

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

2.1. Profondità di mescolamento

Nel corso del 2010 la verifica dell'effettiva profondità dello strato mescolato invernale nel Lago Maggiore è stata continua e condotta, come di consueto, attraverso una serie di sopralluoghi nel suo punto di maggior profondità 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 anche quest'anno, come negli ultimi 40 anni (Ambrosetti et al. 2010) l'omogenizzazione delle sue acque è risultata incompleta, un aspetto idrodinamico quest'ultimo, divenuto ormai 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 ha impedito la loro piena circolazione invernale.

Negli ultimi 50 anni il Lago Maggiore ha visto un riscaldamento estivo di 0.0101 MJm^{-2} per anno, mentre le perdite invernali sono risultate solo di 0.0034 MJm^{-2} per anno; di conseguenza il raffreddamento invernale non è stato sufficiente a controbilanciare l'accumulo estivo.

Anche le indagini condotte nel 2010 hanno confermato quanto già sottolineato nei rapporti annuali precedenti circa l'incidenza negativa sulla profondità del mescolamento di alcuni parametri meteo-limnologici. In particolare del vento e delle temperature dell'aria e dell'acqua superficiale, parametri responsabili della generazione dell'energia necessaria ad indurre la presenza di moti convettivi capaci di agire dalla superficie al fondo del lago. Entro il bacino lacustre verbanese è infatti notevolmente diminuito il percorso invernale del vento, sopra tutto in febbraio (solo 2.781 km nel 2010 contro una media del periodo di confronto di 3.250 km). La differenza media invernale fra le temperature dell'acqua-superficiale e dell'aria è stata di soli 0.05°C , il che ha contribuito a ridurre le perdite di energia calorica ad onda lunga (back radiation), nonché di calore di evaporazione e sensibile, favorendo così un minore raffreddamento invernale del lago.

Negli ultimi decenni il lago, risentendo dell'evoluzione climatica globale in atto che tende, come è noto, al riscaldamento, ha evidenziato un progressivo incremento dell'energia totale contenuta nelle sue acque, come risulta dalla Fig. 2.1 nella quale ne è riportato l'andamento mensile. Rilevanti risultano i contenuti calorici nell'intera massa d'acqua nell'inverno 2010 (4.885 MJm^{-2} in febbraio) e soprattutto in estate (6.344 MJm^{-2} in luglio): quest'ultimo valore risulta molto vicino al corrispondente del 1998 quando con 6.401 MJm^{-2} si è stabilito il massimo assoluto del cinquantennio. Ciò fa presupporre che anche nel 2011 la profondità di mescolamento verticale sarà ancora limitata agli strati superficiali in considerazione del fatto che la perdita di calore in inverno è in costante diminuzione.

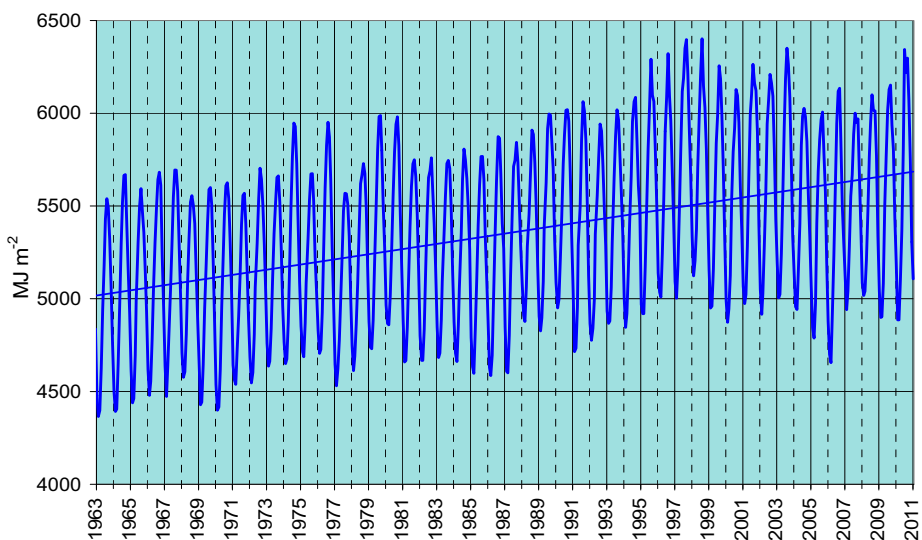


Fig. 2.1. Contenuto mensile di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963-2010

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 confermando, anche nel 2010, la tendenza al riscaldamento degli strati più depressi del lago il che rappresenta, per effetto del gioco delle densità, un ulteriore ostacolo al mescolamento convettivo del lago (Fig. 2.2).

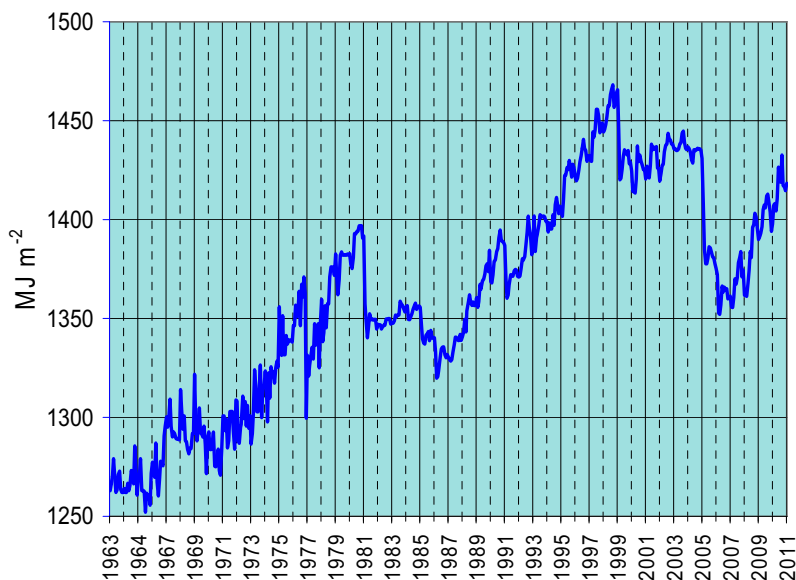


Fig. 2.2. Andamento della memoria climatica nel Lago Maggiore nel periodo 1963-2010

Per quanto riguarda il meccanismo del mescolamento convettivo, i moti relativi nell'inverno 2009-2010 hanno raggiunto soltanto 100 metri di profondità. La causa va ricercata, come detto, nella situazione meteorologica invernale che si è instaurata sull'areale lacustre e, a seguito di questa, della mancanza di inserimenti nell'ipolimnio

profondo di acqua fredda di origine litorale, così come si era verificato nell'inverno precedente e in altre occasioni (Ambrosetti et al. 2010).

In Fig. 2.3 è rappresentata la distribuzione verticale della concentrazione di O_2 dalla superficie al fondo del lago misurata dal novembre 2009 a marzo 2010. E' visibile da gennaio a marzo, attorno a -100 metri, la presenza dell'isolinea di 9.0 mg l^{-1} mentre a circa -125 metri si trova quella indicante 8.5 mg l^{-1} ed entrambe si mantengono allo stesso livello per tutto il periodo: è la dimostrazione che l'ossigenazione delle acque del lago per moti convettivi non ha superato questa profondità. Sul fondo del lago, a febbraio, compare l'isolinea 6.5 mg l^{-1} che denota un consumo di ossigeno che andrà accentuandosi nei mesi successivi tanto che a dicembre si stabilisce a 6.25 mg l^{-1} .

Un'ulteriore conferma della limitata profondità raggiunta dal mescolamento nel 2010 viene fornita dalla distribuzione verticale della temperatura dell'acqua lacustre, che indica nei mesi invernali la presenza tra 100 m e 150 m di pur modesti salti termici (pochi decimi di grado), ma tali da indicare che il mescolamento non ha superato queste profondità.

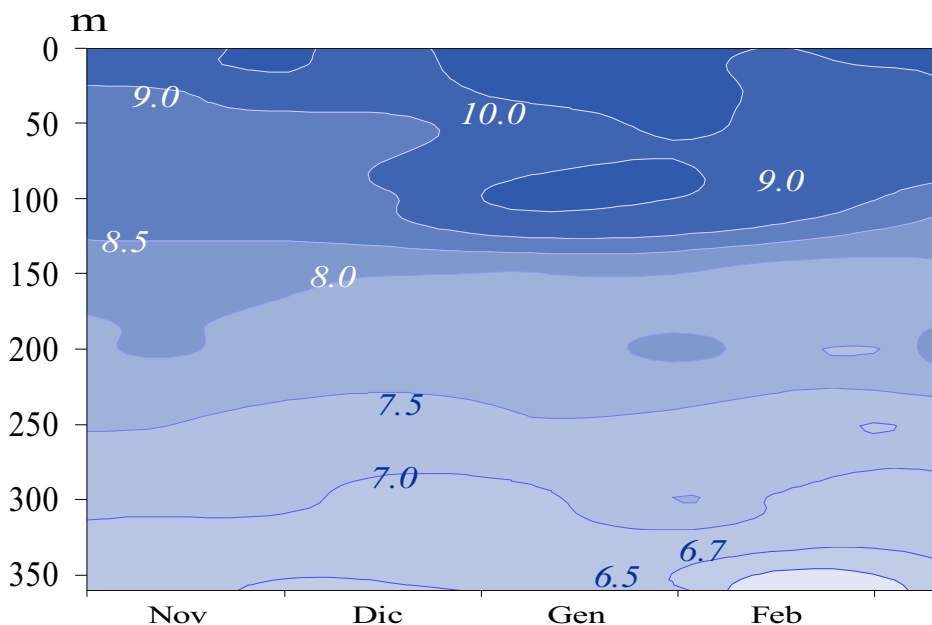


Fig. 2.3. Distribuzione verticale della concentrazione di O_2 (mg l^{-1}) nell'inverno 2009-2010

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 100 m di profondità; si ricorda che questo parametro rappresenta la quantità di energia necessaria per omogeneizzare la colonna d'acqua. I relativi profili verticali (Fig. 2.4) mostrano una decisa resistenza ai moti convettivi che a dicembre 2009 e a gennaio 2010 si colloca attorno a -50 m, è evidentemente l'effetto della persistenza di gradienti termici a quelle profondità; in febbraio quest'ultimo effetto è invece indicato dall'incremento della stabilità, modesto ma evidente, negli strati al di sotto di -100 m. La curva di marzo mostra infine come il mescolamento convettivo si sia ormai interrotto essendo già iniziata la fase di riscaldamento primaverile del lago

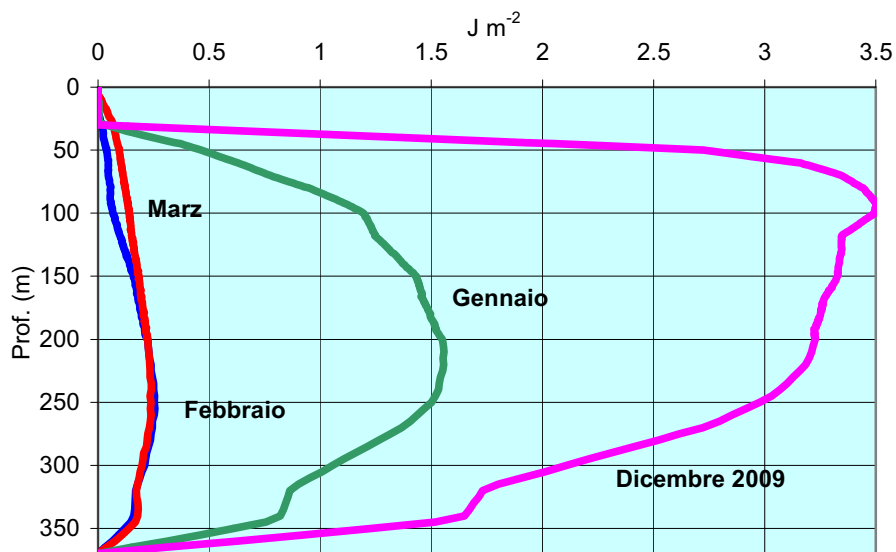


Fig. 2.4. Sequenza temporale della distribuzione verticale della stabilità termica del Lago Maggiore da dicembre 2009 a Marzo 2010.

2.2. Tempo di residenza delle acque lacustri.

Come specificato nei rapporti precedenti, questo studio è finalizzato alla stima del tempo di transito idraulico dalla massa idrica a diverse profondità nel Lago Maggiore e, conseguentemente, alla stima del tempo reale di residenza delle acque lacustri; a tal fine si è fatto uso del modello TRIM_LM, le cui condizioni generali di calcolo sono dettagliatamente descritte in Castellano et al., 2010; Castellano et al., 2008, nonché nei precedenti rapporti CIP AIS. (Ambrosetti et al., 2009)

Nel corso del 2010 la ricerca ha visto, in primo luogo, il proseguimento delle simulazioni con una ulteriore serie di prove al fine di definire la sensibilità e il comportamento dell' idrodinamica lacustre alle sollecitazioni dei parametri idro-meteorologici: ciò ha consentito di raffinare la risposta del modello e di verificarne la validità attraverso un suo sempre più preciso adeguamento alle leggi ed alle nozioni della limnologia fisica moderna. Rispetto alle risultanze dell'anno precedente, si è così ottenuto un notevole miglioramento delle conoscenze, sopra tutto grazie all'aumento del potere risolutivo del reticolo di integrazione ed a una più realistica calibratura del modello di turbolenza.

Successivamente ci si è focalizzati sugli spostamenti di 202 (duecentodue) markers privi di massa immessi in diversi punti del Lago Maggiore, percorsi calcolati nell'ambito di una simulazione numerica del tipo CFD tridimensionale estesa su un periodo temporale di 4 anni, raddoppiandolo quindi rispetto ai 2 anni di simulazione i cui risultati erano stati esposti nel precedente Rapporto CIP AIS (Ambrosetti et al., 2010).

In questa sede si tralascia il commento ai risultati relativi alle distribuzioni 3D di parametri quali la velocità e la temperatura delle acque, sostanzialmente uguali a quelli già descritti in dettaglio con le simulazioni degli anni precedenti, il che conferma la sostanziale correttezza della calibratura effettuata. Qui viene fissata l'attenzione sul

destino dei markers privi di massa immessi nel corpo idrico all'istante $t=0.0$ dell'intero ciclo di simulazioni.

L'applicazione del metodo dei markers privi di massa (cioè non reattivi) trasportati da campi di moto 3D e calcolati con sistemi CFD può essere considerato un "approccio recente" per quanto riguarda la tematica dei tempi di residenza delle acque lacustri di cui stiamo trattando; infatti le documentazioni nella letteratura tecnica corrente non sono molto numerose ma tutte di interesse assai significativo (Duwe et al., 2003; Doos & Engqvist, 2007).

Il modello discreto del lago utilizzato nel presente studio, riportato nelle Fig.2.5 e Fig.2.6, mostra come il corpo d'acqua sia stato idealmente suddiviso in celle di calcolo con dimensioni orizzontali di 250×250 m, mentre lungo la profondità sia stato diviso in 50 strati, più fitti nei livelli superiori: tale suddivisione comporta un totale di 877.500 celle. Sulle figure sono anche indicate la "direzione longitudinale", con il simbolo Y, che va intesa in senso positivo da S a N e che ha punto zero all'incile del lago, la "direzione trasversale", con il simbolo X, che ha il suo senso positivo da W ad E, e il punto zero alla foce del Toce, nonché la "direzione verticale", col simbolo Z, e con la quota "0" nel punto più profondo del lago e quindi il senso positivo verso l'alto.

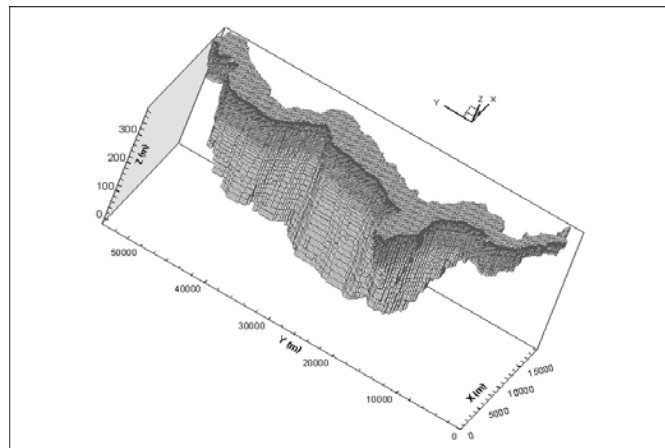


Fig. 2.5. Rete di maglie sull'intera geometria del Lago Maggiore

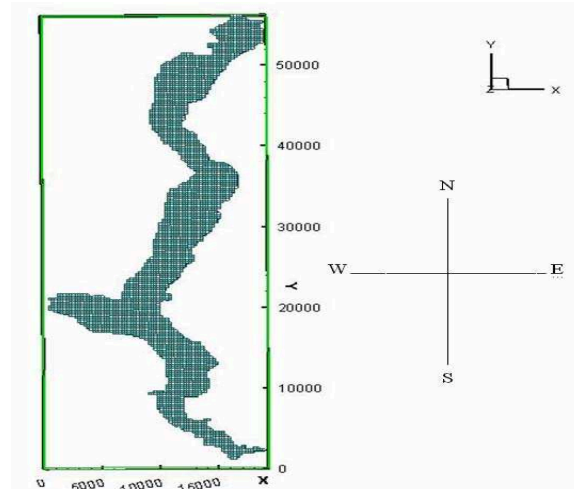


Fig. 2.6. Modello Discreto del Lago Maggiore. La coordinata indicata con X è misurata positivamente da Ovest ad Est e la coordinata indicata con Y è misurata positivamente da Sud a Nord

2.2.1. Posizione Iniziale dei markers

I markers utilizzati in questo studio sono stati in numero di 202 (duecentodue), suddivisi in due gruppi: il primo comprendeva quelli collocati inizialmente nel lago, quindi sottoposti alla sua condizione idrodinamica, e riferiti come “markers-ambiente” ; al secondo gruppo appartenevano invece i markers che all’istante $t=0.0$ furono immessi nella porzione terminale dei principali affluenti al lago soggetti quindi alle velocità di corrente di questi ultimi e in seguito riferiti come “markers-fiume”. Le loro posizioni iniziali sono elencate, rispettivamente, nelle Tab.2.1 e 2.2.

La maggior parte dei “markers ambiente” (una novantina) sono stati collocati a diverse profondità nella zona più settentrionale del lago, nella zona antistante la foce del Ticino, il suo maggior tributario. Le loro coordinate risultano pertanto tutte prossime a valori di $X = 16.800$ e di $Y = 55.000$ (Fig. 2.6).

I restanti “markers-ambiente” sono stati collocati in lago a profondità crescenti più verso Sud ma spostati quanto più possibile verso la sua sponda occidentale.

Quanto ai “markers fluviali” per ciascuno dei maggiori tributari al lago ne sono stati immessi cinque in prossimità della loro foce, a profondità comprese fra 0,5 e 9,0 m.

2.2.2. Percorsi dei “markers-ambiente”

Incrociando le informazioni derivanti dalle traiettorie orizzontali con quelle delle variazioni verticali di ciascun marker ambiente è possibile ricostruire i loro spostamenti nei quattro anni di durata programmati dalle simulazioni. Si rileva che nelle figure che seguono sono riportati, come esempio, gli spostamenti di alcuni markers, ma sono disponibili tutti i movimenti dei 202 traccianti.

L’analisi di quelle relative ai primi 90 markers con posizione iniziale nella zona più settentrionale del lago di fronte alla foce del Ticino immissario consente di rilevare che 11 di essi hanno raggiunto, entro i 4 anni della simulazione, la sezione di chiusura del lago o una zona vicina molto prossima al Ticino emissario: è pertanto possibile considerare i traccianti sotto elencati definitivamente usciti dal lago:

- M 2: partito dalla profondità di -0.5 m, uscito dopo circa 900 gg.;
- M 15: partito dalla profondità di -9.0 m, uscito dopo circa 1200 gg.;
- M 17: partito dalla profondità di -11 m, uscito dopo circa 800 gg.;
- M 23: partito dalla profondità di -16.5 m, uscito dopo circa 900 gg.;
- M 25: partito dalla profondità di -20.5 m, uscito dopo circa 600 gg.;
- M 30: partito dalla profondità di -23.0 m, uscito dopo circa 1000 gg.;
- M 32: partito dalla profondità di -25.5 m, uscito dopo circa 900 gg.;
- M 33: partito dalla profondità di -25.5 m, uscito dopo circa 600 gg.;
- M 49: partito dalla profondità di -48.0 m, uscito dopo circa 600 gg.;
- M 55: partito dalla profondità di -56.0 m, uscito dopo circa 900 gg.;
- M 58: partito dalla profondità di -60.0 m, uscito dopo circa 600 gg.

Tab. 2.1. Posizione Iniziale dei markers-ambiente (immersi nel lago)

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)
M_1	16875	55375	-0.5
M_2	16625	55375	-0.5
M_3	16875	55125	-0.5
M_4	16875	55375	-1.5
M_5	16625	55375	-1.5
M_6	16875	55125	-1.5
M_7	16875	55375	-5
M_8	16625	55375	-5
M_9	16875	55125	-5
M_10	16875	55375	-7
M_11	16625	55375	-7
M_12	16875	55125	-7
M_13	16875	55375	-9
M_14	16625	55375	-9
M_15	16875	55125	-9
M_16	16875	55375	-11
M_17	16625	55375	-11
M_18	16875	55125	-11
M_19	16875	55375	-13.5
M_20	16625	55375	-13.5
M_21	16875	55125	-13.5
M_22	16875	55375	-16.5
M_23	16625	55375	-16.5
M_24	16875	55125	-16.5
M_25	16625	55375	-20.5
M_26	16375	55375	-20.5
M_27	16625	55125	-20.5
M_28	16875	55375	-23
M_29	16625	55375	-23
M_30	16875	55125	-23
M_31	16625	55375	-25.5
M_32	16375	55375	-25.5
M_33	16625	55125	-25.5
M_34	16875	55375	-28.5
M_35	16625	55375	-28.5
M_36	16875	55125	-28.5
M_37	16875	55375	-34.5
M_38	16625	55375	-34.5
M_39	16875	55125	-34.5
M_40	16875	55375	-37.5
M_41	16625	55375	-37.5
M_42	16875	55125	-37.5
M_43	16875	55375	-40.5
M_44	16625	55375	-40.5
M_45	16875	55125	-40.5
M_46	16875	55375	-44
M_47	16625	55375	-44
M_48	16875	55125	-44
M_49	16875	55375	-48
M_50	16625	55375	-48
M_51	16875	55125	-48
M_52	16875	55125	-52
M_53	16625	55125	-52
M_54	16875	54875	-52
M_55	16875	55125	-56
M_56	16625	55125	-56
M_57	16875	54875	-56
M_58	16875	55125	-60
M_59	16625	55125	-60
M_60	16875	54875	-60
M_61	16875	54875	-64
M_62	16625	54875	-64
M_63	16875	54625	-64
M_64	16875	54875	-68
M_65	16625	54875	-68
M_66	16875	54625	-68
M_67	16875	54875	-72
M_68	16625	54875	-72
M_69	16875	54625	-72
M_70	16875	54875	-76
M_71	16625	54875	-76
M_72	16875	54625	-76
M_73	16875	54875	-80
M_74	16625	34875	-80

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)
M_75	16875	34625	-80
M_76	16875	54875	-84
M_77	16625	54875	-84
M_78	16875	54625	-84
M_79	16875	54875	-88
M_80	16625	54875	-88
M_81	16875	54625	-88
M_82	16875	54625	-92
M_83	16625	54875	-92
M_84	16875	54625	-92
M_85	16875	54625	-96
M_86	16625	54625	-96
M_87	16875	54375	-96
M_88	16875	54625	-100.5
M_89	16625	54625	-101
M_90	16875	54375	-101
M_91	12375	50375	-106
M_92	12125	50375	-106
M_93	12375	50125	-106
M_94	12375	50375	-112
M_95	12125	50375	-112
M_96	12375	50125	-112
M_97	12375	50375	-120
M_98	12125	50375	-120
M_99	12375	50125	-120
M_100	12375	50375	-128
M_101	12125	50375	-128
M_102	12375	50125	-128
M_103	12375	50375	-138
M_104	12125	50375	-138
M_105	12375	50125	-138
M_106	12375	49875	-150
M_107	12125	49875	-150
M_108	12375	49625	-150
M_109	12375	49875	-162
M_110	12125	49875	-162
M_111	12375	49625	-162
M_112	12375	49875	-174
M_113	12125	49875	-174
M_114	12375	49625	-174
M_115	12875	49125	-189
M_116	12625	49125	-189
M_117	12875	49375	-189
M_118	12875	49125	-207
M_119	12625	49125	-207
M_120	12875	49375	-207
M_121	12625	47375	-225
M_122	12375	47375	-225
M_123	12625	47125	-225
M_124	12625	47375	-243
M_125	12375	47375	-243
M_126	12625	47125	-243
M_127	11375	46875	-261
M_128	11125	46875	-261
M_129	11375	46625	-261
M_130	11375	46875	-279
M_131	11125	46875	-279
M_132	11375	46625	-279
M_133	10875	44125	-298.5
M_134	10625	44125	-298.5
M_135	10875	43875	-298.5
M_136	12875	39125	-319.5
M_137	12625	39125	-319.5
M_138	12875	38875	-319.5
M_139	12875	39125	-340.5
M_140	12625	39125	-340.5
M_141	12875	38875	-340.5
M_142	14875	35625	-361.5
M_143	14625	35625	-361.5
M_144	14875	35375	-361.5
M_145	14875	35625	-370
M_146	14625	35625	-370
M_147	14875	35375	-370

Tab.2.2. Posizione Iniziale dei “markers fiume” immessi negli affluenti al lago

Markers	Affluente	X (m)	Y (m)	Z (m)
M_148	Ticino	18875	53375	-0.5
M_149	“”	18875	53375	-1.5
M_150	“”	18875	53375	-2.5
M_151	“”	18875	53375	-5
M_152	“”	18875	53375	-9
M_153	Vevera	11875	4875	-0.5
M_154	“”	11875	4875	-1.5
M_155	“”	11875	4875	-2.5
M_156	“”	11875	4875	-5
M_157	“”	11875	4875	-9
M_158	Erno	10625	9625	-0.5
M_159	“”	10625	9625	-1.5
M_160	“”	10625	9625	-2.5
M_161	“”	10625	9625	-5
M_162	“”	10625	9625	-9
M_163	Toce	875	20875	-0.5
M_164	“”	875	20875	-1.5
M_165	“”	875	20875	-2.5
M_166	“”	875	20875	-5
M_167	“”	875	20875	-9
M_168	S. Bernardino	7125	22125	-0.5
M_169	“”	7125	22125	-1.5
M_170	“”	7125	22125	-2.5
M_171	“”	7125	22125	-5
M_172	“”	7125	22125	-9
M_173	Canobino	9375	42875	-0.5
M_174	“”	9375	42875	-1.5
M_175	“”	9375	42875	-2.5
M_176	“”	9375	42875	-5
M_177	“”	9375	42875	-9
M_178	Maggia	14875	51375	-0.5
M_179	“”	14875	51375	-1.5
M_180	“”	14875	51375	-2.5
M_181	“”	14875	51375	-5
M_182	“”	14875	51375	-9
M_183	Verzasca	18625	55125	-0.5
M_184	“”	18625	55125	-1.5
M_185	“”	18625	55125	-2.5
M_186	“”	18625	55125	-5
M_187	“”	18625	55125	-9
M_188	Tresa	15125	32375	-0.5
M_189	“”	15125	32375	-1.5
M_190	“”	15125	32375	-2.5
M_191	“”	15125	32375	-5
M_192	“”	15125	32375	-9
M_193	Boesio	10875	21125	-0.5
M_194	“”	10875	21125	-1.5
M_195	“”	10875	21125	-2.5
M_196	“”	10875	21125	-5
M_197	“”	10875	21125	-9
M_198	Bardello	12875	14875	-0.5
M_199	“”	12875	14875	-1.5
M_200	“”	12875	14875	-2.5
M_201	“”	12875	14875	-5
M_202	“”	12875	14875	-9

A titolo di esempio in Fig. 2.7 si riportano gli andamenti orizzontali e verticali del marker M 30, posizionato in partenza ad est di Locarno alla profondità di 23 m: il tracciate, dopo un’iniziale spostamento verso la sponda orientale del lago, si è progressivamente portato su quella occidentale per poi proseguire verso Sud fino a raggiungere la sezione di uscita dopo circa 1.000 giorni. La sua profondità si è mantenuta sempre negli strati più superficiali.

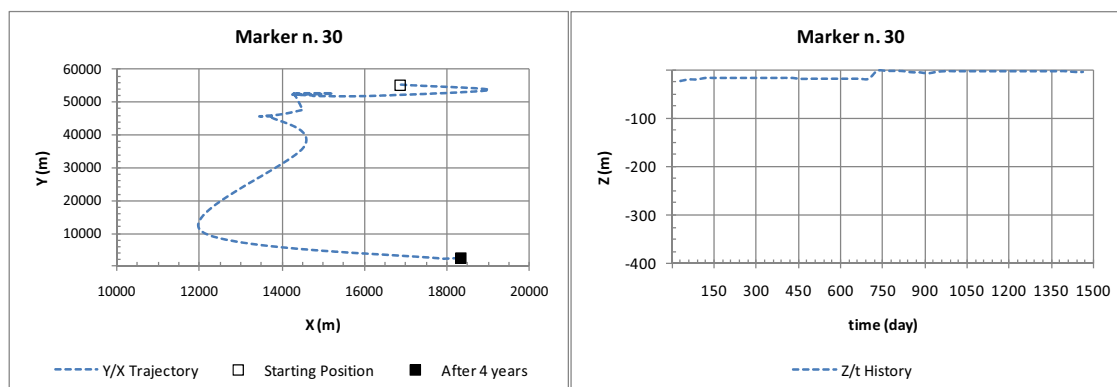


Fig. 2.7. Percorso e spostamenti verticali del marker M 30.

Dall'esame delle risultanze relative ai restanti 79 markers, posti come i precedenti nella porzione più nord-orientale del lago, si rilevano invece situazioni molto più diversificate che si possono sintetizzare:

a) 12 markers, pur con percorsi totali di diversa lunghezza e direzione, si sono mossi su distanze comprese tra 40 e 50 km dal punto di immissione lungo la direzione ideale verso l'uscita dal lago, mantenendosi sempre entro una profondità massima di 100 m:

- M 10: partito dalla profondità di -7.0 m;
- M 12: partito dalla profondità di -7.0 m;
- M 16: partito dalla profondità di -11.0 m;
- M 19: partito dalla profondità di -14.0 m;
- M 20: partito dalla profondità di -14.0 m;
- M 21: partito dalla profondità di -14.0 m;
- M 28: partito dalla profondità di -23.0 m;
- M 42: partito dalla profondità di -38.0 m;
- M 53: partito dalla profondità di -52.0 m;
- M 60: partito dalla profondità di -60.0 m;
- M 65: partito dalla profondità di -68.0 m;
- M 72: partito dalla profondità di -76.0 m.

L'esempio riportato nella Fig. 2.8 si riferisce al percorso del marker M 60 posizionato inizialmente ad est di Locarno alla profondità di 60 m. Dopo uno sprofondamento iniziale fino a circa 90 m, è successivamente risalito a quote più modeste e seguendo un percorso tortuoso con frequenti spostamenti da una sponda all'altra ha raggiunto, alla fine del terzo anno di simulazione il traverso di Intra. Risalito in superficie, ha proseguito il suo cammino verso Sud seguendo sempre la sponda occidentale del lago fino a ritrovarsi, dopo altri 300 giorni circa, nella baia di Ispra.

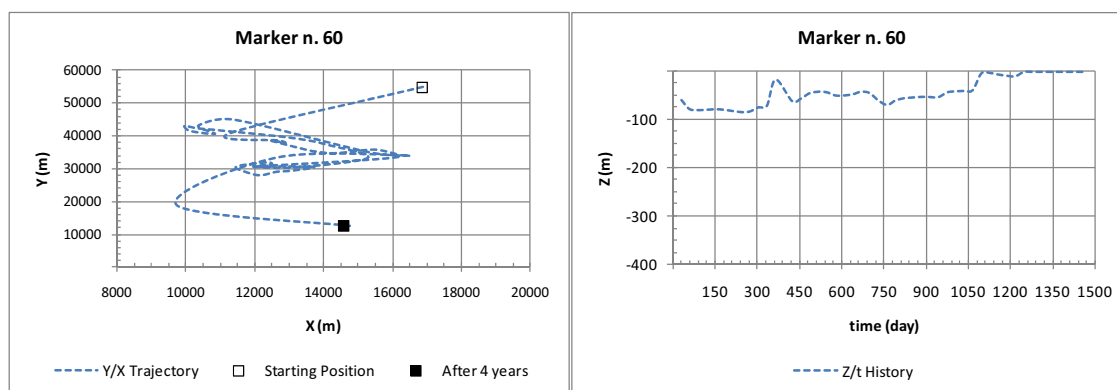


Fig. 2.8. Percorso e spostamenti verticali del marker n°60.

b) i seguenti 11 markers, pur con percorsi totali di diversa lunghezza e direzione, si sono spostati tra 30 e 40 km dal punto di immissione lungo la direzione ideale verso l'incile del lago: la loro profondità massima non ha mai superato 100 m.

- M 8: partito dalla profondità di -5.0 m;
- M 9: partito dalla profondità di -5.0 m;
- M 24: partito dalla profondità di -17.0 m;

- M 40: partito dalla profondità di -38.0 m;
- M 44: partito dalla profondità di -41.0 m;
- M 47: partito dalla profondità di -44.0 m;
- M 64: partito dalla profondità di -68.0 m;
- M 66: partito dalla profondità di -68.0 m;
- M 70: partito dalla profondità di -76.0 m;
- M 86: partito dalla profondità di -96.0 m;
- M 88: partito dalla profondità di -101.0 m.

Per questo gruppo l'esempio riportato in Fig. 2.9 è relativo al percorso compiuto dal marker M 86 che è partito dalla zona ad est di Locarno alla profondità di 96 m: nella fase iniziale del suo percorso si è mosso alternativamente tra le due sponde, mantenendo pressoché costante il suo livello per poi risalire, dopo circa 400 giorni a -30 m, quando si trovava ancora all'altezza di Brissago. Successivamente, mantenendosi in superficie, e seguendo la costa occidentale del lago ha raggiunto la zona del golfo di Pallanza dopo 1500 giorni e 40 km di percorso.

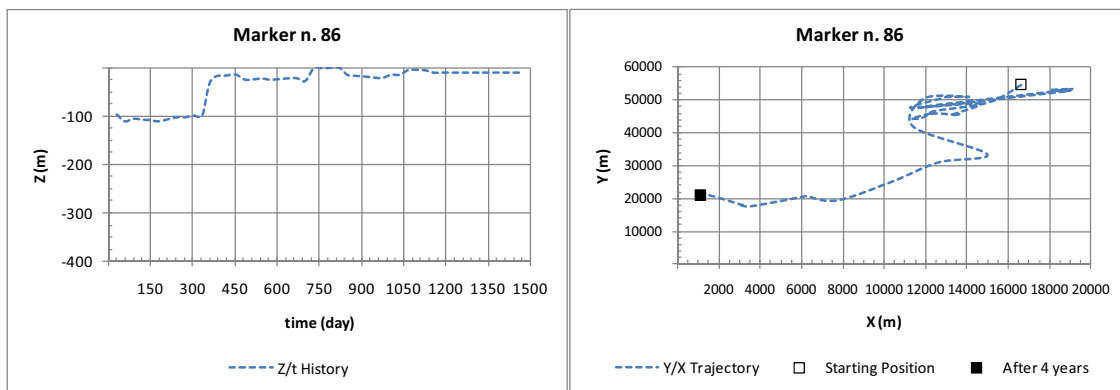


Fig. 2.9. Percorso e spostamenti verticali del marker M 86.

c) altri 8 dei markers posizionati nella zona ad est di Locarno di fronte alla foce del Ticino, pur seguendo percorsi totali di diversa lunghezza e direzione, hanno raggiunto distanze comprese tra 25 e 30 km dal punto di partenza lungo la linea ideale verso la fuoriuscita dal lago, mantenendosi sempre ad una profondità non superiore a 100; eccone l'elenco:

- M 6: partito dalla profondità di -2.0 m;
- M 7: partito dalla profondità di -5.0 m;
- M 22: partito dalla profondità di -17.0 m;
- M 29: partito dalla profondità di -23.0 m;
- M 31: partito dalla profondità di -26.0 m;
- M 38: partito dalla profondità di -35.0 m;
- M 59: partito dalla profondità di -60.0 m;
- M 78: partito dalla profondità di -84.0 m.

In questo caso l'esempio riportato in Fig. 2.10 è relativo al percorso del marker M 59 che è stato immesso in lago a -60 m in un punto ad est di Locarno, Nella primo anno di simulazione ,mantenendosi ad una profondità leggermente superiore a quella iniziale si

è spostato verso la sponda occidentale e all'altezza di Cannobio, è risalito negli strati più superficiali. Il suo percorso verso Sud è quindi proseguito con più di una migrazione laterale nella strettoia tra Cannobio e Maccagno fino all'altezza di Luino dove ha interrotto il suo cammino dopo aver ancora fluttuato trasversalmente all'asse del lago in direzione di Cannero. In 1.500 giorni si è spostato di poco più di 25 km lungo la linea ideale di fuoriuscita dal lago.

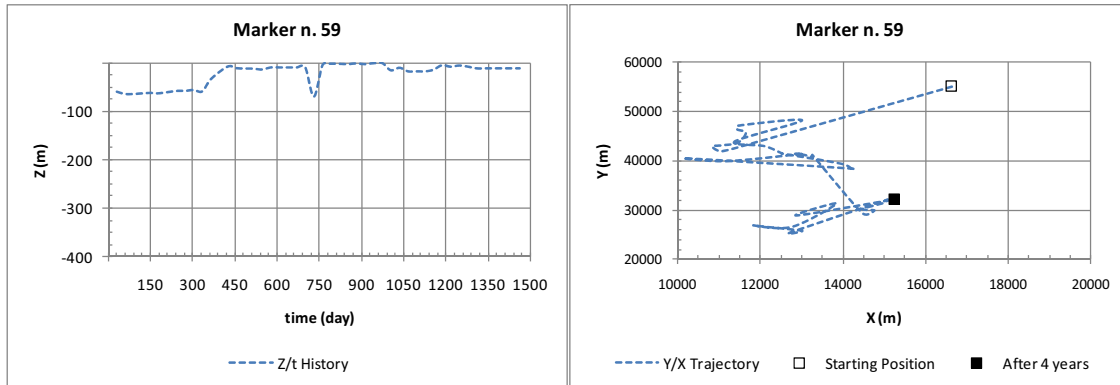


Fig. 2.10. Percorso e spostamenti verticali del marker M 59.

d) I 5 markers sotto elencati, appartenenti al gruppo di quelli immessi allo sbocco in lago del Ticino immissario, si sono avvicinati moltissimo alla zona dell'incile lacustre, percorrendo il cammino in un arco di tempo variabile tra 900 e 1200 giorni, ma, successivamente, hanno invertito la direzione risalendo verso nord:

- M 42: partito dalla profondità di -38.0 m;
- M 48: partito dalla profondità di -44.0 m;
- M 63: partito dalla profondità di -64.0 m;
- M 65: partito dalla profondità di -68.0 m;
- M.73: partito dalla profondità di -64.0 m.

L'esempio rappresentato in Fig. 2.11 riguarda il marker M 65 che era stato posto a -68 metri in un punto ad est di Locarno: le sue migrazioni verticali si possono così sintetizzare: dopo il primo anno di simulazione è risalito verso la quota di -40 m e al termine del secondo anno si è portato in superficie. Quanto al suo percorso orizzontale, il tracciate ha seguito prevalentemente traiettorie meridionali lungo la porzione occidentale del lago (pur con oscillazioni trasversali) tra Cannero e Luino e nel golfo di Pallanza coprendo una distanza di circa 50 km sin quasi all'incile del lago. Qui invertita la direzione ritornando verso Nord, ancora con spostamenti laterali dettati anche dalla morfologia del lago, per ritrovarsi, dopo 4 anni, all'altezza di Ispra.

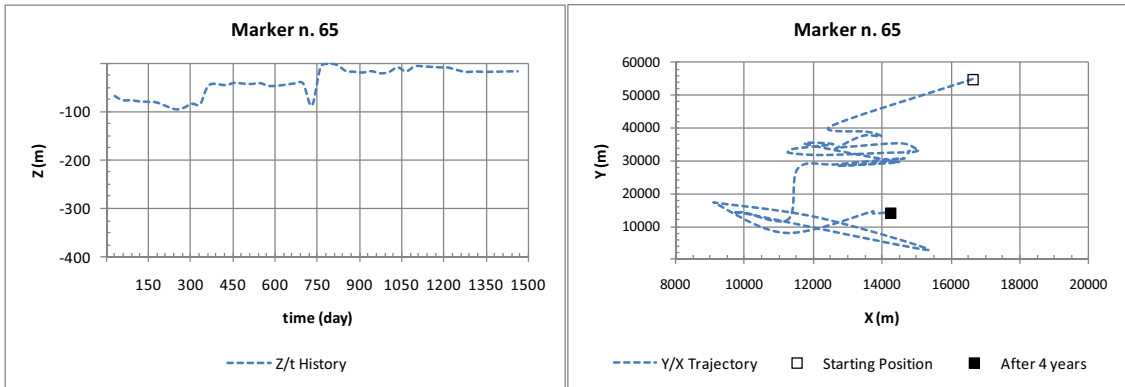


Fig. 2.11. Percorso e spostamenti verticali del marker M 86.

e) tutti i rimanenti 47 markers di questo gruppo di 90 collocati all'estremità più settentrionale del lago hanno percorso meno di 20 km (da intendere sempre rispetto alla direzione ideale verso l'uscita, cioè in direzione Sud).

Altri 57 “markers-ambiente” sono stati posizionati in partenza in siti più meridionali dei precedenti ed a profondità superiori ai 100 m e le relative risultanze delle simulazioni possono così essere riassunte:

f) soltanto i sotto elencati 3 markers hanno raggiunto entro i 4 anni la zona dell'incile da dove ha origine il Ticino emissario e possiamo pertanto considerarli fuoriusciti definitivamente dalle acque del lago:

- M 95: partito dalla profondità di -112.0 m è uscito in circa 900 giorni;
- M 106: partito dalla profondità di -150.0 m è uscito in circa 900 giorni;
- M 107: partito dalla profondità di -150.0 m è uscito in circa 1100 giorni.

L'esempio riportato in Fig. 2.12 riguarda il marker M 95. Il tracciante, immesso nel lago alla profondità di 112 m, è rimasto statico per un anno e dopo essere risalito in superficie ha iniziato il suo percorso verso Sud lungo la sponda orientale fino al traverso di Cannero per poi trasferirsi su quella opposta, entrando anche nel golfo di Pallanza e dirigendosi quindi verso l'emissario che è stato raggiunto in tre anni circa

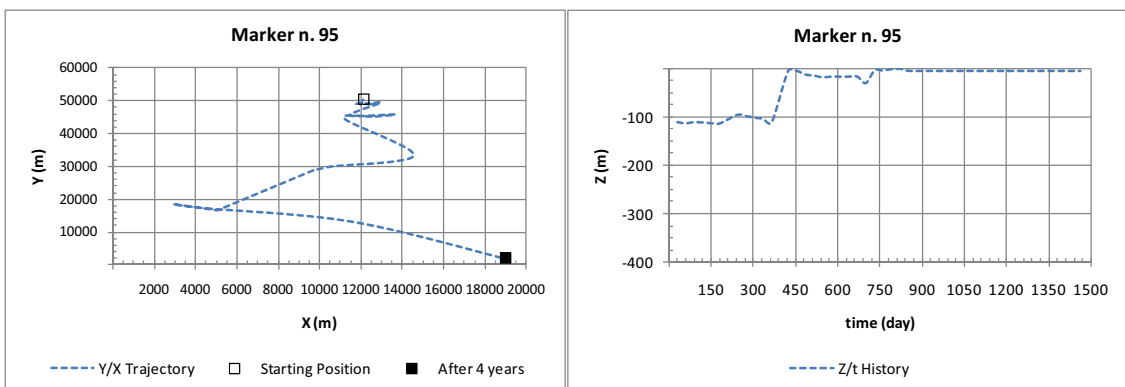


Fig. 2.12. Percorso e spostamenti verticali del marker M 95.

g) i sotto elencati 11 markers, pur con percorsi totali di diversa lunghezza e direzione, si sono spinti fino ad aree poco lontane (10-20 km) dall'incile lacustre. Per la

maggior parte sono risaliti fino ai livelli più superficiali tranne M 92, sprofondato fino a 220 m, M 108 risalito a -70 m e M 144 che da -362 m è stato ritrovato a -105 m:

- M 92: partito dalla profondità di -106.0 m (prof. dopo 4 anni, -220 m);
- M 98: partito dalla profondità di -120.0 m (prof. dopo 4 anni -6 m);
- M 99: partito dalla profondità di -120.0 m (prof. dopo 4 anni -10 m);
- M 100: partito dalla profondità di -128.0 m (prof. dopo 4 anni -23 m);
- M 105: partito dalla profondità di -138.0 m (prof. dopo 4 anni -42 m);
- M 108: partito dalla profondità di -150.0 m (prof. dopo 4 anni -70 m);
- M 111: partito dalla profondità di -162.0 m (prof. dopo 4 anni -8 m);
- M 112: partito dalla profondità di -174.0 m (prof. dopo 4 anni -5 m);
- M 113: partito dalla profondità di -174.0 m (prof. dopo 4 anni -3 m);
- M 133: partito dalla profondità di -299.0 m (prof. dopo 4 anni -10 m);
- M 144: partito dalla profondità di -362.0 m (prof. dopo 4 anni -105 m).

L'esempio riportato in Fig. 2.13 si riferisce proprio al percorso di M 144 che, dal traverso di Maccagno dove era stato posto alla profondità di 362 m è risalito in pochi giorni a -200 e, dopo un anno circa a -100 m; ha stazionato per un lungo periodo (due anni) in zona e, dopo uno sprofondamento di breve durata, ha iniziato il suo cammino verso Sud lungo l'asse del lago fino alla baia di Ispra per poi risalire e ritrovarsi, dopo 4 anni nell'area prospiciente Stresa.

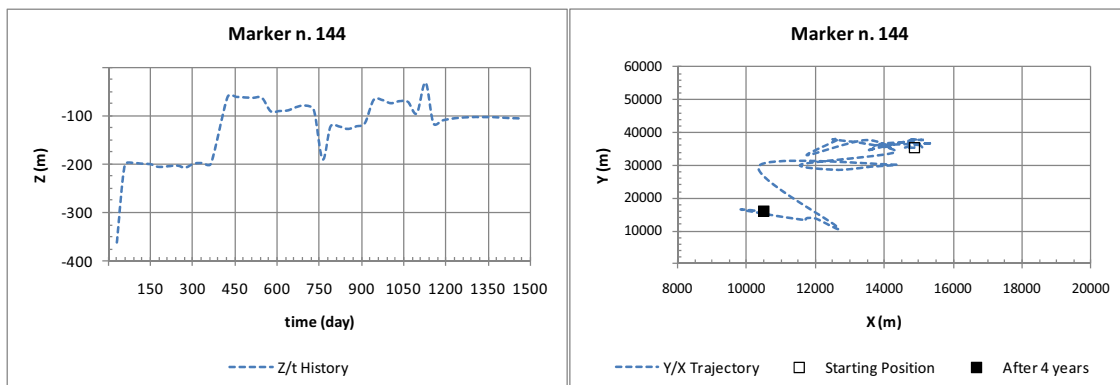


Fig. 2.13. Percorso e spostamenti verticali del marker n°144.

h) altri 10 markers, sia pure seguendo percorsi e direzioni diverse, si sono avvicinati nel loro cammino lungo la linea ideale verso la sezione di fuoriuscita dal lago, fino a 20-30 km dalla stessa: alcuni si sono mantenuti sotto i 100m di profondità (M 110, M 119, M 121 e M 122) mentre altri, pur essendo stati collocati negli strati più profondi sono risaliti a livelli superiori

- M 91: partito dalla profondità di -106.0 m (prof. dopo 4 anni, -10 m);
- M 104: partito dalla profondità di -138.0 m (prof. dopo 4 anni, -12 m);
- M 110: partito dalla profondità di -162.0 m (prof. dopo 4 anni, -178 m);
- M 114: partito dalla profondità di -174.0 m (prof. dopo 4 anni, -79 m);
- M 116: partito dalla profondità di -189.0 m (prof. dopo 4 anni, -44 m);
- M 117: partito dalla profondità di -189.0 m (prof. dopo 4 anni, -3 m);
- M 119: partito dalla profondità di -207.0 m (prof. dopo 4 anni, -157 m);
- M 121: partito dalla profondità di -225.0 m (prof. dopo 4 anni, -115 m);

- M 122: partito dalla profondità di -225.0 m (prof. dopo 4 anni, -265 m);
- M 123: partito dalla profondità di -225.0 m (prof. dopo 4 anni, -1 m).

L'esempio che qui viene rappresentato in Fig. 2.14 si riferisce al tracciante M 119, inizialmente collocato a Sud di Brissago alla profondità di -207 m è rimasto pressoché stazionario per il primo anno risalendo poi fino a quota -100 e procedendo verso Sud con traiettorie trasversali all'asse del lago nella strettoia Cannobio Maccagno. Successivamente più in linea con il suo asse, raggiunge al termine del quarto anno, l'area prospiciente Ghiffa, dopo essere nuovamente sprofondato a poco più di 150 m.

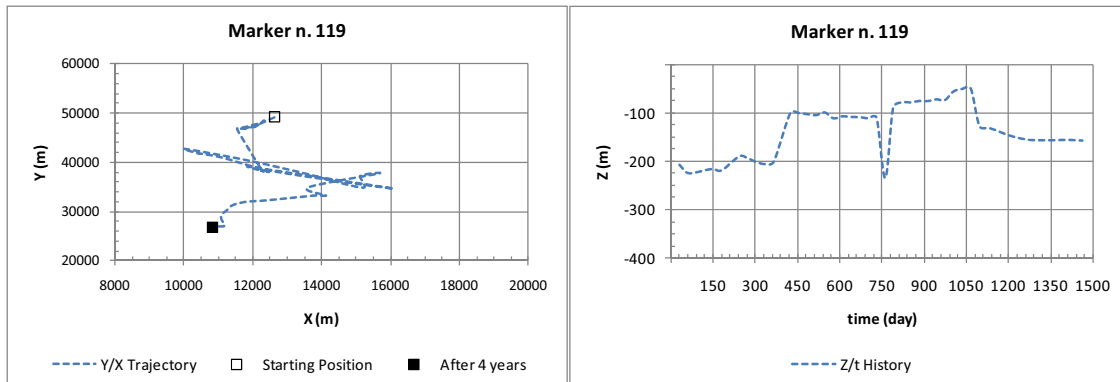


Fig. 2.14. Percorso e spostamenti verticali del marker M 119.

i) la Fig. 2.15 riporta l'interessante percorso del marker M 93 che, posto in acqua a Sud di Brissago a -106 m, nei 4 anni di simulazione si sposta a 4 profondità diverse. Passa in successione da meno 100-80 m del primo, a quote modeste (circa 10 m) nel secondo, ridiscende a circa 50 m nel terzo per poi sprofondarsi definitivamente a 120 m. Il suo percorso verso Sud è caratterizzato per fluttazioni trasversali all'asse del lago (è penetrato anche nel Golfo di Pallanza) e dopo circa 900 giorni è arrivato in prossimità della sezione di uscita del lago ma, invertendo la rotta (e affondando) ha ripreso a risalire verso Nord per oltre 20 km sul traverso di Oggebbio.

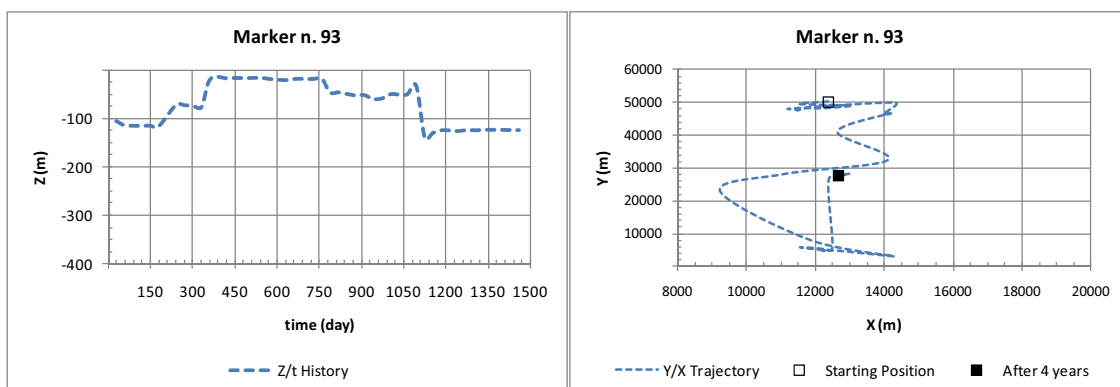


Fig. 2.15. Percorso e spostamenti verticali del marker M 93.

l) i rimanenti 22 markers di questo gruppo, per lo più posti in acqua tra i 140 e i 225 m di profondità nell'areale del delta del Fiume Maggia, hanno evidenziato spostamenti

relativamente modesti, non superando mai i 30 km dal punto di immissione o, addirittura restando pressoché fermi: si veda l'esempio del marker M 124 in Fig. 2.16.

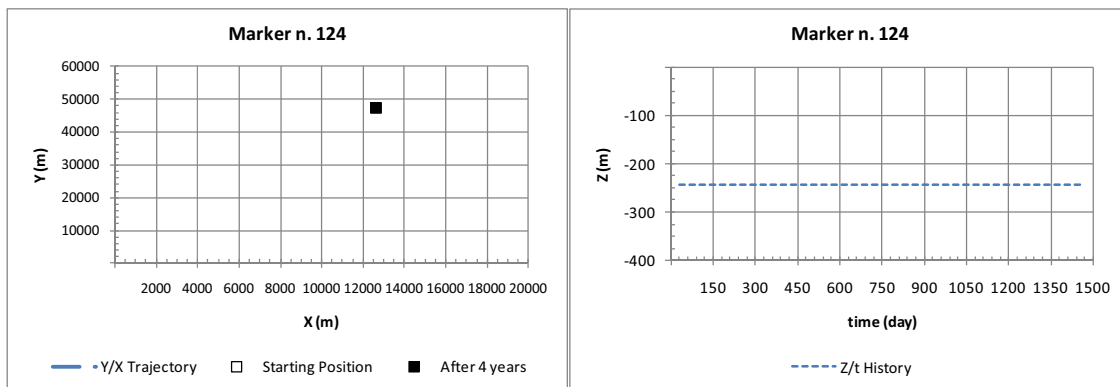


Fig. 2.16. Situazione del marker n° 124, fermo nella posizione di immissione.

2.3. Percorsi dei “markers fiume”.

Il destino dei markers-fiume, cioè dei cinque immessi nel punto di sfocio di ciascuno dei principali tributari al lago, può essere così sintetizzato:

Fiume Ticino Immissario:

- M 148: posizionato alla profondità di 1.0 m, progressivamente infossandosi, si è diretto verso la sponda occidentale e, dopo un percorso con spostamenti trasversali nella strettoia Cannobio-Maccagno, ha proseguito il suo cammino fino a Nord di Ghiffa, ad una distanza dal punto di immissione di 25 Km circa (Fig. 2.13);
- M 149: percorso caratterizzato dallo spostamento iniziale sulla sponda occidentale a Sud del Maggia, dove è rimasto per un biennio, quindi è affondato a circa 100 m, spostandosi nel contempo verso Nord, anche a latitudine maggiore rispetto al punto di partenza;
- M 150: in circa 1000 giorni ha percorso, lungo la costa occidentale. l'intero tragitto fino nei pressi della sezione di uscita dal lago per poi risalire fino all'altezza del golfo di Pallanza. Ha raggiunto i -70 m nel primo anno poi è risalito a livelli superficiali;
- M 151: percorso iniziale analogo al precedente con lunga permanenza nel golfo di Pallanza, discesa fino alla baia di Ispra e risalita ancora verso Pallanza. Profondità compresa fra 100 m e la superficie;
- M 152: percorso analogo ai precedenti con temporanea permanenza nella strettoia di Maccagno e successiva discesa fino alla baia di Ispra e definitiva risalita fino al Golfo di Pallanza: profondità a vari livelli entro i primi 100 m.

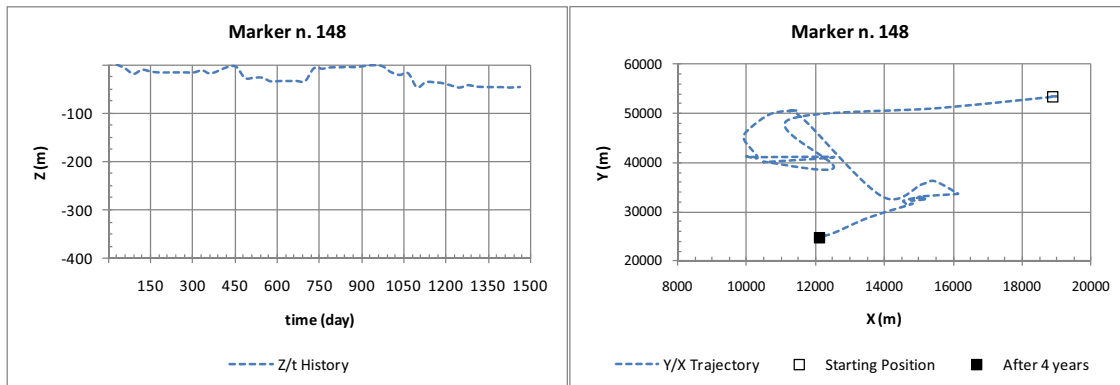


Fig. 2.17. Percorso e spostamenti verticali del marker M 148.

Torrente Verzasca:

- M 183: ha raggiunto la sezione di chiusura del lago in circa 1500 giorni con un percorso regolare (salvo una circuitazione nel bacino di Pallanza) per lo più in sponda occidentale e rimanendo costantemente negli strati più superficiali;
- M 184: percorso alquanto tortuoso con continui spostamenti da una sponda all'altra, massima posizione meridionale a Maccagno e risalita finale in un posizione molto prossima al punto di partenza: profondità variabile e in progressivo aumento fino a 73 m;
- M 185: intero percorso nel bacino di Locarno con spostamento sulla sponda occidentale e ritorno in prossimità del punto di partenza a profondità costante nei primi metri superficiali;
- M 186: percorso analogo a M 184 ma più di uno spostamento fra le due sponde, profondità tra 5 e 16 m tranne nel terzo anno quando ha superato 60 m;
- M 187: ha raggiunto la sezione di uscita in 730 giorni navigando lungo la sponda occidentale per lo più a profondità non superiori a 10 m.

Fiume Maggia:

- M 178: intero percorso all'altezza della sua foce, con spostamento dalla costa occidentale a quella orientale; per i primi tre anni la profondità è variata da 70 a 100 m, con successiva risalita in superficie;
- M 179: percorso inizialmente diretto verso meridione fino a Maccagno, successiva risalita nell'area a sud del delta del fiume. Profondità di circa 50 m il primo anno, di 250-270 m il secondo, di 30 m il terzo e in superficie il quarto;
- M 180: percorso limitato a spostamenti trasversali all'asse del lago nella zona a Sud del delta: profondità di circa 50 m il primo anno, di una decina di metri il secondo ed il terzo, di 135 m il quarto;
- M 181: un unico spostamento trasversale verso la costa orientale; profondità dai 25 m del primo anno ai pochi metri dei successivi;
- M 182: iniziale direzione meridionale fino a Cannobio, poi risalta in prossimità del punto di immissione: profondità in progressivo aumento fino a 86 m. (Fig. 2.18).

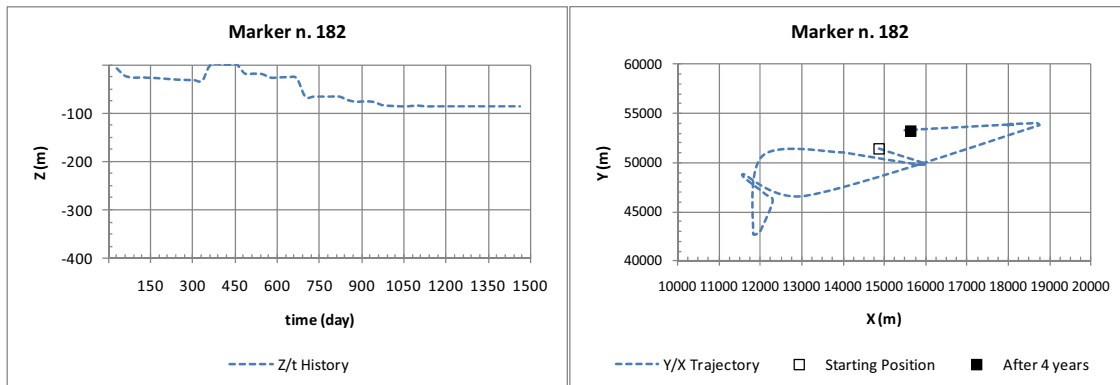


Fig. 2.18. Percorso e spostamenti verticali del marker M 182.

Torrente Cannobino:

- M 173: stazionarietà iniziale presso il punto di immissione poi discesa fino a penetrare nel golfo di Pallanza con profondità da 1 a -31 m;
- M 174: percorso analogo al precedente ma più irregolare con sprofondamento il secondo anno fino a 200 m;
- M 175: dopo alcuni spostamenti trasversali discesa fino all'uscita dal lago in poco più di 900 giorni a 3-4 m di profondità;
- M 176: percorso complesso con risalita iniziale fino al delta del F. Maggia, successiva discesa fino ad Arona e nuova risalita fino a Cannero, profondità da 5m a 42 m;
- M 177: percorso analogo a quello di M 175 a profondità sempre superficiali ed uscita dal lago dopo circa 1070 giorni.

Torrente S. Bernardino:

- M 168: percorso regolare fino all'uscita dal lago dopo 450 giorni rimanendo sempre a livelli superficiali;
- M 169: percorso analogo al precedente alla profondità di 2 m e uscita dal lago dopo circa 400 giorni;
- M 170: percorso analogo ai precedenti a profondità inferiori a 10 m e uscita dal lago dopo circa 400 giorni;
- M 171: si è spostato inizialmente verso il centro lago, è successivamente sceso fino alla baia di Ispra ed è poi risalito fino al golfo di Pallanza mantenendosi sempre nei 10 m superficiali;
- M 172: sprofondato inizialmente fino a 75 m, è risalito fino a Cannero per poi invertire la direzione e arrivare all'uscita dal lago dopo circa 1.100 giorni.

FiumeToce:

- M 163: ha raggiunto la sezione di uscita dal lago dopo poco meno di 400 giorni alla profondità di 65 m;
- M 164: inizialmente è sprofondato a 80 m permanendo nel Golfo di Pallanza; successivamente ha raggiunto l'uscita dal lago dopo poco meno di 700 giorni alla profondità di 25 m (Fig. 2.19);
- M 165: percorso simile a M 163 ma con profondità variabili al di sopra di 100 m e raggiungendo l'uscita dal lago in circa 1100 giorni;

- M 166: percorso simile a M 163 ma con profondità limitata a 5-7 m e uscita dal lago dopo circa 750 giorni;
- M 167: risalito inizialmente fino a Cannero, si è quindi sprofondato a 150 m circa, è rientrato nel golfo di Pallanza risalendo a -20 per poi dirigersi verso Sud, a quota -100 m, fino alla Baia di Ispra.

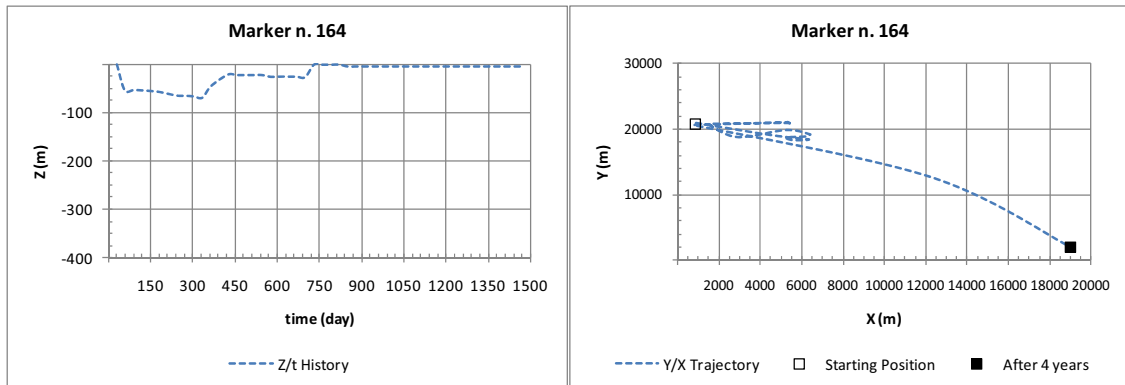


Fig. 2.19. Percorso e spostamenti verticali del marker M 164.

Torrente Erno:

- M 158: con un percorso regolare e mantenendosi in superficie è uscito dal lago in circa 250 giorni;
- M 159: percorso analogo a M 158 ma a profondità comprese fra 2 e 8 m e uscita dal lago in circa 1400 giorni;
- M 160: percorso analogo a M 158 ma con profondità comprese fra 3 e 5 m e uscita dal lago dopo circa 450 giorni;
- M 161: dopo uno sprofondamento iniziale a 60-70 m e successivamente a 300 m con spostamento verso NE, è risalito fino a 200 m dirigendosi a Sud e terminando il suo percorso nella baia di Ispra;
- M 162: percorso analogo a M 158 ma a profondità comprese fra 5 e 9 m e uscita dal lago in circa 350 giorni.

Torrente Vevera:

- M 153: percorso regolare, interamente in superficie, fino alla sezione di uscita dal lago dopo circa 250 giorni;
- M 154: percorso analogo a M 153, a profondità non superiore a 2 m e uscita dal lago dopo 250 giorni;
- M 155: percorso analogo a M 153, a profondità comprese fra 3 e 8 m e uscita dal lago dopo circa 750 giorni;
- M 156: percorso analogo a M 153 a profondità comprese fra 5 e 8 m e uscita dal lago dopo circa 300 giorni;
- M 157: percorso iniziale analogo a M 153 arriva vicino alla sezione di uscita dal lago e ritorna successivamente nella stessa direzione per circa 4 km, profondità in progressivo aumento in direzione Sud, da 9 a 70 m a circa 20 km dal punto di partenza.

Torrente Bardello:

- M 198: dopo un ristagno in fase iniziale, il percorso ha seguito una direzione prevalente verso l'uscita dal lago avvenuta dopo circa 1070 giorni a profondità variabili entro i primi 50 m;
- M 199: percorso del tutto analogo a M 198;
- M 200: percorso analogo a M 198;
- M 201: percorso molto tortuoso all'interno della baia d'Ispra all'inizio a profondità fino a 70 m e successivamente a -30 m;
- M 202: percorso prevalente in direzioni trasversali all'asse del lago, con spostamenti anche verso N a profondità inferiori a 30 m.

Torrente Boesio:

- M 193: percorso in direzione Sud lungo la costa orientale e uscita dal lago dopo circa 600 giorni; profondità variabili tra 1 e 10 m;
- M 194: percorso del tutto analogo a M 103, a profondità da 2 a 5 m;
- M 195: percorso del tutto analogo ai precedenti, a profondità da 3 a 7 m;
- M 196: percorso analogo a M 193 a profondità da 5 a 15 m e con fuoriuscita dal lago dopo 750 giorni;
- M 197: dopo un ampio circuito iniziale entro il golfo di Pallanza è disceso fin alla baia d'Ispra, quindi risale sino a Luino per poi puntare verso Cannero, profondità iniziale entro i 60 m e dal terzo anno a -250 m.

Fiume Tresa:

- M 188: percorso regolare diretto verso la sezione di uscita del lago raggiunta dopo 250 giorni, flottando a pochi metri di profondità;
- M 189: percorso e durata simile a M 188, a profondità da 2 a 7 m;
- M 190: percorso simile a M 188, a profondità da 3 a 10 m, e fuoriuscita dal lago dopo circa 600 giorni;
- M 191: percorso con frequenti spostamenti trasversali al lago, risalite a N fino ad delta del Maggia e ridiscese fino alla posizione finale di Ghiffa, nei primi 2 anni a profondità di circa 30m, da 100 a 250 m nel terzo e attorno ai 40 m nel quarto;
- M 192: percorso analogo a M 191 nella fase iniziale, successivamente discesa regolare fino alla sezione di uscita dal lago raggiunta, risalendo in superficie da profondità oltre i 30 m, dopo circa 1100 giorni.

2.2.3. Prime valutazioni sui tempi di residenza

La complessità delle risultanze ottenute dall'analisi riguardanti gli spostamenti dei 202 markers utilizzati dal modello nelle simulazioni permettono alcune considerazioni sui tempi di residenza delle acque nel Lago Maggiore, che dovranno successivamente essere integrate e analizzate in profondità attraverso elaborazioni che prevedono l'uso di traccianti idrosolubili in modo da evidenziare il trasporto di specie:

- I) i markers-ambiente posizionati nella zona più settentrionale del lago (Bacino di Locarno) hanno indicato che di questa massa d'acqua ne è fuoriuscita, in tempi compresi tra 600 e 1100 giorni, il 12 % circa: si tratta per lo più di quella collocata nello strato fino a 100 m di profondità. Un altro 5 % di essa, pur essendosi avvicinata all'incile del lago in tempi compresi tra 900 e 1100 giorni, se ne è successivamente allontanata, risalendo verso settentrione.

- Un'altra quantità, corrispondente al 13% della suddetta massa, ha percorso tra 40 e i 50 km in direzione dell'uscita del lago, mantenendosi sempre entro 100 m di profondità, mentre un ulteriore 12 % della stessa è riuscita a percorrerne tra 30 e 40 km ed un altro 9 % si è limitato ad un tragitto fra 20 e 30 km. Il rimanente 51% ha percorso meno di 20 km (da intendere sempre nella direzione ideale verso la zona di uscita) o è affondata a profondità superiori;
- II) fra i 57 "markers-ambiente" che hanno avuto come punti di partenza l'area a Sud del bacino di Locarno e profondità maggiori di 100 m, solo 3 hanno raggiunto la sezione di uscita dal lago in tempi tra i 900 e i 1000 giorni. Tutti gli altri si sono avvicinati a questa sezione in media fino a 20-30 km, nella maggior parte dei casi essendo risaliti a profondità superiori a 100 m;
 - III) un buon numero di "markers fiume" partiti dallo sbocco in lago dei maggiori tributari, ad esclusione della maggior parte di quelli relativi a Ticino immissario, Verzasca e Maggia, hanno raggiunto la sezione di uscita del lago, navigando sempre ai livelli più superficiali. I loro tempi di percorrenza risultarono compresi tra 250 e 1100 giorni, in dipendenza sopra tutto dalla distanza fra il punto di immissione e l'incile del lago. Risultano esclusi da questi tragitti quelli che si sono infossati a profondità superiori.

Dall'analisi dei risultati si possono trarre queste prime conclusioni:

- a) la massa d'acqua che occupa gli strati compresi nei primi 100 m di profondità ha tempi di residenza compresi tra un minimo di 1 anno ed un massimo di 4-5 anni;
- b) le acque degli affluenti hanno tempi di residenza tra i 250 e 1000 giorni, in considerazione della loro distanza dalla sezione di chiusura del lago. Da questa valutazione vanno escluse le acque di Ticino immissario, Verzasca e Maggia alle quali si potrebbero attribuire tempi dell'ordine dei 3-4 anni, in analogia con tutta la massa d'acqua del bacino di Locarno;
- c) le acque lacustri che occupano livelli inferiori a 100 m hanno tempi di residenza ancora non esattamente quantificabili ma certamente valutabili in un numero di anni a 2 cifre. Va comunque notato che sono state rilevate anche numerose risalite dei markers verso la superficie, dinamiche queste che sembrano privilegiare alcune aree particolari, ma anche alcuni momenti particolari dei cicli annuali e, nella fattispecie, le fasi del mescolamento verticale tardo invernale delle acque lacustri.

2.2.4. Considerazioni sull'idrodinamica lacustre

Le complesse risultanze relative agli spostamenti dei marker secondo il modello di simulazione applicato in questo studio ci impongono di prendere in considerazione e di applicare a esse quelle che sono le conoscenze attuali dell'idrodinamica limnologica con particolare riferimento alla situazioni dei gradi laghi profondi quale è appunto il Maggiore.

E' nota la dipendenza dei moti lacustri soprattutto dalla forza del vento, il principale motore delle correnti sopra tutto lungo il piano orizzontale, ma anche, fattore determinante del mescolamento verticale tardo invernale. Nel caso specifico del Lago Maggiore il campo anemologico è caratterizzato da due principali direzioni di provenienza (da Nord e da Sud) lungo l'asse principale del lago che è impostato su un

solco vallivo con prevalente orientazione meridiana. Non vanno per altro trascurate la provenienza del vento da Est, che si manifesta, sopra tutto nel bacino di Locarno, e quella da NW che incide in particolare sul golfo di Pallanza e successivamente, seguendo l'asse del lago, anche sul tratto fino alla baia di Ispra. Il forcing del vento sulla superficie del lago è stato per altro modellato dal campo del vento, assai variabile nel tempo, costruito sulla base dei dati registrati nelle stazioni meteorologiche di Pallanza e Locarno Monti.

Ma i movimenti della massa d'acqua lacustre che rispondono alla forza innescante del vento sono condizionati da altri fenomeni fisici dei quali la limnologia non può prescindere e, in particolare, da:

1) strutture termiche che si impostano entro la massa d'acqua.

Uno degli aspetti più importanti che dimostrano il condizionamento operato dalle strutture termiche presenti nella massa d'acqua sulla dinamica lacustre è quello evidenziato dagli spostamenti verticali dei markers. Questi, nella loro stragrande maggioranza, si sono verificati nei mesi del tardo inverno, in corrispondenza cioè con la fase di massimo mescolamento verticale e di inserimento di acqua fredda in profondità che nei laghi monomittici caldi avviene durante e alla fine dell'inverno limnologico. Dette migrazioni verticali, riscontrate sia verso l'alto che verso il basso, sono state molto frequenti e rese visibili anche in alcune delle figure riportate in questo studio. Un esempio tipico di ripetute variazioni di profondità è rappresentato dalla Fig. 2.13 con il marker M 144 che, dopo circa 40 giorni dall'inizio della simulazione avventa il 1° Gennaio, ha avuto una prima risalita dalla profondità di 362 m a 200 m, seguita da una seconda che lo ha portato a -50 m dopo 390 giorni circa (Febbraio dell'anno successivo). Nell'inverno del terzo anno il marker è ridisceso fino a -200 m per poi risalire quasi subito a -100 m; un'altra doppia migrazione verticale (da -100 a -40 e viceversa) si è avuta dopo circa 1150 giorni, cioè a dire nei mesi invernali del quarto anno di simulazione.

Ma anche l'incidenza della stratificazione termica estiva, e il conseguente potenziamento verticale dello strato mescolato in autunno, determinano un forte condizionamento sul posizionamento verticale dei markers. Ne sono prove evidenti i loro progressivi sprofondamenti all'interno dello strato mescolato come quelli che, seguendo questa evoluzione termica delle acque, sono evidenti in Fig. 2.17 (marker M 148) e in Fig. 2.18 (marker M 182).

2) morfologia e morfometria della conca lacustre.

L'articolata planimetria del Lago Maggiore e la configurazione della sua batimetria sono evidentemente alla base del condizionamento dell'aspetto morfologico sull'idrodinamica delle sue acque. All'andamento uniforme della parte centrale del lago, a fondo piatto (profondo oltre 360 m) e a fianchi ripidi, si contrappongono morfologie più complesse non solo nelle sue parti estreme (Nord e a Sud) ma anche per la presenza del ramo laterale che costituisce il Golfo di Pallanza, che confluisce nella conca principale con un gradino batimetrico di 150 m circa. Molti markers, nel loro percorso in direzione della sezione di uscita dal lago sono entrati in detto golfo riducendo in tal modo i tempi ideali di percorrenza: si veda, ad esempio il marker M 95 in Fig. 2.12, ed anche il marker M 164 (Fig. 2.19) che, posto alla foce del Toce, ha compiuto più di un circuito nel golfo prima di dirigersi verso l'uscita dal lago.

All'estremità settentrionale del lago l'imponente delta del fiume Maggia contribuisce, anche con la sua parte sommersa, all'isolamento quasi completo del bacino di Locarno nel quale parte della massa d'acqua è confinata e può ristagnare a lungo. Il marker M 124 di Fig. 2.16 fa parte di un gruppo di 22 che, posizionati inizialmente nel bacino di Locarno a diverse profondità, restano praticamente fermi nel punto di partenza o se ne allontanano solo di pochissimo.

L'area di lago immediatamente a Sud del delta del Maggia costituisce inoltre una zona d'ombra ai venti settentrionali che consente pertanto anche la possibilità di lunghi periodi di ristagno delle acque (si veda M 182 in Fig. 2.18).

Al contrario, più a Sud la strettoia tra Cannobio e Maccagno, incassata tra fianchi alti e ripidi, restringe la sezione trasversale del lago ed è investita dai forti venti settentrionali che vi determinano movimenti accelerati e vorticosi (M 119 in Fig. 2.14 e M 148 in Fig. 2.17).

Come il delta del Maggia, anche quello meno pronunciato del Rio Cannero, combinato con la leggera rotazione verso occidente che l'asse del lago subisce localmente, determina una zona di relativa calma nelle acque lacustri antistanti le sue rive meridionali (M 182 in Fig. 2.18).

Una struttura morfologica importante per l'idrodinamica lacustre è rappresentata dall'ampia baia di Ispra che sbarra quasi completamente la valle lacustre ed è caratterizzata nella sua parte sommersa da un progressivo innalzamento del fondo lacustre. La massa d'acqua che vi confluisce da settentrione può quindi fuoriuscirne solo attraverso la strettoia laterale sulla costa occidentale, imposta anche dalla presenza del delta del torrente Erno. Non pochi markers non sono riusciti a superare questo ostacolo e sono stati quindi bloccati nella baia stessa (M 60 in Fig. 2.8) o da essa costretti a risalire verso Nord (M 93 in Fig. 2.15).

A meridione di questa struttura la conca lacustre risulta molto ridotta in larghezza e profondità e prosegue verso l'incile, riducendo progressivamente la sua sezione e, nella sua parte estrema, deviando verso Est. I markers in questo settore hanno avuto quindi un percorso regolare e più agevole probabilmente risentendo già del richiamo del Ticino emissario;

3) spinta idraulica operata dagli afflussi dei tributari al lago.

E' noto che i tributari del lago, sopra tutto quelli con afflussi di maggior portata, sono in grado di influenzare anche la circolazione delle acque a scala di bacino. E' quanto è stato accertato anche in questo studio dai movimenti dei markers fluviali posizionati in prossimità dei loro sbocchi a lago.

Come già specificato in precedenza, quasi tutti hanno raggiunto la sezione di uscita e hanno fatto eccezione in particolare un buon numero di quelli rilasciati alle foci dei tre tributari più settentrionali (Ticino immissario, Verzasca e Maggia), per altro condizionati, oltre che dalla distanza, anche dalla stabilità del bacino di Locarno nel quale confluiscono.

Dalla possibilità di uscita dal lago sono stati esclusi anche i markers-fluviali che si sono subito infossati a profondità superiori a quella di immissione (limitata, come si è detto, ad un massimo a 9 m). Questa loro migrazione verticale è stata probabilmente dovuta ai rapporti di densità sussistenti fra le acque in ingresso e quelle lacustri. Secondo uno schema, per altro assai semplificato data la complessità del fenomeno, è possibile il prevalere delle forze di galleggiamento, che determinano correnti superficiali, oppure la presenza di spinte all'immersione, o ancora, il verificarsi di flussi

di galleggiamento neutrale a profondità intermedie. I markers sottoposti alle due ultime condizioni non hanno per tanto avuto la possibilità di fuoriuscire dal lago;

4) forza di Coriolis, conseguente alla rotazione della terra.

Per effetto della rotazione della Terra ci si deve attendere che nel Lago Maggiore la forza di Coriolis debba deviare verso la sponda occidentale tutto l'afflusso fluviale, a cominciare da quelli di Ticino immissario e Maggia e, via via, di quelli che vi confluiscono più a meridione. La limitata larghezza del Maggiore potrebbe rendere difficile l'identificazione di questo particolare aspetto idrodinamico, tuttavia i percorsi seguiti da più di un marker nel loro spostamento verso Sud sembrano proprio seguire una corsia preferenziale lungo la sponda occidentale del lago, Per esempio, ne fa testimonianza in Fig. 2.12 il marker M 95, e con esso tutti gli altri che sono entrati nel golfo di Pallanza.

Questo flusso occidentale di corrente verso Sud potrebbe essere compensato da un altro in direzione opposta che segue invece la costa orientale del lago e che potrebbe essere definito di compensazione. A ciò potrebbe aver provveduto anche lo sbarramento operato dalla morfologia della baia di Ispra e, in particolare, dal promontorio di Ranco: si veda a questo proposito il tratto finale del percorso del già citato M 93 (Fig. 2.15) in risalita lungo la sponda orientale per oltre 20 km dalla suddetta baia fino quasi al traverso di Germignaga.

BIBLIOGRAFIA

- Ambrosetti, W. & L. Barbanti. 1999. Deep water warming in lakes; an indicator of climatic change. *J. Limnol.*, 58(1): 1-9.
- Ambrosetti, W., L. Barbanti, E.A. Carrara. 2010 Mechanism of hypolimnion erosion in a deep lake (Lago Maggiore, N.Italy). *J. Limnol* (69(1): 3-14.
- Ambrosetti, V., L. Barbanti, E.A. Carrara, A. Ferrari & A. Rolla. 2010. Valutazione del tempo di residenza delle acque lacustri Ricerche sull'evoluzione del Lago Maggiore. Aspetti limnologici. Programma quinquennale 2008-2012. Campagna 2009 e Rapporto quinquennale 2003-2007. Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere (Ed.):77-88
- 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.
- 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.
- Döös K. Engqvist A. (2007) "Assessment of Water Exchange between a Discharge Region and the Open Sea - A Comparison of Different Methodological Concepts" *Estuarine Coastal and Shelf Science* n. 74: 585-597.
- Duwe K. et al. (2003) D24: Realistic Residence Times Studies Integrated Water Resource Management for Important Deep European Lakes and their Catchment Areas. EUROLAKES FP5 Contract No. EVK1-CT1999-00004