

6.2. 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 quinquennio relative a:

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

6.2.1. Contenuto di calore

Con i dati di temperatura dell'acqua del Lago Maggiore anni raccolti dal 1963 al 2012 è stato calcolato il contenuto calorico con cadenza mensile, il cui andamento è rappresentato in Fig. 6.2.1.

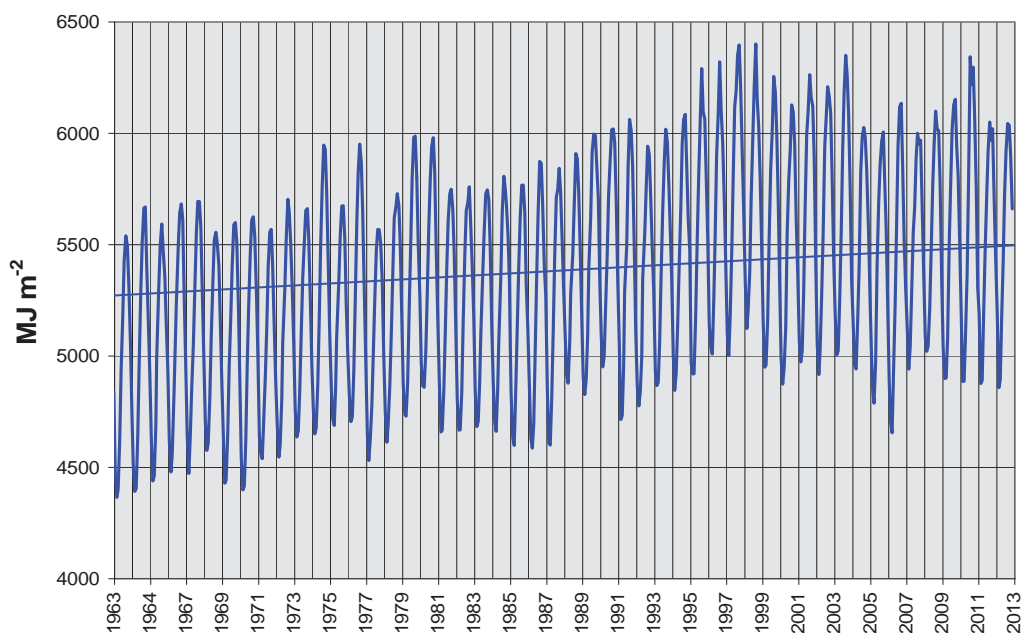


Fig. 6.2.1. Andamento mensile del contenuto di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963-2012.

Oltre alla marcata evidenza del ciclo stagionale, va notata la grande variabilità dei massimi e minimi annuali. Il trend generale della serie mostra un netto incremento sino al termine degli anni novanta, cui segue una stabilizzazione e un leggero calo dopo il 2002 (Fig. 6.2.1.).

I valori minimi annuali, che si collocano normalmente nel periodo Febbraio-Marzo, sono compresi tra 4398 MJ m⁻² (1963) e 5003 MJ m⁻² (1997) mentre i più elevati,

collocati nel periodo Agosto-Settembre, risultano compresi tra 5540 MJ m^{-2} (1963) e 6424 MJ m^{-2} (1998). Negli ultimi 5 anni, ad eccezione del Luglio 2010 (6344 MJ m^{-2}), sia i dati invernali che estivi hanno subito una graduale diminuzione (Fig. 6.2.1a). Nella stessa figura è rappresentata anche la serie dei bilanci termici annuali del lago che mostrano un andamento molto variabile, sufficientemente aderenti a quello del contenuto massimo di calore. È quindi evidente che il bilancio termico annuale del lago dipende in modo prevalente dalla quantità di calore assorbita durante la stagione calda, come dimostrato dalla significativa ($r=0,66$) correlazione statistica tra il bilancio termico (B_t) e il contenuto massimo di calore ($Q_{t_{\max}}$), mentre la stessa dipendenza non esiste tra B_t e il contenuto minimo ($Q_{t_{\min}}$).

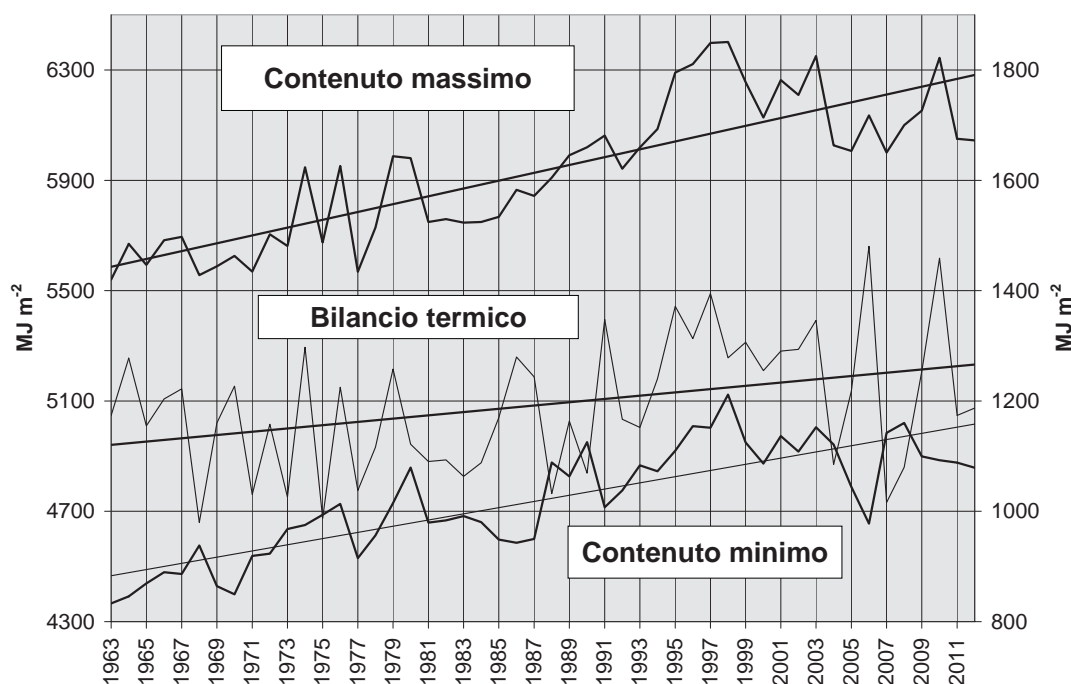


Fig. 6.2.1a. Andamento del contenuto massimo (estivo), minimo (invernale) di calore e del relativo bilancio termico (riferito all'asse secondario) nel Lago Maggiore dal 1963 al 2012 (MJ m^{-2}).

6.2.2. Profondità del mescolamento invernale

La caratteristica idrodinamica più importante dei laghi profondi sudalpini riguarda la modalità con cui avviene il mescolamento verticale 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 iniziate nel 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) e il calcolo di un parametro (M) che sintetizza numericamente le variabili meteorologiche che intervengono nell'omogeneizzazione delle acque.

La serie delle suddette profondità riscontrate dal 1951 ad oggi a seguito dei moti convettivi sono riportate in Fig. 6.2.2.: le barre verticali 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 5 anni la massima profondità di mescolamento si è verificata nel 2012 (circa -150 m) mentre un'ossigenazione delle acque profonde (sotto i -300 m) si è avuta nel 2009.

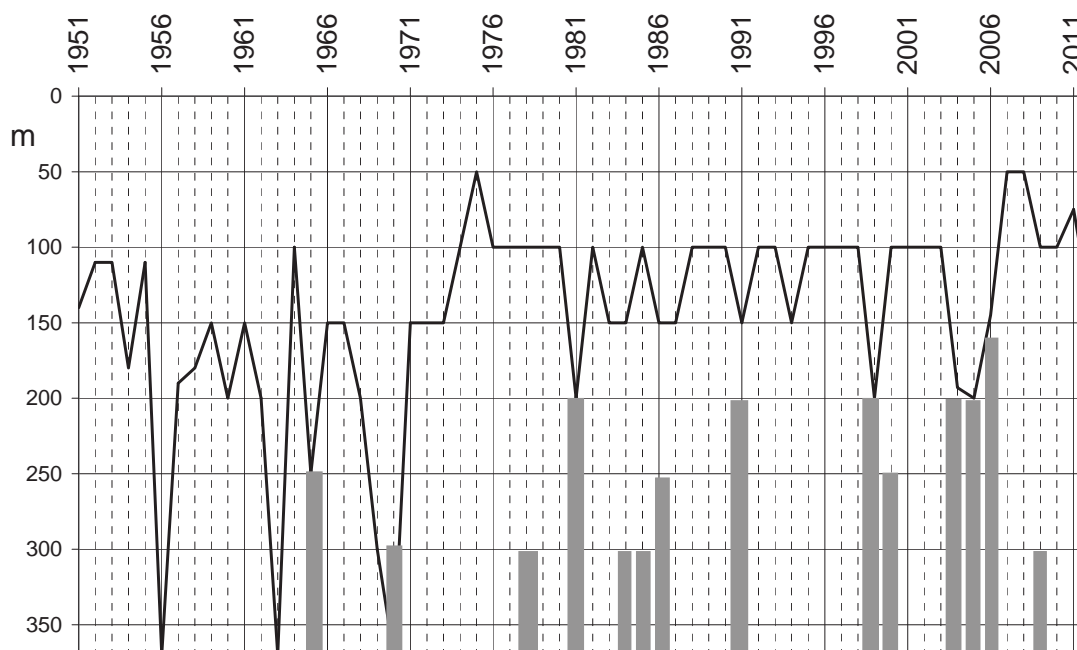


Fig. 6.2.2. Profondità del mescolamento verticale tardo invernale nel Lago Maggiore nel periodo 1951-2012 (linea continua). Le barre verticali indicano inserimenti di acqua negli strati ipolimnici del lago.

6.2.3. 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 figura 6.2.3. sono riportate, per il periodo 1963-2012, 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 (che si verifica con la massima circolazione verticale invernale) e del suo contenuto massimo che si ha con la più pronunciata stratificazione termica estiva. Mentre esiste un'elevata significatività della 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 nel Febbraio 2007, evento determinato dal forte riscaldamento dello strato superficiale in 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 tornato a valori nella media negli anni successivi.

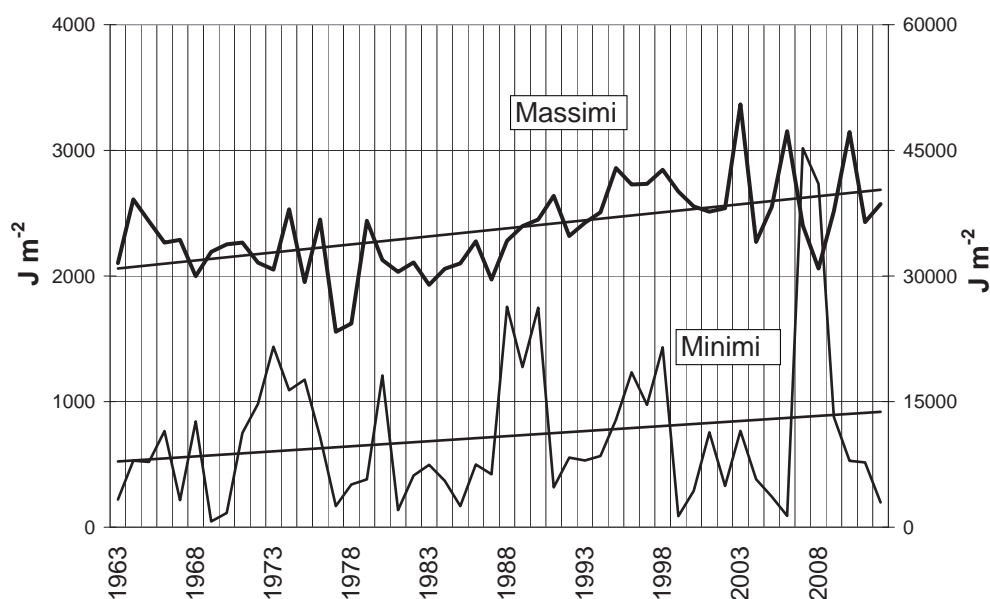


Fig. 6.2.3. Andamento della stabilità termica massima estiva e minima invernale ($J m^{-2}$) nel Lago Maggiore dal 1963 al 2012. All'asse secondario vanno riferiti i valori minimi.

6.2.4. Ossigenazione

In Fig. 6.2.4. sono riportati gli andamenti del contenuto medio di ossigeno disciolto ($mg l^{-1}$) degli ultimi cinque anni, lungo tutta la colonna d'acqua.

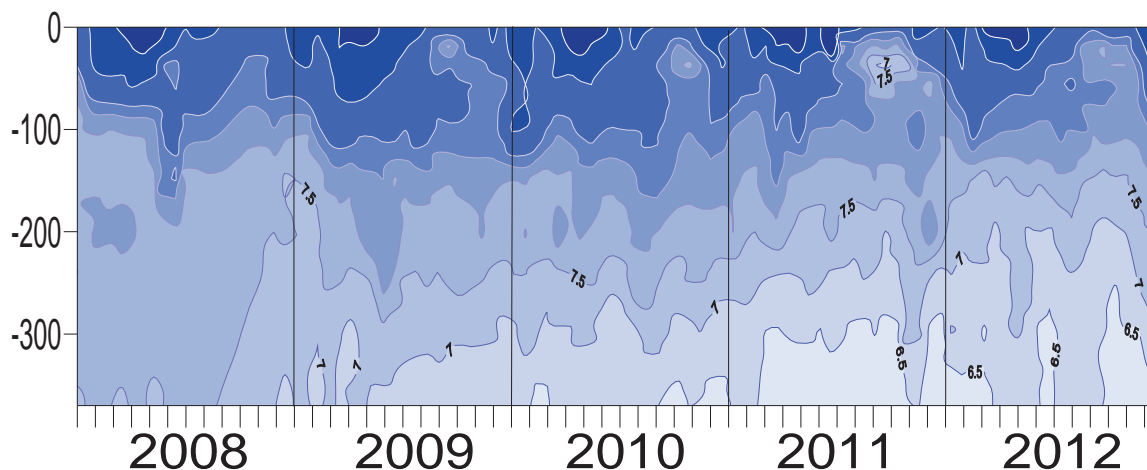


Fig. 6.2.4. Andamento del contenuto medio di ossigeno disciolto mg l^{-1} nelle acque del Lago Maggiore. Quinquennio 2008-2012.

La figura mette in evidenza gli episodi dell'inverno 2009 e dell'autunno 2011 dovuti non a mescolamenti convettivi ma piuttosto a discesa in profondità di acqua densa e fredda di provenienza fluviale o litorale come discusso nei Rapporti CIP AIS relativi ai suddetti anni. Nonostante questi due episodi verificatisi nel corso degli ultimi cinque anni, sotto i 200 metri di profondità si assiste ad una riduzione dell'ossigeno: l'isolinea dei 7 mg l^{-1} sul fondo all'inizio di maggio 2009 risale sino a -200 m nell'autunno del 2012. Dal 2010 al 2012 nell'ipolimnio profondo compare anche l'isolinea dei 6.5 mg l^{-1} , assente nel 2008 e 2009.

6.2.5. Valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri

Stabilire il tempo reale medio di residenza dell'acqua entro un bacino complesso quale il Lago Maggiore rappresenta un problema di fondamentale importanza per la limnologia teorica ed applicata (Ambrosetti et al., 2003).

Per questo a partire dal 2008 è stato creato un modello numerico- matematico dedicato ad una stima sempre più esatta del tempo di residenza delle acque del lago e che tenga conto, oltre all'idrologia del bacino imbrifero, soprattutto della sua circolazione interna, intesa quest'ultima come valutazione quantitativa dei movimenti longitudinali, trasversali e verticali delle acque del lago alle diverse quote batimetriche in rapporto alla sua struttura termica, ai parametri meteorologici ed idrologici responsabili del processo.

Si è proceduto alla creazione di un modello matematico multidimensionale denominato TRIM-LM e dei codici di calcolo per il trasferimento di calore e di massa che è stato già ampiamente descritto nei rapporti CIP AIS dei singoli anni. Un'indagine preliminare è stata condotta nel 2008 con lo scopo di mettere a punto e utilizzare le linee guida di simulazioni numeriche, sviluppate per studiare le scale temporali dell'idrodinamica e dei fenomeni di trasporto nel Lago Maggiore. Nel 2009 si è proceduto in una serie di simulazioni per studiare la sensibilità e il comportamento dell'idrodinamica del lago in rapporto alle sollecitazioni dei parametri idro-meteorologici, allo scopo di raffinare la risposta e la validità del modello in modo che si adegua con maggior precisione alle conoscenze attuali di limnologia fisica. Ciò ha permesso un più stretto accordo tra misure e simulazioni, una più accurata valutazione sia dei coefficienti di scambio attraverso la superficie libera che delle associate

temperature di riferimento. La messa a punto del modello ha permesso simulazioni numeriche per la determinazione dei tempi di residenza osservando il trasporto convettivo-diffusivo di un tracciante conservativo (cioè non reagente).

Il modello discreto del lago usato nel presente studio è riportato in Fig. 6.2.5 e mostra come il corpo d'acqua sia stato idealmente suddiviso in celle di calcolo con dimensioni orizzontali di 250x250 m, mentre lungo la profondità sia stato diviso in 50 strati, più raffittiti nei livelli superiori: tutto questo per un totale di 877.500 celle.

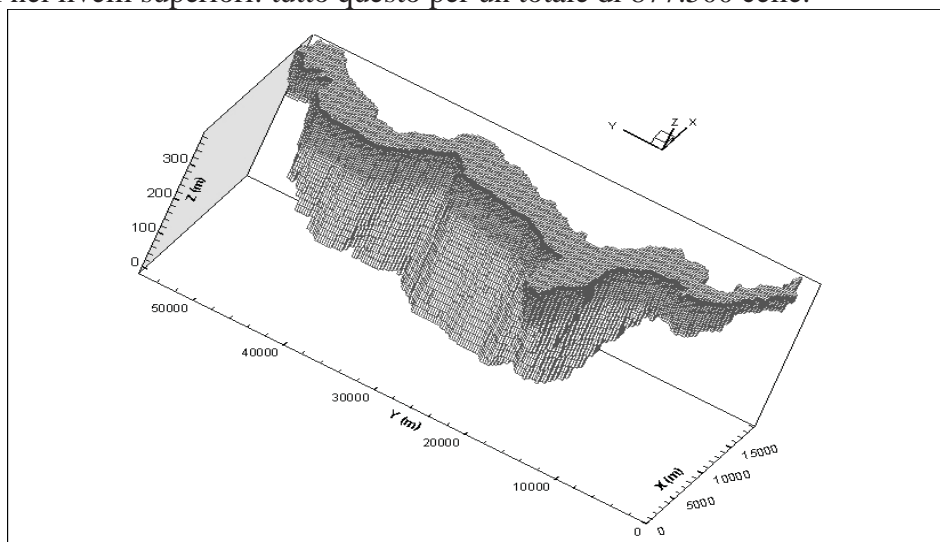


Fig. 6.2.5. Rete di maglie sull'intera geometria del Lago Maggiore

Tralasciando i risultati circa le distribuzioni 3D di velocità e temperatura, sostanzialmente quasi uguali a quelli già descritti in dettaglio nel rapporto della Campagna 2008 (il che conferma la sostanziale correttezza della nuova calibrazione effettuata), ci si è focalizzati dapprima sugli spostamenti di 72 markers langragiani privi di massa per un periodo di due anni, inseriti in diverse posizioni nel lago al tempo zero di una simulazione multi annuale. Da rilevare che l'applicazione del metodo dei markers privi di massa (non reattivi) trasportati da campi di moto 3D calcolati con sistemi CFD (Computational Fluid Dynamics) può essere considerato un "approccio recente" (Castellano et al., 2008; Castellano & Dinelli, 1975; Castellano, et al. 1977) Successivamente si sono focalizzati gli spostamenti di altri 202 markers privi di massa sempre calcolati nell'ambito della citata simulazione numerica tridimensionale estesa sul periodo temporale di 4 anni, aumentando così il precedente periodo di 2 anni di simulazioni presentato nel rapporto 2009 (Ambrosetti et al., 2009).

I 202 markers considerati sono stati divisi in due gruppi: quelli inizialmente immersi nel lago (tra 0 e 370 metri di profondità), con la velocità di questo, e riferiti come "markers-ambiente" e il gruppo di quelli che all'istante $t=0.0$ furono immessi negli affluenti con le velocità di scarico di questi, e riferiti come "markers-fiume" : le rispettive posizioni iniziali sono elencate nella tabella 2.2 del rapporto 2010.

La maggior parte dei markers "ambiente" sono stati collocati a diverse profondità nella zona più a Nord del lago spostati verso l'ingresso del Ticino. I rimanenti sono stati collocati a profondità del lago crescenti verso Sud e spostati quanto più possibile verso Ovest. Incrociando le informazioni derivanti dalle traiettorie orizzontali con quelle delle variazioni verticali di ciascun marker è stato possibile ricostruire i loro spostamenti nei quattro anni di durata programmati dalla simulazione.

I risultati hanno indicato che:

- delle acque della zona più a Nord del lago circa il 12% riesce ad uscire in tempi compresi tra i 600 e i 1100 giorni e sono quelli che si mantengono nello strato compreso nei primi 100 metri di profondità (a partire dalla superficie libera);
- un 13% riesce a percorrere tra i 40 e i 50 km in direzione della zona di uscita, sempre mantenendosi entro i 100 m di profondità;
- un 12% riesce a percorrere tra i 30 e i 40 km in direzione della zona di uscita, sempre mantenendosi entro i 100 m di profondità;
- un 9% riesce a percorrere tra i 20 e i 30 km in direzione della zona di uscita, sempre mantenendosi entro i 100 m di profondità;
- un 5% si avvicina moltissimo in tempi compresi tra i 900 e i 1000 giorni ma poi si riallontanano dalla zona di uscita;
- il rimanente 51% precorre meno di 20 km (da intendere lungo la direzione ideale verso la zona di uscita) o affonda.

Dei rimanenti markers “ambiente”, che partono da zone a sud dell’ingresso del Ticino e da profondità maggiori di 100 m, solo 3 raggiungono l’uscita in tempi tra i 900 e i 1000 giorni. Gli altri si avvicinano in media fino a 20-30 km dall’uscita ma quasi tutti a profondità superiori a 100 m.

Tutti i markers partiti dalle sezioni di ingresso degli affluenti, esclusi quelli del Ticino e del Maggia, raggiungono la sezione di uscita in tempi compresi tra i 250 e i 1100 giorni.

In sostanza si è potuto riassumere quanto segue:

- le acque nella fascia compresa nei primi cento metri di profondità hanno tempi di residenza compresi tra un minimo di 1 anno e un massimo di 4-5 anni;
- le acque degli affluenti hanno un tempo di residenza tra i 250 e un massimo di 1000 giorni. Da questa valutazione vanno escluse le acque del Ticino e del Maggia alle quali si potrebbero attribuire tempi dell’ordine dei 3-4 anni;
- le acque più profonde hanno tempi di residenza ancora non quantificabili ma certamente dell’ordine di un numero di anni a 2 cifre. Va comunque notato che si rilevano anche alcune zone dove i markers riescono a risalire anche fino in superficie.

Per proseguire nello studio del tempo di ricambio del lago attraverso la propagazione di un tracciante inquinante idrosolubile e successivamente reattivo nelle acque del Lago Maggiore si è reso necessario nel 2011 procedere ad una ricostruzione numerica della struttura della turbolenza nella sua parte più superficiale.

Ciò è dovuto al fatto che il moto turbolento di ciascun corpo d’acqua è il maggior responsabile dei reali meccanismi di diffusione/dispersione ed esercita poi un controllo decisivo sulla stratificazione termica, sul ricambio degli strati lacustri, sulla diluizione degli inquinanti e su tutti i processi biogeochimici.

Da quanto prodotto, lo studio dimostra che il Lago Maggiore ha una modesta capacità di diluizione meccanica (convettiva-dispersiva) degli inquinanti e di scarsa turbolenza totale limitando così il mescolamento. E’ stato posto in evidenza che la zona di un certo mescolamento turbolento è sempre troppo piccola per garantire, anche in aggiunta al trasporto convettivo, una diluizione sostenibile di ogni inquinante. In altre parole il Lago Maggiore sembra essere un ecosistema molto delicato che richiede una grande attenzione. Di questo si è tenuto conto nel prosieguo della determinazione del tempo reale di ricambio delle sue acque.

Si è successivamente proseguito con simulazioni CFD 3D riguardanti la propagazione nel Lago Maggiore di un inquinante idrosolubile non-reattivo. In una prima situazione il

tracciante è assunto immesso con continuità nel Fiume Ticino immissario, nella seconda il tracciante parte come una macchia “spot” collocata nelle adiacenze della foce del Fiume Toce. Così come nel caso dei markers privi di massa, i tempi di residenza del tracciante idrosolubile sono calcolati come differenza tra l’istante di avvio alla bocca di uscita del Ticino emissario dal lago e l’istante di partenza. La condizione di “arrivo” è stata considerata raggiunta quando la concentrazione all’uscita è pari a $0,1 \text{ mg l}^{-1}$.

Lo scopo era quello di evidenziare 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 queste simulazioni, che era infatti solo 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.

Dall’analisi svolta sinora risulta che i tempi di residenza di un tracciante idrosolubile sono, sino a circa 12 metri di profondità, tendenzialmente meno di un quarto di quelli relativi ai markers lagrangiani privi di massa partiti da posizioni analoghe. Per profondità maggiori, a fine Agosto, si trovano valori allineati all’andamento temporale di quelli delle profondità maggiori valutate con i markers lagrangiani.

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 per ogni specie e in funzione delle condizioni chimiche, fisiche e biologiche del corpo idrico.

Bibliografia

- 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., 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, V., L. Barbanti, E.A. Carrara, A. Ferrari & A. Rolla. 2009. Valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri Ricerche sull’evoluzione del Lago Maggiore. Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2008-2012. Campagna 2008 e Rapporto quinquennale 2003-2007. Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere (Ed.): 77-88.
- Castellano L., Ambrosetti W. & N. Sala. 2008. About the use of computational fluid dynamic (CFD) in the framework of physical limnological studies on a Great Lake. In: *Reflexing interfaces*. Information Science Reference, Hershey, New York, London: 257-277.
- Castellano, L., Colombo, A., & A. Tozzi. 1977. Numerical-Differential Model for the Dispersion of Heat and Pollutants in Sea Environments, (Technical Report CALISMA/MATEC prepared for ENEL-CRTN, Centro di Ricerca Termica e Nucleare), Milano (Italy).
- Castellano, L., & G. Dinelli. 1975. Experimental and Analytical Evaluation of Thermal Alteration in the Mediterranean, Int. Conference on Mathematical Models for Environmental Problems; University of Southampton, September 8-12, 1975. Pentech Press (London)