

2. PROFONDITÀ DI MESCOLAMENTO E VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RESIDENZA DELLE ACQUE LACUSTRI

2.1. Profondità di mescolamento

L'olo-oligomissi, è una delle caratteristiche idrodinamiche più importanti dei laghi profondi delle regioni temperate, in particolare di quelli sud-alpini. Da essa dipendono i complessi fenomeni che interessano anche i comparti chimico e biologico dell'ecosistema lacustre quali l'ossigenazione degli strati profondi, il riciclo dei nutrienti, la migrazione verticale del plancton con possibili effetti anche sulla successiva produzione. Il Lago Maggiore è stato oggetto di ricerche proprio su questo argomento fin dagli anni '50. Da allora il controllo sull'effettiva profondità dello strato mescolato è stato continuo, condotto attraverso una lunga serie di sopralluoghi nel suo punto più profondo con lo scopo 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 in passato l'omogenizzazione delle sue acque è risultata completa, cioè fino alla massima profondità, solo in occasione di inverni particolarmente freddi e ventosi (Ambrosetti & Barbanti, 1999), eventi, questi, che ormai sono diventati più l'eccezione che la regola. Le stesse indagini hanno confermato quanto già sottolineato nei vari rapporti annuali circa l'incidenza sulla profondità del mescolamento di alcuni parametri meteo-limnologici, in particolare vento, radiazione solare e differenza fra le temperature dell'aria e dell'acqua lacustre in superficie.

È ormai ampiamente confermato come negli ultimi decenni si sia manifestata la tendenza ad un riscaldamento della temperatura atmosferica che, per quanto risulta anche dalle registrazioni della stazione meteorologica di Pallanza, ha riguardato soprattutto i suoi valori massimi invernali mentre i corrispondenti minimi hanno visto una seppure moderata diminuzione (Ambrosetti *et al.*, 2006). In aumento è risultato anche il numero di giorni con minimi termici al di sopra dello zero, sovente caratterizzati anche da valori maggiori rispetto alla media stagionale.

Altresì, sull'areale del Lago Maggiore va registrata una diminuzione della quantità di vento filato con una repentina caduta a partire dagli anni settanta che si è protratta a tutto il 2009 (Fig. 2.1). Pertanto le condizioni meteorologiche invernali a partire dal 1970 non sono state così spinte da provocare una piena circolazione nelle acque del lago (Ambrosetti *et al.*, 2010) in quanto a queste variazioni è corrisposta una diminuzione dell'energia necessaria ad indurre moti convettivi dalla superficie al fondo del lago.

Negli ultimi decenni evidentemente il lago ha risentito dell'evoluzione climatica globale tendente al riscaldamento come si può dedurre dalla figura 2.2 dove è rappresentato l'andamento mensile dell'energia totale contenuta nelle acque del Lago Maggiore: dal 1963 ad oggi ha subito un graduale aumento sia nei valori massimi estivi che in quelli minimi invernali. Rilevante è soprattutto quanto si è verificato negli ultimi 50 anni nella fase di de-stratificazione termica autunno-invernale quando i contenuti calorici per unità di volume dello strato mescolato e dell'ipolimnio al termine dell'inverno limnologico hanno subito un notevole incremento (Fig. 2.3).

Un fatto altrettanto importante da rilevare è che la quantità di calore contenuta nell'ipolimnio profondo del lago, sede della così detta "*memoria climatica*" (Ambrosetti & Barbanti, 1999), dopo una diminuzione dal 2005 al 2007 simile a quella del 1981, ha ripreso ad aumentare determinando un proseguimento del riscaldamento degli strati più

depressi del lago ostacolando ulteriormente, per il gioco delle densità, il mescolamento convettivo del lago (Fig. 2.4).

Per quanto riguarda quest'ultimo meccanismo i moti convettivi nell'inverno 2008-2009 non hanno raggiunto i 100 di profondità. La causa va ricercata nella situazione meteorologica invernale particolarmente "calda" e poco ventosa che si è instaurata sull'areale lacustre. Infatti la temperatura media dei tre mesi invernali è risultata di 4,85 °C, del 33% superiore a quella del periodo 1963-2007; ancora più elevata la temperatura media delle minime (+ 42%). L'incremento termico ha provocato una precoce fusione delle nevi che si sono depositate a quote basse a Dicembre, all'inizio di Gennaio e nei primi tre giorni di Febbraio: queste acque inserendosi in profondità hanno determinato l'ossigenazione dell'ipolimnio secondo un meccanismo che si vedrà in seguito.

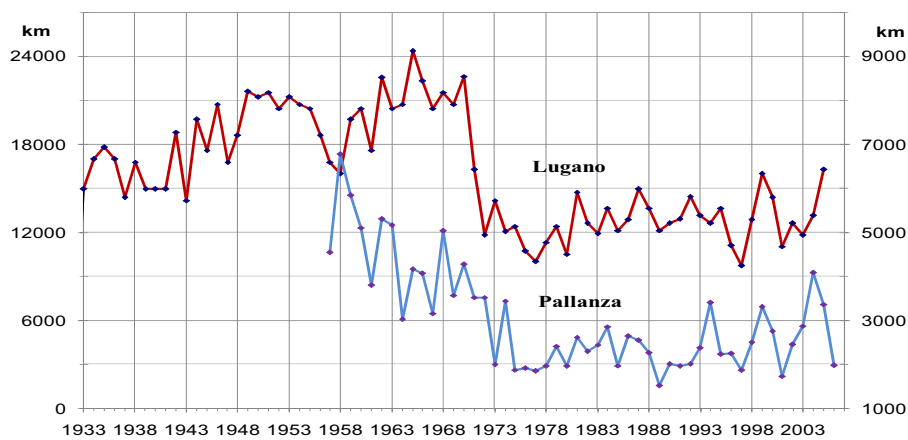


Fig. 2.1. Percorso del vento rilevato nella stagione invernale nelle stazioni di Pallanza (scala di destra) e Lugano (scala di sinistra).

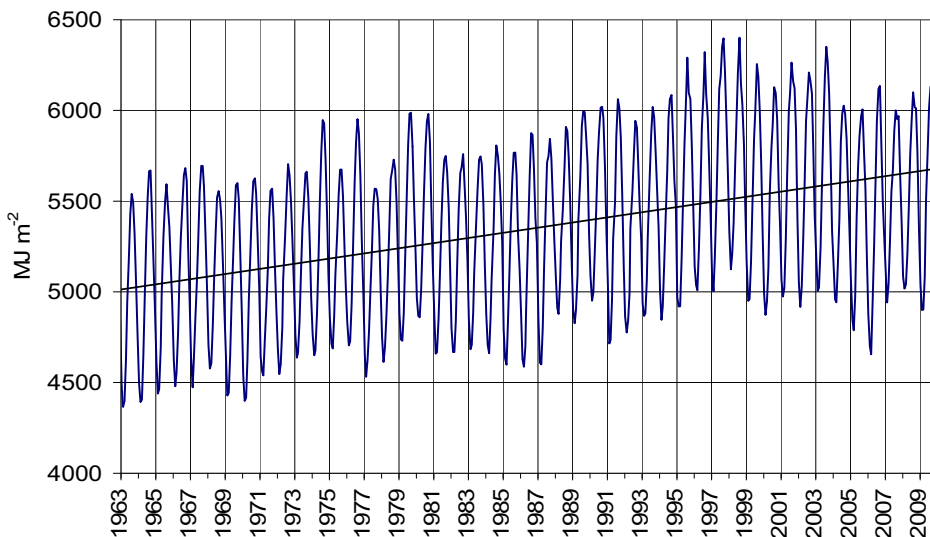


Fig. 2.2. Contenuto di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963-2009.

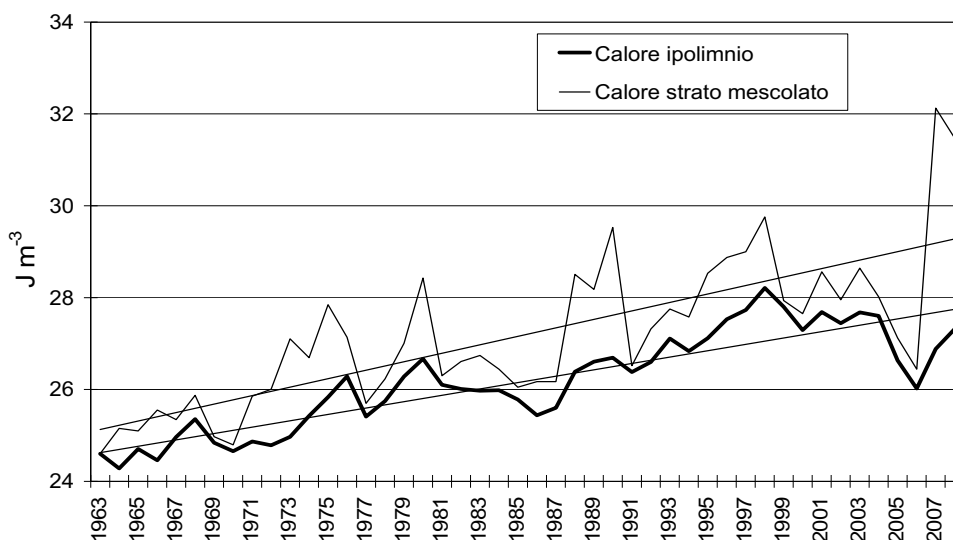


Fig. 2.3. Contenuto di calore per unità di volume nello stato ipolimnico e in quello mescolato al termine degli inverni limnologici.

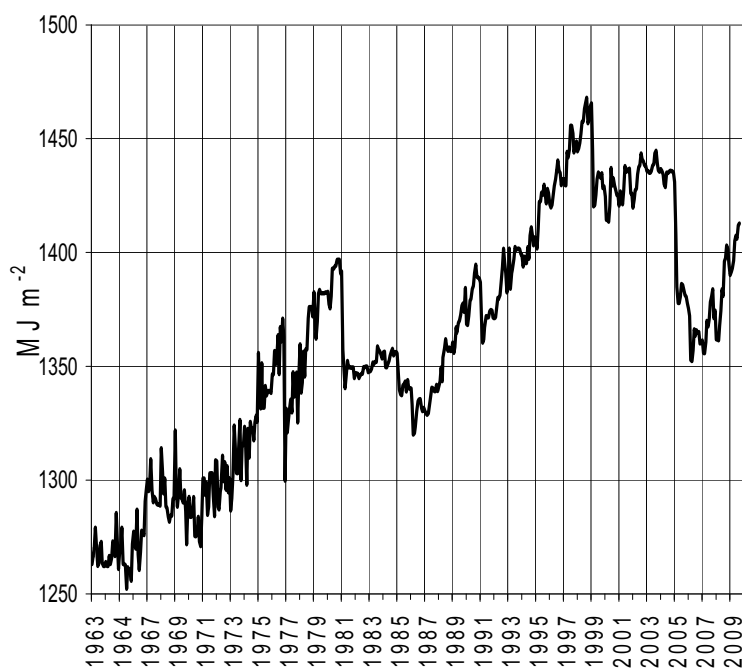


Fig. 2.4. Andamento della memoria climatica nel Lago Maggiore.

Il percorso totale del vento nel periodo invernale invece è risultato al di sotto della media (10.239 contro 10.681 km); in particolare a Febbraio, nel momento più importante per l'approfondimento dello strato mescolato, è risultato di soli 2.815 km contro una media di 3.238 km.

Sulla base di queste condizioni meteorologiche la circolazione delle acque del Lago Maggiore per moti convettivi nel 2009 non poteva che essere parziale. Tuttavia accanto a questo meccanismo se ne è presentato fortunatamente un altro, con caratteristiche

dinamiche diverse, ma sempre sostenuto da eventi esterni e favorito dalle caratteristiche morfologiche del bacino stesso e dell'areale imbrifero.

Questo tipo di dinamica lacustre, descritto in Ambrosetti *et al.* (2010), non rappresenta una novità: è stato riscontrato nel Lago Maggiore oltre che nel 1984 anche nel 1985 e probabilmente nel 1978 e nel 2006 e si è chiaramente verificato nell'inverno 2009. In figura 2.5 è rappresentata la concentrazione di O₂ dalla superficie al fondo del lago misurata a Ghiffa. In essa è visibile nella seconda decade di Gennaio sotto i 300 metri uno strato, completamente isolato da quelli soprastanti, nel quale la concentrazione di ossigeno incrementa da 6,9 mg l⁻¹ a 7,2 mg l⁻¹ per poi ridiscendere, in Febbraio a 6,8 mg l⁻¹. Un'ulteriore conferma alla discesa di acqua fredda di origine litorale nell'ipolimnio è avvalorato anche dalla diminuzione della temperatura che a questi livelli passa da 6,39 a 6,32 °C.

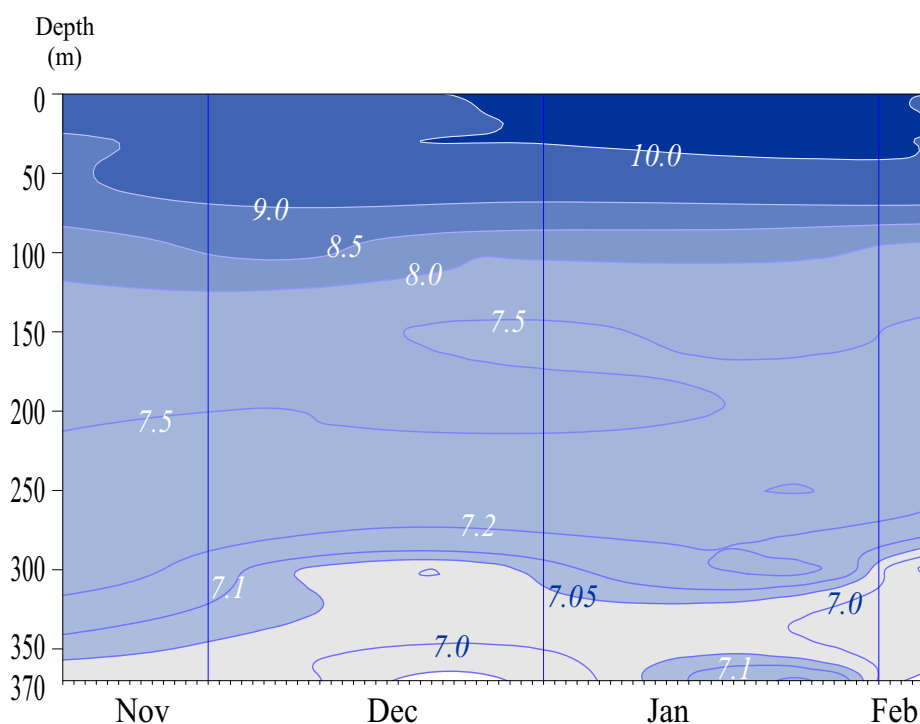


Fig. 2.5. Distribuzione verticale della concentrazione di O₂ (mg l⁻¹) nell'inverno 2009.

Senza dubbio quanto avvenuto non può che essere interpretato come una conseguenza dello scioglimento di neve precipitata, in particolare quella del 6 Gennaio, che in seguito all'innalzamento termico dell'atmosfera, si è inserita lungo i fianchi del lago fino in profondità. È grazie a questo intervento che nell'inverno 2008-2009 l'ecosistema lacustre ha tratto dei benefici, usufruendo, in particolare, della ossigenazione degli strati profondi.

La conferma dell'assenza di mescolamento totale è data anche dalla distribuzione verticale della temperatura dell'acqua lacustre, il suo andamento lungo la verticale misurato a Ghiffa mostra in Gennaio un gradiente termico di 0,35 °C tra 50 e 100 metri di profondità che all'inizio di Febbraio scende a 0,18 °C mentre nei primi giorni di Marzo risale a 0,2 °C: modesti salti termici ma sufficienti ad impedire il proseguimento del mescolamento oltre i 100 metri di profondità.

Una ulteriore conferma è data dai valori della stabilità entro la colonna del lago, parametro che rappresenta la quantità di energia necessaria per omogeneizzare la colonna d'acqua. I profili verticali figura 2.6 mostrano una resistenza ai moti convettivi a Gennaio attorno a -50 m per effetto della persistenza di gradienti termici lungo la colonna; in Febbraio quest'ultimo effetto è invece evidenziato dall'incremento della stabilità in tutti gli strati sotto i -100 m. 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.

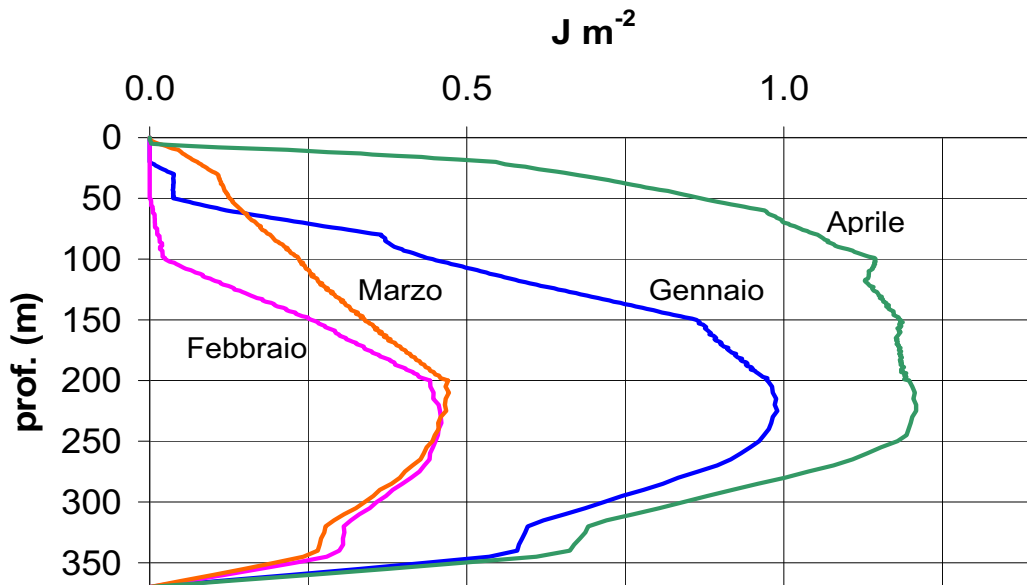


Fig. 2.6. Sequenza temporale della distribuzione verticale della stabilità del Lago Maggiore da Gennaio ad Aprile del 2009.

Se l'intervento dei moti convettivi, con azioni di mescolamento più o meno intense, è una costante sempre attiva durante la fase fredda del ciclo stagionale, altri tipi di meccanismi risultano invece occasionali e, agendo singolarmente o con accoppiamenti diversi, provvedono all'ossigenazione della parte più profonda della colonna d'acqua. Uno di questi è quello che si è verificato nell'inverno 2008-2009 ed è possibile riconoscere in lago la presenza di un successivo processo di erosione dal basso della massa liquida non ancora interessata da mescolamento superficiale: è un processo dinamico che agisce in direzione opposta rispetto a quello innescato dai meccanismi che operano esclusivamente sulla superficie lacustre e che pertanto può essere definito come una "deep erosion".

Un'ultima importante considerazione riguarda poi il fatto che i meccanismi di ossigenazione delle acque ipolimniche di cui si è detto determinano condizioni ecologiche diverse rispetto a quelle conseguenti al mescolamento convettivo totale, non fosse altro che per la loro diversa durata.

2.2. Valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri

Si è proseguito nell'utilizzo e nella messa a punto del modello TRIM_LM, costruito nel 2008 e dettagliatamente descritto in Castellano *et al.* (2008) e nel rapporto per la CIP AIS Campagna 2008. Lo scopo principale è quello di valutare lo spettro del tempo di residenza delle acque alle diverse profondità e di studiare il meccanismo che governa il ciclo stagionale della stratificazione e della destratificazione termica per giungere al tempo reale di ricambio delle acque del Lago Maggiore.

Nel 2009 si è ulteriormente proceduto in una serie di simulazioni per studiare la sensibilità e il comportamento dell'idrodinamica del lago alle sollecitazioni dei parametri idro-meteorologici al fine di raffinare la risposta e la validità del modello in modo che si adegua con maggior precisione alle conoscenze attuali di limnologia fisica. Va sottolineato che si è ottenuto, rispetto all'anno precedente, un notevole miglioramento dei risultati e questo sostanzialmente grazie a due fattori:

- a) aumento del potere risolutivo del reticolo di integrazione, infatti si è passati da 400.000 a 877.500 celle;
- b) una più realistica calibratura del modello di turbolenza.

L'ulteriore attenzione a questi due aspetti ha determinato un più stretto accordo tra misure e simulazioni, una più fine valutazione dei coefficienti di scambio attraverso la superficie libera e delle associate temperature di riferimento. Infatti le simulazioni numeriche ottenute, in condizioni semplificate rispetto alla complessità naturale, forniscono un quadro verosimile della sensibilità idrodinamica del lago alla variazione di tutti i più importanti parametri, da quelli meteorologici alle portate e temperature degli immissari, portate equivalenti di piogge e ruscellamento.

La messa a punto del modello ha permesso esperimenti numerici per la determinazione dei tempi di residenza osservando il trasporto convettivo-diffusivo di un tracciante conservativo (cioè non reagente). Da rilevare che la realizzazione di questa indagine non ha difficoltà concettuali, ma solo "tecniche" in quanto occorre eseguire simulazioni complete annuali per ogni ipotesi di "macchia" di tracciante inizialmente localizzata in diversi punti e a diverse profondità, e ogni scenario richiede un notevole tempo di esecuzione.

Il modello discreto del lago usato nel presente studio è riportato in figura 2.7 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 comporta un totale di 877.500 celle. Dalla figura si può anche notare che la "direzione longitudinale", indicata con il simbolo Y, va intesa in senso positivo nel verso da S a N con il punto zero situato all'incile del lago; la "direzione trasversale", indicata con il simbolo X, ha il suo senso positivo da W ad E, con lo zero alla foce del Toce; la "direzione verticale", indicata col simbolo Z, ha la quota "0" nel punto più profondo del lago e quindi il senso positivo verso l'alto. Queste indicazioni sono importanti in quanto permettono di osservare il posizionamento ed il percorso dei markers rappresentati nelle figure successive.

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), il presente rapporto si focalizza sugli spostamenti di 72 markers langragiani, privi di massa, inseriti in diverse posizioni nel Lago Maggiore al tempo zero di una

simulazione multi annuale. 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" (Dinelli & Tozzia, 1977; Castellano *et al.*, 2008).

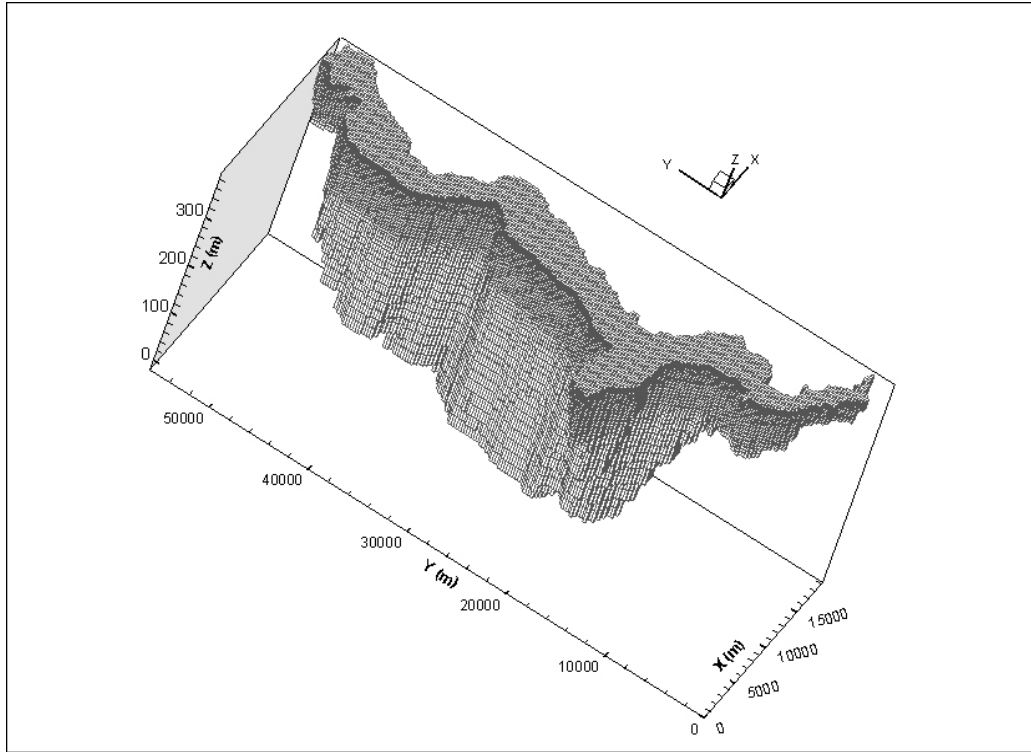


Fig. 2.7. Rete di maglie sull'intera geometria del Lago Maggiore usata nel presente studio.

I markers sono stati opportunamente posizionati all'istante convenzionale $t=0,0$ del 1 Gennaio 2002 e seguiti sul periodo temporale di 2 anni. Detti markers sono intesi privi di massa e volume e quindi viaggiano esclusivamente con la velocità locale (calcolata) del lago. Le equazioni del moto sono puramente "cinematiche" (lagrangiane) ed hanno la forma:

$$(1.1) \quad x_p^{t+\delta t} = x_p^t + u(x_p^t, y_p^t, z_p^t) \delta t$$

$$(1.2) \quad y_p^{t+\delta t} = y_p^t + v(x_p^t, y_p^t, z_p^t) \delta t$$

$$(1.3) \quad z_p^{t+\delta t} = z_p^t + w(x_p^t, y_p^t, z_p^t) \delta t$$

dove (x, y, z) sono le coordinate (rispettivamente trasversale, i.e. da Ovest verso Est; longitudinale, i.e. da Sud verso Nord; e verticale) del generico marker p ; δt è l'incremento temporale; l'apice t è per le variabili valutate al tempo "precedente"; l'apice $t+\delta t$ è per le variabili al tempo "corrente"; (u, v, w) sono le componenti cartesiane della velocità dell'acqua del lago fornite puntualmente e istante per istante dalla simulazione (per ogni incremento δt del tempo): nel contesto delle (1.1)-(1.3) vanno intese quelle calcolate per la cella computazionale in cui giace il marker p all'istante "precedente" t .

L'incremento temporale con cui vengono eseguite le simulazioni è di 120 secondi.

Come si può vedere nelle tabelle 2.1 e 2.2, sono stati considerati due tipi di markers: "markers ambientali" che hanno avuto posizioni iniziali dentro il lago, e "markers dei tributari" che hanno avuto posizioni iniziali alla foce dei vari tributari. Si noti che i primi 31 markers ambientali furono posti, a diverse profondità, nella zona più settentrionale del lago, in prossimità dell'area di sbocco in lago del fiume Ticino, mentre i restanti furono posizionati a profondità crescenti andando in direzione Sud.

Solo 5 dei 31 markers ambientali (M5, M8, M10, M19, M31) con posizione iniziale vicino alla foce del Ticino immissario hanno raggiunto la zona di uscita del Ticino emissario e possono essere considerati fuoriusciti dal lago. I valori che ne derivano del tempo di residenza si collocano tra circa 350 giorni (per le particelle che partirono pochi metri sotto la superficie libera) e circa 500 giorni (per le particelle con posizione di partenza più profonda). Tra quelli che hanno raggiunto l'uscita, il marker M5 (Fig. 2.8 A), partito in corrispondenza di Locarno alla profondità di 9,0 m (Tab. 2.1) ha percorso un tragitto sinuoso spostandosi dapprima verso la parte occidentale del lago per poi proseguire verso l'emissario. La sua profondità nei primi 320 giorni è rimasta confinata entro i primi 20 m ed è risalita successivamente in superficie per poi fuoriuscire dal bacino dopo circa 500 giorni.

Tab. 2.1. Posizionamento dei markers ambientali.

| Markers | X (m) | Y (m) | Z (m) | Markers | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|--------|
| M_1 | 16875 | 55375 | -1,0 | M_26 | "" | "" | -80,0 |
| M_2 | "" | "" | -3,0 | M_27 | "" | "" | -84,0 |
| M_3 | "" | "" | -5,0 | M_28 | "" | "" | -88,0 |
| M_4 | "" | "" | -4,0 | M_29 | "" | 54625 | -92,0 |
| M_5 | "" | "" | -9,0 | M_30 | "" | "" | -96,0 |
| M_6 | "" | "" | -11,0 | M_31 | "" | "" | -100,5 |
| M_7 | "" | "" | -13,5 | M_32 | 12375 | 50500 | -106,0 |
| M_8 | "" | "" | -16,5 | M_33 | "" | "" | -112,0 |
| M_9 | "" | "" | -19,5 | M_34 | "" | "" | -120,0 |
| M_10 | "" | "" | -22,5 | M_35 | "" | "" | -128,0 |
| M_11 | 16625 | 55375 | -25,5 | M_36 | "" | "" | -138,0 |
| M_12 | "" | "" | -25,5 | M_37 | "" | 50000 | -150,0 |
| M_13 | 16875 | 55375 | -28,5 | M_38 | "" | "" | -162,0 |
| M_14 | "" | "" | -34,5 | M_39 | "" | "" | -174,0 |
| M_15 | "" | "" | -37,5 | M_40 | 12875 | 49125 | -189,0 |
| M_16 | "" | "" | -40,5 | M_41 | "" | "" | -207,0 |
| M_17 | "" | "" | -44,0 | M_42 | 12625 | 47275 | -225,0 |
| M_18 | "" | "" | -48,0 | M_43 | "" | "" | -243,0 |
| M_19 | "" | 55125 | -52,0 | M_44 | 11375 | 46875 | -261,0 |
| M_20 | "" | "" | -56,0 | M_45 | "" | "" | -279,0 |
| M_21 | "" | "" | -60,0 | M_46 | 10875 | 44125 | -298,5 |
| M_22 | "" | 54875 | -64,0 | M_47 | 12875 | 39125 | -319,5 |
| M_23 | "" | "" | -68,0 | M_48 | "" | "" | -340,5 |
| M_24 | "" | "" | -72,0 | M_49 | 14875 | 36375 | -361,5 |
| M_25 | "" | "" | -76,0 | M_50 | "" | 35625 | -370,0 |

Tab. 2.2. Posizionamento dei markers ambientali.

| Markers | Fiume | X (m) | Y (m) | Z (m) | Markers | Fiume | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|---------|---------------|-------|--------|-------|---------|-----------|--------|---------|-------|
| M_51 | Ticino | 18875 | 53375. | -1,0 | M_62 | Cannobino | 9375. | 42875.0 | -7,0 |
| M_52 | "" | 18875 | 53375. | -7,0 | M_63 | Maggia | 14875. | 51375.0 | -1,0 |
| M_53 | Vevera | 11875 | 4875. | -1,0 | M_64 | "" | 14875. | 51375.0 | -7,0 |
| M_54 | "" | 11875 | 4875. | -7,0 | M_65 | Verzasca | 18625. | 55125.0 | -1,0 |
| M_55 | Erno | 10625 | 9625. | -1,0 | M_66 | "" | 18625. | 55125.0 | -7,0 |
| M_56 | "" | 10625 | 9625. | -7,0 | M_67 | Tresa | 15125. | 32375.0 | -1,0 |
| M_57 | Toce | 875 | 20875. | -1,0 | M_68 | "" | 15125. | 32375.0 | -7,0 |
| M_58 | "" | 875 | 20875. | -7,0 | M_69 | Boesio | 10875. | 21125.0 | -1,0 |
| M_59 | S. Bernardino | 7125 | 22125. | -1,0 | M_70 | "" | 10875. | 21125.0 | -7,0 |
| M_60 | "" | 7125 | 22125. | -7,0 | M_71 | Bardello | 12875. | 14875.0 | -1,0 |
| M_61 | Cannobino | 9375 | 42875. | -1,0 | M_72 | "" | 12875. | 14875.0 | -7,0 |

N.B.: I movimenti orizzontali e verticali di tutti i markers indicati nelle due tabelle sono riportati in appendice.

In questa serie di markers l'eccezione è rappresentata da M31 (Fig. 2.8B) che, posto inizialmente a -100 m, è riuscito a risalire in superficie dopo un anno quando si trovava all'altezza della zona più profonda del lago (Ghiffa) fuoriuscendone successivamente. Questa sua ascesa verso l'alto può essere collegata al fatto che all'inizio del biennio di simulazione (inverno 2001-2002) il mescolamento convettivo verticale aveva raggiunto solo 100 m di profondità per cui il marker è rimasto nella sua posizione iniziale per tutto il ciclo annuale. Nell'inverno successivo l'omogeneizzazione invernale ha superato 120 m di profondità arrivando ad inglobare il marker ed a trascinarlo verso la superficie.

Da rilevare anche che i markers superficiali che escono dal lago hanno tutti la tendenza a spostarsi verso la sua costa occidentale: ciò sembra essere dovuto più che ad un effetto della forza di Coriolis (trascurabile considerata la modesta larghezza del lago) alla particolare morfologia della valle lacustre che condiziona i venti settentrionali, localmente i più forti, a fluire in direzione SSW.

Le 26 restanti particelle di questo insieme, partite con coordinate orizzontali quasi uguali e posizione verticale tra -1 e -128,5 m, hanno seguito percorsi differenti: M17, M22, M24, M30 hanno viaggiato su e giù in una più o meno vasta zona del lago prima di ritornare quasi alla stessa posizione iniziale; M25 è stata persa, uscita dal dominio del calcolo (questo può essere considerato un indesiderato incidente numerico); tutti gli altri hanno coperto circa la metà dell'intera distanza nominale Nord-Sud, in parte risalendo verso la superficie libera, in parte discendendo verso il fondo, in parte galleggiando liberamente alla profondità iniziale.

Tra i 19 markers ambientali con una posizione iniziale superiore a 130 m sotto la superficie libera, solo quello targato M34 (Fig. 2.8C) ha raggiunto la zona di uscita del Ticino emissario; posto inizialmente in corrispondenza del delta della Maggia ne ha probabilmente risentito l'influenza. Il suo tempo di residenza è stato di circa 400 giorni. Tra gli altri, la tendenza dei markers M40, M41, M42, M 44, M46, M47, M48 (Fig. 2.8D) è stata quella di ritornare alla loro posizione iniziale dopo più o meno estesi movimenti su e giù attraverso il corpo d'acqua; gli spostamenti di M36 e M37 sono stati molto corti; M43, M45, M50 sono stati persi dal dominio del calcolo (incidenti numerici); la tendenza di M36, M37 e M39 è stata di muoversi in direzione Nord; i restanti hanno coperto circa un terzo della loro distanza iniziale nominale dal Sud, ma con più o meno la stessa posizione verticale iniziale.

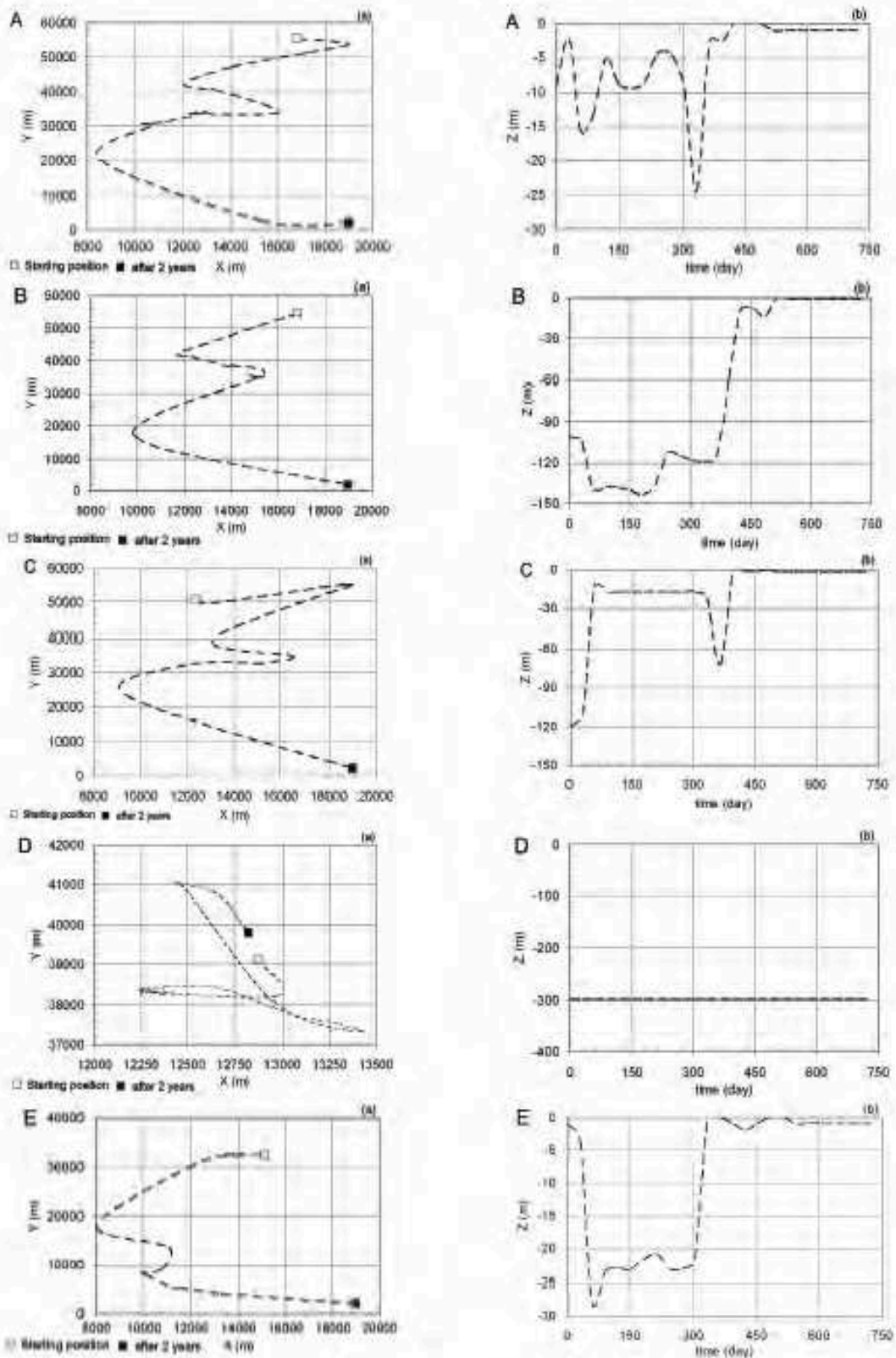


Fig. 2.8. Movimenti orizzontali (a) e verticali (b) dei marker M5 (A), M 31 (B), M34 (C), M48 (D) e M67 (E).

La stazionarietà di questo gruppo di markers risiede nel fatto di essere posti nell'ipolimnio del lago, zona isolata e stabile dove i movimenti dell'acqua in genere non superano il centimetro al secondo, fatti salvi alcuni eventi, per lo più invernali, connessi con il mescolamento convettivo o con altri meccanismi di ossigenazione degli strati più profondi.

È stato per altro dimostrato che questi ultimi non hanno la capacità di trasferire masse d'acqua dal fondo alla superficie e, oltre tutto, nei due anni di simulazione nessun inserimento di acqua ha interessato gli strati ipolimnici (Ambrosetti *et al.*, 2010).

Solo 6 dei 22 markers dei tributari possono aver lasciato il lago uscendo con le acque del Ticino emissario; M53-M54 (tributario Vevera), M56 (secondo marker dell'Erno), M67-M68 (Tresa, Fig. 2.8E), M72 (secondo marker del Bardello). Il valore del tempo di residenza è di circa 2 anni per Vevera ed Erno, e di circa 350 e 400 giorni per Tresa e Bardello rispettivamente. I markers del Toce, M57, M58 e M58 hanno coperto quasi l'80% della loro distanza nominale dall'uscita. I rimanenti hanno avuto comportamenti diversi: lo sviluppo tendenziale delle traiettorie dei markers M59-M60 (S. Bernardino) e M63-M64 (Maggia) è stato verso la direzione SW, al contrario M55 (Erno, primo marker), M65-M66 (Verzasca), M69 (Boesio, primo marker), M71 (Bardello, primo marker) hanno viaggiato verso la direzione NE; M61 e M62 (Cannobino) hanno ambedue camminato verso W ma in direzioni opposte Nord-Sud. Da ultimo, il primo marker del tributario Ticino, M51, ha coperto più della sua distanza nominale N-S dall'uscita, mentre il secondo marker, M57, ha evidenziato solo uno spostamento verso W.

Le notevoli diversità di comportamento fra i markers dei tributari, e anche fra le singole coppie, possono essere interpretate solo alla luce delle diverse caratteristiche termiche delle acque affluenti e di quelle presenti in lago.

Una prima osservazione riguarda il fatto che tutti i markers fuoriusciti hanno avuto come posizione iniziale la foce di quei tributari che drenano bacini con altitudini modeste, il che significa acque con temperature tali da inserirsi ai livelli lacustri più superficiali. Viceversa gli affluenti che scendono da bacini idrografici con altitudini medie più elevate, nella fattispecie Ticino immissario, Maggia e Toce, oltre ad essere in genere più freddi, possono essere carichi di limo glaciale che ne aumenta la densità e quindi il loro inserimento in lago avviene a livelli più profondi. Tuttavia questi markers non superano nel loro successivo percorso in lago la profondità di 100 m, probabilmente per effetto del loro miscelamento con le acque ospitanti; si ha conferma del fatto che non c'è stato mescolamento verticale e quindi che i markers non hanno raggiunto il fondo lacustre dal fatto che nei due anni di simulazione non è stato verificato nell'ipolimnio alcun incremento di ossigeno, ma anzi una sua diminuzione (Ambrosetti *et al.*, 2010).

Quanto al diverso comportamento riscontrato fra le singole coppie alla medesima foce, la loro immissione a due diverse profondità (1 e 7 m) può, di volta in volta, aver significato l'inserimento in filoni d'acqua con caratteristiche dinamiche completamente differenti, determinate non solo delle già ricordate diverse profondità di inserimento delle acque immissarie ma anche da condizioni morfologiche locali.

Conclusioni e lavoro in corso

L'essenziale dei risultati di questo studio possono essere sintetizzati in queste affermazioni:

- a) molta dell'acqua che arriva dai fiumi tributari e/o da profondità da 0,0 a circa 50-70 m sotto la superficie libera ha valori probabili di tempo di residenza tra 250 giorni e 2 anni o superiore;
- b) l'acqua che scorre sotto 150-180 m mostra alcuni movimenti orizzontali ma ha poche probabilità di innalzarsi verticalmente;
- c) nessuna ipotesi generale può essere fatta circa il destino dell'acqua che fluisce nella zona intermedia.

Queste prime conclusioni circa il tempo di residenza delle acque del Lago Maggiore trovano piena conferma nei meccanismi di mescolamento e di ossigenazione delle acque profonde descritti da Ambrosetti *et al.* (2010): nel periodo invernale le acque dello strato più superficiale (in genere 100-120 m in conformità all'attività convettiva di questi ultimi 40 anni) sono in grado di circolare liberamente. Quelle dei livelli più profondi rimangono invece isolate, indipendentemente dai loro modesti movimenti interni e si possono considerare "ferme". Il destino delle masse d'acqua intermedie è invece legato al fatto che risentono della profondità raggiunta di anno in anno dal mescolamento verticale invernale e il loro tempo di ricambio è pertanto soggetto all'essere, o meno, coinvolti dal sistema circolatorio.

Una conferma di quanto qui esposto può essere rilevata anche attraverso l'analisi delle distribuzioni verticali della stabilità termica dalla quale è possibile rilevare la netta separazione tra strati superiori mescolati, ipolimio-superficiale e ipolimnio-profondo (Ambrosetti *et al.*, 2010). Tuttavia il lavoro descritto sopra può essere considerato solo la parte introduttiva di uno studio più vasto sulla probabilità di usare gli strumenti euleriani-lagrangiani del CFD (Computational Fluid Dynamics) per valutare il tempo di residenza reale di un grande lago sud-alpino come il Maggiore.

Il lavoro ha sottolineato sia le potenzialità che le difficoltà di questo approccio. Indipendentemente dal suo livello di sofisticazione, dal punto di vista teorico un modello matematico 3D offre sempre un numero enorme di probabilità di investigazioni. Questo può essere facilmente dedotto dalla struttura delle equazioni discusse in Castellano *et al.* (2010), che rappresentano un modello di livello medio, e ulteriori commenti non sono necessari.

Le difficoltà si trovano nella reale possibilità di sfruttamento delle potenzialità precedenti, ad un livello abbastanza alto di precisione. Dal punto di vista pratico questo significa la necessità di usare un numero di markers grande abbastanza da permettere risposte statisticamente significative, su una discretizzazione abbastanza fine del corpo d'acqua. Questo può essere facilmente dedotto dalle differenze sensibili osservate dalle traiettorie delle particelle con posizioni iniziali relativamente vicine e, in particolare, tra le due particelle associate ai medesimi tributari.

In considerazione di queste note, la ricerca ora in sviluppo è diretta: a) un'estensione delle simulazioni precedenti oltre i 4 anni; b) una nuova serie di confronti con discussioni più approfondite; c) utilizzo di un maggior numero di markers (200). Il nuovo modello discreto e la posizione iniziale delle particelle lagrangiane saranno aggiustate sulla base dei risultati descritti in precedenza.

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 & A. Rolla. 2006. Il clima dell'areale del Lago Maggiore durante gli ultimi cinquant'anni. The climate of Lago Maggiore area during the last fifty years. *J. Limnol.*, 65(Suppl. 1): 62 pp.
- 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.
- 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: *Reflexing interfaces. Information Science Reference*. Hershey, New York, London: 257-277.
- Castellano, L., Ambrosetti W., 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.
- Dinelli, G. & A. Tozzia. 1977. Three-Dimensional Modelling of the Dispersion of Pollutants in Mediterranean Coastal Waters. *XVII Int. Congress of IAHR*, August 1977, Baden Baden (Germany): 52-61.

2.2.1. Appendice

Movimento orizzontale e verticale di tutti i markers ambientali e tributari delle tabelle 1 e 2

