

2. PROFONDITA' DI MESCOLAMENTO E VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RESIDENZA DELLE ACQUE DEL LAGO MAGGIORE

Valter Ambrosetti, Luigi Barbanti, Mario Contesini, Angelo Rolla

2.1 Profondità di mescolamento

La verifica dell'effettiva profondità dello strato mescolato invernale nel Lago Maggiore nel 2013 è stata condotta, come per il passato, attraverso una serie di sopralluoghi nel suo punto più profondo: lo scopo era appunto 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 quest'anno, come del resto negli ultimi 50 anni, l'omogeneizzazione delle sue acque per moti convettivi è risultata incompleta (Ambrosetti *et al.* 2010). Quest'ultimo processo ormai è divenuto per il Lago Maggiore più l'eccezione che la regola. E' infatti ormai ampiamente confermato a livello mondiale che negli ultimi decenni si è verificata la tendenza ad un accumulo di calore nelle acque dei grandi laghi tale da impedire la loro circolazione completa nella stagione invernale e conseguentemente un'adeguata ossigenazione delle acque profonde.

Le stesse indagini hanno confermato quanto già sottolineato nei vari rapporti annuali precedenti circa gli effetti sulla profondità del mescolamento determinati da alcuni parametri meteo-limnologici: in particolare vento, radiazione solare, temperature dell'aria e dell'acqua superficiale, responsabili nel produrre o nel limitare l'energia necessaria ad indurre moti convettivi dalla superficie al fondo del lago. Nel corso dei tre mesi invernali si è avuto sull'intero bacino lacustre verbanese un leggero aumento del percorso del vento (11.306 km contro una media pluriennale di 10.744 km) mentre la temperatura media dell'aria si è mantenuta sui livelli del periodo di confronto (3.57 °C contro 3.66°C).

In particolare sono da segnalare i valori di febbraio, elevati per quanto riguarda il percorso del vento (3.836 km contro una media di 3.246 km) ed una temperatura dell'aria di 1.14°C inferiore alla media. Ciò ha comportato una circolazione delle acque superficiali per convenzione sino a -120 m, sui livelli del 2012, ma comunque assai limitata rispetto ai 370 metri della massima profondità del corpo d'acqua.

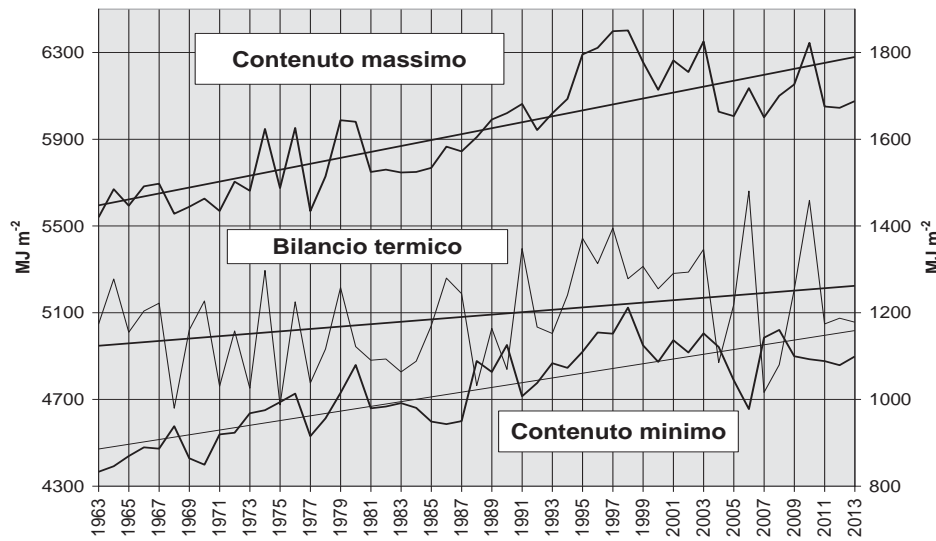


Fig.2.1. Contenuti di calore e bilancio termico delle acque del Lago Maggiore nel periodo 1963-2013

Più in dettaglio, come risulta dalle Figg. 2.1 e 2.2, il lago negli ultimi 50 anni, risentendo in particolare dell'evoluzione climatica globale, è stato caratterizzato durante il periodo invernale da un progressivo riscaldamento (10.42 MJ m^{-2} per anno) pur mantenendosi nel 2013 sui livelli degli ultimi sette anni: nella prima delle due figure sono rappresentati i contenuti massimi estivi, minimi invernali e il bilancio termico annuale, nella seconda l'andamento mensile dell'energia totale presente nelle acque del lago. Il calore minimo nell'intera massa d'acqua nell'inverno 2013 è risultato di 4898 MJ m^{-2} in febbraio mentre il massimo con 6076 MJ m^{-2} si è verificato in Agosto, entrambi sui valori degli ultimi 4 anni. Il tutto è confermato anche dal contenuto calorico nell'ipolimnio profondo, sede della così detta "memoria climatica" (Ambrosetti & Barbanti, 1999), che si è stabilizzato per tutto l'anno, così come dal 2011, attorno ai 1413 MJ m^{-2} (Fig. 2.3).

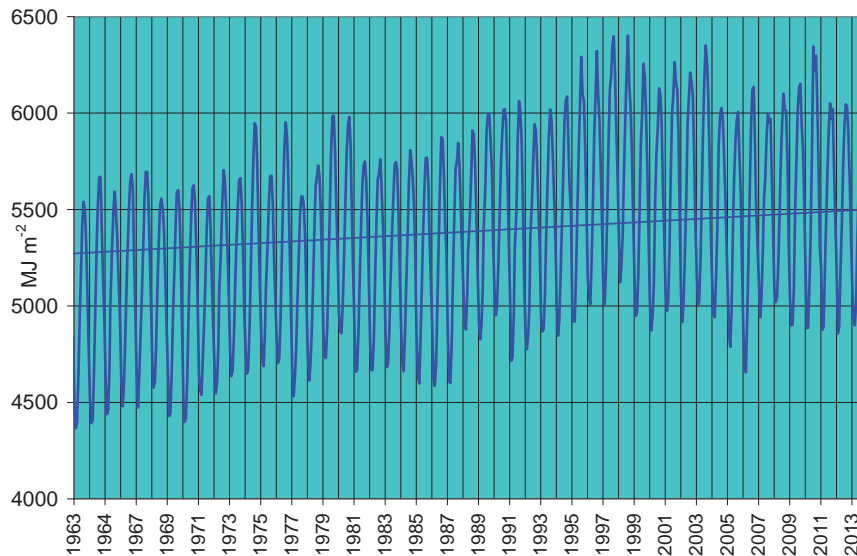


Fig. 2.2. Contenuto di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963- 2013

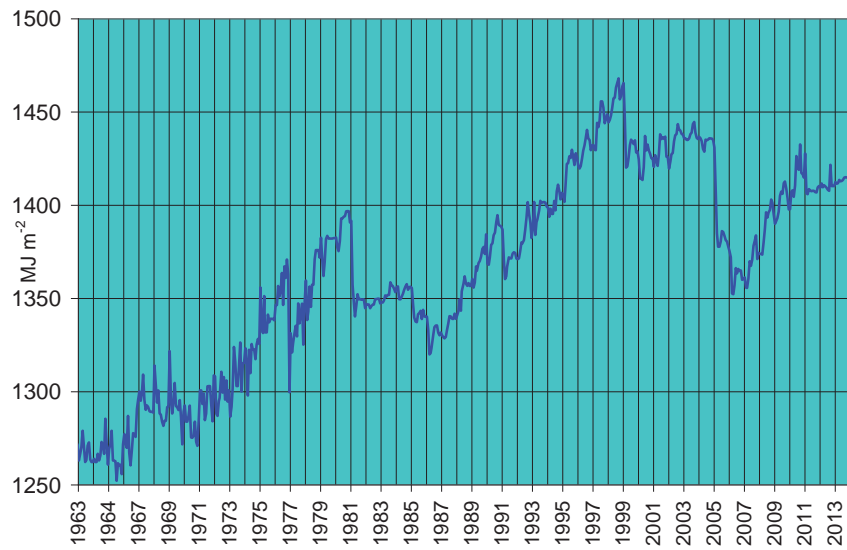


Fig.2.3. Andamento della memoria climatica nel Lago Maggiore periodo 1963-2013

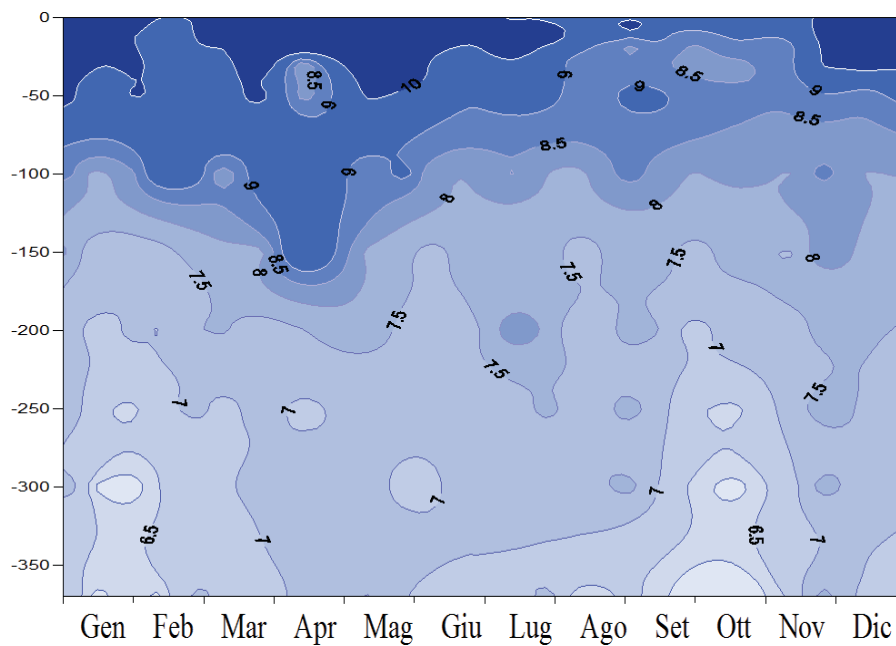


Fig.2.4. Distribuzione verticale della concentrazione di O_2 ($mg\ l^{-1}$) nel 2013

In Fig. 2.4 è presentata la concentrazione di O_2 dalla superficie al fondo del lago misurata come di consueto al largo di Ghiffa nel 2013. L'isolinea $8,5\ mg\ l^{-1}$ delimita la profondità di mescolamento mantenendosi per tutto l'inverno 2012-2013 tra 80 e 120 m di profondità. Sul fondo del lago una zona con valori tra $7,0$ e $7,5\ mg\ l^{-1}$ occupa una cospicua parte dell'ipolimnio tra marzo e aprile probabilmente dovuta ad infossamento di acqua fluviale in seguito alle elevate precipitazioni di

marzo (141.8 mm contro una media pluriennale di 109 mm) e, soprattutto di aprile (339 mm rispetto ad una media di 176mm). Una ulteriore conferma della modesta profondità raggiunta dalla circolazione invernale viene fornita dalla distribuzione verticale della temperatura dell'acqua lacustre, che presenta nel trimestre invernale un gradiente verticale, seppure debole, ma evidente a circa -120 m (Fig.2.5).

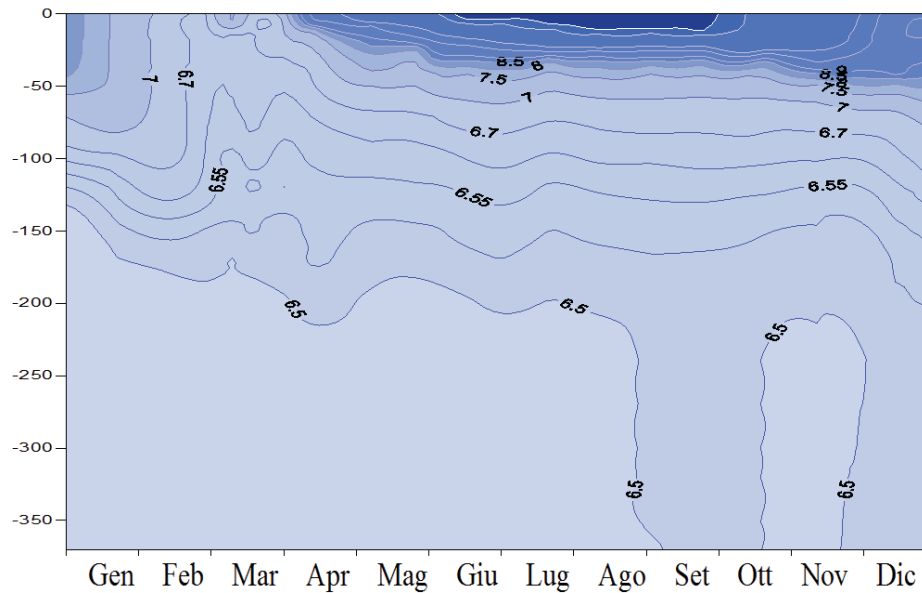


Fig.2.5. Distribuzione verticale della temperatura dell'acqua (°C) nel 2013

Anche i valori della stabilità termica (cioè della misura della quantità di energia necessaria per omogeneizzare la colonna d'acqua) confermano la profondità di mescolamento verticale di -120 m, indicata in precedenza, (Fig.2.6). I profili verticali della stabilità mostrano a dicembre 2012 e gennaio 2013 una resistenza ai moti convettivi collocata a circa 50 m di profondità per effetto della persistenza di gradienti termici lungo la colonna. In febbraio quest'ultimo effetto è invece visibile tra 100 e 120 m di profondità. La curva di marzo, e ancor più quella di aprile, mostrano infine come il mescolamento convettivo si sia ormai interrotto e sia già iniziata la fase di riscaldamento del lago.

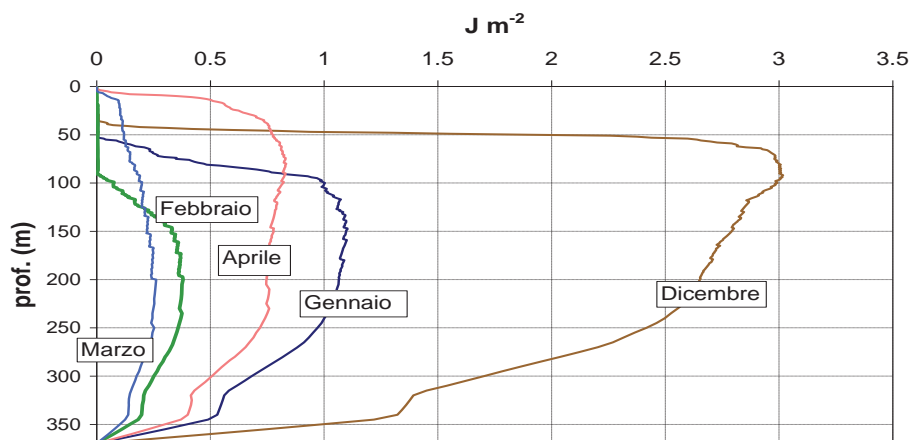


Fig.2.6. Sequenza temporale della distribuzione verticale della stabilità del Lago Maggiore da dicembre 2012 ad aprile 2013

2.2 Idrodinamica del Lago Maggiore: dipendenza dalla NAO, dal tempo locale e dal trend climatico

In letteratura sono largamente documentati gli effetti della variabilità climatica sulle caratteristiche fisiche, e più in generale ecologiche, sia degli ambienti delle acque interne (Gerten & Adrian, 2002; Straile, *et al.* 2003), che di quelle marine (Krichak & Alpert, 2005; Molinero *et al.*, 2007). In particolare gli ecosistemi lacustri, a dispetto della loro diversità morfologica e geografica, appaiono validi testimoni alle variazioni meteo-climatologiche non solo per la loro sensibilità ai mutamenti esterni, ma anche perché ne rispondono con rapidità, integrando anche le informazioni relative a tutti gli eventi naturali e antropici che avvengono nel loro bacino imbrifero (Adrian *et al.*, 2009).

In effetti, nell'ultimo cinquantennio le grandi masse d'acqua, sotto la spinta delle forze esterne, hanno visto modificarsi rapidamente i rapporti tra le varie forme di scambio energetico tra la loro superficie, l'atmosfera sovrastante e l'ambiente circostante (Ambrosetti, *et al.* 2003), il che ha determinato una sensibile modificazione delle loro condizioni idrodinamiche, nonché dell'accumulo di calore entro la massa d'acqua. Nei grandi laghi profondi a sud delle Alpi e in particolare nel Lago Maggiore, si sono modificate le profondità del loro mescolamento invernale, nonché i processi di convezione turbolenta, la stabilità termica e le modalità di immissione di acque fredde e ossigenate provenienti dai tributari: ne sono perciò derivate anche profonde ripercussioni sul tempo reale di rinnovo delle acque che è andato sempre più incrementando (Ambrosetti, *et al.* 2011; Ambrosetti, *et al.* 2010; Castellano, *et al.* 2010; Ambrosetti *et al.* 2012).

Una serie di indagini sui laghi di tutto il mondo ha provato la correlazione tra i parametri limnologici e gli indici connessi ai movimenti oceanici a grande scala quali l'ENSO (El Nino Southern Oscillation) in America e la NAO (North Atlantic Oscillation) in molta parte dell'Europa. Alle medie ed alte latitudini dell'emisfero nord sono stati riconosciuti almeno una dozzina di modelli diversi di connessioni e tra questi quello relativo alla NAO costituisce il solo modello che si manifesta lungo tutto l'arco dell'anno, anche se le anomalie climatiche associate ad essa sono più evidenti durante i mesi dell'inverno quando l'atmosfera è dinamicamente più attiva (Hurrell, 1995).

Come è noto, la NAO è misurata da indici derivati dalla differenza di pressione atmosferica a livello del mare tra un sito nell'area di bassa (Islanda) ed un altro in quella di alta (Azzorre). Valori altamente positivi degli indici invernali delle oscillazioni atlantiche (NAO), testimoni di elevati gradienti barici, indicano la presenza di forti circolazioni zonali sul Nord Atlantico, con conseguenti inverni miti e piovosi sull'Europa occidentale e settentrionale, mentre bassi gradienti della suddetta differenza di pressione determinano solo deboli circolazioni nord-atlantiche cui, di norma, seguono inverni freddi su gran parte dell'Europa.

2.2.1 Scopo del lavoro e metodologia

La maggior parte degli studi sulla dipendenza dell'idrodinamica lacustre dalle forze esterne si sono orientati unicamente su alcuni parametri, quali ad esempio la temperatura dell'aria o il vento, spesso considerati singolarmente, mentre la completa comprensione delle basi meccanicistiche che sostengono le risposte limnologiche alle

forze esterne richiede necessariamente l'identificazione di tutti i fattori mediatori (Castellano, *et al.* 2008; Castellano, *et al.* 2010) tenendo conto anche delle loro reciproche interferenze.

Questo lavoro cercherà di appurare attraverso analisi statistiche in che modo la dinamica interna in un lago profondo come il Maggiore sia connessa alle due principali forze meteorologiche esterne (locale (M) e a grande scala NAO) che, in sinergia o indipendentemente, influiscono sul sistema lacustre, prescindendo almeno in fase iniziale dagli effetti del cambiamento climatico globale.

La ricerca ha avuto luogo grazie alla disponibilità di serie temporali di più di 50 anni, riguardanti la termica e i contenuti energetici presenti nell'intera massa d'acqua, la sua stabilità, la profondità di mescolamento e le sue principali caratteristiche chimiche, in particolare il contenuto di ossigeno ai livelli più profondi al termine dell'inverno limnologico. I dati di temperatura dell'acqua sull'intera colonna nel punto di massima profondità del lago sono stati raccolti dal CNR-ISE di Pallanza dal 1963 ad oggi con l'utilizzo di termometri a rovesciamento e sonde termometriche: la frequenza delle misure in situ, inizialmente mensile, divenne decadica, a partire dagli anni '70, con rilevamenti ancora più fitti in occasione di eventi meteorologici particolari. In contemporanea a queste misure sono stati prelevati campioni di acqua per le analisi dei parametri chimici di base usati in limnologia.

I contenuti calorici e quelli della stabilità termica di Walker (1974), valutati metro per metro dalla superficie al fondo del lago, sono stati calcolati con l'ausilio del programma LIMNOX (Ferris, 1989; Ambrosetti & Barbanti, 1999; Ambrosetti *et al.*, 2010). Si è proceduto a definire il contenuto di calore presente nel lago al momento di massima circolazione verticale, quando cioè si raggiunge la temperatura minima su tutta la colonna, per altro suddividendo le quantità energetiche presenti nello strato mescolato da quelle contenute nell'ipolimnio e cioè valutando i volumi dei due strati sulla base della profondità raggiunta, anno per anno, dal mescolamento. Quest'ultima ha potuto essere verificata non solo attraverso la distribuzione verticale della temperatura dell'acqua ma anche considerando le concentrazioni lungo la colonna d'acqua di alcuni parametri chimici quali ossigeno, silicati, nitrati e conducibilità elettrica.

L'insieme dei dati meteorologici è stato registrato con continuità dalla stazione operante presso lo stesso ISE, situata cioè a poche decine di metri dalla riva del lago. Per i tre mesi invernali è stato calcolato un indice meteo-limnologico locale, il parametro adimensionale M, che è stato valutato tenendo conto del vento (V) e della differenza tra le temperature dell'acqua lacustre in superficie e dell'aria (ΔT), fattori dai quali dipendono la turbolenza e quindi anche i moti convettivi, nonché della radiazione solare (R) che favorisce invece il galleggiamento secondo la formula:

$$M = (V^2 \cdot \Delta T^{1,5}) / R.$$

Ai dati mensili è stata poi applicata una ponderazione sulla base della differenza temporale fra i singoli mesi e il momento del massimo turnover invernale (per maggiori dettagli si veda Ambrosetti & Barbanti, 1999; Ambrosetti *et al.* 2010). Analoga ponderazione è stata applicata ai dati meteorologici, mentre gli indici NAO, per altro anch'essi limitati ai soli tre mesi invernali, sono stati ottenuti dalla pagina <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao/nao.dat>. Quanto alla quantità di ossigeno

disciolto, parametro fondamentale per quanto attiene alla dinamica del mescolamento invernale del lago, si è considerata la sua concentrazione media presente al termine dell'inverno limnologico nello strato d'acqua al di sotto dei 250 metri di profondità.

2.2.2 Procedura statistica

La connessione tra le variabilità sia del parametro M, le cui caratteristiche sono state presentate precedentemente, sia dell'indice NAO, con le condizioni fisiche e chimiche presenti nel lago è stata analizzata statisticamente dopo aver proceduto alla standardizzazione dei dati delle singole serie storiche in modo da essere maggiormente confrontabili nella loro dinamica ed eliminando così anche le differenze di scala.

Le analisi sono state svolte in tre fasi.

a) Si è presa in considerazione l'autocorrelazione dei dati delle serie storiche del parametro M e della NAO nonché dei principali parametri limnologici di interesse. È stato così possibile valutare la cosiddetta "memoria" della variabile selezionata, vale a dire, quanto una osservazione ad un certo tempo influenza il futuro di se stessa (Box *et al.* 2008). Successivamente si è quantificata la correlazione tra le due variabili M e NAO, e tra ciascuna di queste e i parametri limnologici selezionati, utilizzando i coefficienti di correlazione di Pearson. Considerando però che quest'ultima analisi non prende in considerazione l'effetto sinergico tra le diverse variabili sono stati costruiti modelli utili per trovare il peso statistico tra i vari parametri.

b) Per valutare l'effetto combinato del clima locale (M) e regionale (NAO) sull'idrodinamica del lago, si sono utilizzati modelli Autoregressive Integrated Moving. Questi descrivono la variazione di una variabile esprimendo il suo valore in un certo tempo t in funzione dei valori passati (a volte $t-1$, $t-2$, ..) e dei valori di altre variabili esplicative (a tempi t , $t-1$, $t-2$, ..). L'effetto delle componenti nei vari modelli è stata stimata usando "the Maximum-Likelihood Approach".

I modelli ARIMA di questo studio descrivono l'effetto di NAO su M così come l'effetto di tali indici sui parametri limnologici selezionati. Tutti i modelli ARIMA hanno tenuto conto dell'effetto di una tendenza pluriennale sulla variabile dipendente, che è stata presa in considerazione inserendo un termine nei modelli che aumenta linearmente con il tempo. Successivamente sono stati sviluppati ulteriori modelli ARIMA definiti come "ridotto" che hanno eliminato i parametri statisticamente insignificanti nelle procedure iniziali, inoltre le varie componenti del modello sono state stimate utilizzando l'approccio di massima verosimiglianza. Per ogni relazione d'interesse sono stati considerati diversi modelli al fine di selezionare la migliore rappresentazione statistica dei dati disponibili. I criteri applicati sono:

- 1) la significatività statistica dell'effetto stima come determinato dalla t-test;
- 2) la bontà di adattamento del modello, come misurato dai criteri di "Akaike Information Criteria", che è considerato essere appropriato per il confronto di modelli non gerarchici (Brockwell & Davis, 2009);
- 3) esame visivo della sovrapposizione delle serie temporali tra variabile dipendente osservata e quella prevista dal modello.

c) successivamente per valutare se il rapporto tra M e gli altri parametri limnologici potrebbe essere spiegato dalla relazione tra M e NAO sono stati estratti dal migliore modello di M in funzione di NAO i residui (che rappresentano la quota di variabilità della serie storica di M non spiegata dalla variabile NAO) cioè le

differenze tra i valori di M rilevati ed i corrispondenti valori di M modellati. Tali residui sono stati usati come variabile esplicativa in una serie di nuovi modelli ARIMA per spiegare la variabilità dei parametri limnologici di interesse. Tutte le analisi sono state eseguite utilizzando il software v9.1 SAS. Tutte le ipotesi testate sono state considerate statisticamente significativa se il corrispondente p-value è inferiore a 0.05.

2.2.3 Primi risultati

I risultati iniziali pongono in evidenza che la dinamica interna di un corpo d'acqua profondo come il Lago Maggiore, durante la fase di mescolamento invernale è fortemente dipendente dalle due principali forze esterne (M e NAO) e mettono in evidenza come queste ultime possono agire in sinergia o indipendentemente, sull'ecosistema lago.

Le analisi statistiche hanno posto in evidenza come le condizioni meteorologiche locali, private degli effetti di forcing a grande scala, abbiano un'incidenza significativa sulla profondità raggiunta dal mescolamento e, quindi, sulle concentrazioni di ossigeno in profondità; scarso invece il loro peso sui contenuti di calore presenti nella massa d'acqua, sia nello strato mescolato che nell'ipolimnio, che sono invece condizionati per lo più dalla variabilità delle oscillazioni atlantiche. Oltre alla componente autoregressiva, un'incidenza importante in tutti i modelli ARIMA proposti è stata anche quella di un trend pluriennale, evidentemente connesso all'evoluzione climatica globale in atto. Sul Lago Maggiore è quindi l'azione sinergica delle forze esterne rappresentate dalle condizioni meteorologiche locali, dalle oscillazioni atlantiche e dai mutamenti climatici globali che condizionano l'idrodinamica lacustre nella fase invernale; queste agiscono comunque in maniera ponderatamente diversa sulle variabili fisico-limnologiche che caratterizzano tali meccanismi. Si può quindi sostenere che i meccanismi interni del Lago Maggiore, e non solo, oltre che legati ad un forcing climatico a grande scala a loro volta connessi al cambiamento globale, sono fortemente vincolati alle condizioni meteorologiche locali. Condizioni che verranno analizzate con maggior dettaglio considerando la loro influenza sulle diverse caratteristiche limnologiche del corpo d'acqua.

Bibliografia

- Adrian, R., O'Reilly, H. Zagarese, S.B. Baines, d.O. Hessen, w. Keller, D.M. livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk, G. A.Weyhenmeyer & M. Winder. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnol. Oceanogr.* 54 86 part 29: 2283-2297.
- Ambrosetti, V., L. Barbanti.1999. Deep water warming in lakes: an indicator of climatic change. *J. Limno.* 58 (1):1-9.
- Ambrosetti, V., 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. 2011. Profondità di mescolamento e valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri. *Ricerche sull'evoluzione del Lago Maggiore. Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2008-2012. Campagna 2010.* Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere (Ed.): 12-35.

- 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, 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.
- Box G.E.F., Jenkins G.M. & Reinsel G.C., 2008. *Time Series Analysis – Forecasting and control*. Wiley series in Probability And Statistic. Fourth Edition: 729 pp.
- Brockwell, P. & R.A. Davis, 2009. *Introduction to Time Series and Forecasting* (Second Edition) vol.1: 429 pp,
- Castellano L., Ambrosetti V., Sala N. 2008. About the use of computational fluid dynamic (CFD) in the framework of physical limnological studies on a Great Lake. In: F.Orsucci & N.Sala (Eds) *Reflexing Interfaces: the Complex Coevolution of Information Technology Ecosystems*. Information Science Reference, Hershey, New York, London: 257-277.
- 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
- Ferris, J.M. 1989. LIMNO/2 A basic program for calculation of whole lake stability, heat content and volume-weighted averages of oxygen concentration and salinit . Anare research notes, 68: 22 pp.
- Gerten, D., R. Adrian. 2001. Differences in the persistency of the North Atlantic Oscillation signal among lakes. *Limnol. Oceanogr.* 46(2): 448-455.
- Hurrell, J.W.1995. Decadal trend in the north Atlantic oscillation: regional temperatures an precipitation. *Science* vol 269 No 5224: 676- 679
- Krichak, S.O. & P. Albert. 2005. Signatures of the NAO in the atmospheric circulation during wet winter over the Mediterranean region. *Theor. Appl. Climatol.* 82: 27-39.
- Molinero J.C., O. Anneville, S. Souissi, L. Lain  & D. Gerdeaux. 2007. Decadal changes in water temperature and ecological time series in Lake Geneva, Europe-relationship to subtropical Atlantic climate variabilit . *Climate Research.* vol. 34: 15-23.
- Walker, K.F. 1974. The stability of meromictic lakes in central Washington. *Limnol. Oceanogr.*, 19:209-222.