Studi Trentini di Scienze Naturali
ISSN 2035-7699

homepage: https://www.muse.it/it/Editoria-Muse/Studi-Trentini-Scienze-Naturali/Pagine/home.aspx
© 2022 MUSE - Museo delle Scienze, Trento, Italia

Popolamenti vitali di diatomee epilitiche nel Lago di Tovel e loro distribuzione lungo un gradiente di profondità

Nicola Angeli, Silvia Scola, Marco Cantonati*, Daniel Spitale, Massimiliano Tardio

MUSE - Museo delle Scienze,
Corso del Lavoro e della Scienza 3, I-38122 Trento
* Indirizzo attuale: Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali – BiGeA,
Via Selmi 3, 40126 Bologna

Parole chiave

• diatomee epilitiche vitali
• gradiente di profondità
• biovolume
• diversità
• pigmenti
• Lago di Tovel

Key words

• vital epilithic diatoms
• depth gradient
• biovolume
• diversity
• pigments
• Lake Tovel

* Autore corrispondente:
e-mail: nicola.angeli@muse.it

Riassunto

Questo articolo scientifico, tratto da una tesi di laurea sulle diatomee epilitiche lungo un gradiente di profondità del lago di Tovel, è dedicato al direttore emerito Gino Tomasi, limnologo e appassionato conoscitore del Lago Tovel.

Il Lago di Tovel, situato nel Parco Naturale Adamello-Brenta, è un lago di montagna (1178 m s.l.m.), noto come "lago rosso", perché fino al 1964, nel periodo estivo, si verificava il fenomeno dell'arrossamento, dovuto ad un'alga dinoflagellata. Il lago, caratterizzato da forti variazioni di livello, si è dimostrato essere un ecosistema particolarmente adatto per lo studio della distribuzione lungo un gradiente verticale delle diatomee epilitiche. Il periodo che ha interessato questa ricerca va da ottobre 2001 a ottobre 2002, con campionamenti a frequenza stagionale. In media, per ogni campionamento, si sono campionate 10 stazioni da 0.5 a 24 m con l'ausilio di sommozzatori. La peculiarità di questa ricerca è l'approccio adottato per i conteggi effettuati al microscopio invertito per distinguere cellule vitali da frustoli morti e vuoti in base alle caratteristiche del citoplasma. Tra i fattori ecologici correlati con la profondità, la radiazione fotosinteticamente attiva, la probabilità di disseccamento, la conducibilità e la concentrazione della silice sono risultate le variabili principali che determinano il gradiente verticale, lungo il quale si ha una distribuzione caratteristica dei taxa identificati. Ciò ha permesso di identificare tre zone: una zona superficiale profondamente influenzata dalle variazioni di livello, una zona intermedia stabile e una zona profonda dove la luce diventa limitante.

Summary

This scientific article, taken from a degree thesis on epilithic diatoms along a depth gradient of Lake Tovel, is dedicated to the director emeritus Gino Tomasi, limnologist and passionate connoisseur of Lake Tovel.

Lake Tovel, located in the Adamello-Brenta Natural Park, is a mountain lake (1178 m a.s.l.), known as the "red lake", because until 1964, in the summer period, the phenomenon of reddening occurred, due to a dinoflagellate alga. The lake, characterized by strong variations in level, has proved to be a particularly suitable ecosystem for studying the distribution along a vertical gradient of epilithic diatoms. The period that involved this research goes from October 2001 to October 2002, with seasonal sampling. On average, for each sampling, 10 stations from 0.5 to 24 m were sampled with the help of divers. The peculiarity of this research is the approach adopted for the counts carried out under an inverted microscope to distinguish viable cells from dead and empty frustules based on the characteristics of the cytoplasm. Among the ecological factors correlated with the depth, the photosynthetically active radiation, the probability of desiccation, the conductivity and the concentration of silica were the main variables that determine the vertical gradient, along which there is a characteristic distribution of the identified taxa. This made it possible to identify three zones: a superficial zone deeply influenced by level variations, a stable intermediate zone and a deep zone where the light becomes limiting.

Redazione: Valeria Lencioni e Marco Avanzini

pdf: *https://www.muse.it/it/Editoria-Muse/Studi-Trentini-Scienze-Naturali/Pagine/STSN/STSN_100_2022.aspx*

Angeli N., Scola S., Cantonati M., Spitale D., Tardio M., 2022 – Popolamenti vitali di diatomee epilitiche nel Lago di Tovel e loro distribuzione lungo un gradiente di profondità. Studi Trentini di Scienze Naturali, 100: 53-72.

Premessa

Gino Tomasi, nell'ambito dei suoi multidisciplinari interessi scientifici, si occupò come limnologo degli aspetti geografici di numerosi laghi del Trentino. Questi studi furono coronati dalla redazione del volume i "Laghi del Trentino" (1963) e, poco più di quarant'anni dopo, dell'edizione aggiornata del volume con il nuovo titolo "I trecento laghi del Trentino" (Tomasi, 2004).

Uno dei laghi a lui più cari fu senz'altro il lago di Tovel. Tomasi, in qualità di Direttore dell'allora Museo Tridentino di Scienze Naturali, ne promosse le peculiarità attraverso diverse pubblicazioni scientifiche-divulgative (Tomasi 1975, 1982, 1989a, 1989b) e si occupò attivamente per la sua conservazione e tutela ambientale (Tomasi 1961-1989; 2004; 1968-1972).

A lui si deve la trasmissione entusiasta delle conoscenze ai colleghi più giovani del museo e la promozione delle ricerche in campo limnologico che crearono anche le premesse per l'istituzione della Sezione di Limnologia e Algologia nel 2000 con la nuova Direzione.

Questo articolo scientifico vuole rendergli omaggio riproponendo in maniera dettagliata i contenuti di una tesi di laurea (Scola 2003) sul lago di Tovel durante il periodo in cui fu Direttore emerito del museo, nella sede di via Calepina 14, a lui tanto cara. Alcuni degli argomenti del presente articolo sono stati sviluppati in precedenti pubblicazioni specialistiche (Cantonati et al., 2009. , 2014).

Introduzione

Lo studio della distribuzione delle diatomee bentoniche lungo gradienti di profondità nei laghi è un argomento poco sviluppato e le ricerche più rilevanti riguardano i grandi laghi del Nord-America. Nel Lago Michigan, Kingston et al. (1983) hanno rilevato marcate differenze stagionali sia verticali che orizzontali nelle popolazioni di diatomee bentoniche analizzate; inoltre, nella parte centrale e profonda del transetto analizzato, che presenta condizioni ambientali più stabili, la diversità aumenta ed è presente il più alto numero di taxa rari. Stevenson & Stoermer (1981), indagando le comunità algali bentoniche del lago Michigan, riportano che la differenza nella composizione di specie con la profondità dipende probabilmente dal disturbo provocato dalle onde, dalla qualità e quantità della luce che penetra alle varie profondità, dai tassi di sedimentazione e dalle condizioni chimiche rilevate a diverse quote batimetriche.

Maggior interesse sulla distribuzione verticale delle diatomee si è avuto nelle indagini paleoclimatiche (per esempio Lotter, 1988), necessariamente concentrate sulle osservazioni dei sedimenti superficiali.

I primi studi sulle diatomee di Tovel risalgono all'inizio del XX secolo. Vittorio Largaiolli raccolse delle pietre sommerse lungo le rive e, con l'ausilio di una rete limnetica, del limo dal fondo del lago (30 m) trovando ben 54 specie di diatomee (Largaiolli, 1905, 1906). Successivamente Dell'Uomo & Pedrotti (1982) raccogliendo pietre da riva e Dell'Uomo & Masi (1988) prelevando campioni di benthos aggiunsero rispettivamente 36 e 51 specie di diatomee, arrivando a un totale di 134 specie di diatomee conosciute per il lago di Tovel. Queste ricerche hanno riguardato campioni prelevati principalmente da riva fino ad una profondità massima di 80-100 cm, limitando le conoscenze sulla biodiversità bentonica alle zone più superficiali del lago. I ricercatori del Museo Tridentino Scienze Naturali dall'autunno 1999 all'autunno 2001 effettuarono dei prelievi stagionali di diatomee da sassi e sedimento superficiale a varie profondità, dalle rive fino a 24 m, rinvenendo ben 82 nuovi taxa (Cantonati et al., 2002).

Lo scopo di questo lavoro è definire la distribuzione dei popolamenti di diatomee epilitiche lungo un gradiente di profondità di un lago di montagna, cercando di discernere gli organismi vitali da quelli morti, e approfondendo le conoscenze sulle variabili ambientali che influenzano la distribuzione di queste alghe lungo il gradiente di profondità. Parallelamente alle analisi relative alla struttura delle comunità di diatomee epilitiche basate su conteggi quantitativi di densità e biovolume, i campioni raccolti sono stati analizzati per quanto riguarda i pigmenti algali (clorofilla a, fucoxantina e scitonemina), il peso secco, il contenuto di sostanza organica e i carbonati.

Ambiente di studio

Il Lago di Tovel, situato all'interno del Parco Naturale Adamello-Brenta nel Gruppo delle Dolomiti del Brenta, si trova a 1178 m s.l.m (Fig. 1). Viene ricordato come "lago rosso" a causa del famoso fenomeno estivo, che avveniva fino al 1964, dell'arrossamento delle sue acque, dovuto ad un'alga dinoflagellata allora denominata *Glenodinium sanguineum* Marchesoni.

La cuvetta lacustre è suddivisa in due bacini di diversa profondità. Il bacino principale (N-E) ha una profondità massima di 38,5 m mentre il bacino minore (S-O), denominato "Baia rossa" per il fenomeno dell'arrossamento, presenta una profondità modesta (circa 6 m).

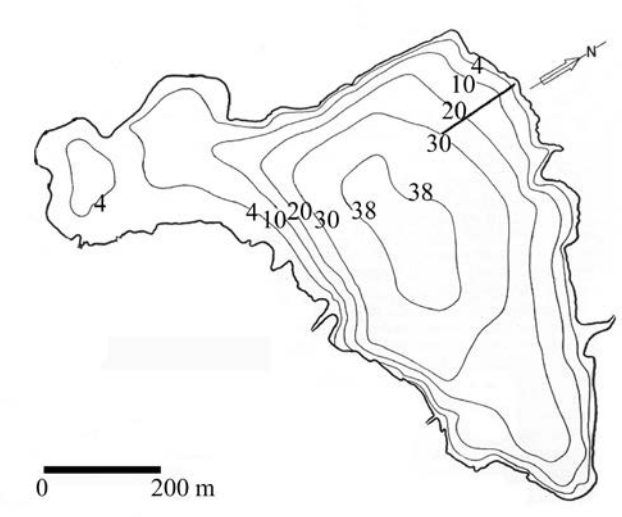


Fig. 1 *- Il lago di Tovel e il transetto di campionamento delle diatomee epilitiche a diverse profondità (modificato da Cantonati et al., 2009).*

Il lago è di tipo temperato, meromittico con mixolimnio dimittico, con isotermia primaverile e autunnale (Baldi, 1941) ed è dicotermico (la temperatura minima non viene registrata alla massima profondità ma tra i 20 e 32 m; Paganelli *et al*., 1988). È un lago oligotrofico e mostra un gradiente di profondità per vari parametri fisici e chimici; la distribuzione dei nutrienti nella zona eufotica è omogenea. Inoltre, il lago è soggetto a marcate variazioni di livello annuali, circa 4-5 m (Corradini et al. 2001).

Nella tabella 1 vengono riportati i dati morfometrici del lago di Tovel (Paganelli *et al.*, 1981).

Tab. 1 *- Caratteristiche morfometriche del Lago di Tovel.*

Area	382.450,00 m^2
Volume	7.367.610,00 m^3
Profondità max	38,50 m
Profondità min	19,26 m
Lunghezza max	1.123,00 m
Larghezza max	547 m
Larghezza media	341 m
Linea di costa	3.480,00 m
Indice di sinuosità	1,59
Sviluppo del volume	1,50

Metodi

Campionamento

I campionamenti stagionali, compiuti da ottobre 2001 a ottobre 2002 dal Nucleo Sommozzatori dei Vigili del Fuoco di Trento, sono stati preceduti da un'indagine preliminare per individuare una zona adatta a prelevare substrati litici colonizzati da diatomee epilitiche. Il transetto è stato contrassegnato con una corda fissa, ancorata al fondo del lago. Alle varie profondità di campionamento sono state posizionate delle targhette fissate alla corda e delle boe, in modo da poter campionare la stessa stazione nelle varie stagioni indipendentemente dalle marcate variazioni di livello del lago.

Per ogni profondità di campionamento (0,5-2-4-6-9-12-15-18-21-24-27-30 m) sono stati raccolti alcuni ciottoli o piccoli massi che a riva venivano spazzolati per campionare le diatomee. In mancanza di sassi venivano prelevati pezzi di rami o pigne.

Ad ogni profondità sono stati prelevati diversi campioni per poter effettuare le analisi. Inizialmente sono state svolte analisi qualitative e quantitative del periphyton; successivamente sono state introdotte analisi di alcuni pigmenti (clorofilla *a*, feofitina *a* e fucoxantina). Per il campione quantitativo sono stati spazzolati 3 quadrati di lato 3 cm su sassi diversi, quando possibile, e una parte di questo campione è stata utilizzata per la determinazione del peso secco (24 ore a 105 °C; Westlake, 1971), della sostanza organica e dei carbonati (LOI – *loss onignition*; 4 ore a 550 °C; Boyle, 2001). Per l'analisi dei pigmenti sono stati spazzolati 3 quadrati per la clorofilla a, feofitina a e 1 per la fucoxantina. Il materiale per l'analisi qualitativa veniva prelevato spazzolando una frazione di microphytobenthos da ciascun sasso.

Parametri fisici

Durante ogni campionamento venivano effettuate misurazione della trasparenza mediante il Disco di Secchi e dei profili di estinzione della luce lungo tutta la colonna d'acqua nel punto più profondo del lago utilizzando un quantum *sensor* LI - COR (LI - 1400).

La variazione di livello del lago è stata monitorata in continuo, dal 19 dicembre 2001, dopo aver posizionato alla base della boa del punto di campionamento relativo ai 18 m un misuratore di pressione (piezometro).

Durante il primo campionamento invernale (15 gennaio 2002) si è potuto constatare che lo strato di ghiaccio che ricopriva la cuvetta lacustre si presentava trasparente, in quanto privo di copertura nevosa, tanto da non alterare quasi la capacità di penetrazione della luce in profondità. Secondo Margalef (1983), uno spessore di 40 cm di ghiaccio puro lascia passare dal 50 al 75 della luce incidente; se il ghiaccio è coperto da 5 - 20 cm di neve o se è ghiacciato in modo molto irregolare, non passa più del 5 - 20% della luce. Inoltre, la misura della trasmittanza della P.A.R. (radiazione fotosinteticamente attiva) attraverso il ghiaccio vitreo indica che una significativa quantità di radiazione penetra nella colonna d'acqua in assenza di neve sulla copertura ghiacciata, anche quando lo strato di ghiaccio è spesso (Bolsenga *et al*., 1996). A causa di questa situazione ritenuta non corrispondente a una tipica situazione invernale si è ritenuto opportuno ripetere il campionamento dopo qualche precipitazione nevosa (20 marzo 2002).

Parametri chimici

I prelievi d'acqua e le analisi chimiche e fisiche sono stati effettuati dall'Unità Operativa "Chimica e Biologia Ambientale e Acquacoltura", allora Istituto Agrario di San Michele all'Adige (IASMA), ora Fondazione Edmund Mach, secondo i metodi I.R.S.A. - C.N.R. (1994), tramite bottiglia Ruttner da 2 litri alle profondità di metri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e a circa mezzo metro dal fondo. Nel caso in cui da parte di IASMA fosse prevista la rilevazione dei parametri fisici e chimici sulla colonna d'acqua nella stessa giornata o in date immediatamente precedenti o successive a quelle previste per i presenti campionamenti, sono stati utilizzati questi dati fisici e chimici. Nel caso in cui IASMA non effettuasse prelievi contestualmente ai campionamenti, si è provveduto direttamente a rilevare i parametri con una sonda multiparametrica "HYDROLAB H20" e a prelevare i campioni d'acqua, per le analisi idrochimiche lungo la colonna d'acqua alle profondità di 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 metri.

Analisi dei pigmenti

Per l'analisi dei pigmenti clorofilliani il materiale spazzolato dai sassi veniva filtrato sul posto attraverso filtri in fibra di vetro (Whatman GF/C). I filtri venivano conservati al buio e in freezer fino al momento dell'estrazione con acetone al 90%. Successivamente venivano eseguite le analisi per determinare la concentrazione della clorofilla a secondo il metodo spettrofotometrico di Lorenzen (1967). Per la determinazione della feofitina a, prodotto di degradazione della clorofilla *a*, è stato aggiunto acido cloridrico alla concentrazione finale di $3\ 10^{-3}$ M.

Le analisi della fucoxantina sono state effettuate dal Laboratorio di Chimica Bioorganica del Dipartimento di Fisica dell'Università di Trento mediante estrazione con etanolo, spettro UV e spettrometria di massa HPLC/PDAD-MS secondo la metodologia di Frassanito et al. (2005).

Peso secco, sostanza organica e carbonati determinati per perdita di peso in muffola (L.O.I.)

Questo tipo di analisi è stata effettuata su subcampioni prelevati dal materiale campionato per le analisi quantitative.

Da ogni campione quantitativo, dopo essere stato posto su un agitatore magnetico, è stato prelevato un subcampione. La parte di campione utilizzata per la determinazione del peso secco è stata messa in cilindri graduati e portata a volume (100 ml) con acqua di rubinetto e lasciata sedimentare per 7 giorni sotto cappa in quanto contenente formaldeide al 4% come fissativo. Il materiale sedimentato è stato successivamente trasferito in crogioli e lasciato per 24 ore a 105 °C in una stufa a ventilazione forzata (Binder Mod. FD 53) per ottenere il peso secco del campione (Westlake, 1971). Successivamente i crogioli sono stati messi per 4 ore a 550 °C in un forno a muffola (Gefran 1001 Mod. ZB) per ottenere il peso della materia organica. Per ottenere il peso dei carbonati i campioni sono stati lasciati in muffola per 2 ore a 1000 °C (Boyle, 2001). I campioni, dopo ogni trattamento, venivano lasciati raffreddare nell'essiccatore prima di essere pesati.

Misura del rendimento quantico fotosintetico

La valutazione dell'efficienza fotosintetica mediante la misura del rendimento quantico fotosintetico (Fv/Fm) per mezzo di un fluorimetro P.A.M. (Pulse Amplitude Modulated Fluorescence) è stata effettuata solo per il campionamento di luglio 2002 grazie alla presenza al Lago di Tovel per il Progetto S.A.L.TO (Studio su mancato Arrossamento del Lago di Tovel) del dott. Francesco Ghetti e della dott. Costanza Bagnoli dell'Istituto di Biofisica del C.N.R. di Pisa.

Analisi qualitative

Nei giorni successivi al campionamento, una piccola aliquota di materiale spazzolato, non fissata in formalina, è stata utilizzata per delle osservazioni al microscopio (Zeiss Axioskop 2 dotato di fotocamera digitale Axiocam e Leitz Laborlux 12) a 1000 ingrandimenti per verificare la presenza d'individui vitali (in base a forma e colore dei cloroplasti e all'aspetto del citoplasma), la motilità delle diatomee e la percentuale di diatomee rispetto alle cianofite. Circa un terzo del rimanente del campione è stato utilizzato per la preparazione dei vetrini permanenti. Il materiale è stato trattato con perossido d'idrogeno al 35% per circa 24 ore a freddo e successivamente portato ad ebollizione per circa 1-2 ore. Successivamente per eliminare l'eventuale sostanza organica rimasta, il campione è stato trattato a caldo con bicromato di potassio e acido cloridrico (37%). Infine, sono stati allestiti i vetrini permanenti fissando il campione preparato con Naphrax®, una resina con elevato indice di rifrazione, e si è proceduto all'osservazione al microscopio ottico Zeiss Axioskop 2 avendo cura di contare almeno 450 valve per vetrino portaoggetti. Per la determinazione delle specie di diatomee ci si è avvalsi delle seguenti chiavi di determinazione: KRAMMER & LANGE-BERTALOT (1986-1991), KRAMMER & LANGE-BERTALOT (2004) e KRAMMER (2000-2003) adattando successivamente la nomenclatura a quella più recente. Il materiale rimasto è stato fissato in formalina al 2-3% circa e conservato in collezione per eventuali successive analisi. I vetrini permanenti sono stati utilizzati per un primo conteggio al microscopio ottico a 1000 ingrandimenti per fare una stima approssimativa dei taxa più abbondanti e l'elenco delle varie specie presenti. Considerata la difficoltà dell'identificazione del materiale vivo

al microscopio invertito si è deciso di utilizzare il microscopio ottico al massimo ingrandimento (1000x) per calcolare il biovolume medio delle varie specie. La presenza delle strutture citoplasmatiche negli organismi vitali non sempre ha reso possibile la visione della struttura e della geometria delle valve.

Per la determinazione degli individui vitali, oltre a poter disporre delle percentuali dei conteggi sui campioni permanenti ci si è avvalsi anche di apposite chiavi di determinazione (Cox, 1996).

Analisi quantitative

I campioni sono stati sottoposti ad alcuni trattamenti (agitazione magnetica e bagno a ultrasuoni - Bandelin Sonorex) e diluizioni in modo da ottenere una densità ottimale e l'assenza di grumi, prima dell'allestimento delle camere di sedimentazione per l'osservazione al microscopio ottico invertito Olympus IX70 a 600 ingrandimenti. Per il conteggio degli individui si è cercato di contare almeno 350-400 individui classificati come "vivi", realizzando in media 4 transetti. Per i campioni in cui la densità era molto bassa (relativa a condizioni ambientali estreme) e per i quali non si raggiungevano i 350-400 individui in 5-6 transetti, sono contati gli individui presenti in ulteriori 4 transetti.

Per riconoscere le diatomee vitali da quelle non vitali sono stati utilizzati dei criteri il più possibile oggettivi. Le diatomee che presentavano i frustoli vuoti o con qualche piccolo grumo raggrinzito di colore marrone spento venivano classificate "morte", mentre quelle al cui interno erano presenti delle strutture citoplasmatiche distese e di colore vivace, giallo dorato-verde, venivano classificate "vive". Questo tipo di suddivisione non poteva tenere conto degli organismi morti da poco viste le poche informazioni bibliografiche disponibili sulla permanenza delle strutture citoplasmatiche nelle diatomee dopo la morte cellulare.

Calcolo della densità totale di individui e del biovolume

Le formule utilizzate per il calcolo dei biovolumi sono quelle proposte da Hillebrand et al. (1999). Il calcolo dei biovolumi medi e del numero di individui per cm^2 è stato effettuato utilizzando i conteggi fatti al microscopio invertito e le misure eseguite al microscopio ottico.

Per il calcolo del biovolume totale sono stati considerati i taxa, in termini di numeri di individui, che erano presenti almeno in un campione con un'abbondanza relativa superiore all'1% in quanto alcune specie rare, presenti anche con un solo individuo in un unico campione, avendo un biovolume notevole potevano alterare in maniera significativa il biovolume totale. Infine, le tecniche di campionamento adottate non fornivano un quadro rappresentativo dei taxa rari e di grandi dimensioni distribuiti in maniera disomogenea sul substrato ponendo un'ulteriore limitazione al calcolo dalle percentuali dei biovolumi.

Analisi statistica

Per ottenere una stima sulla diversità specifica della comunità vitale di diatomee epilitiche sono stati applicati gli indici di diversità e di equi-ripartizione ai dati di densità e biovolume per le varie profondità. La diversità è stata calcolata utilizzando l'indice di Shannon-Wiener (Shannon & Weaver, 1949) mentre l'equi-ripartizione Eveness, (Hill, 1973) è stata derivata da Shannon-Wiener.

Inoltre, sono state eseguite due analisi per correlare i taxa (sia in termini di numero totale di individui sia di biovolumi) e i siti di campionamento con i parametri chimici e fisici. Per l'Analisi Canonica delle Corrispondenze è stato utilizzato il software CANOCO 4.0 (ter Braak & Šmilauer, 1998). Il numero totale di individui e il biovolume è stato espresso in termini di percentuale. Per il numero di individui sono stati eliminati i campioni in cui il numero totale di individui per cm^2 non superava le 10.000 unità, corrispondenti a campioni in cui il totale di individui contati non superava il centinaio di unità. Per il biovolume non sono stati considerati campioni in cui il biovolume totale non superava mai il valore di 0.001 mm^3 cm^{-2}, corrispondenti, anche in questo caso, a circa un centinaio di individui contati. In entrambe le analisi sono stati eliminati i taxa che non superavano un'abbondanza complessiva del 3%. Il numero totale dei campioni presi in esame è 42.

Risultati

Parametri fisici

Durante l'inverno 2002 la cuvetta lacustre è stata ricoperta da ghiaccio per circa 4 mesi (dalla prima metà di dicembre alla fine di aprile). A gennaio il ghiaccio si mostrava vitreo, privo di copertura nevosa e aveva uno spessore di circa 46 cm, mentre a marzo lo spessore del ghiaccio (circa 45 cm) era coperto da circa 3 cm di nevato e tra il nevato e il ghiaccio vitreo era presente un'intercapedine di circa 3 cm costituita da acqua di fusione.

I dati rilevati dal misuratore di pressione collocato nel dicembre 2001 hanno consentito di ricostruire l'andamento delle variazioni del livello idrometrico per il periodo in esame (Fig. 2). Il periodo di massima variazione di livello, - 4,7 m rispetto all'incile, coincide con il secondo campionamento invernale (marzo 2002), dove le stazioni dei 0,5 e 2 m erano esposte all'aria, mentre quella dei 4 m era ricoperta solamente da uno strato di ghiaccio (Tab. 2). Le stazioni interessate dalle variazioni di livello idrometrico sono state quelle più superficiali (0,5-2-4 m), mostrate nella tabella 2.

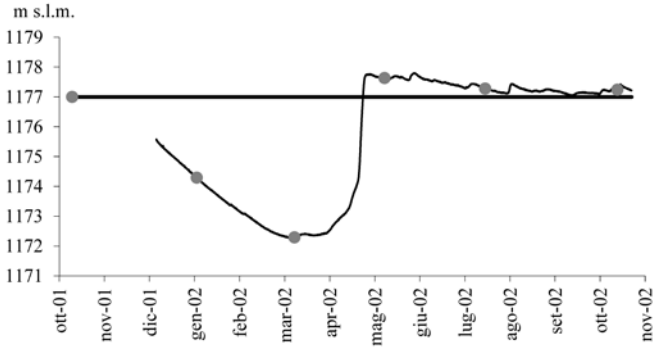


***Fig. 2** - Oscillazioni (linea curva) del livello idrometrico del lago di Tovel nel periodo ottobre 2001 – ottobre 2002. Livello del lago allo sfioro (linea orizzontale). Livello del lago durante i vari campionamenti (simboli) (modificato da Cantonati et al., 2009).*

La trasparenza massima è stata rilevata nell'ottobre 2001 con 14 m, mentre il valore minimo a maggio 2002 con 3 metri. La trasparenza media rilevata durante i sei campionamenti è di 10,9 m.

Le misure di estinzione della luce hanno fornito informazioni importanti per definire il limite della zona eufotica e come questo fosse collegato alla stagionalità (Fig. 3 e 4a). Il limite della zona eufotica (ovvero quella profondità entro la quale gli organismi autotrofi riescono a fotosintetizzare) è risultato più profondo a ottobre 2002, quando l'1% della radiazione solare incidente rispetto alla superficie si è avuta a 27 m di profondità. I campionamenti lacustri hanno cercato di cogliere i periodi in cui la termica del lago fosse quella caratteristica della stagione campionata.

Parametri chimici

Le figure 4a e 4b mettono in risalto le differenze tra i valori massimi e minimi registrati da ottobre 2001 a ottobre 2002. Le stazioni dove sono stati prelevati i campioni hanno profondità comprese tra 0,5 e 24 m, cioè fino al limite inferiore della zona eufotica. Si può notare come, lungo la colonna d'acqua interessata, i valori della maggior parte dei parametri fisico-chimici si mantengono costanti nell'arco dell'anno, con l'eccezione dei primi metri (Fig. 4a-4b).

Pigmenti algali

Le analisi dei pigmenti clorofilliani sono iniziate nel gennaio 2002. La concentrazione media di clorofilla *a* aumenta con la profondità con i picchi massimi a 15 e 21 m mentre la concentrazione di feofitina a diminuisce passando da 6,0 µg cm^{-2} a 0,5 m a 0,5 µg cm^{-2} a 24 m. I valori di feofitina *a* superano quelli di clorofilla *a* nelle stazioni da 0,5 e 6 m durante i due campionamenti invernali; mentre i valori di clorofilla *a* superano di molto quelli della feofitina *a* alle profondità inferiori ai 12 m (Fig. 5) L'analisi della fucoxantina è stata effettuate per

Tab. 2 *- Situazione delle stazioni più superficiali interessate dalle variazioni di livello idrometrico.*

m	ottobre-01	gennaio-02	marzo-02	maggio-02	luglio-02	ottobre-02
0,5	acqua	aria	aria	acqua (25-27 gg)	acqua (3 mesi)	acqua (6 mesi)
2	acqua	ghiaccio (20gg)	aria	acqua (25-27 gg)	acqua (3 mesi)	acqua (6 mesi)
4	acqua	acqua	ghiaccio (30gg)	acqua (25-27 gg)	acqua (3 mesi)	acqua (6 mesi)

i campioni da marzo a ottobre 2002. Dalla figura 6 si può osservare che la concentrazione di questo pigmento, accessorio responsabile della colorazione giallo-bruno delle diatomee aumenta in modo molto evidente con l'aumentare della profondità.

Peso secco, sostanza organica e carbonati determinati per perdita di peso (L.O.I.)

Lungo il gradiente di profondità, il peso secco tende ad aumentare, ad eccezione dei campioni di gennaio e marzo 2002 in cui l'andamento è invertito (Fig 8). I valori massimi di peso secco sono stati riscontrati per i campioni dei 2 m di gennaio e dei 21 e 24 m di ottobre 2002. Questo parametro si mantiene pressoché costante per le stazioni dei 4 e 12 m mentre le variazioni più marcate sono state rilevate per le stazioni dei 2 e 6 m.

L'andamento con la profondità della sostanza organica è simile a quello descritto per il peso secco per i campioni prelevati a ottobre 20021, gennaio, marzo e maggio 2002 (Fig. 8). A ottobre 2001, infatti, i valori si mantengono abbastanza costanti lungo la profondità; a gennaio e a marzo tendono a diminuire con l'aumentare della profondità, mentre a maggio si nota un andamento inverso, con valori sempre maggiori scendendo in profondità. A luglio sono stati rilevati i valori più bassi (< 1.15 mg cm^{-2}) con una media di circa 0.7 mg cm^{-2} di sostanza organica. Le stazioni che, lungo l'arco dei vari campionamenti, hanno mostrato le maggiori differenze in quantità di sostanza organica, eccetto per i campioni in cui il substrato analizzato è il legno, sono quelle dei 0.5, 2, 6 e 18 m. La stazioni dei 4, 12 e 15 m mostrano invece valori pressoché costanti di sostanza organica presente sui sassi campionati. Le stazioni dei 21 e 24 m presentano valori piuttosto bassi e costanti.

I dati relativi ai carbonati comprendono sia il carbonio autogenico che precipita nel lago sia quello derivante dalla roccia carbonatica da cui è stato ricavato il materiale da analizzare. L'andamento dei carbonati, quindi, non rispecchia totalmente l'andamento dei carbonati legati alle vicende biologiche. I campioni che nella stagione invernale erano esposti all'aria (0,5-2-4 m) presentano valori di carbonato maggiori rispetto agli altri periodi di campionamento (Fig. 8). Alla stazione dei 2 m, a marzo, si registra un valore di circa 25 mg cm^{-2}; valori simili generalmente si ritrovano a profondità inferiori (ad esempio, attorno ai 21 e 24 m in ottobre 2002), dove la più alta concentrazione di anidride carbonica lungo il gradiente di profondità tende ad aumentare.

Misura del rendimento quantico fotosintetico

L'analisi sulla misura del rendimento quantico fotosintetico mette in evidenza che l'efficienza fotosintetica aumenta in modo pronunciato con l'aumentare della profondità (Fig. 7).

Distribuzione lungo un gradiente di profondità delle diatomee epilitiche vitali

In questo studio, oltre a contare gli individui presenti in ogni campione si è cercato di separare gli organismi vivi da quelli morti subito dopo il campionamento (Fig. 9a, 9b). Questo ha permesso di mostrare come nelle varie stagioni il rapporto tra il numero diatomee vive e morte sia molto variabile: da 0,51 nel mese di marzo a 1,26 di ottobre 2002.

Le figure 10.1-10.6 mostrano l'andamento con la profondità dei principali taxa diatomici bentonici, la loro stagionalità da ottobre 2001 a ottobre 2002 e il rapporto tra la frazione di individui vivi e quelli morti.

I taxa più abbondanti rinvenuti in questo studio sono: *Achnanthidium minutissimum, Rossithidium pusillum, Adlafia bryophila, Brachysira calcicola, Delicata delicatula, Denticula tenuis, Encyonopsis microcephala*. Per brevità di esposizione i nomi degli autori dei taxa di diatomee sono riportati all'appendice 1.

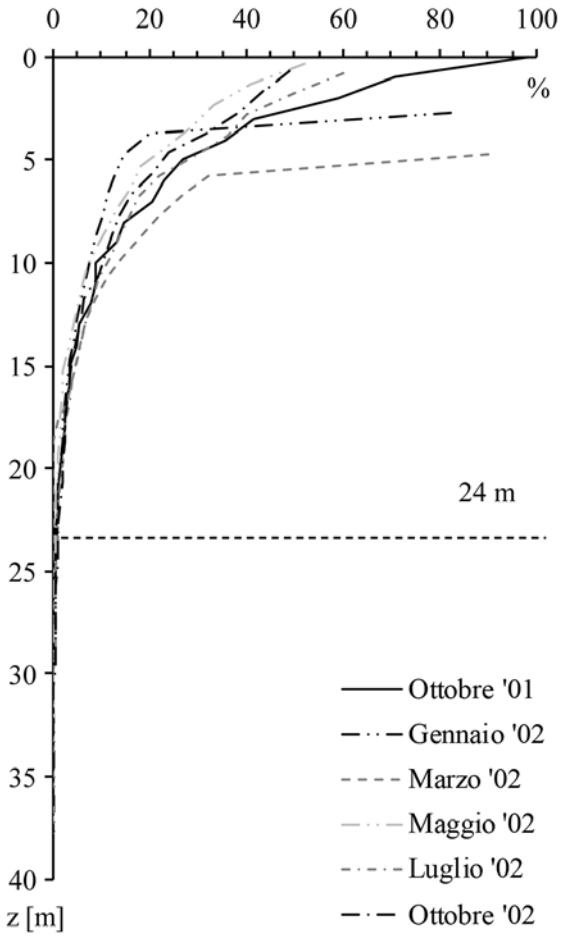


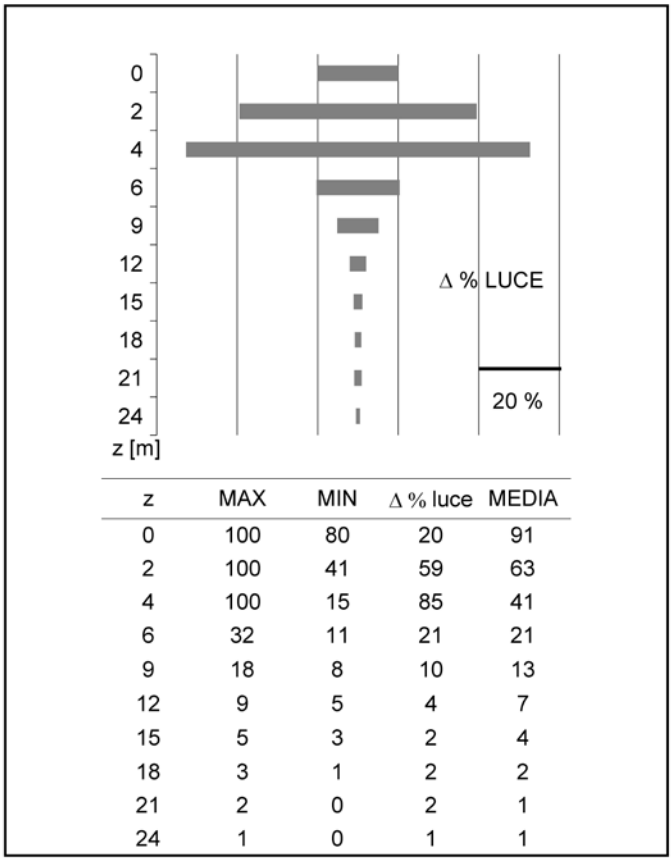
Fig. 3 *- Andamento stagionale della radiazione fotosinteticamente attiva lungo la profondità.*

A. minutissimum è presente con abbondanze relative importanti lungo tutto il gradiente di profondità, con variazioni stagionali marcate nel rapporto tra individui vivi-morti (Fig. 10.1-10.6). Nell'ottobre 2001 fino a 15 metri sono presenti più individui morti rispetto a quelli vivi e a 2, 6 e 12 m la quantità di individui morti è il doppio o il triplo di quelli vivi. A gennaio, ad eccezione dei 18 metri dove la differenza è minima, la frazione di individui vivi è nettamente superiore a quelli morti alle profondità di 4, 9, 12, 18, 21 e 24 m. A marzo la maggior parte degli individui di *A. minutissimum* sono stati trovati non vitali.

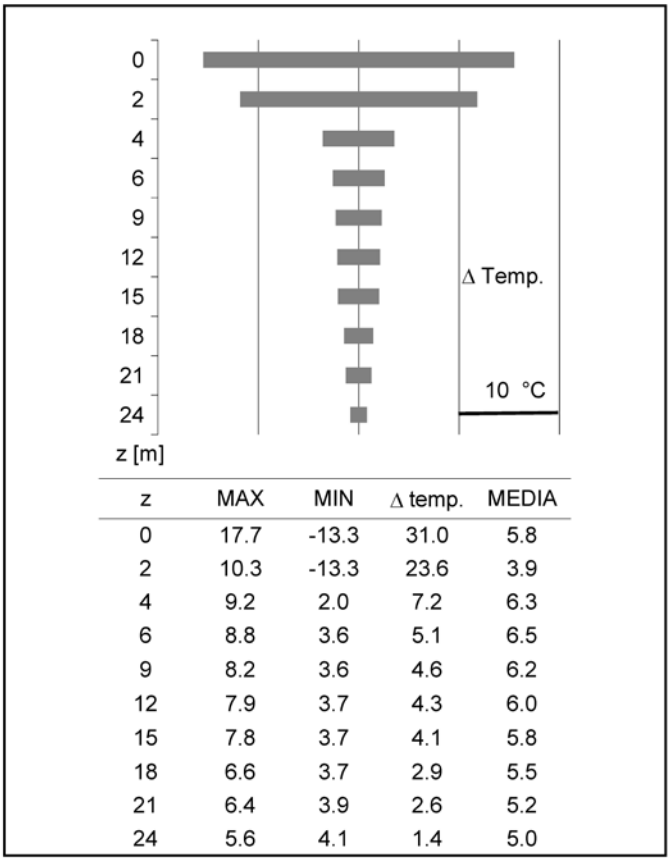
R. pusillum è un taxon che colonizza le zone più profonde con percentuali elevate di organismi vivi (fino a 47,7 % a luglio alla profondità di 15 m). Nella maggior parte dei campioni osservati le popolazioni di questo taxon sono caratterizzate da una dominanza di individui vivi rispetto a quelli morti, soprattutto alle profondità più elevate (Fig. 10.1-10.6).

Le popolazioni *A. bryophila* sono presenti a tutte le profondità e sono quelle più soggette a variazioni stagionali (Fig. 10.1-10.6).

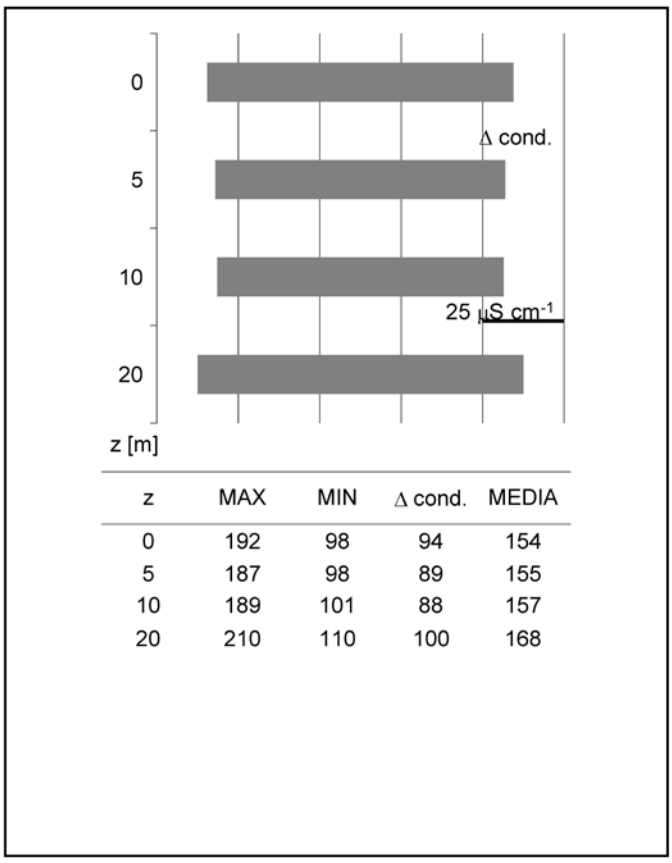
B. calcicola è una specie che colonizza la zona centrale del



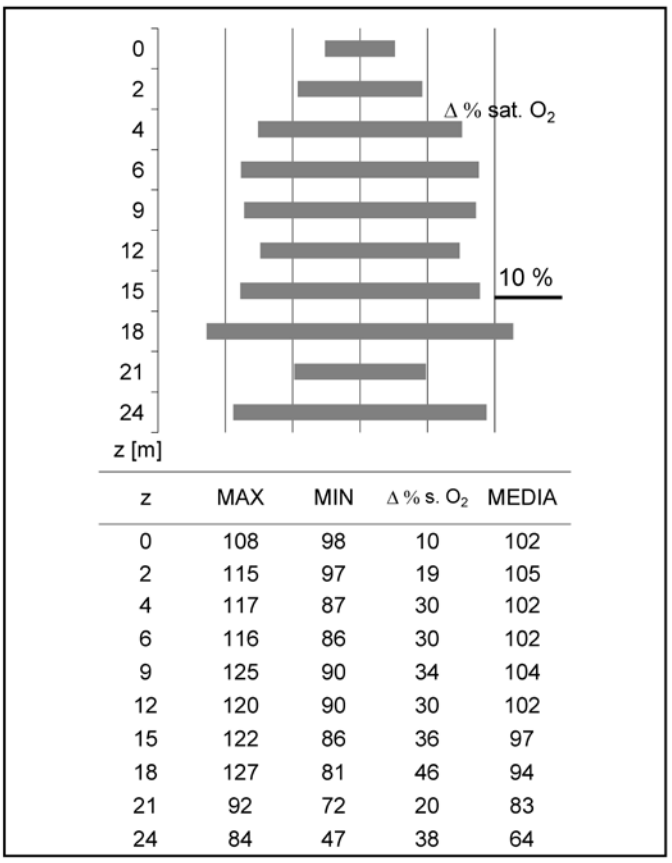
z	MAX	MIN	Δ % luce	MEDIA
0	100	80	20	91
2	100	41	59	63
4	100	15	85	41
6	32	11	21	21
9	18	8	10	13
12	9	5	4	7
15	5	3	2	4
18	3	1	2	2
21	2	0	2	1
24	1	0	1	1



z	MAX	MIN	Δ temp.	MEDIA
0	17.7	-13.3	31.0	5.8
2	10.3	-13.3	23.6	3.9
4	9.2	2.0	7.2	6.3
6	8.8	3.6	5.1	6.5
9	8.2	3.6	4.6	6.2
12	7.9	3.7	4.3	6.0
15	7.8	3.7	4.1	5.8
18	6.6	3.7	2.9	5.5
21	6.4	3.9	2.6	5.2
24	5.6	4.1	1.4	5.0

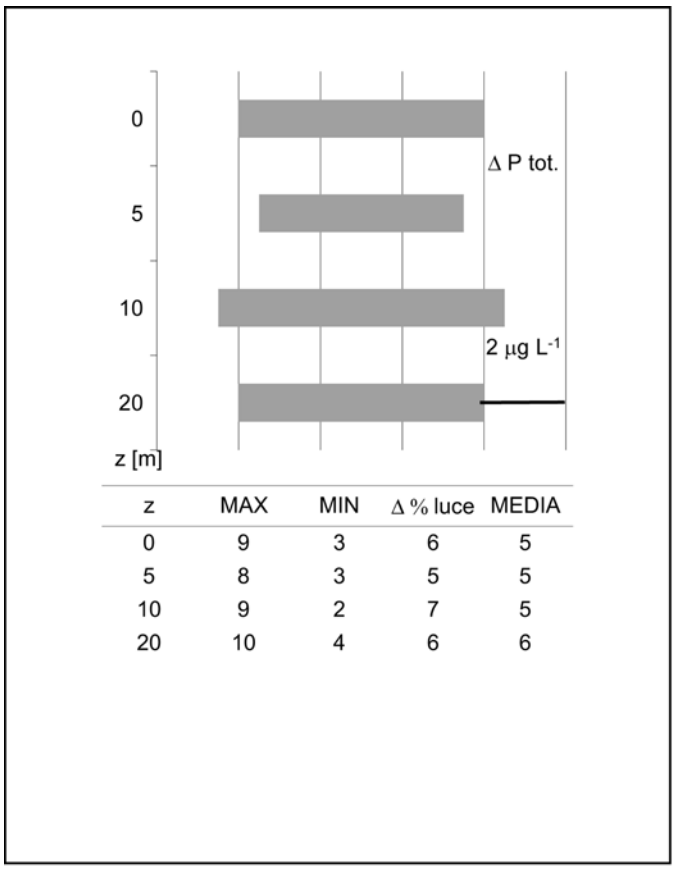


z	MAX	MIN	Δ cond.	MEDIA
0	192	98	94	154
5	187	98	89	155
10	189	101	88	157
20	210	110	100	168

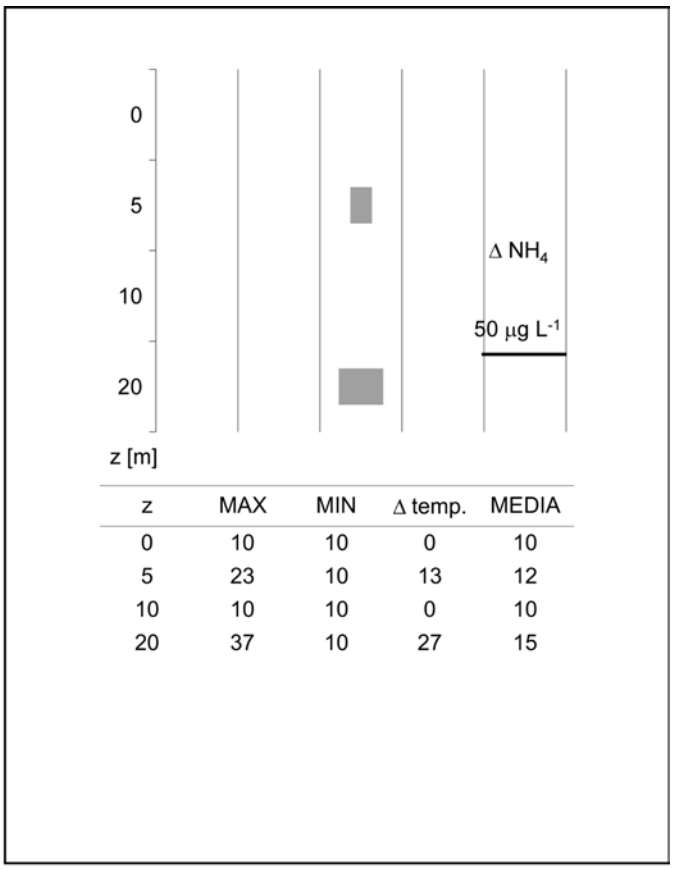


z	MAX	MIN	Δ % s. O_2	MEDIA
0	108	98	10	102
2	115	97	19	105
4	117	87	30	102
6	116	86	30	102
9	125	90	34	104
12	120	90	30	102
15	122	86	36	97
18	127	81	46	94
21	92	72	20	83
24	84	47	38	64

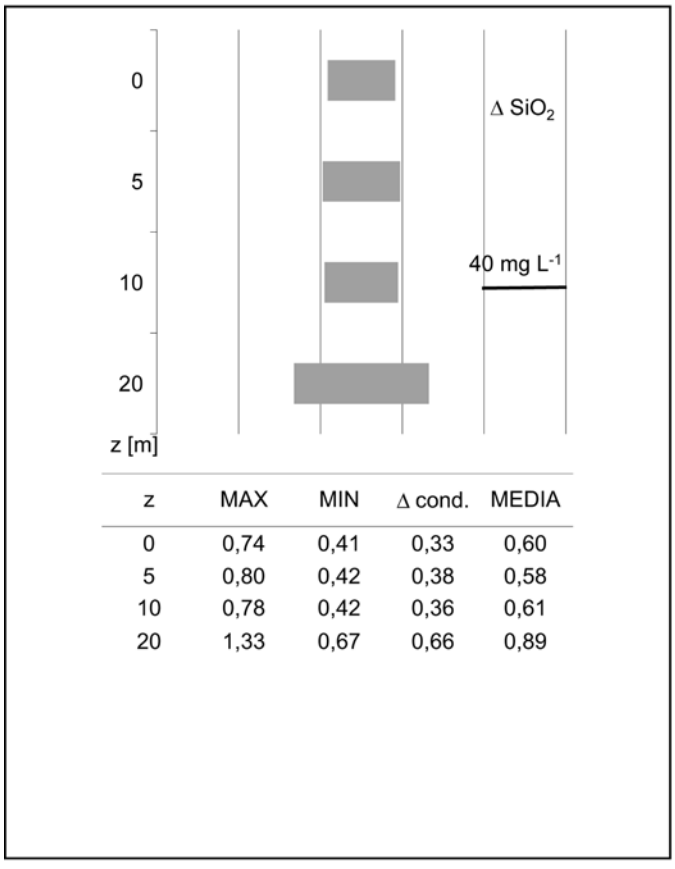
Fig. 4a *- Variazione massima di radiazione fotosinteticamente attiva (P.A.R.), temperatura, conducibilità e % di saturazione dell'ossigeno e relativi valori massimi, minimi e medi (modificato da Cantonati et al., 2009).*



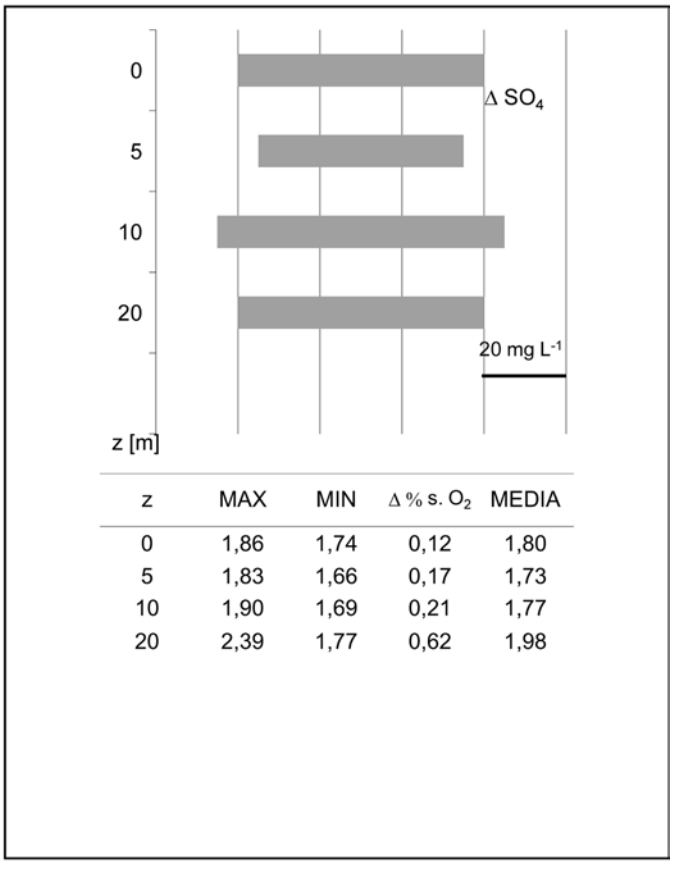
z	MAX	MIN	Δ % luce	MEDIA
0	9	3	6	5
5	8	3	5	5
10	9	2	7	5
20	10	4	6	6



z	MAX	MIN	Δ temp.	MEDIA
0	10	10	0	10
5	23	10	13	12
10	10	10	0	10
20	37	10	27	15



z	MAX	MIN	Δ cond.	MEDIA
0	0,74	0,41	0,33	0,60
5	0,80	0,42	0,38	0,58
10	0,78	0,42	0,36	0,61
20	1,33	0,67	0,66	0,89



z	MAX	MIN	Δ % s. O2	MEDIA
0	1,86	1,74	0,12	1,80
5	1,83	1,66	0,17	1,73
10	1,90	1,69	0,21	1,77
20	2,39	1,77	0,62	1,98

Fig. 4b *- Variazione massima di fosforo totale, azoto nitrico, silice e solfati e relativi valori massimi, minimi e medi (modificato da Cantonati et al., 2009).*

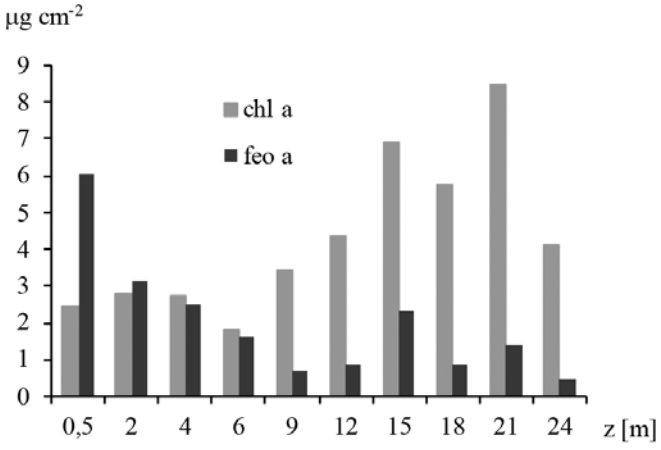


Fig. 5 *- Confronto fra i valori medi di concentrazione di clorofilla e feofitina a delle alghe epilitiche a lungo la profondità (modificato da Cantonati et al., 2009).*

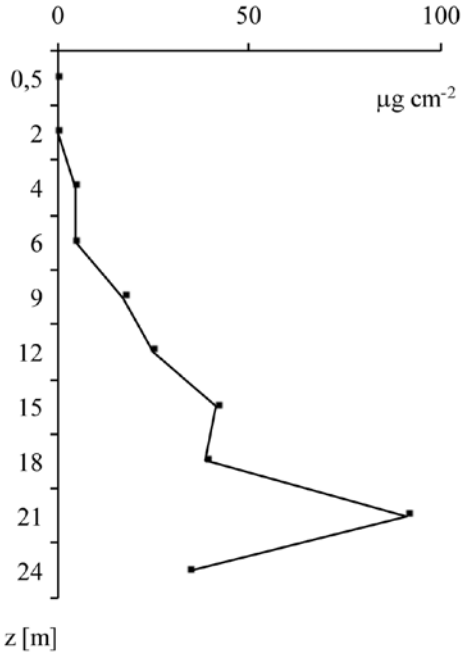


Fig. 6 *- Andamento medio della fucoxantina lungo la profondità.*

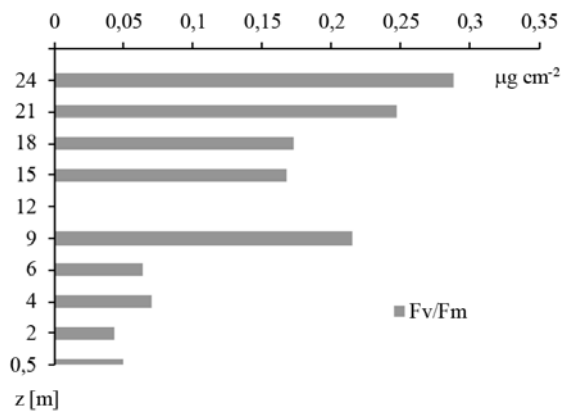


Fig. 7 *- Andamento dell'efficienza fotosintetica lungo la profondità - luglio 2002.*

transetto, dai 4 ai 15 m, con una preferenza per i 9 m. A maggio è uno dei pochi taxa in cui prevalgono gli individui vivi (5,6 %) rispetto a quelli morti (Figg. 10.1-10.6).

Delicata delicatula è presente con individui vivi fino a 15 m di profondità, anche se la maggior parte degli individui è limitata alle zone superficiali (Fig. 10.1-10.6).

Denticula tenuis mostra una notevole variazione sia stagionale sia lungo il gradiente di profondità. Inoltre, solo in alcuni casi, anche se di poco, il numero di individui vivi supera quello dei frustoli vuoti (Fig. 10.1-10.6).

Encyonopsis microcephala colonizza prevalentemente le zone fino ai 15 m, anche se in alcune stagioni si sono notati dei picchi a 18 m (Fig. 10.1-10.6).

La densità media delle diatomee vitali aumenta lungo il gradiente di profondità fino a 15 m (700.997 individui per cm^{-2}), per poi diminuire a profondità maggiori (Fig. 11). La densità massima è stata osservata a maggio alla profondità di 15 m con 1.090.047 individui per cm^{-2} mentre quella minima a maggio a 0,5 m e a luglio a 6 e 18 m con 487 individui per cm^{-2}. La stazione dei 0,5 m presenta le densità totali più basse con valori inferiori a 70.000 individui per cm^{-2}. Il mese di gennaio è quello in cui si sono osservati il maggior numero di individui vitali nelle stazioni più superficiali comprese fra 2 e 9 m (Fig. 11).

Il biovolume medio assume valori minimi (circa 0,005 mm^3 cm^{-2}) a 0,5 m, e raggiunge un massimo di 0,164 mm^3 cm^{-2} a 21 m. Il valore minimo, ad eccezione dei campioni in cui non si sono trovati individui, è stato registrato alla stazione dei 18 m a luglio (0,00006 mm^3 cm^{-2}), mentre il valore massimo (0,6545 mm^3 cm^{-2}) è stato osservato a 21 m a gennaio (Fig. 12). La stazione dei 0,5 m è quella che presenta nelle varie stagioni i valori più bassi, inferiori a 0,016 mm^3 cm^{-2}. L'andamento del numero di individui dei principali taxa lungo il gradiente di profondità nelle diverse stagioni viene rappresentato in appendice 2. Nel complesso risulta evidente che i taxa presenti con le densità più alte sono solitamente quelli caratterizzati da dimensioni ridotte.

Achnanthidium minutissimum e *Encyonopsis microcephala* sono presenti lungo tutto il gradiente con una percentuale relativamente elevata di individui vitali e la loro distribuzione nelle varie stagioni è piuttosto costante. *E. microcephala* è generalmente abbondante nelle zone comprese tra 4 e 6 m, con le eccezioni di luglio (con un massimo dell'8,8 % a 9 m) e di ottobre 2002 (con un massimo del 60,44 % alla profondità di 18 m). Anche *Rossithidium pusillum* è un taxon che presenta le abbondanze più alte al di sotto dei 9 metri. Alla stazione dei 15 m, eccetto ad ottobre 2001, questo taxon è dominante ed è presente con i valori percentuali più elevati (tra il 50,5% di marzo e l'84,0 % di gennaio). *Denticula tenuis* è un taxon presente lungo tutta la colonna d'acqua, ma solo nella parte più superficiale è fra i taxa dominanti. A ottobre 2001, alla stazione dei 0,5 m, questa specie raggiunge il 32,1% della densità totale. *Delicata delicatula* e *Navicula leistikovii* colonizzano prevalentemente le zone superficiali, anche se si possono trovare, in percentuali molto ridotte (inferiori all'1%), oltre i 12 m. *Adlafia bryophila* è presente, sebbene in quantità inferiori rispetto ai taxa precedenti, lungo tutto il gradiente di profondità e la sua abbondanza tende ad aumentare con la profondità. A 24 m, dove il substrato campionato è legno e il numero totale di individui contati è 166, la percentuale di cellule vive di *A. bryophila* raggiunge il 46,4%. *Fragilaria pinnata* e *Fragilaria brevistriata* presentano marcate differenze nell'abbondanza sia rispetto alla profondità che nelle diverse stagioni. *F. pinnata* ad ottobre 2001 supera l'1% solo a 0,5, 15, e 18 m; a gennaio è stata trovata solo alle stazioni dei 2 e 18 m, a marzo supera l'1 % in tutte le stazioni dove è presente (4, 9, 12 e 18 m). A maggio è stata rilevata in tre stazioni, ma solo a 12 m raggiunge appena l'1,57 %. A ottobre 2002 questa specie è stata trovata con le densità più elevate: a 24 m e raggiunge il 14,7%. *F. brevistriata* a ottobre 2001 e gennaio non supera mai il 4% ed è localizzata tra i 2 e i 24 m. A marzo gli individui vitali di questa specie raggiungono il 7,7 % a 2 m, cioè nel campione esposto all'aria. Negli altri tre campionamenti la presenza di questo taxon è rilevante al di sotto dei 12 m, con valori che raggiungono il 32 % a 24 m in ottobre 2002.

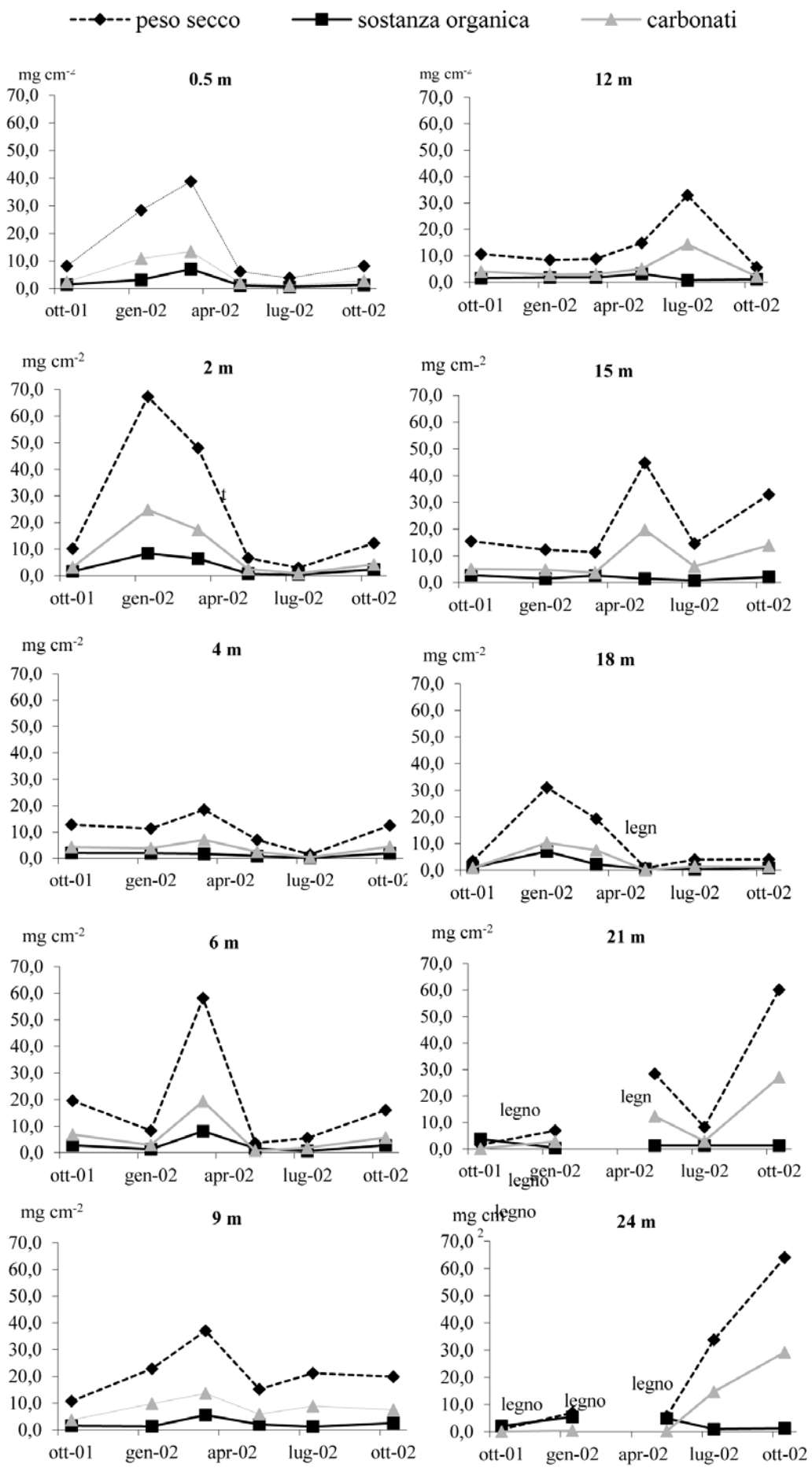


Fig. 8 - Variazioni stagionali alle varie profondità di peso secco, sostanza organica e carbonati.

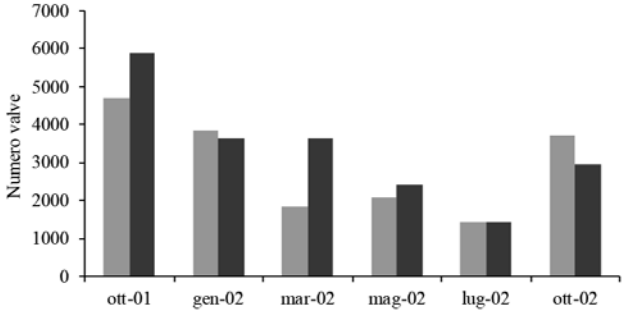


Fig. 9a *- Stagionalità delle diatomee epilitiche viventi (grigio) e morte (nero) – numero di individui.*

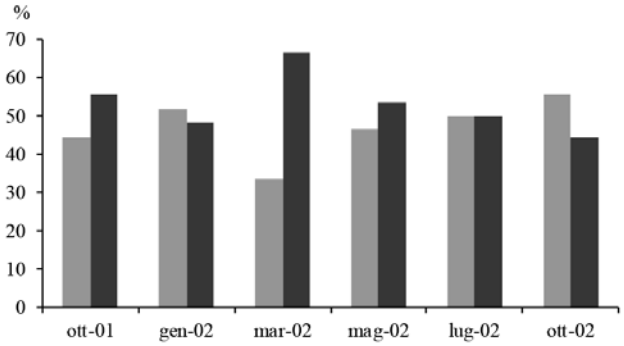


Fig. 9b *- Stagionalità delle diatomee epilitiche viventi (grigio) e morte (nero) – percentuali.*

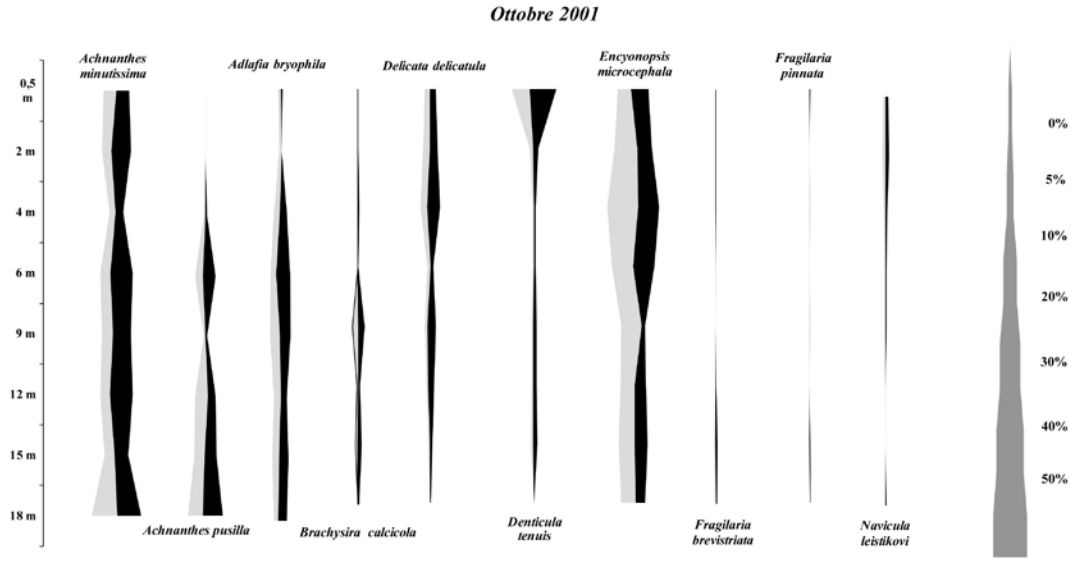


Fig. 10-1 *- Andamento con la profondità dei più importanti taxa diatomici e rapporto percentuale tra individui vivi (grigio) e individui morti (nero) ad ottobre 2001.*

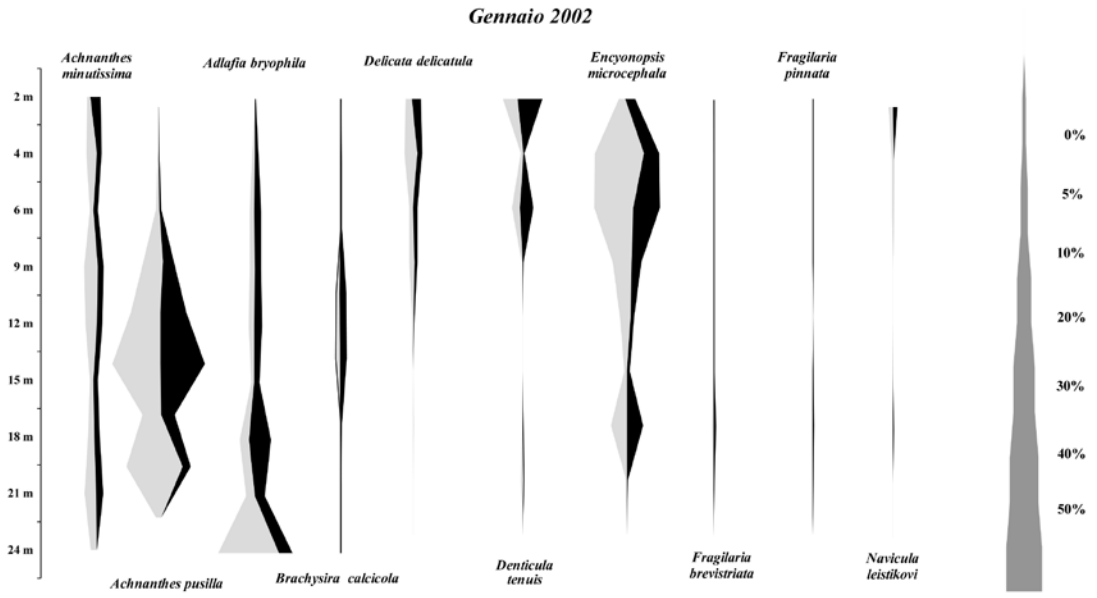


Fig. 10-2 *- Andamento con la profondità dei più importanti taxa diatomici e rapporto percentuale tra individui vivi (grigio) e individui morti (nero) a gennaio 2002.*

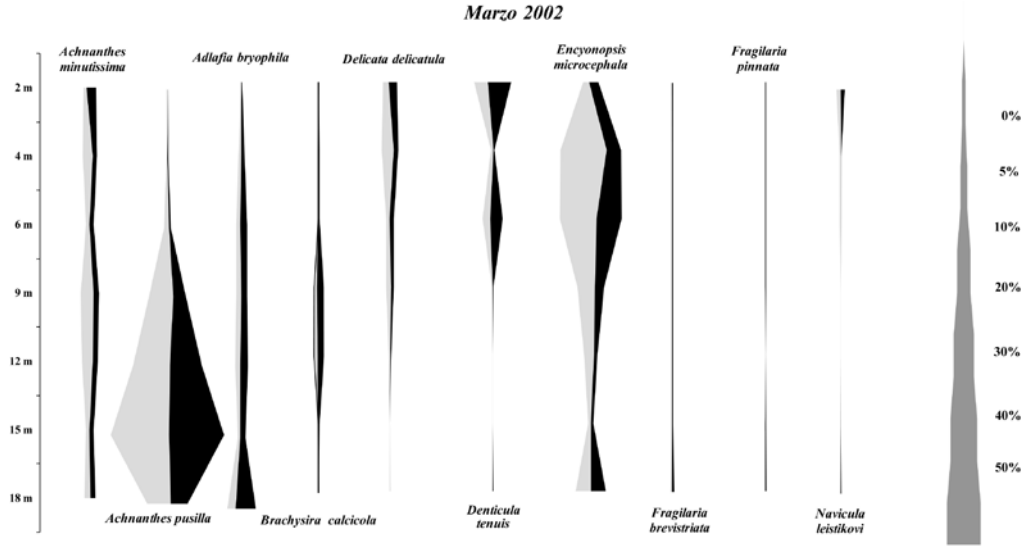


Fig. 10-3 *- Andamento con la profondità dei più importanti taxa diatomici e rapporto percentuale tra individui vivi (grigio) e individui morti (nero) a marzo 2002.*

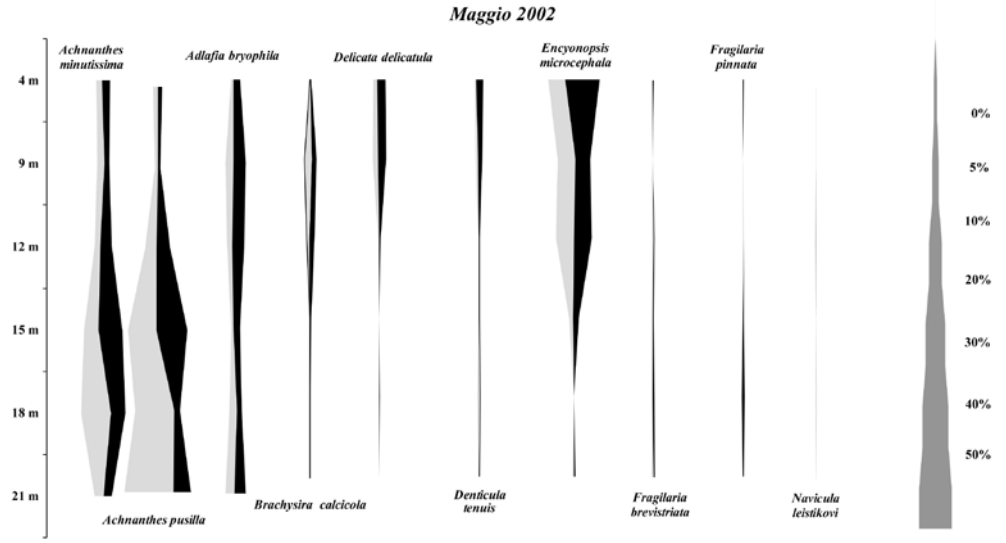


Fig. 10-4 *- Andamento con la profondità dei più importanti taxa diatomici e rapporto percentuale tra individui vivi (grigio) e individui morti (nero) a maggio 2002.*

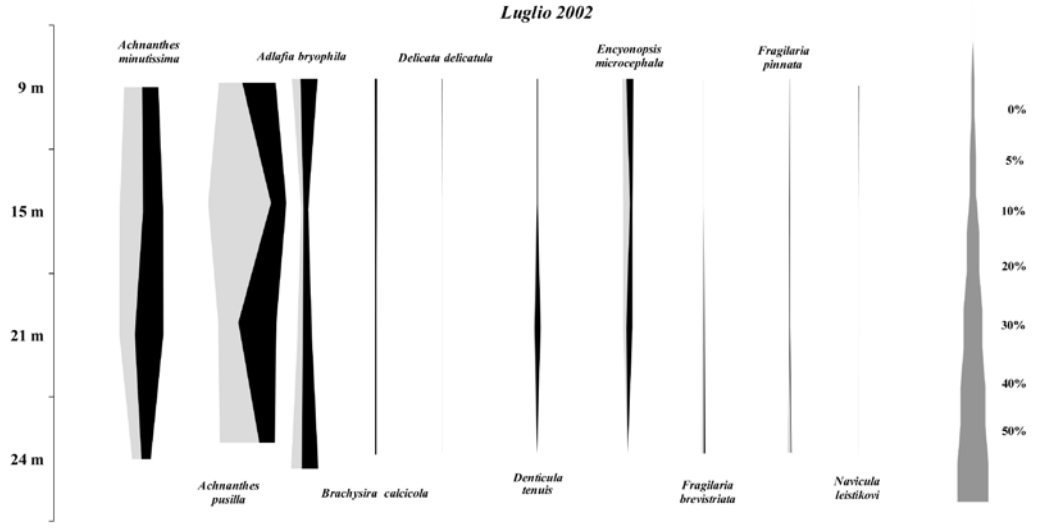


Fig. 10-5 *- Andamento con la profondità dei più importanti taxa diatomici e rapporto percentuale tra individui vivi (grigio) e individui morti (nero) a luglio 2002.*

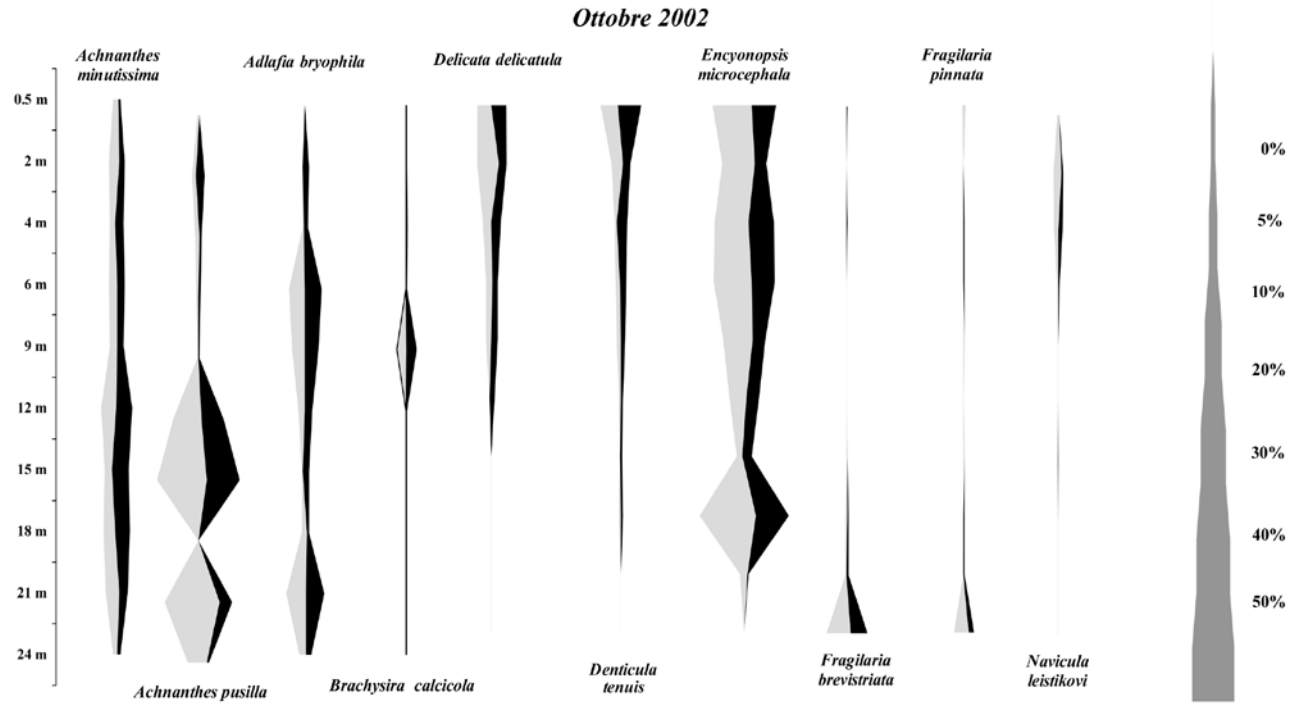


Fig. 10-6 *- Andamento con la profondità dei più importanti taxa diatomici e rapporto percentuale tra individui vivi (grigio) e individui morti (nero) a ottobre 2002.*

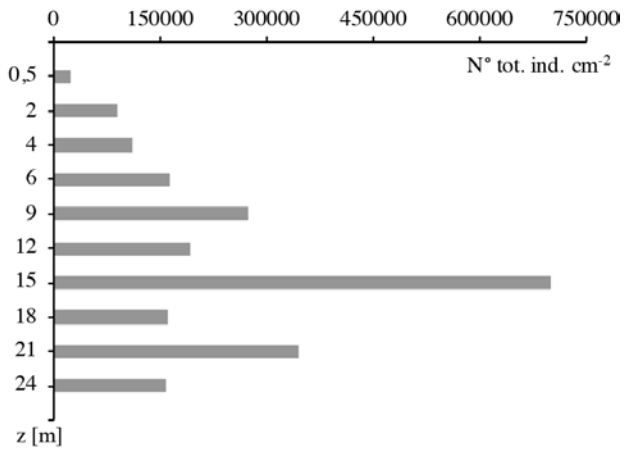


Fig. 11 *- Densità media delle diatomee per unità di superficie (individui cm-2) epilitiche alle varie profondità di campionamento.*

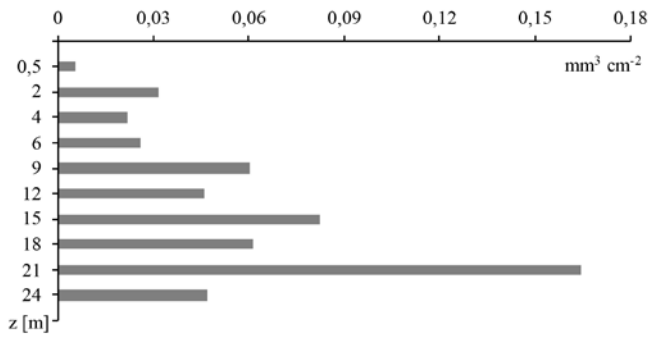


Fig. 12 *- Biovolume medio per unità di superficie (mm3 cm-2) delle diatomee epilitiche alle varie profondità di campionamento.*

Considerando i biovolumi al posto delle densità numeriche la composizione della comunità appare notevolmente diversa, con una generale prevalenza dei taxa di grandi dimensioni rispetto a quelli di piccole dimensioni (appendice 3).

A. minutissimum e *E. microcephala* sono taxa con volumi ridotti, rispettivamente 63 e 98 μm^3. Poiché sono presenti con abbondanze relative molto alte, anche a livello di biovolume risultano essere fra i taxa più importanti, soprattutto fino ai 15 – 18 metri di profondità. *A. minutissimum* è presente lungo tutto il gradiente di profondità e il biovolume massimo, nei campioni in cui il numero di individui contati supera le 100 unità, è stato riscontrato alla stazione dei 15 m a maggio con 21,1 % *E. microcephala*, ad eccezione del mese di maggio in cui la sua presenza è limitata ad alcune profondità, è presente in quasi tutti i campioni. Generalmente alla stazione dei 6 m viene registrato il valore di biovolume più elevato (con un massimo del 33,3 % a gennaio). Gli andamenti della densità e del biovolume di *D. tenuis* e *D. delicatula* sono molto simili: entrambi sono presenti con valori elevati nelle zone superficiali e tendono a diminuire con l'aumentare della profondità. I valori di biovolume più alti per *D. tenuis* sono stati calcolati a 0,5 m a ottobre 2001 con quasi il 60 % e ottobre 2002 con il 40 %; *D. delicatula* non supera mai il 30 %. Anche *R. pusillum* raggiunge in alcune stazioni percentuali consistenti di biovolume totale. A 15 m, dove generalmente domina in termini di biovolume, raggiunge il 76,2 %. Altri taxa che risultano tra le forme dominanti in termini di biovolume, a causa delle loro notevoli dimensioni, sono *Epithemia goeppertiana*, *Eunotia arcubus*, *Encyonema auerswaldii*, *Diploneis krammeri* e *Eucocconeis flexella*. *E. flexella* è generalmente presente solo in poche stazioni, dove non raggiunge mai il 10 %; una notevole eccezione è costituita dal campione a 4 m di ottobre 2002, dove il suo biovolume arriva a circa il 22 %. *E. auerswaldii* è fra i taxa presenti con il biovolume più elevato nella zona superficiale, con valori medi intorno a 1971 μm^3. A ottobre 2001, gennaio e marzo 2002 è dominante alla stazione dei 2 m (biovolume massimo: 43,2 % a marzo); a maggio supera di poco il 18 % solo alla stazione dei 6 m. A luglio non sono stati trovati individui vivi a nessuna delle profondità campionate, mentre a ottobre 2002 questa specie è stata riscontrata dai 2 ai 9 m, con il biovolume massimo relativo (24,6%) a 9 m. *D. krammeri* compare solo in due campioni: a 21 m in gennaio,

con poco più dell'1 %, e a 24 m in ottobre 2002 con il 24,4 %. Nonostante la bassa frequenza con cui è stato trovato, questo taxon costituisce una frazione importante del popolamento in termini di biovolume. Il suo biovolume medio stimato è infatti pari a 3855 µm^3. I taxa che in termini di biovolume dominano le stazioni più profonde sono *E. goeppertiana* e *E. arcubus*. Sono forme di notevoli dimensioni e generalmente sono ritrovate al di sotto dei 9 m. I biovolumi medi stimati sono rispettivamente 14456 e 2823 µm^3. *E. arcubus*, da ottobre 2001 a maggio 2002, si colloca tra i 9 e i 21 m, mentre a luglio e ottobre 2002 la sua presenza è rilevante a 24 m. È da notare che in questa stazione, dove il substrato campionato è legno, non sono mai stati trovati individui di questo taxon. *E. goeppertiana* è il taxon dominante a 18 e 21 m nelle stazioni in cui il substrato campionato non è legno. Arriva a rappresentare fino all'86% del volume degli individui vitali presenti. A marzo si sono trovati individui vitali anche a 4 e 12 m, con biovolumi compresi tra il 15,8 % e il 50,6 %.

Analisi statistica dei popolamenti vitali

L'indice di Shannon (appendice 4) calcolato per la densità media alle varie profondità mostra due valori massimi, nella zona superficiale (0,5-6 m) e nella zona intermedia (9-18 m), mentre nella zona profonda (21-24 m) si nota una diminuzione dei valori. I valori massimi di diversità (superiori a 3 unità) si hanno alla profondità di 2- 9-12 e 15 m a ottobre 2001, gennaio, marzo, maggio e ottobre 2002. La diversità delle diatomee si mantiene costante lungo l'arco di tempo studiato per le stazioni dei 4, 6, 9, 12 e 18 m.

Anche l'andamento medio della diversità riferita al biovolume medio (Appendice 4) presenta un massimo nella zona superficiale e nella zona intermedia ed è molto simile a quello della diversità totale di individui e con valori medi maggiori nella zona centrale del transetto.

Il valore medio dell'equiripartizione (appendice 5), riferito alla densità di individui vitali, tende a diminuire dalla superficie fino a 15 m per poi aumentare leggermente alle profondità più elevate. Le stazioni dei 4, 9, 12 e 18 m mostrano la variazione minima dei valori di equiripartizione nell'arco dei vari campionamenti. I valori massimi si hanno nelle stazioni più superficiali a marzo e luglio mentre i valori più bassi (inferiori a 0,50 unità) sono registrati alla stazione dei 15 m a gennaio e 21 m a ottobre 2001.

L'andamento dell'equiripartizione per i biovolumi medi per unità di superficie (appendice 5) aumenta fino a 15 m (0,80 unità) per poi diminuire scendendo in profondità. Nel periodo dei vari campionamenti l'indice si mantiene costante per le stazioni dei 2, 4, 9 e 12 m mentre aumenta per le stazioni dei 6, 15 e 21 m.

L'Analisi Canonica delle Corrispondenze ha messo in risalto le correlazioni fra i parametri ambientali e le stazioni e i taxa. Nella CCA relativa alla percentuale di individui vitali (appendici 6-7), l'asse principale è altamente correlato con la profondità (-0,90); gli altri parametri correlati sono radiazione fotosinteticamente attiva (0,70), probabilità di andare a secco (0,61), silice (0,58) e conducibilità (0,58). L'unica variabile correlata con l'asse 2 è la temperatura (-0,41), ma con valori al limite della significatività statistica.

Dall'analisi dei diagrammi è possibile identificare 3 zone:

- zona superficiale: caratterizzata dai taxa che colonizzano le zone comprese fra 0,5 e 6 m (appendice 6, gruppo quadrante destro superiore). In questa zona sono presenti soprattutto *Delicata delicatula, Encyonema minutum, Navicula leistikovii, Denticula tenuis, Navicula cryptotenella, Encyonema auerswaldii*;
- zona intermedia: compresa fra 9 e 18 m (quadrante sinistro e destro inferiore, appendice 6), contraddistinto da *Brachysira calcicola, Achnanthes trinodis, Gomphocymbellopsis ancyli, Brachysira styriaca*;
- zona profonda: compresa fra 21 e 24 m (quadrante sinistro superiore, appendice 6) con i taxa *Fragilaria pinnata, Eunotia arcbuus, Fragilaria brevistriata, Epithemia goeppertiana e Amphora pediculus*.

Dall'analisi della CCA per i biovolumi (appendici 8-9) sono emerse le stesse tre zone correlate con l'asse della profondità dell'analisi relativa alla percentuale degli individui vitali. I taxa che colonizzano le varie zone cambiano leggermente, in quanto alcune specie poco abbondanti, ma di notevoli dimensioni, risultano prevalenti rispetto a taxa di dimensioni ridotte. Anche nella CCA per i biovolumi l'asse 1 è fortemente correlato con la profondità (0,92). I parametri correlati positivamente alla profondità sono la conducibilità (0,57) e la silice (0,53), mentre quelli correlati negativamente sono la radiazione fotosinteticamente attiva (0,64) e la probabilità di andare a secco (-0,55). A differenza della CCA con numero di individui, quella con i biovolumi non include la temperatura come variabile ambientale significativa. Va tuttavia sottolineato che l'importanza di questo gradiente, apprezzabile dalla lunghezza del vettore mostrato nel biplot della CCA, era limitata, quindi è possibile che nel corso del processo di selezione delle variabili significative (routine per forward selection) sia stata omessa causa piccole differenze. I vari taxa che colonizzano le tre zone sono:

- zona superficiale (0.5-6 m): *Encyonema minutum, Navicula leistikovii, Denticula tenuis, Cymbella affinis, Nitzschia* sp., *Navicula cryptotenella*;
- zona intermedia (9–18 m): *Brachysira calcicola, Achnanthes trinodis, Cymbella hustedtii, G. ancylii, Cymbopleura inaequalis, Diploneis oblongella, Adlafia bryophila, Brachysira styriaca*;
- zona profonda (21–24 m): *Fragilaria pinnata, Eunotia arcubus, Fragilaria brevistriata, Epithemia goeppertiana, Diploneis krammeri* e *Amphora pediculus*.

Dall'analisi dei grafici della CCA si osserva che alcuni taxa sono distribuiti in due zone (per esempio *E. microcephala* nella zona superficiale e in quella intermedia e *R. pusillum* nella zona intermedia e nella zona profonda) e compaiono quindi in una posizione intermedia nel diagramma di ordinazione. *A. minutissimum* è un taxon presente lungo tutto il transetto campionato, come è confermato dalla sua collocazione prossima al centro del diagramma di ordinazione.

Discussione e conclusioni

L'analisi delle caratteristiche limnologiche del lago di Tovel ha evidenziato come esso sia un ecosistema particolarmente adatto per lo studio della distribuzione lungo un gradiente di profondità di popolamenti vitali di diatomee epilitiche. La trasparenza dell'acqua e le forti oscillazioni di livello rendono il lago un laboratorio naturale dove poter studiare gli adattamenti di questi microorganismi. L'approccio di studio adottato ovvero l'analisi degli individui vitali ha messo in evidenza la peculiare distribuzione dei taxa lungo la profondità. La distribuzione dei vari taxa è simile, nelle sue linee generali, all'andamento descritto nelle ricerche pregresse (Cantonati *et al.* 2002).

Il gradiente di profondità si può suddividere in tre zone caratterizzate da precise condizioni ambientali e specifici taxa o associazioni di taxa che le colonizzano (Cantonati *et al.* 2009). La zona superficiale, 0,5-6 m è caratterizzata da marcate fluttuazioni del livello idrometrico del lago e da forti escursioni termiche nell'arco dell'anno. Questa zona è dominata da taxa in grado di attuare strategie per sopravvivere durante i periodi di disseccamento, come *Encyonema auerswaldii* (che vive all'interno di tubi mucillagginosi), *Denticula tenuis*, *Navicula leistikovii*, *Delicata delicatula*. Inoltre, la zona tra 0,5 a 4 m, cioè quella che durante il periodo invernale è rimasta esposta per la variazione di livello idrometrico, in primavera e in estate ha mostrato una bassissima densità sia di organismi vivi che di frustoli vuoti. La zona intermedia, non interessata dalle variazioni di livello e contraddistinta da un'adeguata quantità di luce e da variazioni di temperatura contenute, ospita taxa che che si rinvengono quasi esclusivamente in questa zona (*Brachysira calcicola*, *B. styriaca* e *Gomphocymbellopsis. Ancyli*). La zona intermedia, caratterizzata da condizioni ambientali più stabili presenta i valori più elevati di diversità, sia a 9 m che a 12 m. Tuttavia, anche la stazione dei 4 m nella zona superficiale ha mostrato valori elevati di diversità dovuta probabilmente alla parziale sovrapposizione di due gruppi di taxa: quelli adattati a far fronte a condizioni estreme di disseccamento e quelli colonizzanti profondità maggiori. La zona profonda si trova al limite inferiore della zona eufotica dove la percentuale di radiazione fotosinteticamente attiva è inferiore al 2%, e in alcuni periodi non arriva nemmeno all'1%, sovrapponendosi così, di fatto, alla zona afotica. Questa zona si distingue per la presenza di *Amphora pediculus, Epi-*

themia goeppertiana, Eunotia arcubus, Fragilaria brevistriata e *F. pinnata*. Per alcuni taxa sono stati trovati individui vivi lungo tutto il transetto, come *Achnanthidium minutissimum* e *Adlafia bryophila*; altri taxa sono presenti in due zone attigue (per esempio *Encyonopsis microcephala* tra 0.5 e 18 m, zona superficiale e zona intermedia).

Anche l'analisi di pigmenti algali del periphyton quali clorofilla *a*, feofitina *a*, fucoxantina e scitonemina ha mostrato evidenti gradienti verticali (Cantonati *et al.* 2014). Nell'epilithon la clorofilla *a* tende ad aumentare con la profondità mentre la feofitina a diminusice. Nell'epilithon la concentrazione di fucoaxantina aumenta con la profondità mentre quella della scitonemina (legata alla presenza di cianobatteri che resistono meglio alle condizioni emerse), diminuisce per scomparire del tutto al di sotto dei 9 metri di profondità. I valori elevati di feofitina *a* determinati a marzo confermano la difficoltà delle diatomee bentoniche a sopravvivere a lunghi periodi di disseccamento, anche se la presenza di modeste concentrazioni di clorofilla *a* dimostra la capacità di alcuni taxa di rimanere vitali. L'andamento della scitonemina ha evidenziato che la comunità perifitica superficiale fino ai 9 metri è dominata da cianoprocarioti, dotati di guaine capaci di produrre tale pigmento fotoprotettivo, mentre a profondità maggiori sono predominanti i popolamenti a diatomee.

La distribuzione verticale nella composizione dei popolamenti vitali di diatomee è stata analizzata in relazione ai parametri ambientali che variano con la profondità. Per il lago di Tovel i parametri più importanti risultano essere la radiazione fotosinteticamente attiva (P.A.R.), e, a questa correlata, la radiazione ultravioletta, e la temperatura. Altri parametri potenzialmente rilevanti, come la concentrazione di nutrienti, si mantengono costanti lungo la profondità, suggerendo che la loro importanza sia limitata nel determinare la distribuzione verticale delle diatomee. L'analisi Canonica delle Corrispondenze (CCA) ha confermato ed evidenziato la correlazione esistente tra alcune variabili e la profondità; come prevedibile la profondità è la variabile maggiormente correlata con il primo asse mentre le principali variabili associate sono in ordine la radiazione fotosinteticamente attiva, la probabilità di disseccamento, la concentrazione della silice e la conducibilità.

In questa ricerca, grazie all'approccio metodologico adottato in partenza è stato possibile determinare le abbondanze assolute degli individui vitali esprimendo così il numero di individui contati sia in termini di densità (numero individui cm^{-2}) che in termini di biovolume (mm^3 cm^{-2}); le stime di densità per unità di superficie variano da un minimo di 487 individui cm^{-2} a un massimo di 1090047 individui cm^{-2}; nei 62 campioni la densità media è di 2216858 individui cm^{-2}. Questi valori sono molto bassi anche per un lago oligotrofo come il lago di Tovel: nell'unico lavoro reperito, relativo alle diatomee bentoniche del lago Huron prelavate a 2,5 e 5,5 m (Lowe & Pillisbury, 1995), i valori medi di biovolume sono all'incirca dieci volte superiori a quelli misurati a Tovel. Un dato ecologico molto importante è la ridotta frazione di individui vitali trovati alle varie profondità e nelle diverse stagioni rispetto alla frazione dei frustoli vuoti; la percentuale di individui vivi rinvenuti nei 62 campioni è infatti pari a circa il 42%.

In conclusione, il lago di Tovel è un ambiente che presenta caratteristiche ottimali per questo tipo di studi, offrendo spunti interessanti nel campo dell'ecofisiologia che regola la distribuzione verticale di organismi autotrofi. Questa ricerca ha infine integrato le conoscenze sulla biodiversità delle diatomee bentoniche del lago di Tovel in quanto con le tecniche di campionamento adottate è stato possibile campionare profondità precedentemente non accessibili.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Nucleo Sommozzatori del Corpo Permanente dei Vigili del Fuoco di Trento, il dott. Flavio Corradini; il dott. Graziano Guella, il dott. Francesco Ghetti, la dott.ssa Rita Frassanito e la dott.ssa Costanza Bagnoli.

Bibliografia

Baldi E., 1941 - Ricerche idrobiologiche sul Lago di Tovel. *Memorie del Museo di Storia Naturale della Venezia Tridentina*, 6:1-297.

Bolsenga S.J., Evans M., Vanderploeg H. A. & D.G. Norton, 1996 - PAR transmittance through thick, clear freschwater ice. *Hydrobiologia*, 33: 227-230

Boyle, J.F. (2001). Inorganic geochemical methods in palaeolim- nology. In Tracking Environmental Change Using Lake Sediments – *Physical and Chemical Techniques*, Vol. 2 (Last, W.M. and Smol, J., editors), 83–141. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.

Cantonati M., N. Angeli, S. Scola & G. Rossetti, 2002 - Depth distribution of epilithic diatoms in a mountain lake (Lake Tovel, 1178 m a.s.l., Northern Italy). *Book of Abstracts of the 17th International Diatom Symposium.* Ottawa, Canada 25-31 August 2002.

Cantonati M., Scola, S., Angeli, N., Guella, G. and Frassanito, R. 2009. Environmental controls of epilithic diatom depth-distribution in an oligotrophic lake characterised by marked water-level fluctuations. *European Journal of Phycology* 44: 15-29. DOI: 10.1080/09670260802079335

Cantonati, M., G. Guella, D. Spitale, N. Angeli, A. Borsato, V. Lencioni, And M. L. Filippi. 2014. The contribution of lake benthic algae to the sediment record in a carbonate mountain lake influenced by marked natural water-level fluctuations. *Freshwater Science* 33: 499-512. DOI: 10.1086/676471.

Corradini F., Flaim G. & Pinamonti V., 2001 - Five years of limnological observations on lake Tovel (1995-1999): some considerations and comparisons with data. *Atti Ass. It. Oceanol. Limnol.*, 14: 209-218.

COX E.J. 1996 *Identification of Freshwater Diatoms from Live Material*. Chapman and Hall, New York, 158p.

Dell'Uomo A. & F. Pedrotti, 1982 - Le phytobenthos de la zone eulittorale du lac de Tovel (Trentin, Italie du Nord). Cryptogamie: *Algologie*, III, 2: 129-146.

Dell'Uomo A. & M. A. Masi, 1988 - Studio floristico-ecologico delle diatomee del Lago di Tovel (Nord Italia). *Riv. Idrob*., 27: 2-3.

Frassanito, R., Cantonati, M., Tardio, M., Mancini, I. & Guella, G. (2005). On-line identification of secondary metabolites in freshwater microalgae and cyanobacteria by combined liquid chromatography-photodiode array detection- mass spectrometric techniques. *J. Chromatogr. A*, 1082: 33–42.

Hill M.O., 1973 - Diversity and eveness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54: 427-432.

Hillebrand, H., Du ¨ Rselen, C.-D., Kirschtel, D., Pollingher, U. & Zohary, T. (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *J. Phycol.*, 35: 403–424.

I.R.S.A. & C.N.R., 1994 – Metodi analitici per le acque. Istituto di Ricerca sulle Acque. *Quaderni IRSA*, 100: 1-342.

Largaiolli V., 1905. Le diatomee del Trentino. XIX, XX: I laghi di Malghetto e di Tovel *Tridentum*: 8 (2), 73-79.

Largaiolli V. 1906. Le diatomee del Trentino. Ancora i laghi di Lavarone e di Tovel. *Tridentum*: 8 (8-9), 384-386.

Lorenzen, C.J. 1967 - Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectropho-tometric equations. *Limnol. Oceanogr.* 12: 343-346.

Lotter A., 1988 - Past water-level fluctuations at lake Rotsee (Switzerland), evidenced by diatom analysis. In: Miller U. & A.M. Robertsson (Eds.), *Proceedings of the Nordic Diatomist Meeting*. University of Stockholm, Dept. of Quaternary Re-search Report 12, 47-55.

Lowe, R.L., & R.W. Pillsbury, 1995 - Shifts in benthic algal community structure and function following the appearance of Zebra Mussels (*Dreissena polymorpha*) in Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res*. 21(4): 558-566.

Krammer, K & Lange-Bertalot, H., 1986-1991 - Sűβwasserflora von Mitteleuropa. In: ETTL, H., GERLOFF, J., HEYNIG, H. & MOLLENHAUER, D. (eds): *Bacillariophyceae. Naviculaceae,* 2/1, 876 pp.; *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*, 2/2, 596 pp.; *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae,* 2/3, 576 pp.; *Achnanthaceae*, 2/4, 437 pp. – G. Fisher, Stuttgart. New York.

Krammer K., 2000-2003 - Diatoms of Europe. The genus *Pinnularia* . 1, 703 pp.; *Cymbella*, 3, 584 pp.; *Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocymbella,* 4, 530 pp. Edited by H. Lange Bertalot, A.R.G. Gantner Verlag K.G.

Krammer, K & Lange-Bertalot, H., 2004 - Sűβwasserflora von Mitteleuropea. In: Ettl, H., GÄRtner, G., Heynig, H. & Mollenhauer, D. (eds): *Bacillariophyceae. Achnanthaceae*, 2/4, 468 pp. G. Fisher, Stuttgart. New York.

Margalef R., 1983 - *Limnologia*. Ediciones Omega, 1009 pp.

Kingston, J.C., Lowe, R.L., Stoermer, E.F. & Ladewski, T.B. (1983). Spatial and temporal distribution of benthic diatoms in northern Lake Michigan. Ecology, 64: 1566–1580.

Paganelli A., Trevisan R., Cordella P., Miola A. & E.M Cappelletti, 1981 - Ricerche limnologiche sul Lago di Tovel (Trentino) ed ipotesi sul mancato arrossamento. *Studi Trent. Sc. Natur.*, Acta Biologica, 88: 393-424.

Paganelli A., Miola A. & Cordella P., 1988 – Il Lago di Tovel (trentino) e la circolazione delle sue acque. *Riv. di Idrobiol.*, 27: 363-376.

Scola S., 2003 - Distribuzione lungo un gradiente di profondità dei popolamenti vitali di diatomee epilitiche nel lago di Tolvel (Parco Naturale Adamello-Brenta, Trentino). Tesi di laurea, Università degli studi di Parma, facoltà di scienze matematiche, fisiche e naturali. Anno accademico 2002 - 2003.

Shannon C. E. & W. Weaver, 1949 - *The mathematical theory of communication* -University of Illinois Press, Urbana, 117 pp.

Stevenson, R.J. & Stoermer, E.F. (1981). Quantitative differences between benthic algal communities along a depth gradient in Lake Michigan. *J. Phycol.*, 17: 29–36.

Ter Braak, C. J. F. & P. Smilauer, 2002 - *CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*. Microcomputer Power (Ithaca, NY, USA), 500 pp.

Tomasi G., 1961-1989; 2006 - Carteggio, relazioni, disposizioni di legge per la tutela paesaggistica ed ecologica del lago di Tovel, carta topografica e batimetrica.

Tomasi G.,1968-1972 - Verbali delle riunioni della Commissione dei gruppi di studio per i problemi del lago di Tovel e relazioni.

Tomasi G., 1963 – *I laghi del Trentino*. Coeditori Casa editrice G. B. Monauni Trento Arti Grafiche R. Manfrini Rovereto, 330 pp.

Tomasi G. 1975 - Il Tovel rosso: un secolo dalle prime osservazioni - Bel Trentino, Milano, 9, pp. 22-25

Tomasi G. 1982 - Lago di Tovel: quando è nato e quando è stato conosciuto - in: Tuenno ieri ed oggi, Cassa rurale di Tuenno, pp. 252-255.

Tomasi G. 1989a - Lago di Tovel: dall'immaginario al plausibile - Natura Alpina, Trento, 40(1), pp. 1-72

Tomasi G. 1989b - Glitzernde Perlen der Brenta. Der Tovel und der Molvenosee - Berge, Bern, 39, pp. 58-59

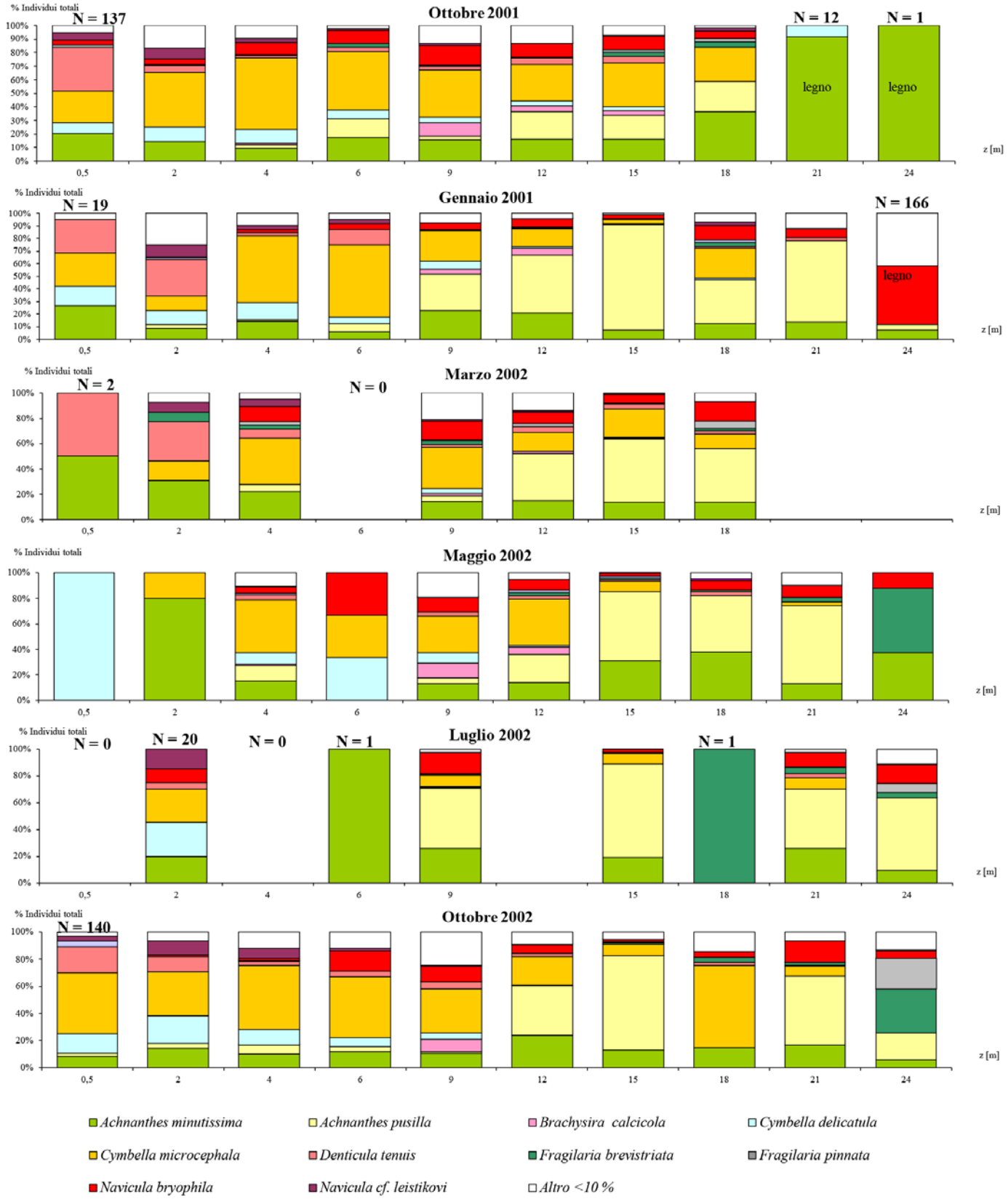
Tomasi G., 2004 – *I trecento laghi del Trentino* – Temi Editore, 536 pp.

Westlake, D.F. (1971). *Macrophytes*. In *A Manual of Methods for Measuring Primary Production in Aquatic Environments* I.B.P. Handbook, 12 (Vollenweider R.A., editor). Blackwell Scientific Publication, Oxford, UK.

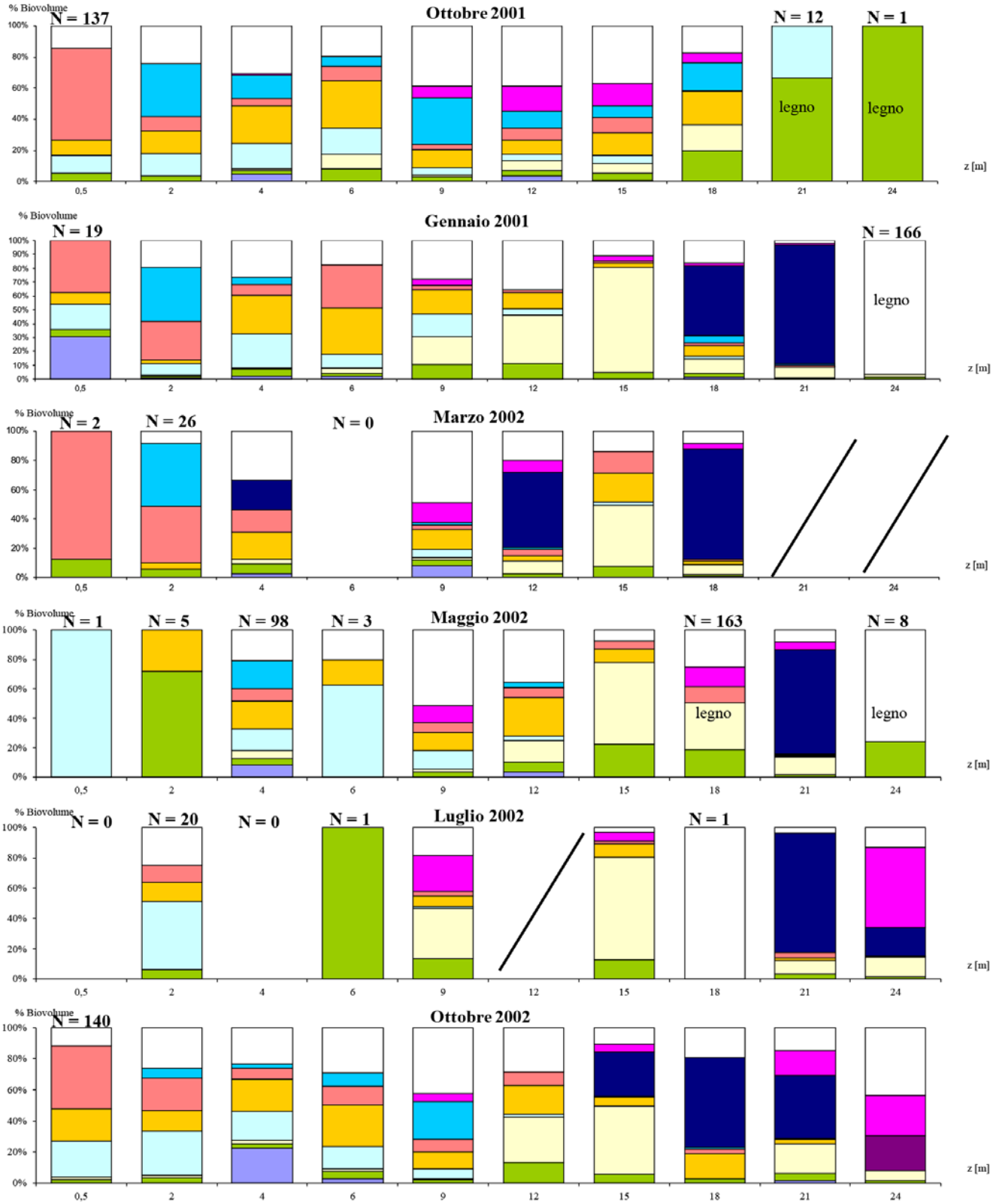
***Appendice 1**: Elenco dei taxa di diatomee rinvenuti.*

Taxa	**Autore**
Achnanthes caledonica	Lange-Bertalot
Achnanthes clevei	Grunow
Achnanthes conspicua	(Mayer) Krammer & Lange-Bertalot
Achnanthes laevis	(Oestrup) Krammer & Lange-Bertalot
Achnanthes minutissima	(Grunow) Lange-Bertalot
Achnanthes pusilla	(Grunow) De Toni
Achnanthes rosenstockii	Lange-Bertalot
Achnanthes trinodis	(W. Smith) Grunow.
Adlafla bryophila	(Petersen) Lange-Bertalot
Amphora lybica	Ehrenberg
Amphora ovalis	(Kutzing) Kutzing
Amphora pediculus	(Kützing) Grunow
Amphora thumensis	(Mayer) Cleve-Euler
Brachysira calcicola	Lange-Bertalot
Brachysira styriaca	(Grunow) Ross
Brachysira neoexilis	Lange-Bertalot
Brachysira vitrea	(Grunow) Ross
Caloneis alpestris	(Grunow) Cleve
Caloneis silicula	(Ehrenberg) Cleve
Cyclotella sp.	
Cymbella affinis	Kützing
Cymbella descripta	(Hustedt) Krammer & Lange-Bertalot
Cymbella helvetica	(Krasske) Krammer
Cymbella hustedtii	(Krasske) Krammer
Cymbella laevis	(Naegeli in Kützing) Krammer
Cymbella neocistula var. neocistula	Krammer
Cymbella neoleptoceros	Krammer
Cymbopleura inaequalis	(Ehrenberg) Krammer
Delicuta delicatula	(Kützing) Krammer
Denticula tenuis	Kützing
Diploneis krammeri	(Hustedt) Krammer & Lange-Bertalot
Diplonels oblogella	(Nageli) Cleve-Euler
Encyonema auerswaldi	(Ehrenberg) Krammer & Lange-Bertalot
Encyonema minutum	(Hilse ex Rab.) D. Mann
Encyonopsis microcephala	(Grunow) Krammer
Epithemia goeppertiana	Hilse
Eucocconeis flexella	(Kutzing) Cleve
Eunotia arcubus	NÖrpel-Schempp, Lange-Bertalot
Fragilaria brevistriata	(Grunow) Krammer & Lange-Bertalot
Fragilaria pinnata	Ehrenberg
Fragilaria tenera	(W. Smith) Lange-Bertalot
Gomphocymbellopsis ancyli	(Cleve) Krammer
Gomphonema cf. minutum	(Agardh)
Gomphonema sp. "grande"	
Gomphonema sp. "piccolo "	
Gomphonema truncatum	(Ehrenberg) Krammer & Lange-Bertalot
Navicula antonii	Lange-Bertalot
Navicula cryptocephala	Kützing
Navicula cryptotenella	Lange-Bertalot
Navicula leistikovii	Lange-Bertalot
Navicula radiosa	Kützing
Naviculaceae Gruppo Lineolatae	
Neidium iridis	(Ehrenberg) Cleve
Nitzschia angustata	Grunow
Nitzschia sp.	
Pinnularia sp.	
Sellaphora mutata	(Krasske) Lange-Bertalot
Sellaphora pupula	(Kützing) Mereschkowsky

***Appendice 2**: Stagionalità e distribuzione degli individui vitali (in percentuale) dei principali taxa diatomici lungo il gradiente di profondità. N = numero di individui contati nei campioni in cui il n° totale è minore delle 350 unità. In mancanza di sassi venivano prelevati pezzi di rami o pigne indicati come "legno".*

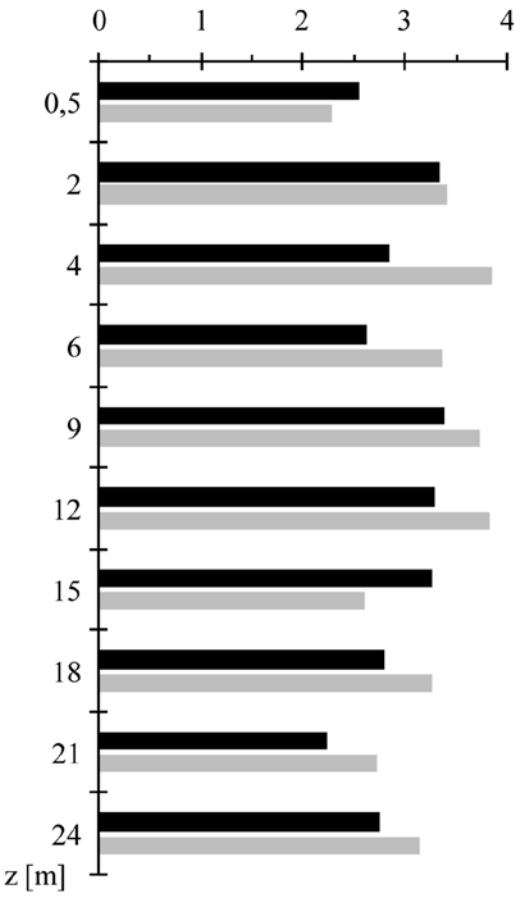


***Appendice 3**: Stagionalità e distribuzione d'individui vitali lungo il gradiente di profondità (% biovolume) N=n° individui contati nei campioni in cui il n° totale è minore delle 350 unità.*

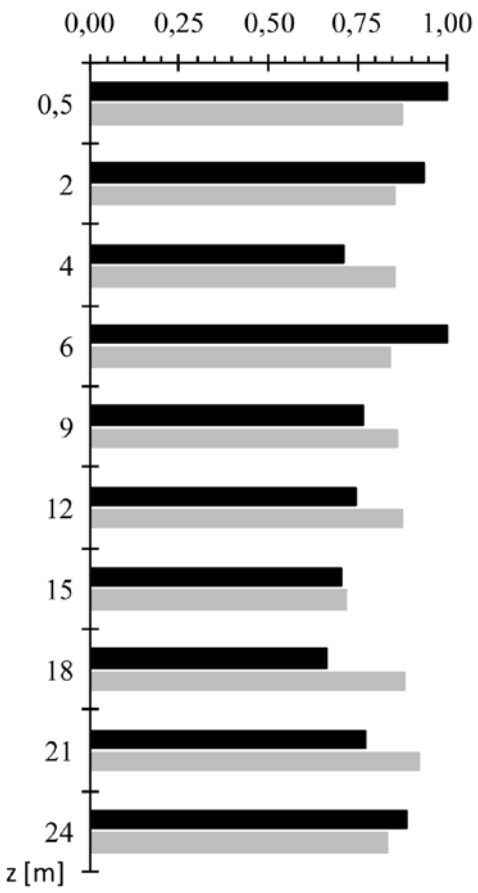


Achnanthes flexella · *Achnanthes minutissima* · *Achnanthes pusilla* · *Cymbella delicatula*
Cymbella microcephala · *Denticula tenuis* · *Diploneis krammeri* · *Encyonema auerswaldi*
Epithemia goppetriana · *Eunotia arcubus* · *Altro <20%*

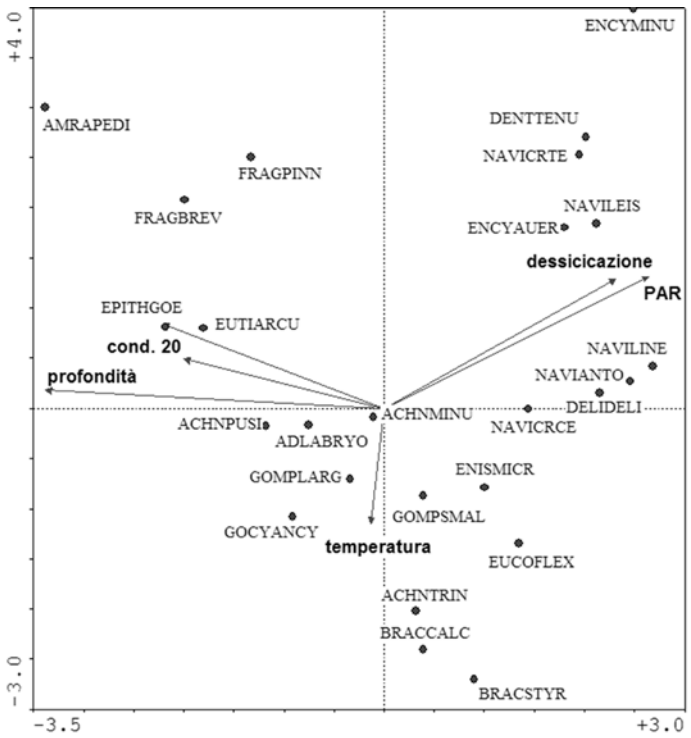
Appendice 4 *- Indice di Shannon (valore medio) calcolato per il numero di individui (nero) e per il biovolume (grigio).*



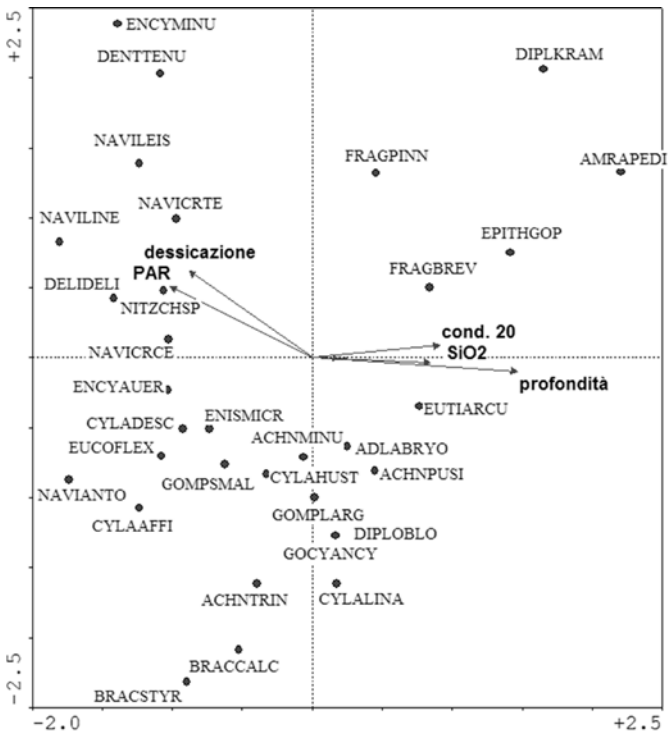
Appendice 5 *- Indice di Eveness (valore medio) calcolato per il numero di individui (nero) e per il biovolume (grigio).*



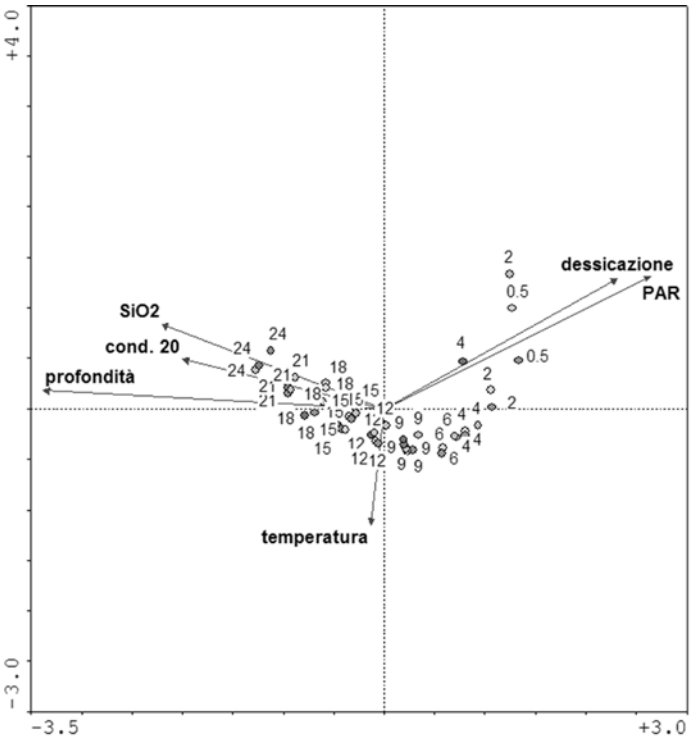
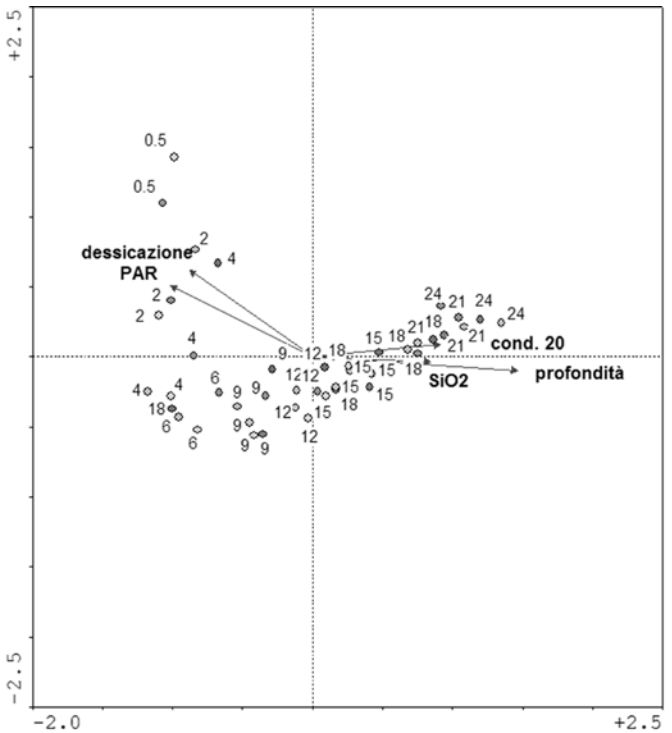
***Appendice 6**: CCA numeri individui/ parametri ambientali.*



***Appendice 8**: CCA biovolumi individui/ parametri ambientali.*



***Appendice 7**: CCA numeri stazioni di campionamento / parametri ambientali.*



***Appendice 9**: CCA biovolumi stazioni di campionamento / parametri ambientali.*