

2. IL MESCOLAMENTO INVERNALE DEL LAGO: DIPENDENZA DALLA METEOROLOGIA LOCALE, DALLE OSCILLAZIONI OCEANICHE NORD-ATLANTICHE (NAO) E DAI CAMBIAMENTI CLIMATICI GLOBALI

Valter Ambrosetti, Luigi Barbanti, Elisabetta Carrara, Antonella Zambon, Mario Contesini, Claudia Dresti, Angelo Rolla

2.1. Contenuti calorici, temperatura, ossigeno e stabilità termica nelle acque del Lago Maggiore nell'anno 2014

2.1.1 Profondità di mescolamento

Nel corso del 2014, come di consueto, la verifica dell'effettiva profondità dello strato mescolato invernale nel Lago Maggiore è continuata attraverso una serie di sopralluoghi nel suo punto di maggior profondità. Lo scopo era di analizzare la distribuzione verticale, lungo l'intera colonna d'acqua, di alcuni parametri fisici e chimici (temperatura e concentrazioni di ossigeno disciolto, nitrati e silicati). Si è visto che anche in quest'ultimo anno, come nei precedenti 51 anni (Ambrosetti et al., 2010), l'omogeneizzazione verticale delle sue acque è risultata incompleta raggiungendo una profondità di ca. 65 m, rimanendo quindi sui livelli degli anni più recenti: un aspetto idrodinamico quest'ultimo che è ormai divenuto la regola nelle acque del Lago Maggiore. Si tratta di un fatto, ormai ampiamente confermato a livello mondiale, che trova la sua causa nella tendenza al riscaldamento delle acque lacustri manifestatasi negli ultimi decenni, tendenza che nei laghi profondi della zona temperata ha impedito la loro piena circolazione invernale.

Anche le indagini condotte nel 2014 hanno confermato quanto già sottolineato nei rapporti annuali precedenti, cioè la scarsa incidenza sulla profondità del mescolamento di alcuni parametri meteorologici come il vento e la temperatura dell'aria. In gennaio e febbraio, il percorso del vento è risultato in media rispetto al periodo di confronto, rispettivamente con valori di 3564 km (contro una media di 3595) e 3464 km (contro una media di 3325 Km). La temperatura media dell'aria invernale è risultata invece molto al di sopra della media degli ultimi 60 anni (4.77 °C contro 3.66 °C) con un aumento in gennaio di 1.71 °C e in febbraio di 1.4 °C rispetto a quella del periodo di confronto. Di conseguenza, l'energia necessaria ad indurre la presenza di moti convettivi capaci di agire dalla superficie al fondo del lago, non è stata sufficiente ad innescare una piena circolazione delle acque del lago.

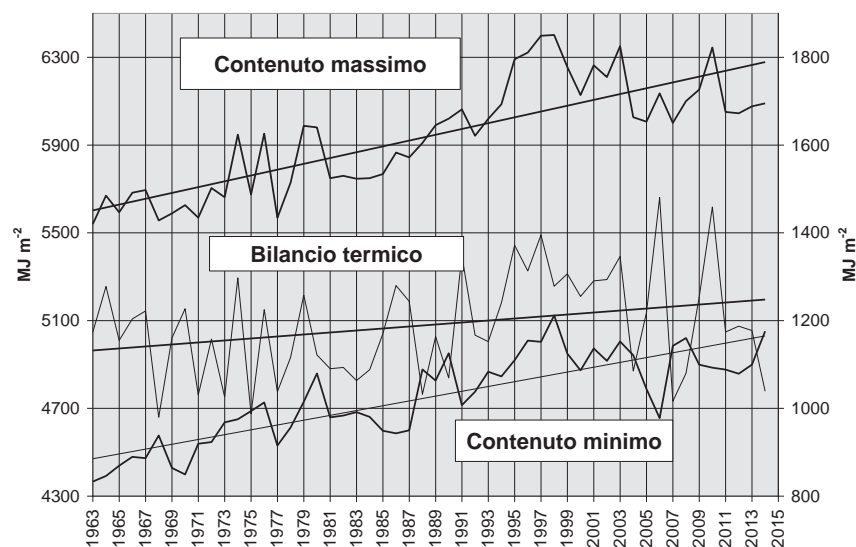


Fig.2.1. Contenuti di calore e bilancio termico delle acque del Lago Maggiore nel periodo 1963-2014.

Il contenuto di energia totale entro la massa lacustre nel 2014 ha subito nel periodo invernale un leggero aumento (5051 MJm^{-2}) rispetto ai 5 anni precedenti, in cui non si superavano i 5000 MJm^{-2} . In estate, si sono raggiunti 6090 MJm^{-2} , dato sugli stessi valori dal 2011 ma molto al di sotto di quello del 2010 (6344 MJm^{-2}) e del 1998, quando con 6.401 MJm^{-2} si è stabilito il massimo assoluto del cinquantennio (Fig. 2.1 e Fig. 2.2).

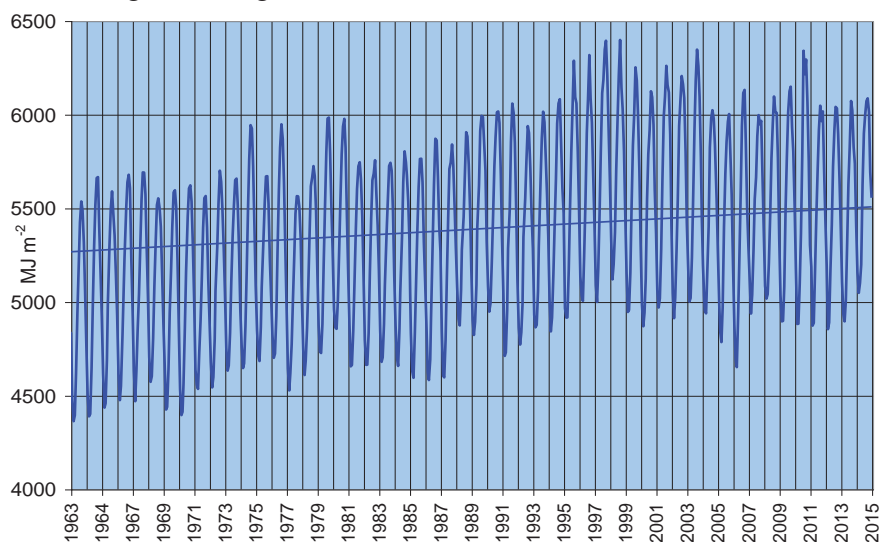


Fig. 2.2. Andamento mensile del contenuto di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963-2014.

E' altrettanto importante rilevare come la quantità di calore contenuta nell'ipolimnio profondo del lago, sede della così detta "memoria climatica" (Ambrosetti & Barbanti, 1999), dopo un periodo in diminuzione dal 2005 al 2007 (di portata simile a quella riscontrata nel 1981) ha ripreso ad aumentare sino al portandosi a 1428 MJm^{-2} nel dicembre 2014 (Fig. 2.3).

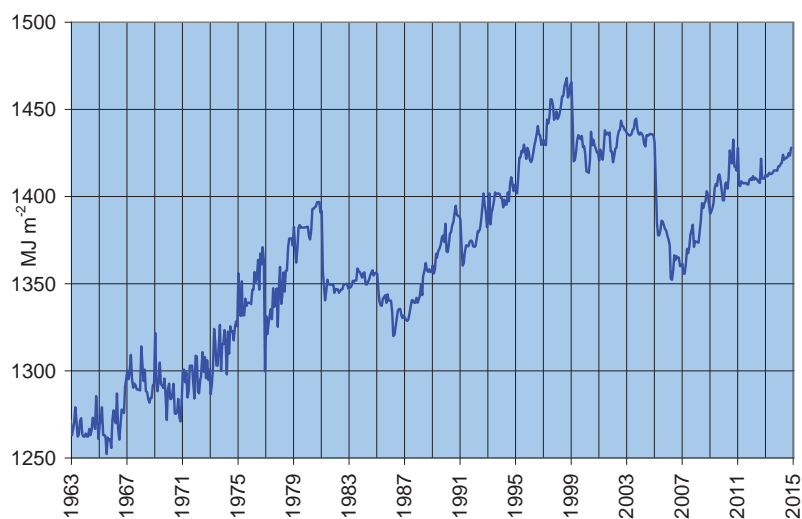


Fig. 2.3. Andamento della memoria climatica nel Lago Maggiore nel periodo 1963-2014.

Per quanto riguarda la profondità di mescolamento per moti convettivi, nell'inverno 2013-2014 si sono raggiunti i 65 metri di profondità. Questo è visibile in Fig. 2.4 in cui è rappresentata la distribuzione verticale della concentrazione di O_2 misurata dalla superficie al fondo del lago: l'isolinea 9.0 mg l^{-1} si mantiene per tutto l'anno tra 50 e 100 metri di profondità, così come quella quotata 8.0 mg l^{-1} attorno a -100 m.

Nella zona profonda, sotto i 250 m, la concentrazione di O_2 per tutto l'anno si mantiene tra 6.5 e 7 mg l^{-1} evidenziando così la mancanza di inserimenti nell'ipolimnio profondo di acqua fredda, sia di origine litorale che per moti convettivi.

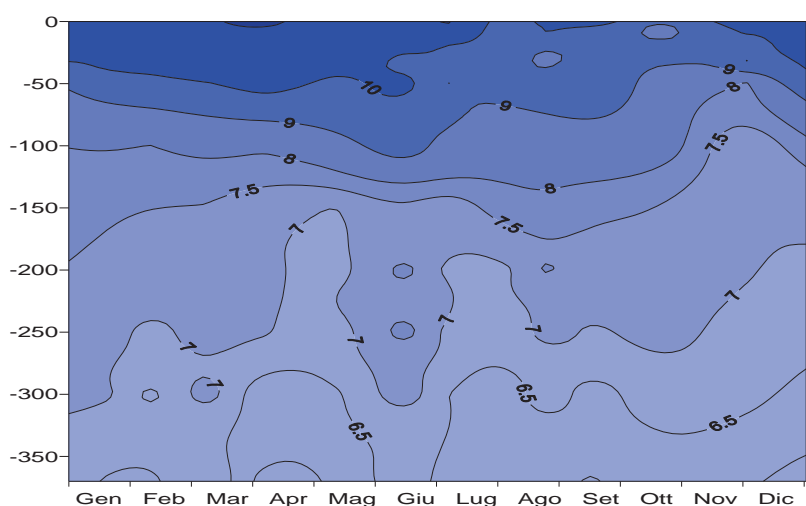


Fig. 2.4. Distribuzione verticale della concentrazione di O_2 (mg l^{-1}) nell'anno 2014.

Un'ulteriore conferma della limitata profondità raggiunta dal mescolamento nel 2014 viene fornita dalla distribuzione verticale della temperatura dell'acqua lacustre,

che indica nei mesi invernali a 65 metri un salto termico di 0.6 °C, sufficiente però ad impedire una circolazione completa (Fig. 2.5).

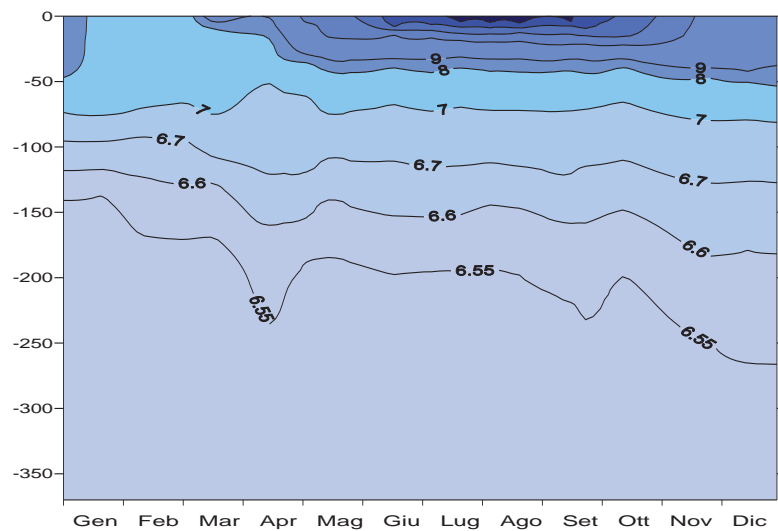


Fig. 2.5. Distribuzione verticale della temperatura (°C) nell'anno 2014.

Anche i valori della stabilità termica invernale, misurata lungo la colonna d'acqua sulla base dei dati medi mensili, confermano un mescolamento limitato a circa 65 m di profondità. I relativi profili verticali (Fig. 2.6) mostrano una decisa resistenza ai moti convettivi, che a gennaio e febbraio 2014 si colloca attorno a -65 m. La curva di marzo e ancor più quella di aprile mostrano infine come il mescolamento convettivo si sia ormai interrotto essendo già iniziata la fase di riscaldamento primaverile del lago.

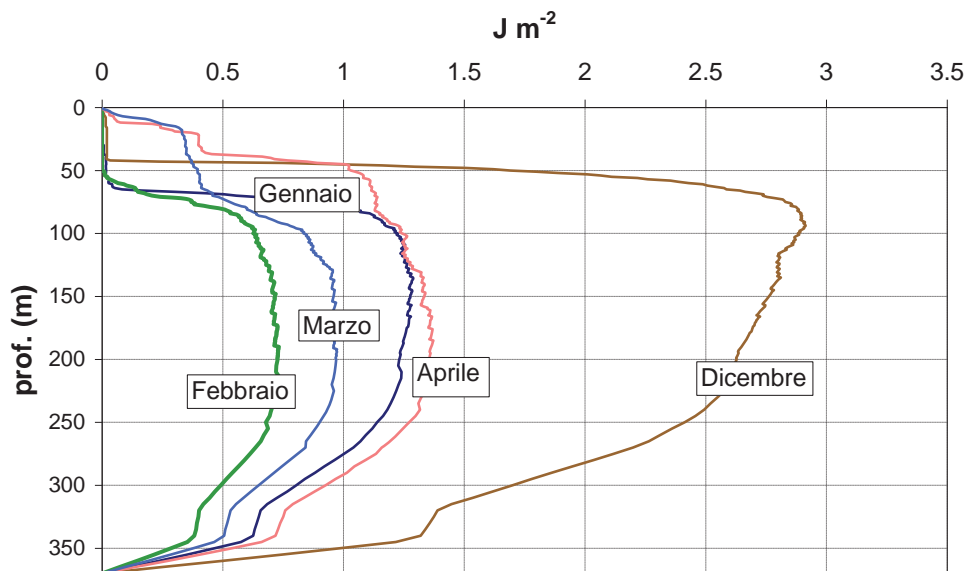


Fig. 2.6. Sequenza temporale della distribuzione verticale della stabilità termica del Lago Maggiore da Dicembre 2013 ad Aprile 2014.

2.2. Aspetti della dinamica del Lago Maggiore condizionati dal clima

I risultati dei vari modelli di regressione applicati nell'analisi statistica (presentati nel precedente rapporto, con la simbologia dei vari parametri) consentono di definire il peso, esercitato sulle principali variabili limnologiche, caratterizzanti il Lago Maggiore, dalle singole forze esterne, globale (trend), a larga scala (indici NAO_w) e scala locale (indici M); in altri termini, si ha la possibilità di cogliere la dinamica che regola la risposta idrodinamica del lago, controllata dalle variabili stesse e dalle loro relazioni reciproche.

2.2.1 Rapporto tra temperatura dell'aria e dell'acqua

Fra le componenti dei modelli di regressione riguardanti le relazioni tra gli indici NAO_w e le condizioni termiche dell'atmosfera (T_a) e dell'acqua superficiale del lago (T_w), la più significativamente legata all'indice atlantico risulta essere la temperatura massima dell'aria ($T_{a\max}$).

E' quindi la temperatura diurna dell'aria il tramite attraverso la quale la NAO_w incide con maggior peso sulla struttura termica dell'acqua del lago, quanto meno su quella superficiale; quasi ininfluenza risulta invece la temperatura minima dell'atmosfera ($T_{a\min}$), scarsamente correlata con la NAO_w e con una scarsa capacità di adattamento nel riprodurre l'andamento della variabile nel modello di regressione. Livingstone et al. (2003) sul Lago di Zurigo avevano invece attribuito alla temperatura minima giornaliera (quella notturna) il peso maggiore nella definizione della termica lacustre, in quanto determinante nel raffreddamento convettivo notturno dello strato mescolato superficiale: questo diverso risultato fra la termodinamica dei due laghi va probabilmente attribuito alla loro diversa posizione geografica, in particolare alla loro collocazione rispettivamente a nord e a sud della catena alpina.

Ad un aumento dell'indice NAO_w corrisponde al tempo $t=0$ anche una diminuzione di ΔT , cioè della differenza tra temperatura dell'acqua superficiale e quella dell'aria; trattasi di un parametro fondamentale per la valutazione delle componenti del bilancio termico del lago dal momento che una sua diminuzione comporta una minor perdita di energia ad onda lunga verso l'atmosfera, oltre che un aumento dell'energia assorbita dalla massa lacustre (nel Lago Maggiore + 0.0122 MJ m^{-2} anno⁻¹ dal 1963 ad oggi), nonché un leggero incremento dell' evaporazione e contenute perdite di calore sensibile; la conseguenza è stato quindi il raffreddamento invernale delle acque lacustri che, nel tempo, è risultato sempre meno pronunciato.

E' chiaro però che, oltre alla temperatura atmosferica, come già detto, devono essere tenuti presenti altri elementi climatici e limnologici, che sono componenti essenziali nei processi di riscaldamento delle acque, per lo più riguardanti situazioni locali.

2.2.2 Contenuto di calore

Ad un aumento dell'indice NAO_w corrisponde un incremento del contenuto di calore del lago (H_{tot}) e nel modello di regressione ridotto l'indice atlantico risulta una componente significativa sia del calore contenuto nello strato mescolato (H_{mixi}) che di quello totale; l'energia presente nella parte più profonda del lago (H_{hyp}) dipende invece essenzialmente dall'autocorrelazione e dal trend. Se ne deduce che i processi idrodinamici invernali che interessano in profondità il Lago Maggiore sono condizionati, in particolar modo, dalla situazione presente nel corpo d'acqua

nell'inverno dell'anno precedente, dal momento che la dinamica termica estiva non è in grado di “cancellare” completamente quanto, sempre in profondità, si era instaurato in precedenza. Va infatti considerato che nel periodo estivo sono solo gli strati superficiali del lago che vengono influenzati dalle condizioni esterne; il 90% dello scambio energetico annuo nel Maggiore, come negli altri laghi italiani che superano i 100 m di profondità, si verifica entro uno strato d'acqua che rappresenta il 14-16% della profondità massima (Ambrosetti et al., 2003). E' pur vero che movimenti dell'acqua di diversa natura, quali shears locali e onde interne (Michalsky & Lemmin, 1995), possono agire in maniera diversificata in rapporto alle caratteristiche morfometriche e batimetriche della conca del lago, determinando così nell'ipolimnio una variabilità della quantità di contenuto calorico, variabilità che tuttavia si presenta con un'incidenza molto modesta, non superiore al 2-4% dello scambio totale annuo.

Dai bilanci termici, valutati a livello mensile, per esempio, risulta che nell'ultimo cinquantennio i guadagni annuali del Maggiore nel periodo di stratificazione sono aumentati di 0.0101 MJ m^{-2} per anno, mentre le perdite invernali si sono ridotte di 0.0034 MJ m^{-2} per anno: la conseguenza è stato l'incremento del contenuto calorico minimo invernale (H_{mix}) soprattutto negli strati superiori alla profondità raggiunta dal mescolamento verticale. In particolare dal 1963 al 2010 il contenuto H_{toti} è aumentato dell'11.9% (mentre per quello estivo l'incremento è stato di +14.5%): il che significa che l'energia calorica invernale ha visto un aumento annuo per unità di volume sull'intera colonna, di 0.0704 J m^{-3} , distribuito in 0.0883 J m^{-3} nella parte superiore e in 0.068 J m^{-3} nell'ipolimnio (Ambrosetti et al., 2010).

Uno dei risultati più evidenti dell'analisi statistica è la costante presenza nei modelli di regressione proposti della componente “trend”, caratterizzata anche da un suo forte peso nel definire la significatività delle correlazioni fra i due indici NAO_w ed M e le singole variabili limnologiche; in altri termini c'è una incidenza notevole delle tendenze temporali che caratterizzano l'andamento di base evidenziato dalle serie temporali delle singole variabili.

Questo problema, che era già stato affrontato da Lemmin & Amouroux (2006) nelle loro ricerche sul Lago di Ginevra, introduce al tema dell'influenza dei cambiamenti climatici globali sui principali parametri fisici dell'ecosistema lacustre. Gli Autori avevano già osservato l'esistenza di un trend generale al riscaldamento negli strati superiori di quel corpo d'acqua (più forte durante l'inverno che in estate) e la causa era stata attribuita in particolare al progressivo riscaldamento dello strato limite atmosferico nelle notti invernali, con conseguente minor raffreddamento del lago.

Tuttavia la durata delle serie storiche disponibili è ancora troppo limitata per consentire una chiara definizione di quale potrà essere lo sviluppo futuro di ogni singolo parametro come conseguenza dei mutamenti in atto: la tendenza al riscaldamento globale oggi riconosciuta potrebbe rivelarsi infatti una semplice fase destinata ad esaurirsi nel tempo. Infatti, dall'analisi del contenuto di calore della memoria climatica nelle acque del Lago Maggiore, così come degli altri laghi profondi sud-alpini (Ambrosetti & Barbanti, 1999) appare con molta evidenza dal 1800 ad oggi la presenza di almeno quattro fasi di riscaldamento (e di altrettante di raffreddamento) che dal punto di vista delle quantità di contenuto energetico raggiungono livelli estremi simili a quelli verificatisi a partire dal 1985 (Carrara et al., 2009).

2.2.3 Profondità di mescolamento

I processi di mescolamento verticale che la massa d'acqua del Lago Maggiore evidenzia alla fine dell'inverno limnologico traggono la loro origine dall'azione sinergica sia delle forze esterne a larga scala (nel nostro caso sintetizzati dagli indici NAO_w) che di quelle locali (indici M), con queste ultime che risultano le più incisive. Dalle analisi statistiche emerge che l'indice atlantico influenza debolmente M , ma questo, a sua volta, incide fortemente sulla profondità del mescolamento verticale tardo invernale (D_m): infatti la significatività del legame tra l'indice M , depurato dall'effetto NAO_w , e D_m supera abbondantemente quella con l'indice atlantico rendendo tra l'altro non significativa la componente autoregressiva presente nel relativo modello.

La fase autunnale di raffreddamento della massa d'acqua è dovuta in buona parte alle componenti del parametro M , il quale è costituito esclusivamente da elementi meteo locali, in particolare dal vento e dalla radiazione solare che agiscono in maniera opposta: il primo è il motore principale della turbolenza che favorisce i processi convettivi, mentre l'azione radioattiva tende a favorire il galleggiamento. Tuttavia, sull'intero areale del Lago Maggiore, a partire dagli anni settanta, la quantità di vento filato ha subito una sensibile riduzione, come evidenziato dal trend della serie storica relativa che presenta, proprio in quegli anni, una rottura significativa del suo andamento; viceversa, la radiazione solare effettiva, intorno agli anni '90, ha mostrato un notevole incremento (Ambrosetti et al., 2006). Col concorso di ambedue queste variazioni della meteorologia locale si è assistito all'affermarsi nel Lago Maggiore di una serie di mescolamenti verticali invernali che hanno interessato solo una parte della colonna d'acqua senza mai raggiungere la massima profondità del lago.

Il fatto che le due citate componenti di M non presentino alcun legame con l'indice NAO_w (p-values non significativi), è probabilmente da attribuire alla posizione geografica del Maggiore, sud-marginale all'arco della catena alpina che agisce da ostacolo alle oscillazioni atlantiche, particolarmente per quanto attiene alle loro condizioni anemologiche. Anche dai risultati del cross-correlogramma si osserva come la relazione tra l'indice NAO_w e i due parametri suddetti sia di entità modesta. Di conseguenza, le corrispondenti rappresentazioni grafiche che risultano dall'applicazione del modello di regressione mostrano una scarsa capacità di adattamento nel riprodurre l'andamento delle variabili prese in esame.

2.2.4 Concentrazioni dell'ossigeno ipolimnico

Dalle profondità raggiunte dal mescolamento verticale invernale dipendono, come è ovvio, le concentrazioni di O_2 presenti nei livelli più depressi dell'ipolimnio che, per quanto riguarda questo lavoro, sono state calcolate per lo strato al di sotto di 250 m. Al pari della profondità di mescolamento, anche le concentrazioni di O_2 risultano quindi dipendenti dalle forze esterne locali: il modello di regressione relativo al valore di M (p-value 0.0001) e alla sua componente auto-regressiva (p-value 0.004) mostrano infatti un buona capacità di adattamento nel riprodurre l'andamento della variabile O_2 con le rispettive serie temporali che, nel corso degli anni, mostrano andamenti quasi paralleli. Sono tuttavia evidenti alcune nette diversificazioni che si riscontrano in anni particolari e che si spiegano con il fatto che i processi di ossigenazione profonda sono avvenuti attraverso meccanismi diversi dal tipico mescolamento convettivo verticale; tra questi vanno ricordati, per esempio,

l'infossamento di acque fredde litorali o la discesa in profondità di acque di fusione delle nevi (Ambrosetti et al., 2010).

2.2.5 Stabilità termica

La progressiva riduzione delle profondità del mescolamento invernale nel Lago Maggiore, evidenziata in situ dalla presenza di seppur modesti gradienti verticali della temperatura e di alcuni parametri chimici, ha comportato anche un aumento della stabilità termica (S_t), calcolata per unità di volume (quella di natura chimica è del tutto trascurabile in questo lago). Dall'analisi delle stime dei coefficienti dei modelli di regressione di M e NAO_w nei confronti stabilità termica totale, valutata cioè sull'intera colonna d'acqua, si rileva come l'indice relativo alla situazione meteorologica locale, oltre a mostrare coefficienti più significativi, presenti una migliore capacità di adattamento nel riprodurre l'andamento della variabile stessa.

La S_t totale ha assunto un valore nullo solo nel 1963 ad indicare l'avvenuta completa omogeneizzazione verticale delle acque lacustri mentre negli anni successivi si sono registrati valori bassi solo nel 1969 (45.1 J m^{-3}) e nel 1970 (113.1 J m^{-3}), anni nei quali il mescolamento verticale, per altro incompleto, ha raggiunto ragguardevoli profondità (rispettivamente di m 250 e m 300: le S_t dello strato mescolato sono state di 33.7 J m^{-3} nel 1969 e di 101 J m^{-3} nel 1970, mentre quelle ipolimniche sono risultate quasi simili attorno ai 12 J m^{-3} . Negli anni successivi i valori di stabilità si sono sensibilmente innalzati, in particolare nello strato ipolimnico con un aumento medio annuo del 15% rispetto a quelli dello strato mescolato e con punte superiori del 100% negli anni 2008 e 2009: si è così determinata una sempre più evidente netta separazione tra gli strati superiore e inferiore del lago, a conferma del ridotto mescolamento convettivo verticale tardo invernale riscontrato in questi anni (Ambrosetti et al., 2010).

2.2.6 Rapporti tra gli indici M , NAO_w e Trend

L'analisi statistica dei dati relativi al Lago Maggiore ha constatato come l'indice M , alla cui formulazione concorrono, come si è detto, esclusivamente parametri limno-meteorologici locali, determini un impatto molto significativo sulle sue principali caratteristiche fisiche, sia quando opera in sinergia con l'azione esercitata dall'indice atlantico invernale, sia quando è depurato dall'effetto di quest'ultimo; in particolare, l'azione di M , privata degli effetti a grande scala, non ha alcuna incidenza sui contenuti di calore (H) ma solo sulla profondità di mescolamento (D_m) e, in parte, sulla concentrazione di ossigeno negli strati profondi. Infatti, l'incidenza dominante nei modelli dei residui è data dalla componente autoregressiva e dal trend, quest'ultimo generato principalmente dall'evoluzione climatica globale in atto a cui sono soggetti i due indici qui considerati. L'indice NAO_w invece risulta più legato al contenuto energetico presente nel lago, soprattutto quello degli strati più superficiali.

I due indici (M in progressiva diminuzione dal 1963, mentre in crescita è NAO_w) risultano determinanti, rispettivamente, nella riduzione dello spessore dello strato mescolato e nel suo progressivo riscaldamento: questo ha acuito la differenza di stabilità lungo la colonna d'acqua a livello del salto termico, riducendo nel contempo la possibilità di una sua completa omogeneizzazione. Infatti, se Vollenweider (1964), sulla base dei dati allora disponibili, supponeva episodi di mescolamento verticale completi ogni sette anni circa, dal 1963 eventi simili non si sono più verificati (Ambrosetti et al., 2010). Due le principali conseguenze che ne

sono derivate: il possibile isolamento delle acque degli strati più profondi, per altro in parte superato per la presenza di altri meccanismi atti alla loro ossigenazione e l'allungamento del tempo di ricambio delle acque del lago, attualmente stimato in quattro anni per la massa d'acqua fino a 120 m di profondità, e di un valore a due cifre per quella sottostante (Ambrosetti et al., 2011).

I risultati dei modelli di regressione proposti dall'analisi statistica mostrano, come si è visto, una loro buona capacità di adattamento nel riprodurre i trends, effettivamente misurati, dei diversi parametri limnologici: tuttavia non mancano evidenti differenziazioni fra le due serie di dati, sopra tutto in occasione di eventi di carattere eccezionale con le curve proposte dai modelli che evidenziano picchi molto pronunciati, sia verso l'alto che verso il basso, per altro limitati nel tempo alla durata dell'evento stesso.

La presenza di queste irregolarità era già stata testimoniata dall'andamento a denti di sega della "memoria climatica", riconosciuta da Ambrosetti & Barbanti (1999) non solo nel Lago Maggiore ma anche in tutti i grandi laghi subalpini. Detti eventi, ancorché isolati, possono causare importanti stress all'ecosistema lago; di qui la necessità di una ancora più dettagliata analisi degli eventi che portano a queste situazioni particolari.

La già ricordata costante presenza di trends, in aumento o in diminuzione, nelle serie temporali sperimentali di quasi tutti i parametri limnologici, trends che risultano componenti fondamentali dei modelli di regressione proposti, sottolinea che, accanto agli impatti sul lago della variabilità meteorologica locale e delle fluttuazioni delle oscillazioni atlantiche, si riscontrano effetti legati ai cambiamenti climatici a livello globale: in particolare negli ultimi decenni va riconosciuto l'incremento della temperatura atmosferica, della quale, anche la nostra indagine, ha evidenziato la forte incidenza sulle strutture termiche dei laghi.

2.2.7 Conclusioni

Una delle conseguenze del riscaldamento climatico in atto potrebbe quindi essere l'aumento del rischio di anossie delle acque. L'azione del mutamento climatico globale gioca un ruolo non trascurabile nel condizionare i meccanismi interni all'ecosistema e in particolare, la termodinamica di un lago profondo come il Maggiore.

In particolare il forcing a larga scala incide sui contenuti profondi dei grandi laghi, eventi che, a lungo termine, potranno anche contro-agire agli 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, sulle quali è ancora aperta la discussione circa la loro effettiva portata e sulle cause che le generano, deve essere presa in considerazione anche la possibile incidenza di altre cause esterne, 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., Barbanti L. & N. Sala. 2003. Residence time and Physical processes in lake. International conference on Residence Time in Lakes: Science, Management, Education. September 29th- October 3rd Bolsena Viterbo, *J. Limnol.* 62 (Suppl.): 1-15.

- Ambrosetti, W., L. Barbanti & A. Rolla. 2006. The climate of Lago Maggiore area during the last fifty years. *J. Limnol.*, 65 (Suppl. 1): 62 pp.
- 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.
- Carrara, E.A., L. Barbanti & W. Ambrosetti. 2009. Deep waters warming in Italian lakes: secular variation. *Atti AIOL-Site. Ancona 2007*: 554-561.
- Lemmin, U. & A. Amouroux. 2006. The influence of climate change on Lake Geneva. *Verh. Internat.Verein. Limnol.* 29: 1806-1810.
- Livingstone.D.M. 2003. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. *Climate change* 57: 205-225.
- Michalsky, J. & U. Lemmin. 1995. Dynamics of vertical mixing in the hypolimnion of a deep lake: Lake Geneva. *Limnol Oceanogr.*, 40 (4):809-816.
- Vollenweider, R.A.1964. Ueber oligomiktische Verhältnisse des Lago Maggiore und einiger anderer insubrischer Seen. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 17: 191-206.