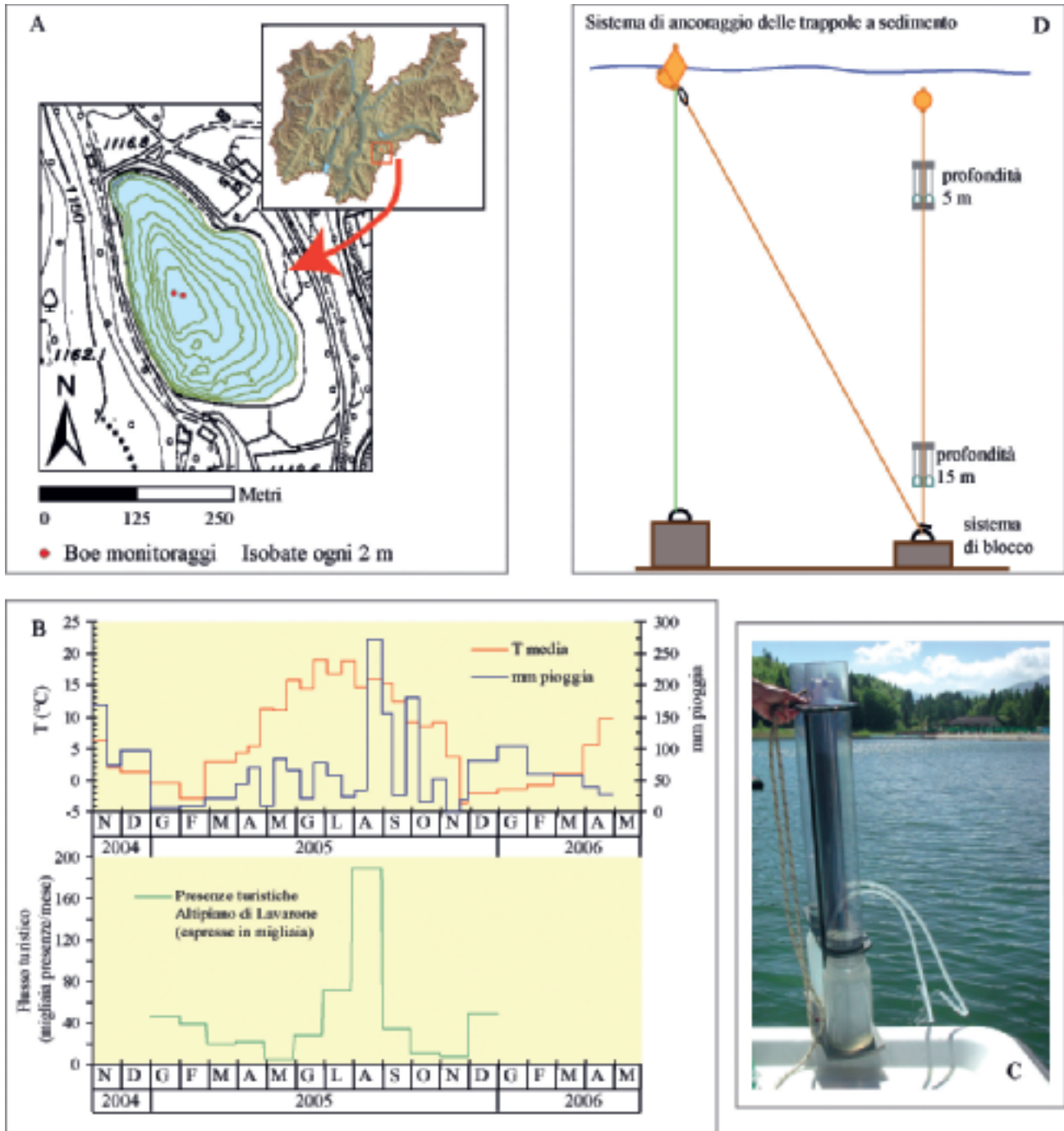


Fig. 1 - A) Localizzazione del Lago di Lavarone in Trentino e delle trappole all'interno del lago. B) Temperatura media dell'aria e precipitazioni registrate alla stazione meteorologica di Lavarone (dati forniti dalla Provincia Autonoma di Trento, Ufficio Previsione ed Organizzazione); i dati di pioggia dal 7/07/05 al 15/09/05 sono stati ricostruiti utilizzando il pluviometro della vicina stazione di Passo Vezzena (relazione $y=1,39x$, $R^2=0,95$, ricavata utilizzando le medie mensili), per problemi del pluviometro locale. Dati del flusso di turisti nella zona dell'Altopiano di Lavarone nell'anno 2005, espresso come migliaia di presenze/mese (dati forniti dall'Azienda per il Turismo Lavarone). C) Foto di una delle trappole usate in questo studio (modello UWITEC, foto di R. Miorandi). D) Schema del sistema di ancoraggio della catena di trappole.

Fig. 1 - A) Location map of Lago di Lavarone in Trentino, and position of sediment traps within the lake. B) Mean air temperature and precipitation at the Lavarone meteorological station (data from the Autonomous Province of Trento, Prevision and Organization Office); period from 7/07/05 to 15/09/05 is reconstructed using rain data from the nearby meteorological station of Passo Vezzena (relationship $y=1.39x$, $R^2=0.95$, obtained comparing monthly means), because of problems with the local pluviometer. 2005 tourist data in the Lavarone Upland area, in thousand people per month (data from the Tourist Office of Lavarone). C) Picture of the sediment trap used in this work (UWITEC model, photo courtesy R. Miorandi). D) Sediment traps mooring system.

cadenza considerata in letteratura come la massima per evitare che il materiale depositato inizi a decomporsi, modificando i dati quantitativi per lo studio dei flussi di sedimentazione (Bloesch & Burns 1980), tranne che nel periodo in cui il lago era ghiacciato (dicembre-aprile). Non si è aggiunto alcun veleno o preservante nelle trappole.

I sedimenti raccolti nei contenitori intercambiabili delle trappole sono stati lasciati decantare in frigorifero per 48 ore, quindi si è eliminata l'acqua in eccesso per aspirazione tramite tubo di gomma flessibile; i $\frac{3}{4}$ del materiale sono stati successivamente centrifugati 3 volte e messi ad essiccare in stufa a 40 °C, mentre $\frac{1}{4}$ è stato conservato in parte in acqua e in parte in Lugol per le analisi quantitative e qualitative del fitoplankton.

In corrispondenza di una boa parallela a quella delle trappole, a 15 m circa di distanza in direzione SE (Fig. 1A), i colleghi dell'Istituto Agrario San Michele all'Adige (IASMA) hanno sistemato una catena di termometri posizionati a diverse profondità (0,3, 1, 2, 4, 8, 12, 16 m), programmati con tempi di acquisizione orari (per dettagli, si veda l'articolo di Corradini *et al.* 2007).

3.1. *Analisi sulla colonna d'acqua*

I parametri fisico-chimici della colonna d'acqua (T, pH, ossigeno disciolto, conduttività, percentuale di saturazione, potenziale Redox) sono stati misurati utilizzando una sonda multiparametrica Hydrolab H20 in occasione del cambio delle trappole (ogni due settimane, tranne nel periodo compreso tra dicembre e aprile quando il lago è ghiacciato) nella zona più profonda del lago in corrispondenza della boa IASMA, mentre per l'estinzione della luce si è utilizzato un sensore quantum LI-COR LI-1400: i dati sono stati segnati per ogni metro di profondità. I campioni d'acqua per le analisi chimiche sono stati presi a profondità differenti (0, 2,5, 5, 10, 15 m) con un campionatore per acque della UWITEC con sistema di chiusura a strappo. Le analisi chimiche sono state condotte dall'Istituto Agrario di San Michele all'Adige (Corradini *et al.* 2007) seguendo procedure standard (APAT & IRSA - CNR 2004, CNR-III 1997), mentre le analisi di clorofilla-a secondo la procedura di Lorenzen (1967), quelle del fitoplankton secondo Utermöhl (1958) e le stime dei biovolumi secondo Rott (1981). Le analisi isotopiche del carbonio inorganico disciolto (*dissolved inorganic carbon*, $\delta^{13}\text{C}$ DIC) sono state eseguite in parte in collaborazione con l'Università di Innsbruck, ed in parte al Joanneum research Forschungsgesellschaft di Graz (Austria), seguendo il metodo descritto da Spötl (2005), sugli stessi campioni d'acqua prelevati per le analisi chimiche nel periodo dal 22/07/05 al 19/07/06.

3.2. *Analisi del sedimento delle trappole: sedimentologia, mineralogia e geochimica*

Il sedimento raccolto nelle trappole, una volta essiccato in stufa a 40 °C, è stato pesato su una bilancia OHAUS Explorer® E11140 (110g x 0,1mg). Il calcolo del flusso di sedimento è stato effettuato dividendo il peso del sedimento secco per l'area delle trappole ($A=58,1 \text{ cm}^2$) moltiplicata per i giorni di esposizione (in genere 14, tranne che nel periodo invernale), median-do il risultato delle due trappole parallele.

Il sedimento è stato osservato con un microscopio binoculare Olympus SZX9 (rapporto di ingrandimento pari a 9, 0,63x-5,7x), ed alcuni campioni sono stati analizzati anche con un microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) attrezzato con un sistema di microanalisi EDAX FALCON (Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali -DIMTI, Università di Trento). In totale, nel periodo dal 4/11/04 al 3/05/06 sono stati raccolti 44 campioni, (Tab. 1), 22 a 5 m e 22 a 15 m di profondità, che in vista delle analisi geochemiche e mineralogiche sono stati omogeneizzati tramite macinazione manuale in mortaio d'agata. Su 30 di questi è stato analizzato il contenuto di Carbonio Totale (TC) e di Azoto Totale (TN) tramite analizzatore elementare CarloErba CHN nei laboratori dell'IGG-CNR (Pisa). Il contenuto di carbonio inorganico totale (TIC) è stato misurato per Coulometria su 25 campioni nei laboratori ALS-Chemex (Canada). Il contenuto di carbonio organico totale (TOC) è stato calcolato per differenza tra TC e TIC. I flussi di carbonio inorganico e organico totali sono stati calcolati moltiplicando il flusso di sedimento totale per il contenuto di TIC e TOC.

Le analisi mineralogiche quantitative sono state eseguite mediante tecnica di diffrazione a raggi X su 10 campioni. L'apparecchiatura utilizzata è un diffrattometro a detector Imaging Plate in configurazione riflettente con anodo al rame, monocromatore multilayer sul fascio in ingresso e filtro nickel in uscita. L'analisi quantitativa è stata effettuata utilizzando il software MAUD (Material Analysis Using Diffraction - <http://www.ing.unitn.it/~luttero/maud/>), con una rifinitura Rietveld estesa a tutto lo spettro. La percentuale di materiale amorfo viene determinata simulando lo spettro con una fase sub-nanocristallina, che preserva la struttura della fase cristallina corrispondente, utilizzando una dimensione dei domini di diffrazione (cristalliti) dello stesso ordine di grandezza dei parametri di cella; è così possibile simulare la perdita dell'ordine a lungo raggio, caratteristica dei materiali amorfi. Le altre fasi cristalline vengono trattate in modo tradizionale. Le percentuali delle varie fasi sono state calcolate sulla frazione minerogena del campione.

Le analisi isotopiche sono state effettuate nel laboratorio dell'Università di Innsbruck. Una micro-quantità di campione è stata analizzata con

Tab. 1 - Lista dei risultati riguardanti i sedimenti delle trappole; sono riportati: data, profondità, giorni di esposizione, peso del materiale intrappolato, flussi medi calcolati, contenuto di carbonio totale e inorganico, composizione isotopica del carbonio e dell'ossigeno della frazione carbonatica. Sono inoltre segnati i campioni su cui si è effettuata l'analisi mineralogica mediante diffrazione a raggi-X.

Tab. 1 - List of results concerning sediment traps. The list contains: date, trap depth, period of exposure, total weight of trapped sediment, calculated mean fluxes, total carbon and inorganic carbon content, stable isotope composition of carbon and oxygen in the trapped sediment. Samples analysed for their mineralogical composition using X-ray diffractometry are also marked.

Periodo di esposizione	Prof. trapp. (m)	N. giorni esposiz.	Peso sed. totale (mg)	Flusso totale medio (mg m ⁻² g ⁻¹)	Carbonio totale (peso %)	Carbonio inorg. tot. (peso %)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	Analisi raggi-X
4-18/11/04	5	14	179,9	1106,3	19,00	5,67	-1,35	-5,64	si
18/11-1/12/04	5	13	56,8	376,1			-2,16	-3,54	
1/12/04-15/04/05	5	135	154,9	98,8	28,70	2,26	-2,01	-7,39	si
15-27/04/05	5	12	88,7	636,3	29,23		-1,72	-5,33	
27/04-11/05/05	5	14	205,1	1261,2	29,21	3,99	-4,12	-6,43	
11-25/05/05	5	14	445,3	2737,8	16,50	7,95	-5,71	-8,17	si
25/05-08/06/05	5	14	486,6	2991,8	15,94	8,09	-5,09	-8,13	
08-22/06/05	5	14	105,9	651,0	19,10		-2,69	-7,14	
22/06-06/07/05	5	14	40,1	246,5			-3,09	-6,68	
06-22/07/05	5	16	168,0	903,8	19,59	7,87	-5,13	-8,55	
22/07-05/08/05	5	14	257,1	1580,5	25,00	5,65	-4,67	-8,65	si
05-17/08/05	5	12	358,4	2570,9	24,59	6,18	-4,20	-8,19	
17/08-02/09/05	5	16	333,0	1791,5	16,37	7,65	-1,90	-6,14	
02-14/09/05	5	12	219,7	1575,9	19,97	6,02	-2,91	-7,08	
14-28/09/05	5	14	91,1	560,1	22,00	5,4	-3,87	-7,92	
28/09-12/10/05	5	14	81,9	503,8	20,01		-3,28	-7,80	
12-26/10/05	5	14	29,0	178,3			-3,29	-7,43	
26/10-09/11/05	5	14	65,0	399,7			-3,34	-7,90	
09-23/11/05	5	14	64,8	398,4			-3,42	-7,92	
23/11-01/12/05	5	8	34,6	372,3			-3,35	-7,40	
01/12/05-19/04/06	5	139	182,8	113,2			-3,72	-8,69	
19/04-3/05/06	5	14	77,3	518,9			-2,95	-7,40	
4-18/11/04	15	14	288,8	1775,8	23,36	4,53	-1,01	-5,36	si
18/11-1/12/04	15	13	56,3	372,9	20,47		-1,91	-4,23	
1/12/04-15/04/05	15	135	265,1	169,0	26,06	2,97	-2,81	-7,94	si
15-27/04/05	15	12	197,9	667,3	25,74		-7,47	-8,95	
27/04-11/05/05	15	14	143,4	881,4	34,12	2,5	-2,36	-6,75	
11-25/05/05	15	14	266,8	1640,4	23,60	5,8	-5,03	-8,11	
25/05-08/06/05	15	14	375,8	2310,8	17,36	6,7	-5,25	-8,14	
08-22/06/05	15	14	165,4	1016,8	19,88	4,46	-4,03	-8,11	
22/06-06/07/05	15	14	220,3	1354,5	18,41	3,84	-1,78	-8,20	
06-22/07/05	15	16	313,3	1685,5	17,86	4,96	-3,89	-8,67	
22/07-05/08/05	15	14	567,6	3489,8	15,95	8,73	-4,88	-8,76	si
05-17/08/05	15	12	378,5	2715,1	16,78	8,13	-4,42	-8,46	
17/08-02/09/05	15	16	34,5	185,6			-2,16	-6,47	
02-14/09/05	15	12	335,3	2405,4	20,28	6	-3,44	-7,98	si
14-28/09/05	15	14	163,7	1006,5	23,93	3,98	-3,58	-8,24	
28/09-12/10/05	15	14	148,2	911,2	22,26	3,13	-3,02	-8,56	
12-26/10/05	15	14	94,7	582,4	25,79		-3,16	-8,50	
26/10-09/11/05	15	14	104,1	640,2			-3,28	-8,24	
09-23/11/05	15	14	127,2	782,2		3,46	-3,19	-7,91	si
23/11-01/12/05	15	8	54,0	581,0			-3,48	-7,82	
01/12/05-19/04/06	15	139	353,3	218,8			-4,25	-8,66	si
19/04-3/05/06	15	14	107,8	662,8			-2,71	-8,45	

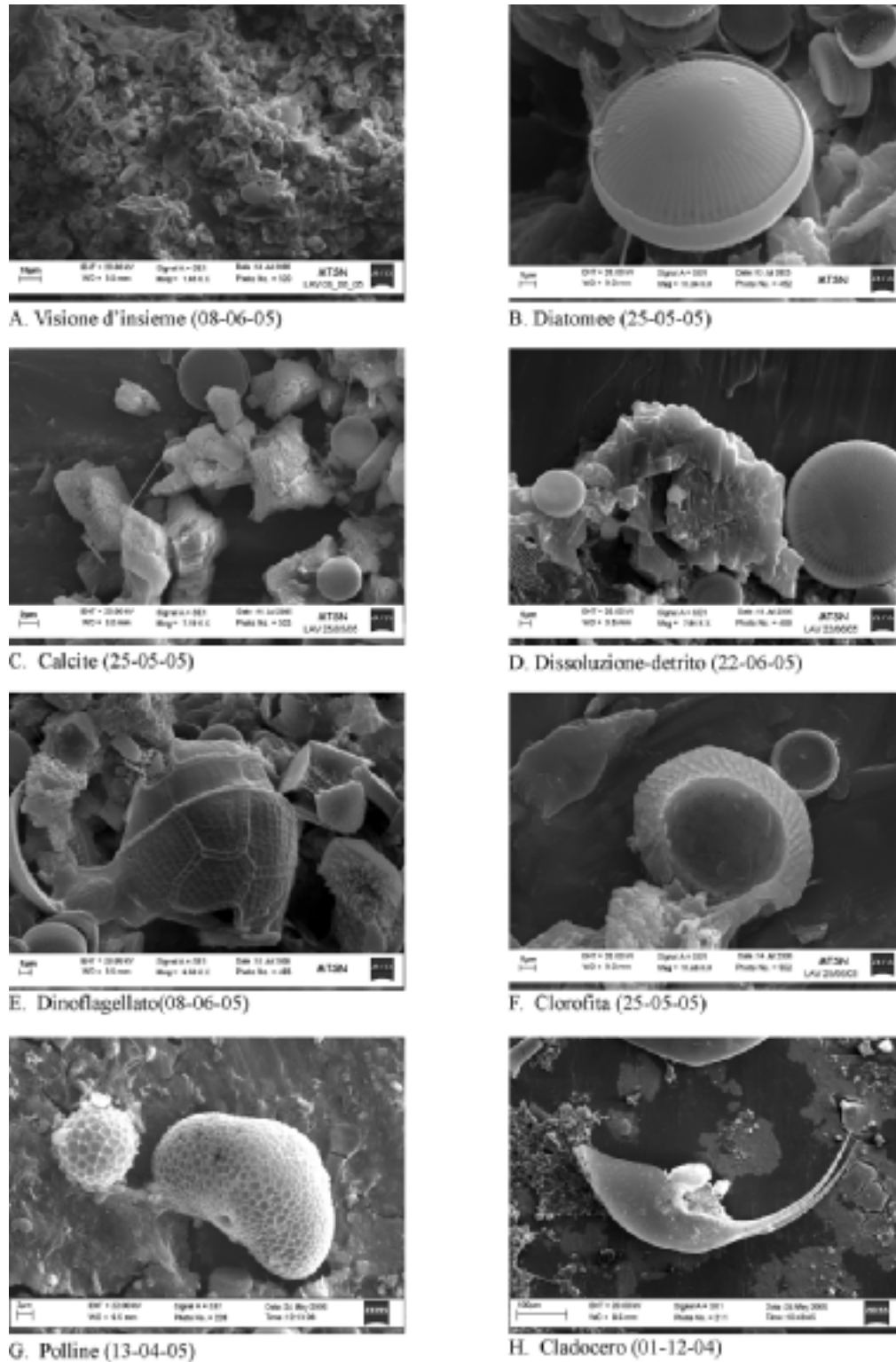


Fig. 2 - Foto al microscopio elettronico a scansione (SEM) del materiale raccolto nelle trappole per sedimento (foto M. Tardio). A) Visione d'insieme di un campione primaverile, costituito essenzialmente di calcite e diatomee. B) Dettaglio di una diatomea (*Cyclotella*). C) Dettaglio di alcuni cristalli di calcite endogenica. D) Dettaglio su fenomeni di dissoluzione su calcite e su diatomee. Il cristallo di calcite è di origine detritica. E) Dettaglio di un dinoflagellato. F) Dettaglio di Clorofita calcificata (*Phacotus*). G) Dettaglio di polline. H) Cladocero (*Bosmina*).

Fig. 2 - SEM pictures of the sediment trap material (courtesy M. Tardio). A) Overview of a spring sample, made mainly of calcite and diatoms. B) Detail of a diatom (Cyclotella). C) Detail of endogenic calcite crystals. D) Detail of dissolution phenomena on detrital calcite crystals and diatoms. E) Detail of a dynoflagellate. F) Detail of a calcified Chlorophyta (Phacotus). G) Detail of a pollen. H) Cladocera (Bosmina).

un sistema di preparazione per carbonati on-line a flusso continuo (Gasbench II) collegato a uno spettrometro di massa Finnigan Delta Plus XL (Spötl & Vennemann 2003). I risultati sono espressi in $\delta\%$ rispetto allo standard "Vienna PeeDee Belemnite" (V-PDB) e la standardizzazione è stata ottenuta utilizzando lo standard NBS19. La precisione dei valori $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ espressa come deviazione standard 1σ è inferiore a $0,10\%$.

4. RISULTATI

4.1. Sedimentologia e flussi di sedimentazione

All'osservazione microscopica (binoculare, SEM e ESEM, vedi Fig. 2), il materiale raccolto nelle trappole è risultato essere composto in parti variabili da particelle inorganiche (soprattutto calcite), più abbondanti nel periodo primaverile-estivo, e da una componente organica. Quest'ultima è rappresentata sia da particelle di materia organica più o meno decomposta di origine vegetale (frammenti di tessuti vegetali, pollini ecc.), sia da frammenti o individui planctonici/bentonici di origine animale (copepodi, cladoceri – molto abbondanti in qualsiasi stagione – e chironomidi) e alghe (diatomee, dinoflagellati, crisofite ecc). L'abbondanza di zooplancton è probabilmente un effetto indotto dalla presenza delle trappole stesse, essendo il materiale raccolto in esse una fonte di cibo per questi organismi. In effetti, l'acqua dei contenitori intercambiabili è risultata essere sempre fortemente popolata da zooplancton, specialmente Cladocera: nel processo di preparazione dei campioni si è pertanto cercato di eliminarne al massimo la presenza. La distribuzione delle varie componenti è funzione di un andamento stagionale che vede una fioritura iniziale di diatomee in primavera, che prosegue nel corso dell'estate, seguita dall'inizio della precipitazione di calcite (maggio). Come confermato dalle analisi all'ESEM – EDAX, il silicio e il calcio sono i due elementi più abbondanti in tutti i campioni raccolti, con subordinati alluminio, magnesio, zolfo, zinco, ferro, fosforo e potassio.

Anche i flussi di sedimentazione calcolati mostrano un marcato andamento stagionale (Fig. 3), con minimi invernali di $0,1 \text{ g m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ e due massimi di $3-3,5 \text{ g m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ nel periodo primaverile-estivo, rispettivamente a maggio e ad agosto, intervallati da un minimo da giugno a metà luglio, che nella trappola a 5 m si traduce in valori di flusso confrontabili con quelli invernali.

In generale, la trappola di fondo raccoglie più materiale di quella situata nell'epilimnio, tranne che durante il periodo primaverile (fine aprile-maggio). I flussi della prima metà di novembre 2004 sono risultati più elevati di quelli di novembre 2005, probabilmente a causa della messa in opera del sistema delle trappole, che ha creato una forte risospensione (trappola di fondo).

4.2. Composizione del particolato raccolto: TIC, TOC, TC

I valori del carbonio inorganico totale (TIC) presente nel sedimento raccolto sono compresi tra $2,26\%$ e $8,73\%$, con una media di $5,44\%$ (Fig. 3). Assumendo che tutto il carbonio inorganico sia presente sotto forma di calcite, i valori appena descritti corrispondono a

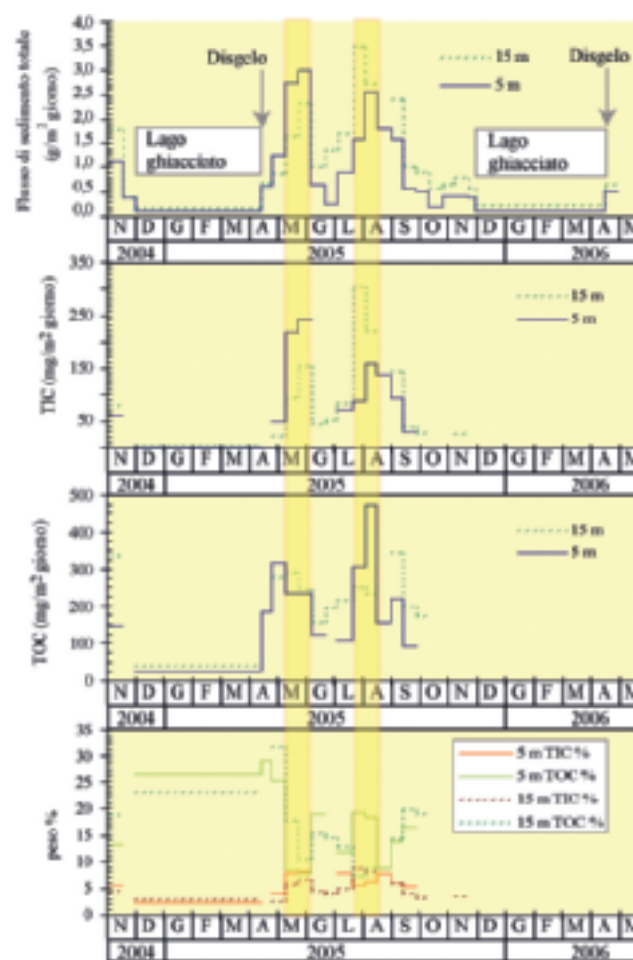


Fig. 3 - Flussi di sedimento totale raccolto nelle trappole di superficie (5 m) e di fondo (15 m) nei differenti periodi di esposizione (vedi anche Tab. 1). Flussi di carbonio inorganico e organico totali calcolati e loro percentuale in peso. In figura sono evidenziati i periodi in cui il lago è ghiacciato (inizio dicembre - metà aprile per i due inverni monitorati) e il conseguente momento del disgelo. Le bande verticali più scure sono in corrispondenza dei picchi di maggior flusso (maggio, agosto).

Fig. 3 - Total sediment flux as recorded in the surface (5 m) and bottom (15 m) sediment traps during the different exposure periods (see also Tab. 1). Calculated inorganic and organic carbon fluxes and their dry weight percentages. Periods of frozen lake (beginning of December - mid of April for the two monitored winters) and subsequent thaws are showed in the figure. The two darker bands mark sediment flux peaks (May, August).

un minimo di 19% e un massimo di 73% di calcite sul sedimento totale. Il TIC mostra un andamento bimodale nel tempo comparabile con quello dei flussi, per lo meno per la trappola di fondo, anche se il numero ridotto di analisi non permette un confronto completo tra le grandezze misurate. Picchi di flusso di TIC si registrano a maggio-inizio giugno e fine luglio-agosto (Fig. 3). In particolare, nella seconda metà di luglio la trappola di fondo riceve un flusso triplo di carbonio inorganico rispetto alla trappola di superficie.

Il contenuto di carbonio organico varia da un minimo di 7,22% (inizio agosto, trappola di fondo) a un massimo di 31,62% (fine aprile - inizio maggio, trappola di fondo), che corrisponde a circa il doppio per il contenuto di materia organica (Dean 1999). Confrontando l'andamento dei valori di TOC della trappola superficiale con quelli della trappola profonda si nota una buona corrispondenza, con un picco di produzione centrato a fine aprile - inizio maggio, tranne che per il periodo da metà luglio a metà agosto (Fig. 3). In particolare, nella prima metà di agosto nella trappola a 5 m si registra un flusso di materia organica che è circa due volte quello della trappola di fondo. Esiste, poi, una tendenza statisticamente significativa alla correlazione negativa tra carbonio totale (o organico) e contenuto di carbonio inorganico (coefficiente di correlazione = 0,76, $\alpha=1\%$): infatti, ad alte percentuali di carbonio organico corrispondono basse percentuali di carbonio inorganico, e viceversa.

4.3. *Composizione mineralogica del sedimento delle trappole*

Il sedimento raccolto nelle trappole è composto da silice amorfa e calcite (rispettivamente con una media del 58% e 32% in volume), con subordinati dolomite e quarzo (4,2 e 1,6% rispettivamente). I rapporti tra i minerali dominanti variano stagionalmente (Fig. 4), con un aumento di calcite e una forte riduzione dei minerali detritici (Dol, Qz) nei mesi estivi, mentre nei mesi primaverili e autunnali predomina la silice amorfa (biogenica). Per tre campioni (18/11/04, 15/04/05, 5/08/05) sono disponibili analisi a diverse profondità: in due casi su tre si nota una maggiore abbondanza di calcite e una minore percentuale di silice amorfa nella trappola di fondo rispetto alla trappola superficiale.

Sono state effettuate anche due analisi mineralogiche sulla sabbia delle spiagge artificiali (vedi par. 2), che è risultata essere una sabbia dolomitico-calcarea, con una composizione media di dolomite al 57%, calcare al 41% e, subordinato, quarzo (<2%).

4.4. *Composizione isotopica del sedimento delle trappole*

La composizione isotopica dei carbonati contenuti nelle trappole per sedimento varia tra -1,00 e -7,47‰ per il carbonio, e tra -3,53 e -8,94‰ per l'ossigeno, con

un intervallo rispettivamente di 6,4 e 5,4 ‰, e una media di 3,4 e 7,5‰ (Fig. 5). I rapporti isotopici mostrano variazioni stagionali, con andamenti oscillatori nei mesi primaverili-estivi. Esiste un'ottima correlazione dei valori e degli andamenti per entrambi gli isotopi tra le trappole di superficie e quelle di fondo ($R^2=0,85$ per il $\delta^{18}O$ e $=0,64$ per il $\delta^{13}C$), se si esclude il campione a 15 m del 27/04/05. Si nota anche una certa tendenza alla covarianza tra $\delta^{18}O$ e $\delta^{13}C$, più marcata nella trappola di superficie ($R^2=0,50$). Le oscillazioni verso valori isotopici bassi nel periodo primaverile-estivo (maggio - inizio giugno e fine luglio - agosto) sono in antifase con l'andamento dei flussi medi misurati e del contenuto di clorofilla-a, un indice della produttività algale; questo è vero specialmente per l'isotopo del carbonio e, più in generale, per le trappole di superficie (Fig. 5).

4.5. *Composizione isotopica dell'ossigeno della colonna d'acqua*

I valori del $\delta^{18}O_{w-SMOW}$ della colonna d'acqua del Lago di Lavarone (vedi Fig. 5) variano tra un minimo di -9,36‰ e un massimo di -7,4‰, e mostrano anch'essi un andamento stagionale con una marcata differenza tra ipolimnio ed epilimnio. La parte più profonda della colonna d'acqua è caratterizzata, infatti, da valori bassi e relativamente stabili (media $\delta^{18}O$ -8,9‰), mentre quella più superficiale mostra un graduale aumento dei valori, a partire da 8,7‰ per raggiungere il massimo a metà settembre (-7,40‰) e quindi diminuire nuovamente.

Questo andamento trova corrispondenza parziale nei risultati del $\delta^{18}O$ del sedimento raccolto nelle trappole, dove abbiamo una buona correlazione solo tra i risultati della trappola di fondo e quelli della colonna d'acqua a 10 m di profondità. Le variazioni misurate per il $\delta^{18}O$ dell'acqua dell'epilimnio sembrano invece seguire, con un certo ritardo, quelle della temperatura media dell'aria (Fig. 1) e, quindi, dell'acqua, e quelle della composizione isotopica delle piogge (Fig. 5). Anche l'evaporazione può giocare un ruolo nel determinare il trend descritto per la parte superficiale della colonna d'acqua.

4.6. *Calcolo delle temperature di precipitazione della calcite*

Utilizzando la media dei valori isotopici dell'ossigeno dei primi 5 m della colonna d'acqua del Lago di Lavarone e il $\delta^{18}O$ del sedimento delle trappole superficiali si è calcolata la temperatura di precipitazione della calcite all'equilibrio, secondo la seguente equazione (Epstein *et al.* 1953), riformulata come in Sharp (2005, cap. 6) per poter inserire i valori espressi rispetto agli standard internazionali PDB e SMOW:

$$(1) \quad t(^{\circ}C) = 15,75 - 4,3 * (\delta^{18}O_{c-PDB} - \delta^{18}O_{w-SMOW}) + 0,14 * (\delta^{18}O_{c-PDB} - \delta^{18}O_{w-SMOW})^2$$

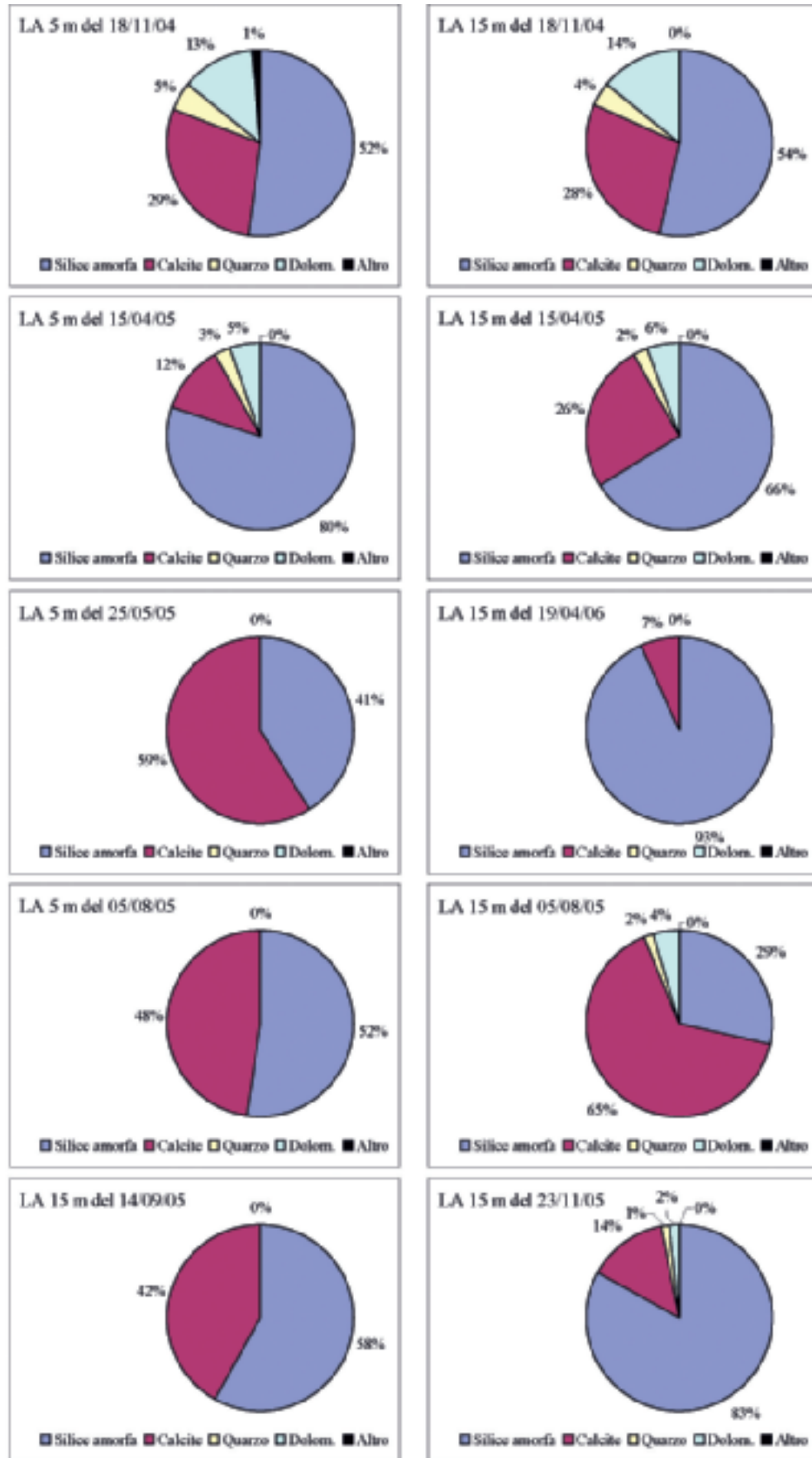


Fig. 4 - Analisi mineralogiche tramite raggi-X di 10 campioni di sedimento raccolto nelle trappole.
 Fig. 4 - X-ray mineralogical analyses of 10 samples of trapped sediment.

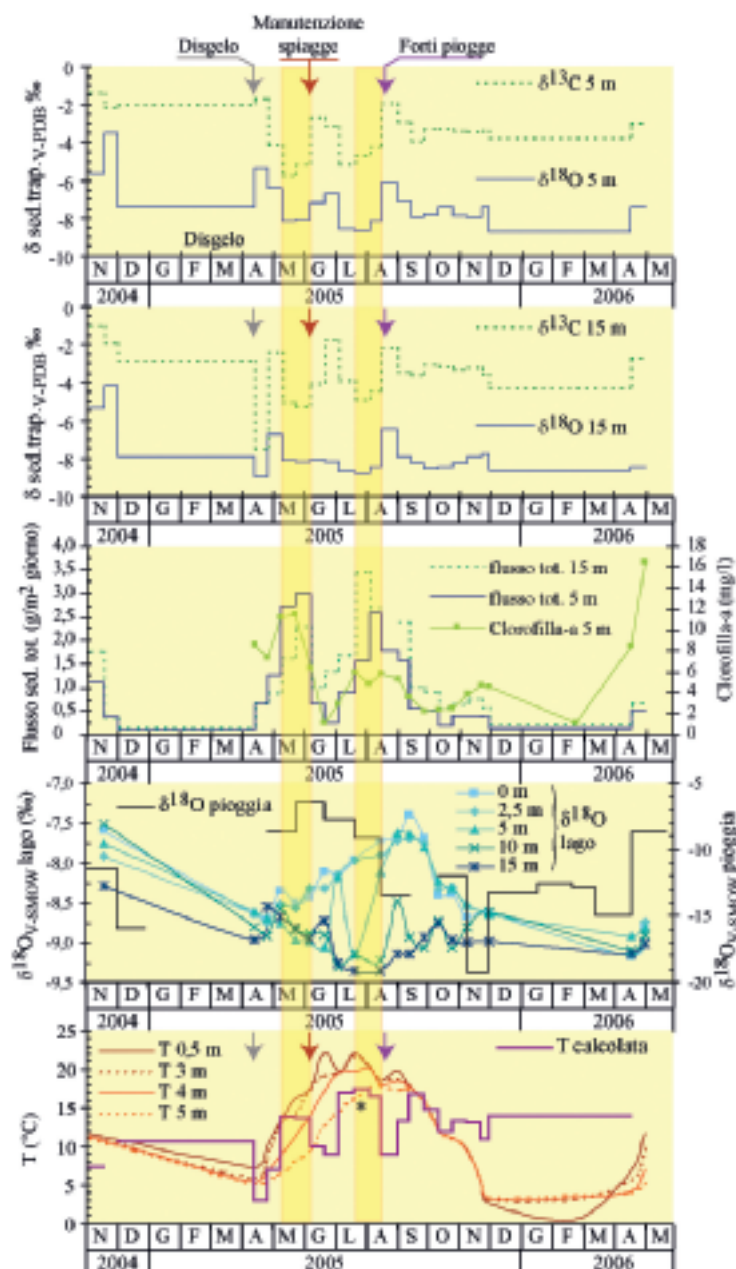


Fig. 5 - Composizione isotopica del carbonio e dell'ossigeno del sedimento totale raccolto nelle trappole di superficie (5 m) e di fondo (15 m). Per confronto sono riportati i flussi di sedimento totale raccolto (vedi Fig. 3) e i valori di clorofilla-a misurati nella colonna d'acqua a 5 m di profondità. Composizione isotopica dell'ossigeno della colonna d'acqua misurata a diverse profondità (0, 2,5, 5, 10 e 15 m), e $\delta^{18}\text{O}$ della pioggia precipitata. Temperature misurate nei primi 5 m della colonna d'acqua e calcolo della temperatura di precipitazione all'equilibrio a partire dai dati isotopici del sedimento e dell'acqua. Il dato di fine luglio - inizio agosto è stato interpolato poiché manca il campione di acqua corrispondente. Le frecce indicano i seguenti eventi (vedi testo per discussione): disgelo (metà aprile), manutenzione delle spiagge (fine maggio - inizio giugno) ed eventi di forti piogge (seconda metà di agosto). Le bande verticali più scure sono in corrispondenza dei picchi di maggior flusso (maggio, agosto).

Fig. 5 - Carbon and oxygen isotope composition of the surface (5 m) and bottom (15 m) sediments from traps. Total sediment fluxes (see Fig. 3) are shown for comparison, together with chlorophyll-a values measured at 5 m depth in the water column. Oxygen isotope composition of the water column measured at different depth (0, 2.5, 5, 10 and 15 m), and rain $\delta^{18}\text{O}$ values. Measured water temperatures within the first 5 m of the water column, and calculated equilibrium-precipitation temperature of calcite using sediment and water stable isotope data. End of July - beginning of August datum was interpolated as the corresponding water sample is missing. Arrows in the figure indicate the following events (see text for details): thawing (mid of April), beach maintenance (end of May - beginning of June) and strong precipitation events (second half of August). The two darker bands mark sediment flux peaks (May, August).

I risultati del calcolo sono visibili in figura 5: si ottengono valori di temperature calcolati simili o uguali a quelli misurati nei periodi di maggior flusso (metà maggio - inizio giugno e fine luglio - metà agosto) e da metà settembre fino a fine ottobre. Le temperature calcolate sono sovrastimate nei mesi autunnali-invernali, mentre sono sottostimate dopo il disgelo, a giugno-metà luglio, e a fine agosto - settembre.

4.7. *Composizione isotopica del carbonio inorganico disciolto*

La composizione isotopica del carbonio inorganico disciolto varia da un minimo di -10,78‰ a un massimo

di -4,72‰, con valori bassi e abbastanza costanti per l'ipolimnio (media $-9,97 \pm 0,64‰$) e un evidente andamento stagionale per l'epilimnio (Fig. 6). Quest'ultimo mostra una graduale ma marcata crescita dei valori di $\delta^{13}C$ a partire dal disgelo, e il raggiungimento dei valori più alti durante i mesi estivi (luglio-settembre). La differenza dei valori medi di $\delta^{13}C$ tra epilimnio e ipolimnio è $>3‰$. Tuttavia, come ben visibile in figura 6, per problemi tecnici esiste uno sfasamento tra il periodo di monitoraggio delle trappole per sedimento (04/11/04-03/05/06) e quello del rapporto isotopico del DIC (22/06/05-19/07/06), per cui manca un ciclo annuale completo in comune. In ogni caso, appare chiara la relazione speculare tra l'andamento del $\delta^{13}C$

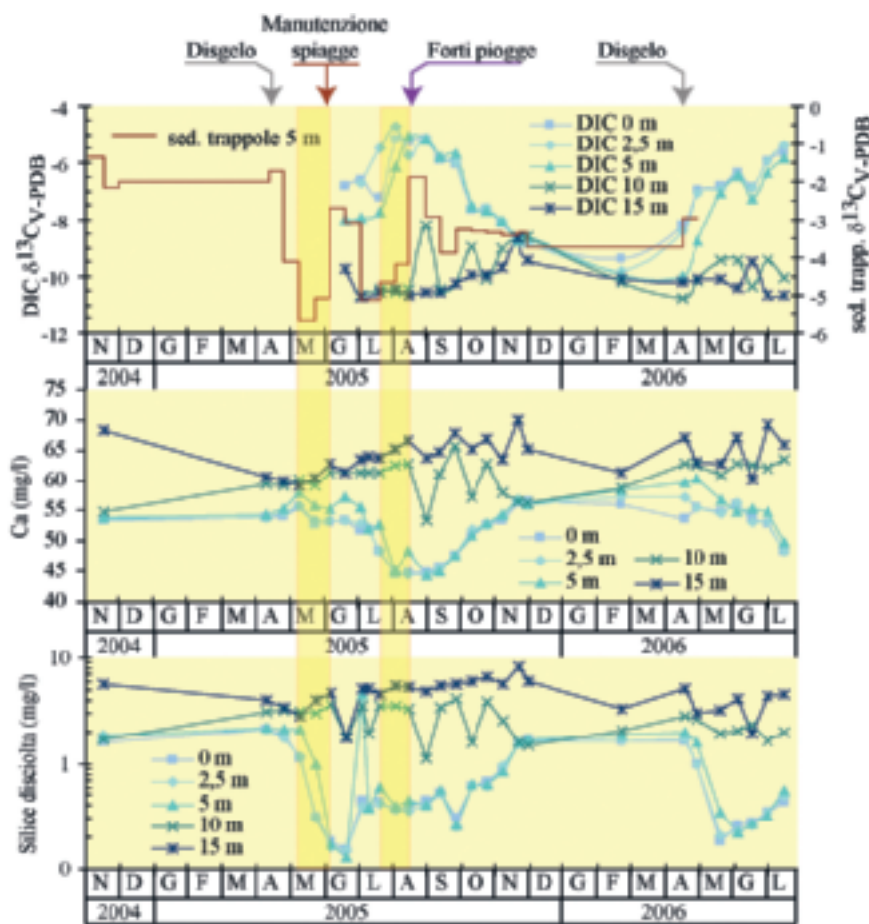


Fig. 6 - Composizione isotopica del carbonio inorganico disciolto nella colonna d'acqua misurata a diverse profondità (0, 2,5, 5, 10 e 15 m) nel periodo di monitoraggio, confrontata con il $\delta^{13}C$ del sedimento raccolto a 5 m di profondità. Contenuto di calcio e silice disciolti nella colonna d'acqua, misurati a diverse profondità (0, 2,5, 5, 10 e 15 m) nel periodo di monitoraggio. Le frecce indicano i seguenti eventi (vedi testo per discussione): disgelo (metà aprile), manutenzione delle spiagge (fine maggio-inizio giugno) ed eventi di forti piogge (seconda metà di agosto). Le bande verticali più scure sono in corrispondenza dei picchi di maggior flusso (maggio, agosto).

Fig. 6 - Isotope composition of dissolved inorganic carbon measured at different depths (0, 2.5, 5, 10 and 15 m) during the monitoring period, compared with the $\delta^{13}C$ of the sediment trapped at 5 m depth. Contents of dissolved calcium and silica, measured at different depth (0, 2.5, 5, 10 and 15 m) during the monitoring period. Arrows in the figure indicate the following events: thawing (mid of April), beach maintenance (end of May-beginning of June) and strong precipitation events (second half of August). The two darker bands mark sediment flux peaks (May, August).

descritto per l'epilimnio e quello della concentrazione del Ca: nel periodo estivo (luglio-ottobre) ad alti valori di $\delta^{13}\text{C}$ del DIC corrisponde un abbassamento nelle concentrazioni del Ca disciolto nella colonna d'acqua. Questo periodo è preceduto (aprile-inizio giugno) da una forte produttività algale nella parte alta della colonna d'acqua, come mostrato dai dati di clorofilla-a (Fig. 5) e della silice disciolta (Fig. 6), il cui consumo è legato alla fioritura delle diatomee. Come il $\delta^{13}\text{C}$ del DIC, anche la composizione isotopica media del carbonio del sedimento totale delle trappole tende ad aumentare andando verso la fine dell'estate, ma presenta tre picchi (aprile, giugno e fine agosto-inizio settembre) che non si ritrovano nel DIC.

5. INTERPRETAZIONE

La media ponderata annua dei flussi di accumulo di materiale ricavato dalle trappole è di $0,022 \text{ g cm}^{-2}$ per la trappola di superficie e di $0,025 \text{ g cm}^{-2}$ per quella di fondo, valori comparabili come ordine di grandezza con i $0,034 \pm 0,002 \text{ g cm}^{-2}$ anno ottenuti per la parte alta della carota di sedimento datata con il ^{210}Pb . I dati dei flussi di sedimento, unitamente a quelli della loro composizione mineralogica e geochimica ed agli studi fatti al microscopio elettronico, indicano la presenza di una prima fioritura algale a diatomee non appena il lago disgela. La silice amorfa è prevalente nei campioni di aprile, e la concentrazione di silice disciolta nell'acqua inizia a diminuire ben prima di quella del calcio. Si sottolinea come la risposta del mondo algale all'irraggiamento ed al primo riscaldamento sia estremamente rapida. Segue a ruota la precipitazione di calcite, probabilmente innescata dall'attività biologica (Kelts & Hsü 1978), che fa aumentare decisamente i flussi di sedimentazione nel mese di maggio. La diminuzione dei flussi sedimentari (giugno - prima metà di luglio) avviene in un periodo in cui lo zooplankton (rotiferi, cladoceri, copepodi) raggiunge il picco di popolazione (IASMA 2000: 41), in particolare per quanto riguarda i cladoceri *Bosmina* e *Daphnia*, che sono molto abbondanti nelle trappole. L'elevato tasso di consumo del fitoplancton da parte dello zooplankton può portare ad avere acque più trasparenti nell'epilimnio, come confermato dai valori del disco di Secchi (Corradini *et al.* 2007, valori di 4,5-5 m rispetto ai 2-2,5 m rilevati nei campionamenti precedenti e seguenti). Lo zooplankton svolgerebbe, dunque, il ruolo di ridurre la sedimentazione tramite l'ingestione del particolato e porterebbe alla rigenerazione di nutrienti nell'epilimnio stesso (Weilenmann *et al.* 1989, e riferimenti ivi contenuti). Passato il picco di sviluppo zooplanctonico, il flusso di sedimentazione legato alla presenza algale e alla precipitazione inorganica riprende, per poi calare in settembre-ottobre, con il diminuire di temperatura ed irraggiamento.

I flussi della prima metà di novembre 2004 sono più elevati di quelli del novembre 2005, probabilmente a causa della messa in opera del sistema delle trappole, che ha creato una forte risospensione (trappola di fondo), e delle forti piogge di inizio mese, che hanno aumentato l'apporto di materiale detritico nel lago.

I picchi di flusso di sedimento nelle trappole in primavera-estate corrispondono a valori isotopici bassi del sedimento stesso, che forniscono temperature di precipitazione - calcolate utilizzando la composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua e del sedimento delle trappole - in buon accordo con quelle misurate nella colonna d'acqua, indice di precipitazione all'equilibrio isotopico. A luglio - inizio agosto, le temperature calcolate sono più vicine a quelle misurate nella parte inferiore dell'epilimnio (5 m), a suggerire che la profondità di precipitazione aumenta nel corso dell'estate, con il riscaldarsi graduale della colonna d'acqua e lo spostarsi dell'attività algale. Nel periodo autunnale-invernale la calcite non precipita, o precipita in quantità minime, e quella che si raccoglie nelle trappole è essenzialmente un residuo di quella estiva, il che spiega la sovra-stima della temperatura calcolata rispetto a quella misurata.

Le oscillazioni verso l'alto della composizione isotopica del sedimento sono da attribuire ad una maggiore influenza dell'apporto detritico, derivante in parte dal substrato affiorante nei dintorni del lago (Formazione dei Calcari Grigi) e in parte dalle spiagge artificiali a composizione dolomitico-calcitica. Analisi isotopiche eseguite sul Membro Inferiore dei Calcari Grigi nella zona del Croz dell'Altissimo hanno fornito valori positivi per il $\delta^{13}\text{C}$ (media 2‰), variabili tra 2,8 e 3,75‰ per il $\delta^{18}\text{O}$ (Borsato *et al.* 1994). Non sono al momento disponibili dati sulla composizione isotopica della sabbia delle spiagge, ma si può ragionevolmente supporre che tenda verso valori alti, considerata l'origine marina dei carbonati usati per il ripascimento. Il Lago di Lavarone non ha immissari superficiali significativi (vedi par. 2) e l'eventuale aumento di apporto detritico deve necessariamente essere legato a fenomeni climatici quali l'aumento delle precipitazioni, il disgelo e/o interventi antropici. Delle tre oscillazioni isotopiche verso valori alti, la prima (metà-fine aprile), evidente nella trappola di superficie e solo successivamente in quella di fondo, è probabilmente legata al disgelo sia del lago stesso, con la diffusione nella colonna d'acqua del carico solido intrappolato nella copertura di ghiaccio/neve del lago, che della copertura nevosa del bacino. Le analisi mineralogiche del sedimento raccolto nelle trappole nel periodo corrispondente al lago ghiacciato e al suo disgelo confermano la presenza di minerali detritici quali quarzo e dolomite. La tendenza verso un aumento dei valori isotopici nel periodo del disgelo si nota in entrambi gli anni di monitoraggio. Il picco isotopico positivo di fine agosto - inizio settembre è correlato a forti eventi piovosi verificatisi in

zona nella seconda metà d'agosto (Fig. 1), che hanno dilavato il terreno circostante, aumentando il carico detritico. Quello di giugno è probabilmente il risultato della manutenzione delle spiagge artificiali, dove il ripascimento avviene ogni anno a inizio stagione (fine maggio - primi di giugno, Bertoldi com. pers.).

Il graduale aumento del $\delta^{13}\text{C}$ DIC tra aprile e agosto è indice dell'attività di fotosintesi algale, durante la quale avviene l'assunzione preferenziale di ^{12}C da parte delle alghe, con il conseguente arricchimento del DIC rimanente in ^{13}C (McKenzie 1985). L'andamento parallelo del $\delta^{13}\text{C}$ DIC e dell'involuppo dei minimi della composizione isotopica del carbonio del sedimento delle trappole, segno della diretta influenza del primo sul secondo, è un ulteriore indice di precipitazione all'equilibrio della calcite e dell'assenza di eventuali effetti di disturbo legati al polo biologico.

6. CONCLUSIONI

Il monitoraggio del Lago di Lavarone effettuato tramite l'esposizione di trappole per sedimento per un intero anno ha permesso di conoscere le varie fasi di produzione/sedimentazione che caratterizzano il lago. Nel 2005 si sono verificati due picchi di sedimentazione, centrati a maggio e ad agosto, legati a un aumento dell'attività algale e alla precipitazione di calcite, la quale precipita in equilibrio isotopico con il suo medium. Il segnale isotopico, tuttavia, risente dell'influenza dell'apporto detritico, in genere molto limitato ma occasionalmente (disgelo, grandi piogge, interventi antropici) sufficientemente forte da disturbare/obliterare l'impronta isotopica originale. Ciononostante, nell'anno monitorato la quantità di calcite endogena precipitata all'equilibrio è risultata predominante rispetto a quella di origine detritica, cosicché anche il rapporto isotopico medio del sedimento è rimasto vicino a quello originale, permettendone il suo utilizzo per ricostruzioni di temperatura.

RINGRAZIAMENTI

Il presente studio fa parte della ricerca OLOAMBIENT ("Risposte dell'ambiente e degli ecosistemi alla variabilità climatica dell'Olocene in Trentino basata su serie di dati-proxy da sedimenti lacustri, latte di monte e tufo calcareo") finanziata dalla Provincia Autonoma di Trento (PAT). La collaborazione e disponibilità del Comune di Lavarone, e dei proprietari dei Lidi Bertoldi e Marzari hanno facilitato grandemente la realizzazione della ricerca. Si ringraziano il Corpo Permanente dei Vigili del Fuoco di Trento, Gruppo Sommozzatori, per l'appoggio tecnico nelle fasi di posizionamento e smantellamento della colonna di trappole. Gli autori sono grati a Renza

Miorandi, Nicola Angeli, Michele Zandonati ed a vari stagisti della sezione di Limnologia e Algologia del Museo Tridentino Scienze Naturali (progetto Daedalus-PAT) per la partecipazione ai campionamenti estivi ed invernali. Si ringraziano inoltre Samantha Manco per l'aiuto sul campo e in laboratorio, Carlo Bressanini (DIMTI - Università di Trento) per le analisi all'ESEM-EDAX, Yuri Dublyansky e Luigi Dallai per le analisi del contenuto di carbonio e azoto totali. I campioni per l'analizzatore elementare sono stati pesati utilizzando una bilancia Mettler Toledo AE 240 Dual Range (leggibilità 0,01 mg) del Laboratorio Microstrutture e Metallurgia del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali dell'Università di Trento.

L'accurata revisione da parte della dott. sa Ilaria Baneschi ha permesso di migliorare il contenuto e la forma di questo articolo.

BIBLIOGRAFIA

- APAT & IRSA - CNR, 2004. *Metodi analitici per le acque. Rep. Manuali e linee guida 29/2003. Voll. 1-2*. APAT, Roma: 840 pp.
- Battisti C. & Ricci L., 1898 - Escursione e studi preliminari sul laghetto di Lavarone nell'altipiano dei Sette Comuni Vicentini. *IV Annuario degli Studi Trentini*: 30 pp.
- Bloesch J. & Burns N.M., 1980 - A Critical Review of Sedimentation Trap Technique. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 42: 15-55.
- Borsato A., S. Frisia & D. Sartorio, 1994 - Late Triassic - Early Liassic evolution at the margin between the Trento Platform and the Lombardy Basin (Brenta Dolomites, Italy). *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 69 (1992): 5-35.
- CNR-III, 1997 - Metodologie analitiche e controlli di qualità nel laboratorio chimico dell'Istituto Italiano di Idrobiologia. *Documenta Ist. It. Idrobiologia*, 60: 160 pp.
- Corradini F., Boscaini A., Flaim G., Filippi M.L., Borsato A. & Zandonati M., 2007 - Fisica, idrochimica e idrologia del Lago di Lavarone (Trentino, Italia). *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 82 (2005): 175-187.
- Dean W.E., 1999 - The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments. *J. Paleolimnol.*, 21: 375-93.
- Eccel E. & Saibanti S., 2007 - Inquadramento climatico dell'altipiano di Lavarone-Vezzena nel contesto generale trentino. *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol.*, 82 (2005): 111-121.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H.A. & Urey H.C., 1953 - Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 64: 1315-26.
- IASMA, 2000 - *Caratteristiche limnologiche dei laghi del Trentino - Rapporto 1998*. Istituto Agrario di S. Michele all'Adige, Trento: 96 pp.
- Kelts K. & Hsü K.J., 1978 - Freshwater Carbonate Sedimentation. In: Lerman A. (ed.), *Lakes. Chemistry, Geology, Physics*. Springer-Verlag, New York: 295-323.

- Lorenzen C.J., 1967 - Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 343-6.
- McKenzie J.A., 1985 - Carbon isotope and productivity in the lacustrine and marine environment. In Stumm W. (ed.), *Chemical processes in lakes*. Wiley-Interscience, New York, NY, United States: 99-118.
- Ohlendorf C. & Sturm M., 2001 - Precipitation and dissolution of calcite in a Swiss high alpine lake. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 33: 410-7.
- Rott E., 1981 - Some results from phytoplankton counting intercalibrations. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 43: 34-62.
- Sharp Z.D., 2005 - *Principles of Stable Isotope Geochemistry, 1/e*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 344 pp.
- Spötl C., 2005 - A robust and fast method of sampling and analysis of $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in ground waters. *Isot. Environ. Health S.*, 41: 217-21.
- Spötl C. & Vennemann T.W., 2003 - Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 17: 1004-6.
- Tomasi G., 1963 - *I laghi del Trentino*. Casa Editrice G.B. Monauini/Trento, Arti grafiche R. Manfrini/Rovereto: 329 pp.
- Tomasi G., 2004 - *I trecento laghi del Trentino*. Artimedia, Temi, Trento: 535 pp.
- Utermöhl H., 1958 - Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton Methodik. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.*, 9: 1-39.
- Weilenmann U., Omelia C.R. & Stumm W., 1989 - Particle-Transport in Lakes - Models and Measurements. *Limnol. Oceanogr.*, 34: 1-18.