

10. MESCOLAMENTO INVERNALE DEL LAGO, ANALISI DEL TEMPO DI RESIDENZA ED INFLUENZE CLIMATICHE LOCALI E GLOBALI: LE RICERCHE DEL TRIENNIO 2013-2015

Walter Ambrosetti, Claudia Dresti, Luigi Barbanti, Angelo Rolla, Mario Contesini

10.1 Caratteristiche idrodinamiche del Lago Maggiore

Gli aspetti idrodinamici che hanno caratterizzato il Lago Maggiore negli ultimi decenni derivano dal quel complesso di meccanismi che riguardano l'interconnessione tra il lago e gli ambienti circostanti, in particolare gli scambi di massa e di energia calorica e meccanica con l'atmosfera sovrastante e con l'areale che circonda il corpo idrico. In questo contesto, saranno qui trattati quegli aspetti che, oltre a fornire un quadro generale della dinamica fisica del lago, sono anche di vitale importanza per i processi chimici e biologici.

Del corpo idrico saranno quindi analizzate le serie storiche pluriennali e dell'ultimo triennio relative a:

- contenuto di calore
- profondità di mescolamento invernale
- stabilità termica
- ossigenazione lungo la colonna d'acqua

10.1.1. Contenuto di calore

Dai dati pluriennali di temperatura dell'acqua del Lago Maggiore relativi agli anni 1963-2015, è stato valutato il suo contenuto calorico con cadenza mensile, il cui andamento è rappresentato in Fig. 10.1.

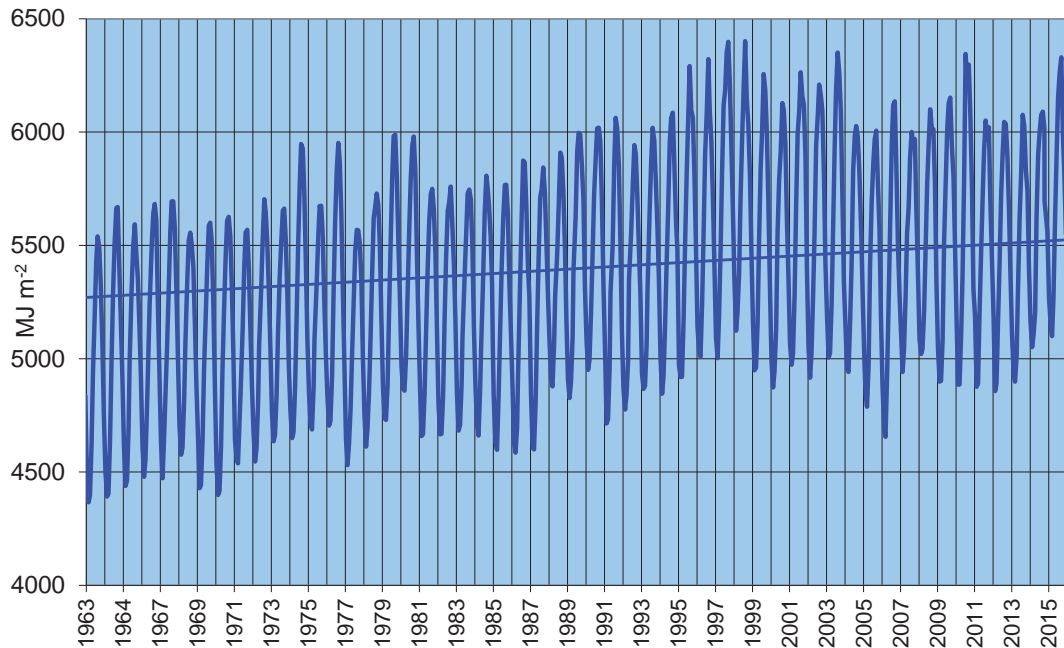


Fig. 10.1. Andamento mensile del contenuto di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963-2015.

Oltre alla marcata evidenza del ciclo stagionale, va notata la grande variabilità dei massimi e minimi annuali ed il trend generale della serie che mostra un netto incremento determinato soprattutto dai dati riscontrati fino al termine degli anni novanta, che si sono poi stabilizzati, con qualche eccezione (estate 2010 e inverno 2006), o sono in leggero calo, dopo il 2002 (Fig. 10.2).

Nella Fig. 10.2, sono rappresentati i valori minimi annuali, che si collocano normalmente in Febbraio-Marzo e sono compresi tra 4398 MJ m^{-2} (1963) e 5003 MJ m^{-2} (1998) mentre quelli più elevati, che si trovano in Agosto-Settembre, risultano compresi tra 5540 MJ m^{-2} (1963) e 6424 MJ m^{-2} (1998). Nel 2013 e nel 2014, i dati invernali hanno subito un leggero aumento e i massimi si sono mantenuti appena sopra i 6000 MJ m^{-2} . Nel 2015, è stato raggiunto un valore massimo di 6329 MJ m^{-2} nel mese di settembre. Nella stessa figura, è rappresentata anche la serie dei bilanci termici annuali del lago che mostra un andamento molto variabile, abbastanza simile a quello del contenuto massimo di calore. È quindi evidente che il bilancio termico annuale del lago dipende in modo precipuo dalla quantità di calore assorbita durante la stagione calda come dimostra anche il fatto che la correlazione statistica tra il bilancio termico (Bt) e il contenuto massimo di calore (Q_{tmax}) è significativa ($r = 0,66$), mentre non lo è quella tra Bt e il contenuto minimo (Q_{tmin}).

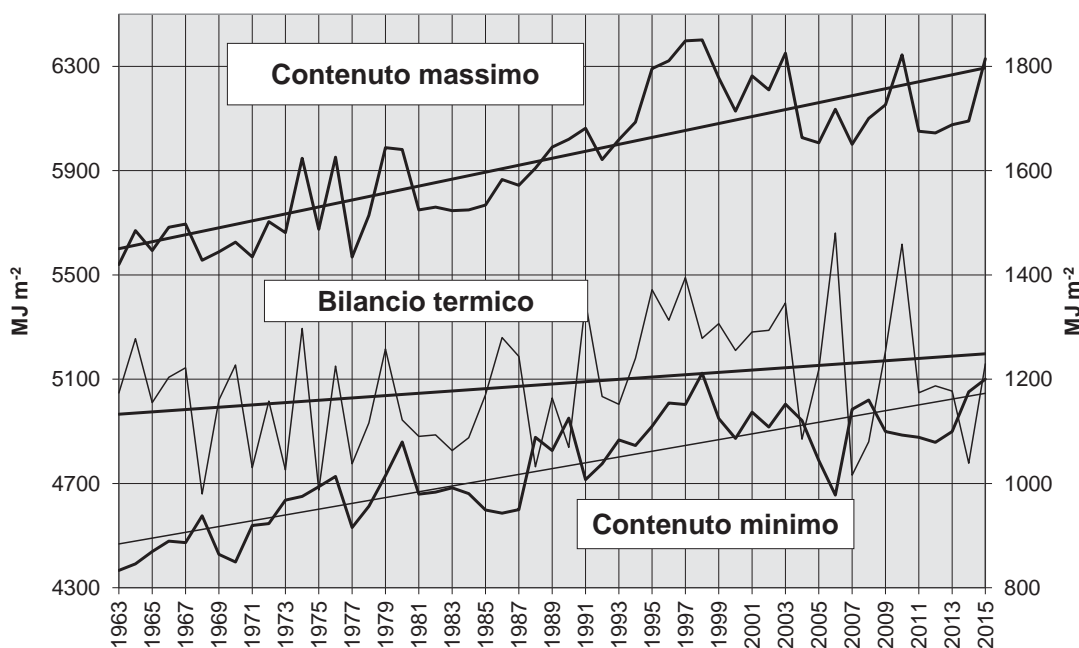


Fig. 10.2. Andamento del contenuto massimo (estivo), minimo (invernale) di calore e del relativo bilancio termico (riferito all'asse secondario) nel Lago Maggiore dal 1963 al 2015 (MJ m^{-2}).

10.1.2. Profondità del mescolamento invernale

La caratteristica idrodinamica più importante dei laghi profondi sudalpini riguarda la modalità con cui avviene il mescolamento verticale convettivo che, per la loro collocazione geografica nella fascia temperata, si verifica una sola volta all'anno e cioè al termine dell'inverno limnologico (nel Maggiore all'incirca alla fine di Febbraio). Poiché nel nostro caso si tratta di un bacino di elevata profondità,

l'omogeneizzazione delle acque può avvenire in maniera completa, cioè giungere sino al fondo del lago, o interessare solo una parte più o meno cospicua della massa liquida e ciò in dipendenza di caratteristiche meteorologiche invernali che possono essere particolarmente fredde e ventose o relativamente miti. Gli eventi di circolazione totale, tuttavia, a seguito dei mutamenti climatici in atto, in particolare per l'incremento invernale della temperatura dell'aria e per la riduzione del vento, sono diventati l'eccezione anziché la regola, come è stato accertato nel Lago Maggiore negli ultimi 60 anni.

Come già specificato a proposito delle indagini di limnologia fisica portate avanti dal 1963, le profondità di mescolamento verticale sono state determinate con un doppio sistema di valutazione. La misura diretta in lago di alcuni elementi atti ad identificarla (temperatura, concentrazione di ossigeno disciolto, nitrati e silicati) ed il calcolo di un parametro (M) che tiene conto delle variabili meteorologiche, che intervengono nell'omogeneizzazione delle acque.

La serie delle suddette profondità riscontrate dal 1951 ad oggi a seguito dei moti convettivi è riportata in Fig. 10.3; gli istogrammi presenti indicano le profondità interessate dall'inserimento di acque fredde di provenienza litorale o di fusione della coltre nevosa convogliata nella zona ipolimnica del lago (Ambrosetti *et al.* 2010). Come si può osservare nella stessa figura, negli ultimi 3 anni la massima profondità di mescolamento si è verificata nel 2013 (circa -120 m) mentre nel 2014 e 2015 non si sono superati i 100 metri di profondità.

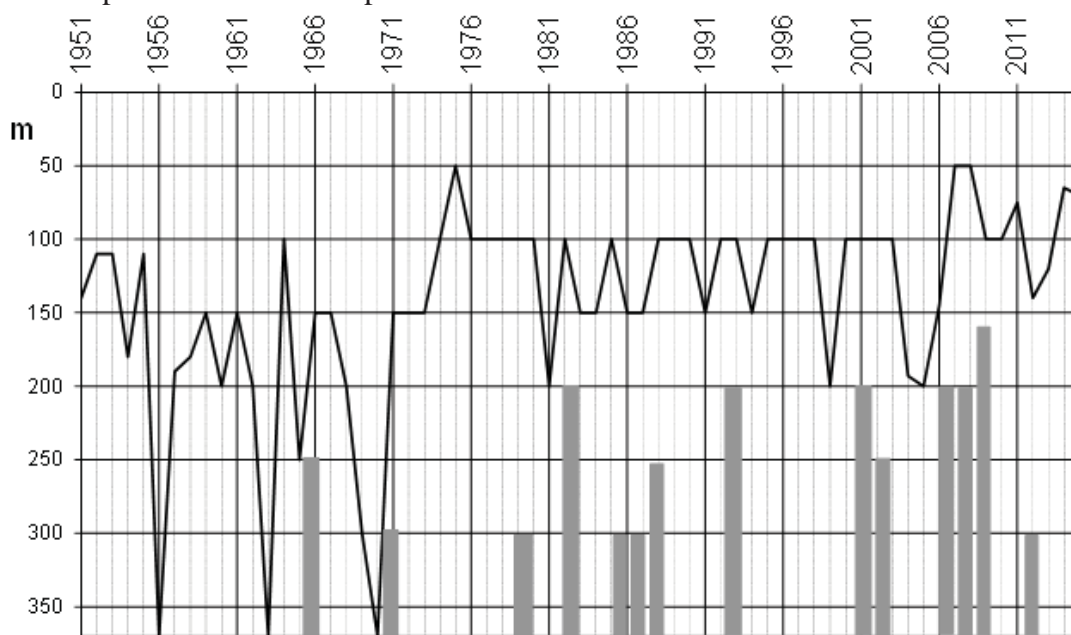


Fig. 10.3. Profondità del mescolamento verticale tardo invernale nel Lago Maggiore nel periodo 1951-2015 (linea continua). Gli istogrammi indicano inserimenti di acqua negli strati ipolimnici del lago.

10.1.3 Stabilità termica

Sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti, si evince che la circolazione verticale invernale di tipo convettivo in un lago profondo come il Maggiore è un evento che oggi si verifica in maniera completa solo in casi del tutto particolari. Infatti, il lavoro necessario per ottenere l'omogeneizzazione della massa

d'acqua deve essere in grado di vincere non solo il gradiente di densità tra i vari strati, che deriva dalla loro differenza di temperatura o dalla presenza eventuale di soluti, ma anche di superare la pressione idrostatica della colonna d'acqua che determina un incremento della stabilità del lago con la profondità. L'incidenza sulla densità dell'acqua è tale da determinare ogni 100 m un suo aumento pari a quello causato dalla diminuzione di temperatura di 0.2 °C.

In Fig. 10.4 sono riportate, per il periodo 1963-2015, gli andamenti delle stabilità termiche totali, relative cioè all'intera colonna d'acqua, valutate nei due momenti cruciali della dinamica lacustre, ossia in occasione del contenuto calorico minimo e del suo contenuto massimo che si ha con la più pronunciata stratificazione termica estiva. Mentre esiste un'elevata significatività di correlazione tra i contenuti minimo e massimo di calore, come visto in precedenza, perché la quantità presente in estate influenza anche quella che si ritrova in inverno, non sussiste significatività statistica tra la stabilità invernale ed estiva. La ragione di ciò va ricercata nel fatto che il ruolo determinante della stabilità è assunto dalle dimensioni degli strati mescolati sia in estate che in inverno e tra queste due situazioni non vi è relazione evidente. Da rilevare nel grafico l'elevato valore assunto dalla stabilità invernale nel Febbraio 2007, evento determinato dal forte riscaldamento dello strato superficiale che ha fatto seguito a condizioni climatiche estremamente "calde". Ne è conseguito l'isolamento dello strato profondo tanto che il mescolamento verticale ha raggiunto solo 50 m di profondità; per le stesse ragioni si è avuto un alto valore di stabilità nel 2008. Negli anni 2013-2015, dopo una diminuzione nel primo anno invernale, si è verificato un leggero incremento nel 2013 e un notevole balzo nel 2014, che costituisce il terzo valore più alto della serie 1963-2015 con la conseguente ridotta circolazione del lago (65 m). I valori massimi estivi hanno invece subito una graduale diminuzione.

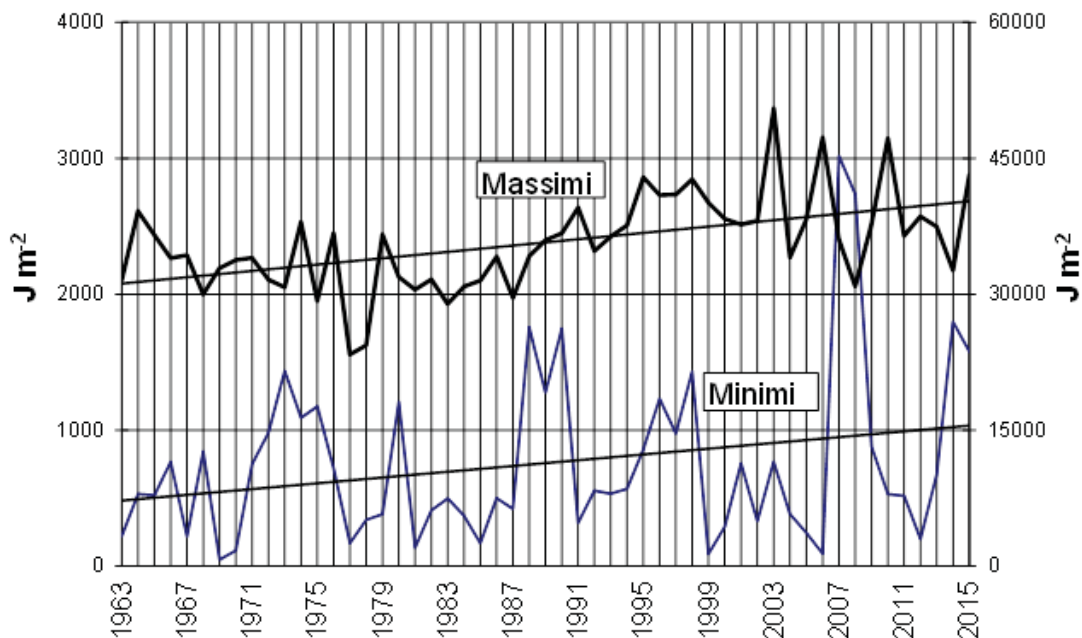


Fig. 10.4. Andamento della stabilità termica massima estiva e minima invernale ($J m^{-2}$) nel Lago Maggiore dal 1963 al 2015. All'asse secondario vanno riferiti i valori minimi.

10.1.4. Ossigenazione

In Fig. 10.5 sono riportati gli andamenti del contenuto medio di ossigeno disciolto (mg L^{-1}) riscontrati negli ultimi tre anni lungo tutta la colonna d'acqua.

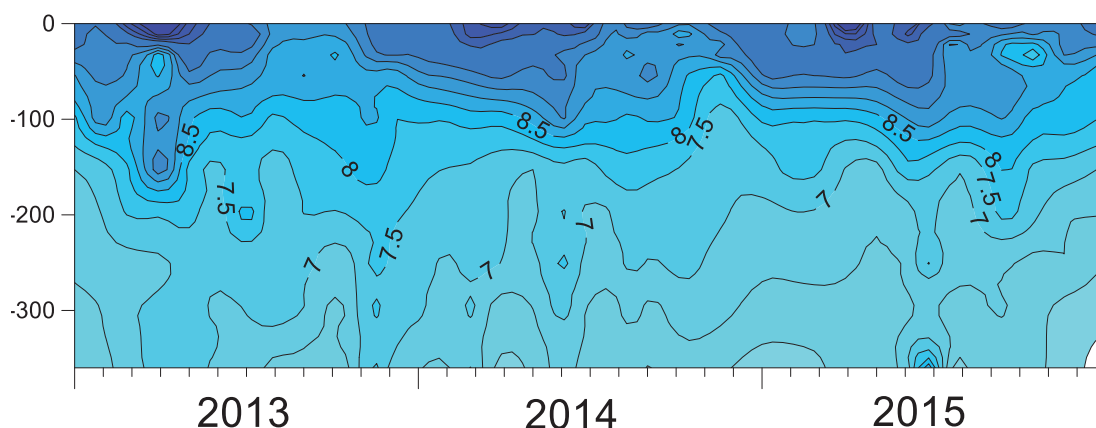


Fig.10.5. Andamento del contenuto medio di ossigeno disciolto (mg L^{-1}) nelle acque del Lago Maggiore. Triennio 2013-2015.

La figura mette in evidenza che negli anni dal 2013 al 2015 la concentrazione di ossigeno nelle acque profonde si è mantenuta tra $6.5\text{-}7.0 \text{ mg L}^{-1}$ e non evidenzia mescolamenti convettivi e nemmeno discesa in profondità di acqua densa e fredda di provenienza fluviale o litorale come discusso nei Rapporti CIP AIS relativi ai suddetti anni.

10.2. Valutazione numerica dei tempi di residenza di traccianti idrosolubili nel Lago Maggiore

Nel corso del 2013, la ricerca è proseguita con simulazioni CFD 3D riguardanti la propagazione nel Lago Maggiore di un inquinante idrosolubile non-reattivo. Lo scopo delle simulazioni era di confrontare i tempi di residenza del tracciante idrosolubile con quelle di particelle (markers) prive di massa così come quantificati in precedenti studi nei rapporti I-CH.

Sono state considerate due diverse configurazioni: la prima con immissione continua del tracciante alla sezione di ingresso del Ticino immissario e la seconda con inserimento a macchia (spot) nelle adiacenze della sezione di ingresso in lago del Toce.

Dall'analisi svolta è risultato che i tempi di residenza di un tracciante idrosolubile sono, sino a ca.12 metri di profondità, tendenzialmente meno di un quarto di quelli relativi ai markers lagrangiani privi di massa partiti da posizioni analoghe (Castellano *et al.*, 2010). Per profondità maggiori, a fine Agosto si trovano valori allineati all'andamento temporale di quelli delle profondità maggiori valutate con i markers lagrangiani. Si evidenzia così l'effetto, molto sensibile, della diffusività effettiva, (essenzialmente orizzontale, mentre quella verticale risulta di molto inferiore) dovuta al regime di turbolenza del lago. La modesta penetrazione del tracciante, di principio, meriterebbe certamente uno studio più accurato che però esula dall'obiettivo di questa serie di simulazioni: questo è infatti quello di valutare la differenza fra i tempi di residenza puramente idraulici, stimati mediante l'uso di

markers lagrangiani privi di massa, e un tempo di residenza ragionevolmente rappresentativo di un tracciante idrosolubile e soggetto alla diffusività molecolare e alla diffusività turbolenta.

Un terzo livello di interesse riguarderebbe i tempi di residenza di traccianti biodegradabili, o comunque reagenti. Problema decisamente più complesso e certamente non univoco in quanto dipendente dalle cinetiche di reazione, diverse di ogni specie e in funzione delle condizioni chimiche, fisiche e biologiche del corpo idrico.

10.3. Aspetti della dinamica del Lago Maggiore condizionati dal clima

Questo studio, condotto nel 2013 e 2014, ha inteso valutare, col supporto statistico, le modalità che connettono la dinamica interna di un lago profondo come il Maggiore con le due principali forze meteorologiche esterne: quella locale, rappresentata dal parametro M ed una seconda a grande scala per la quale si sono considerati gli indici della NAO (North Atlantic Oscillation): detti indici si ricavano dalla differenza di pressione atmosferica a livello del mare tra un'area di bassa (Islanda) ed una di alta (Azzorre). Valori altamente positivi degli indici delle oscillazioni atlantiche invernali (NAO_w), indicano la presenza di forti circolazioni zonali sul Nord Atlantico, con conseguenti inverni miti e piovosi sull'Europa occidentale e settentrionale, mentre i negativi testimoniano deboli circolazioni nord-atlantiche, cui, di norma, seguono inverni freddi su gran parte del territorio europeo.

10.3.1. Metodologia statistica

Utilizzando i principali parametri meteorologici e limnologico-fisici raccolti per oltre un cinquantennio sul lago e indicati nel rapporto 2013, è stata condotta un'analisi statistica che, partendo dalla correlazione reciproca tra tutte le variabili in gioco, si è poi articolata prima sull'autocorrelazione delle singole serie storiche e successivamente su un insieme di modelli, ridotti e non, del tipo Autoregressive Integrates Moving Average (ARIMA); questi sono atti ad individuare, con il confronto con i dati reali, quanto le due forze esterne si influenzino reciprocamente e quanto incidano sui parametri caratterizzanti l'idrodinamica lacustre. Rilevata la quota di variabilità della serie storica di M non spiegata dalla NAO_w (residui) si sono poi costruiti nuovi modelli ARIMA in grado di individuare il peso delle singole caratteristiche limnologiche, particolarmente nel momento delicato del mescolamento convettivo tardo-invernale.

10.3.2. Risultati

Temperatura dell'aria e dell'acqua

La componente più significativa dei modelli di regressione che relazionano gli indici NAO_w e la termica dell'aria e dell'acqua del lago è risultata essere la temperatura massima dell'aria, cioè il tramite con cui la NAO_w incide con maggior peso sulla termica del lago. Ad un aumento dell'indice NAO_w corrisponde poi una diminuzione della differenza tra le temperature dell'acqua superficiale e dell'aria (ΔT) e poichè quest' ultima è una componente fondamentale del bilancio termico del lago una sua

diminuzione comporta una minor perdita di energia ad onda lunga verso l'atmosfera, un aumento dell'energia assorbita dalla massa lacustre, un leggero incremento dell'evaporazione, nonché contenute perdite di calore sensibile. Si ritiene quindi che la diminuzione di ΔT abbia contribuito al progressivo riscaldamento del Maggiore riscontrato negli ultimi anni.

Contenuto di calore

Con l'aumento dell'indice NAO_w aumenta anche il contenuto totale di calore del lago, particolarmente significativo nello strato mescolato; la quantità energetica in ipolimnio dipende invece dall'autocorrelazione e dal trend. Se ne deduce che i processi termodinamici profondi invernali del Maggiore non dipendono dalla situazione del momento, ma dalle condizioni di stabilità dell'inverno precedente. La dinamica termica estiva non è quindi in grado di "cancellare" del tutto ciò che si era instaurato in precedenza, poiché in estate sono influenzati dalle condizioni esterne solo gli strati superficiali.

Va poi sottolineata l'importante presenza della componente "trend" nei modelli di regressione, il che sottolinea il suo peso determinante per la significatività delle correlazioni fra gli indici NAO_w e M e le variabili limnologiche. Tuttavia, la limitata durata delle serie storiche disponibili non consente di definire chiaramente lo sviluppo futuro della fisica lacustre per effetto dei mutamenti climatici in atto: la tendenza al riscaldamento potrebbe rivelarsi solo una fase destinata ad esaurirsi nel tempo. Infatti, la serie storica dei contenuti di calore nel Lago Maggiore e in altri laghi profondi sudalpini ha evidenziato che dal 1800 ad oggi sono avuti almeno quattro fasi di riscaldamento, e altrettante di raffreddamento (Carrara *et al.*, 2009).

Profondità di mescolamento

Nel Lago Maggiore la meteorologia locale risulta più incisiva di quella a larga scala nel definire la profondità del mescolamento verticale invernale. La fase autunnale di raffreddamento del lago è infatti sempre controllata dalle componenti meteo locali. Ad esempio, a partire dagli anni '70, il vento filato ha subito una sensibile riduzione, mentre la radiazione solare ha mostrato dagli anni '80 un buon incremento e dal concorso di ambedue queste variazioni i mescolamenti verticali non hanno mai raggiunto la massima profondità del lago. Il fatto che le due citate componenti meteo locali non presentino alcun legame con l'indice NAO_w è da relazionare alla posizione geografica del Maggiore, sud-marginale all'arco alpino che agisce da ostacolo alle oscillazioni atlantiche.

Livello di concentrazione dell'ossigeno ipolimnico

Dalle profondità del mescolamento verticale invernale dipende anche la concentrazione di O_2 presente a quei livelli. Il modello di regressione relativo a M e alla sua componente auto-regressiva mostra infatti una buona capacità di adattamento nel riprodurre l'andamento della quantità di O_2 nello strato sotto i 250 m con le rispettive serie temporali che mostrano andamenti quasi paralleli. Alcune differenze si hanno quando i processi di ossigenazione in profondità avvengono con meccanismi diversi da quello convettivo verticale, per esempio con l'infossamento di acque fredde sia litorali che di fusione delle nevi veicolate dai tributari (Ambrosetti *et al.*, 2012; Ambrosetti *et al.*, 2010).

Stabilità termica

La progressiva riduzione delle profondità del mescolamento invernale ha comportato anche un aumento della stabilità termica (quella chimica è del tutto trascurabile nel Maggiore).

Dall'analisi statistica si rileva come l'indice relativo alla situazione meteorologica locale, oltre a mostrare coefficienti più significativi, presenti anche una migliore capacità di adattamento nel riprodurre l'andamento della variabile stessa.

Rapporti tra gli indici M, NAO_w e Trend

L'analisi statistica ha constatato che l'indice M determina un impatto molto significativo sulla fisica del lago, soprattutto se in sinergia con l'azione dell'indice atlantico: quando M è privato degli effetti a grande scala, ha incidenza molto elevata sulla profondità di mescolamento e sulla concentrazione di ossigeno in profondità, mentre è scarsa sui contenuti di calore; l'indice NAO_w invece è più legato al contenuto calorico presente nel lago, soprattutto negli strati più superficiali.

Mentre l'indice M è in progressiva diminuzione dal 1963, la NAO_w è in crescita e se l'andamento del primo determina la riduzione della profondità dello strato mescolato, il secondo favorisce il suo progressivo riscaldamento: si acuisce così la differenza di stabilità lungo la colonna d'acqua a livello del salto termico e si riduce nel contempo la possibilità di una sua completa omogeneizzazione, nonché l'isolamento delle acque profonde e l'allungamento del tempo di ricambio delle acque del lago.

I risultati dei modelli di regressione hanno mostrato una buona capacità di adattamento nel riprodurre i trends di quasi tutti i parametri limnologici: tuttavia sono presenti alcune discrepanze fra le due serie, specie in occasione di eventi eccezionali. La loro presenza era per altro già stata testimoniata dall'andamento a denti di sega della "memoria climatica" (Ambrosetti & Barbanti, 1999).

10.4. Conclusioni

L'azione del mutamento climatico globale gioca un ruolo non trascurabile nel condizionare i meccanismi interni all'ecosistema e, nella fattispecie, la termodinamica di un lago profondo come il Maggiore. In particolare il forcing a larga scala incide sui contenuti energetici, mentre agli effetti delle profondità di mescolamento e della concentrazione di ossigeno profondo l'effetto locale assume un ruolo determinante.

Una delle conseguenze del riscaldamento climatico in atto potrebbe quindi essere l'incremento del rischio di anossie delle acque profonde dei grandi laghi, eventi che, a lungo termine, potranno anche contrastare gli sforzi che sono stati fatti per debellare gli effetti dell'eutrofizzazione.

Ai fini di valutare l'effettiva portata dei *forcing* esterni, oltre alle variazioni climatiche, deve essere presa in considerazione anche la possibile incidenza di altre cause esterne, come ad esempio le modificazioni ambientali.

Bibliografia

- Ambrosetti, W. & L. Barbanti. 1999. Deep water warming in lakes: an indicator of climatic change. *J. Limnol.* 58 (1):1-9.
- Ambrosetti, W., L. Barbanti, & E.A. Carrara. 2010 Mechanism of hypolimnion erosion in a deep lake (Lago Maggiore, N.Italy). *J. Limnol.* 69 (1): 3-14.
- Ambrosetti, W. L. Barbanti, A. Rolla, L. Castellano & N. Sala. 2012. Hydraulic paths and estimation of the real residence time of the water in Lago Maggiore (N, Italy): application of massless markers transported in 3D motion fields. *J. Limnol.*, 71(1):23-33.
- Carrara, E.A., L. Barbanti & W. Ambrosetti. 2009. Deep waters warming in Italian lakes: secular variation. *Atti AIOL-Site*. Ancona 2007: 554-561
- Castellano L., W. Ambrosetti, L. Barbanti & A. Rolla. 2010. The residence time of the water in Lago Maggiore (N.Italy): first result from an Eulerian-Lagrangian approach. *J. Limnol.* (69(1): 15-28.