

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

2.1. Profondità di mescolamento

La verifica dell'effettiva profondità dello strato mescolato invernale nel Lago Maggiore nel 2011 è stata condotta, come al solito, attraverso una lunga serie di sopralluoghi nel suo punto più profondo: lo scopo era appunto di analizzare la distribuzione verticale, lungo l'intera colonna d'acqua, di alcuni parametri fisici e chimici (temperatura e concentrazioni di ossigeno disciolto, nitrati e silicati). Si è visto che anche quest'anno, come del resto negli ultimi 40 anni, l'omogeneizzazione delle sue acque per moti convettivi è risultata incompleta, (Ambrosetti et al. 2010). Quest'ultimo evento ormai è divenuto per il Lago Maggiore più l'eccezione che la regola. Questo è dovuto al fatto, ormai ampiamente confermato a livello mondiale, che negli ultimi decenni si è verificata la tendenza ad un accumulo di calore nelle acque dei grandi laghi tale da impedire la loro circolazione completa.

Le stesse indagini hanno confermato quanto già sottolineato nei vari rapporti annuali circa gli effetti sulla profondità del mescolamento di alcuni parametri meteorologici: in particolare vento, radiazione solare temperature dell'aria e dell'acqua superficiale, responsabili nel produrre o nel limitare l'energia necessaria ad indurre moti convettivi dalla superficie al fondo del lago. Sull'intero bacino lacustre verbanese è notevolmente diminuito nel 2011 il percorso totale invernale del vento (9.793 km), risultato il minimo degli ultimi 10 anni, e in particolare in febbraio con 2.364 km si supera di poco il minimo mensile del 1998 (2.124 km). Ciò ha limitato il mescolamento verticale e non è stata sufficiente, a sopperire alla mancanza di vento, la differenza di temperatura media invernale tra acqua-aria risultata di soli 3.5°C (contro una media di 4.1 °C degli ultimi 15 anni), che ha determinato elevate perdite energetiche ad onda lunga, di evaporazione e sensibile, come risulta dal bilancio termico del lago.

Negli ultimi decenni, risentendo dell'evoluzione climatica globale, il lago è stato caratterizzato da un progressivo riscaldamento (+0.0122 MJ m⁻² per anno) pur evidenziando nel 2011 una diminuzione del calore totale contenuto nelle sue acque come risulta dalla Fig.2.1 dove è rappresentato l'andamento mensile dell'energia totale presente nelle acque del lago. Il calore nell'intera massa nell'inverno 2011 è in calo, soprattutto in febbraio (4.876 MJ m⁻²) e in estate (6.051 MJ m⁻² in agosto), con valori sui livelli del 2007. Nonostante questo nel 2011 la circolazione delle acque del lago è risultata, come detto, ancora limitata. Il tutto è confermato dal fatto che il contenuto calorico nell'ipolimnio profondo, sede della così detta "*memoria climatica*" (Ambrosetti & Barbanti, 1999), dopo una perdita iniziale di 27 MJ m⁻² tra gennaio e febbraio, si stabilizzata per tutto l'anno sui 1410 MJ m⁻², come si può osservare in Fig.2.2.

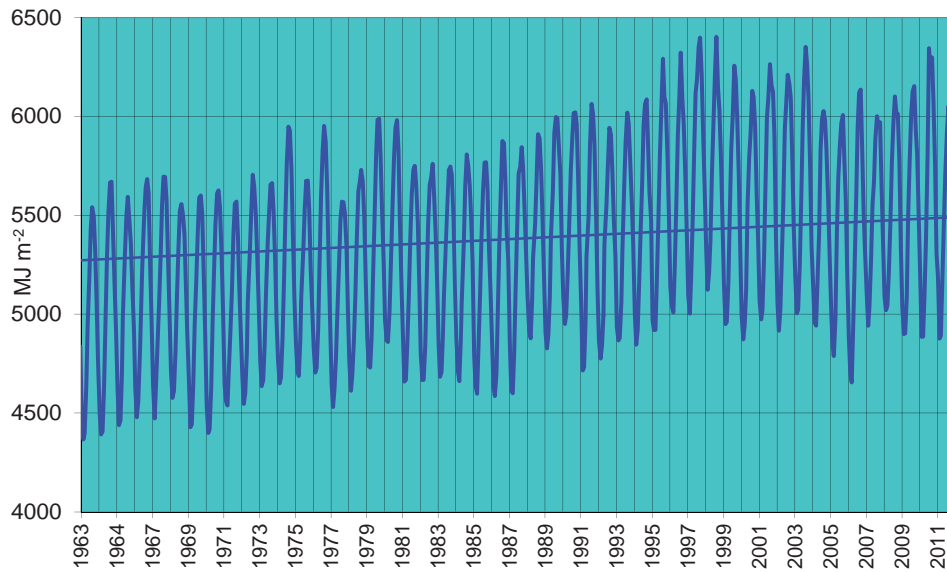


Fig. 2.1. Contenuto di calore nella colonna d'acqua del Lago Maggiore nel periodo 1963- 2011

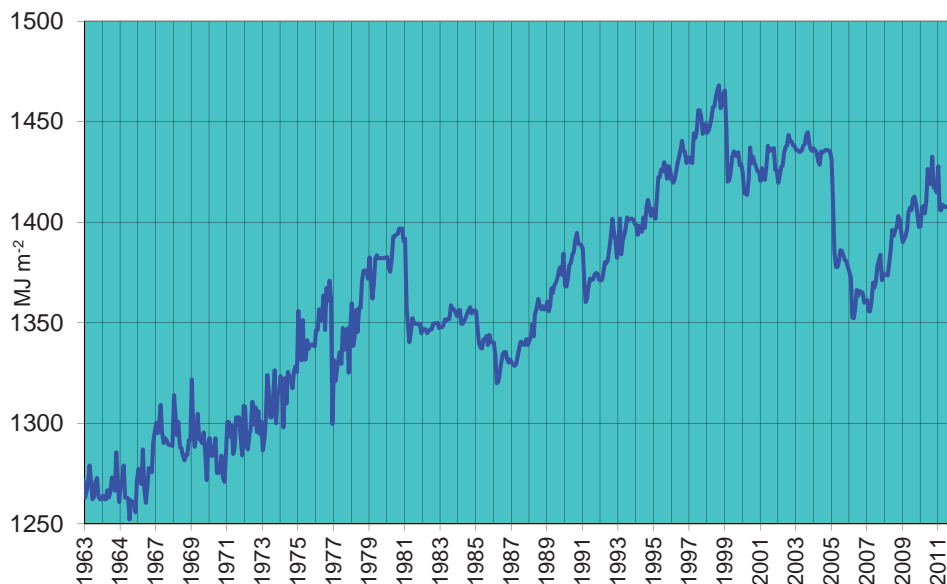


Fig.2.2. Andamento della memoria climatica nel Lago Maggiore periodo 1963-2011

Per quanto riguarda il mescolamento per moti convettivi, nell'inverno 2010-2011 non si sono superati i 100 metri di profondità. La causa va ricercata, come detto, nella situazione meteorologica invernale che si è instaurata sull'areale lacustre; per altro non si sono avuti inserimenti di acqua di origine litorale nell'ipolimnio profondo così come si era verificato in passato.

In Fig 2.3 è presentata la concentrazione di O_2 dalla superficie al fondo del lago misurata a Ghiffa nel 2011. Le isolinee si mantengono all'incirca allo stesso livello per tutto l'anno a dimostrazione che l'ossigenazione per moti convettivi si è limitata entro i livelli superficiali. Sul fondo del lago a febbraio compare l'isolinea dei 6.5 mg l^{-1} alla quale segue un consumo di ossigeno che va accentuandosi nei mesi seguenti, tanto che a ottobre e a dicembre la concentrazione di O_2 scende sotto i 6.0 mg l^{-1} . Una ulteriore conferma della limitata circolazione viene fornita dalla distribuzione verticale della

temperatura dell'acqua lacustre, che presenta nel trimestre invernale tra 50 e 100 metri modesti salti termici (pochi decimi di grado), comunque sufficienti ad impedire il proseguimento del mescolamento oltre queste profondità.

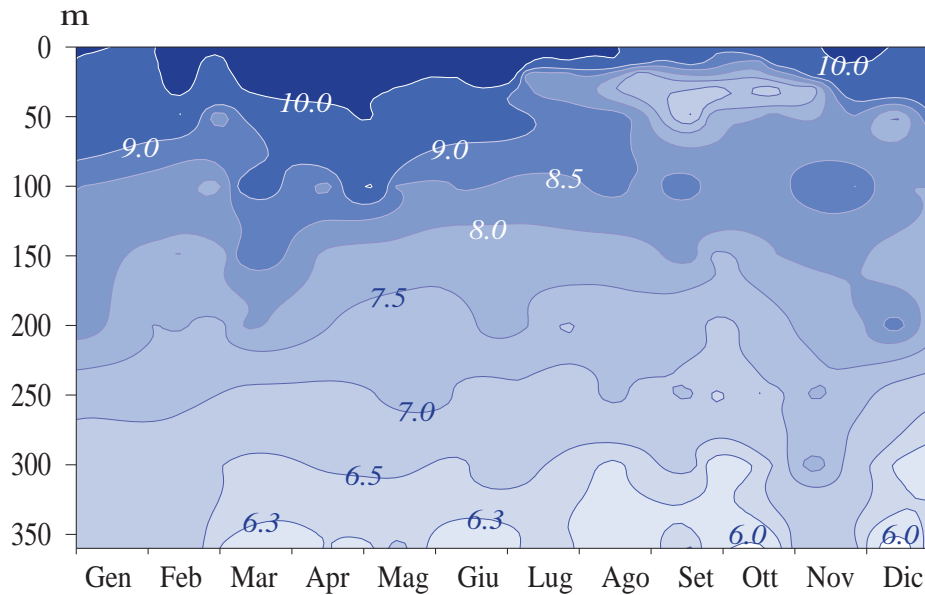


Fig.2.3. Distribuzione verticale della concentrazione di O₂ (mg l⁻¹) nel 2011.

Anche i valori della stabilità termica (che rappresenta la quantità di energia necessaria per omogeneizzare la colonna d'acqua) comprovano il limitato mescolamento verticale. I profili verticali di Fig.2.4 mostrano a dicembre 2010 e gennaio 2011 una resistenza ai moti convettivi attorno a 50 m di profondità 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 tra i 50 e i 100 m di profondità. La curva di marzo, e ancor più quella di aprile, mostrano infine come il mescolamento convettivo si sia ormai interrotto e sia già iniziata la fase di riscaldamento del lago

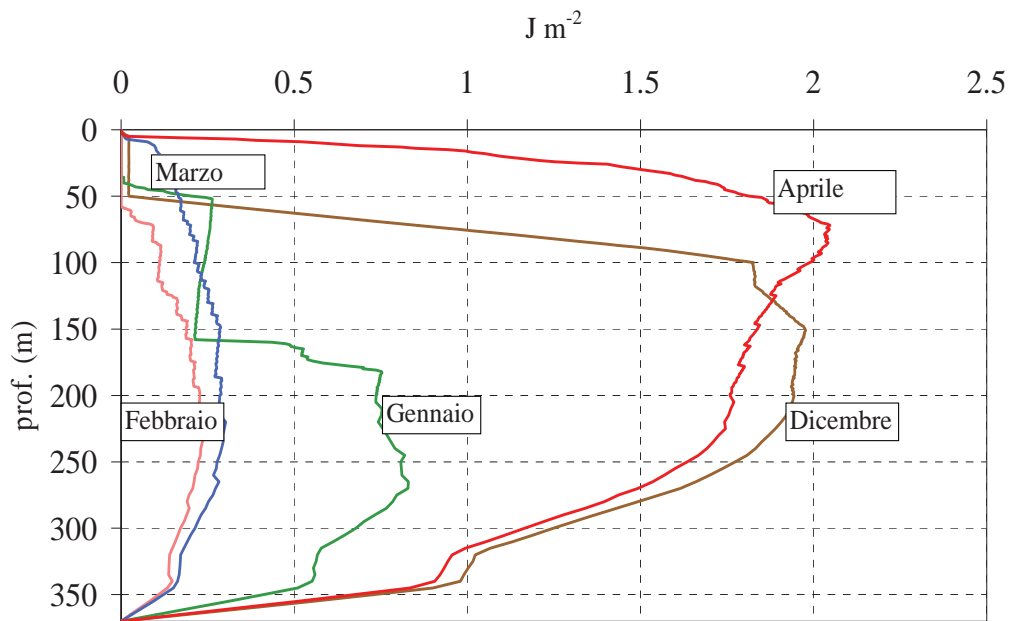


Fig.2.4. Sequenza temporale della distribuzione verticale della stabilità del Lago Maggiore da dicembre 2010 ad Aprile 2011.

2.2- Tempo di residenza delle acque del Lago Maggiore

In una precedente serie di simulazioni numeriche era stato definito il quadro delle strutture termiche e del regime idrodinamico del Lago Maggiore e, successivamente, attraverso l'uso di markers lagrangiani (privi di massa) si era ottenuta una prima valutazione dei tempi di residenza delle acque nella conca lacustre.

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 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 un controllo decisivo sulla stratificazione termica, sul ricambio degli strati lacustri, sulla diluizione degli inquinanti e su tutti i processi biogeochimici.

In particolare la turbolenza, proprietà di un fluido caratterizzato da un moto disordinato, determina un forte incremento della rata dello scambio di quantità di moto, di calore e di specie chimiche.

La rappresentazione matematica della parte di questo incremento non prodotto dal movimento macroscopico del fluido (convezione) è formalmente uguale a quella delle classiche leggi di Newton (trasferimento della quantità di moto per viscosità), di Fourier (trasferimento di calore per conduzione) e di Fick (trasferimento di massa per diffusione),

dove i coefficienti molecolari (viscosità, conduttività del calore e diffusività di massa) sono rimpiazzati dai coefficienti eddy (e/o apparente, e/o turbolento, e/o effettivo).

Una descrizione dettagliata del modello matematico usato nel presente studio può essere trovata nei lavori presentati alla CIP AIS, in Castellano et al. 2008 e in Castellano et al. 2010

L'analisi "soluzione" è ottenuta da una procedura numerica iterativa basata sulla discretizzazione di volumi finiti e i risultati sono stati ottenuti usando un reticolo di calcolo formato da 58 strati orizzontali di spessore non uniforme (che aumentano con la profondità), ciascuno suddiviso in 58 celle nella direzione x (direzione Ovest-Est) e 225 celle nella direzione y (direzione sud-nord) (Fig.2.5). I dati meteorologici e di portata dei fiumi tributari usati come inputs sono stati quelli misurati nell'anno 2002, scelto come caso rappresentativo.

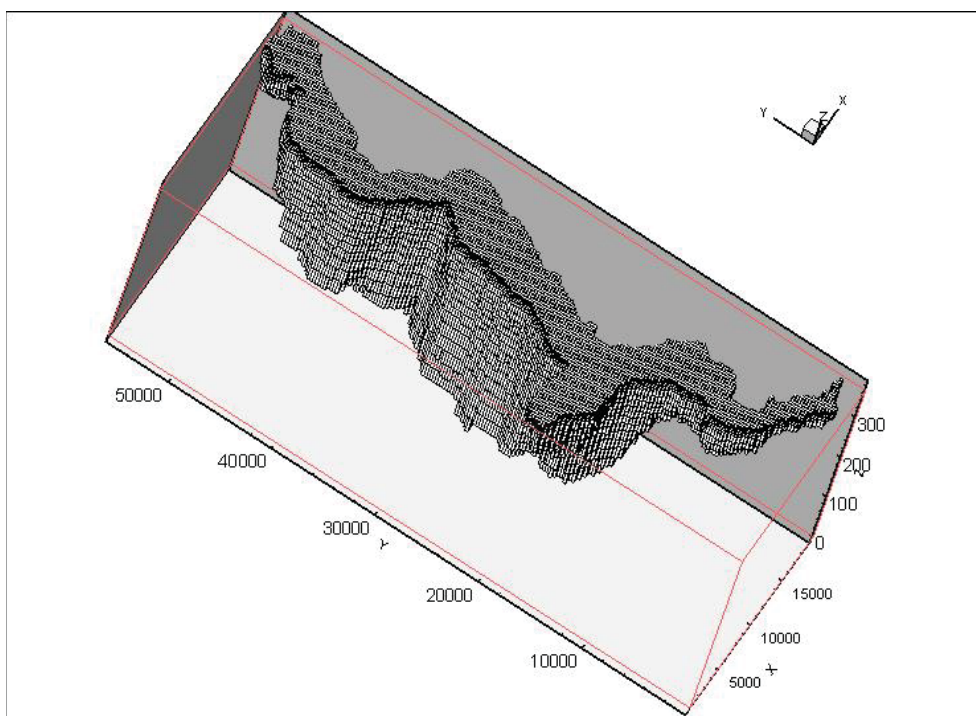


Fig. 2.5. Esempio delle maglie del reticolo sull'intera geometria del Lago Maggiore.

Come in molti lavori pubblicati su questo argomento (Saggio e Imberger, 2001; Wüest e Lorke, 2003; Shimizu et al., 2007; Folkard 2008), per evidenziare l'effetto della turbolenza sui processi di mescolamento nei laghi sono stati scelti come riferimento i profili medi verticali della temperatura. Le Fig. 2.6 - 2.17 mostrano il confronto tra i risultati della simulazione e i dati sperimentali acquisiti da sistematiche campagne di misure in situ.

L'accordo è soddisfacente e particolarmente significativo dove le parti iniziali dei profili sono sinuosi perché, come dimostrato dai risultati numerici, sono strettamente connessi con il comportamento della struttura grossolana della turbolenza come mostrato in Tab. 2.1.

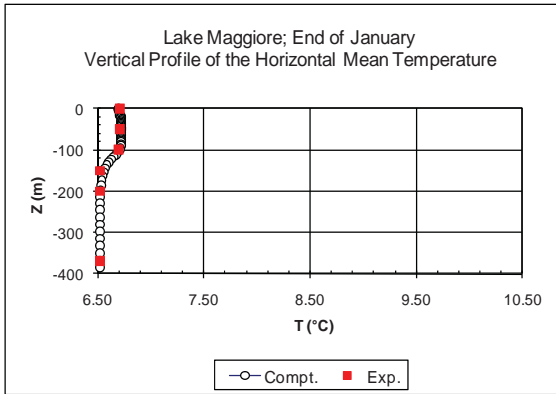


Fig.2.6a. Profilo verticale 0-370 m

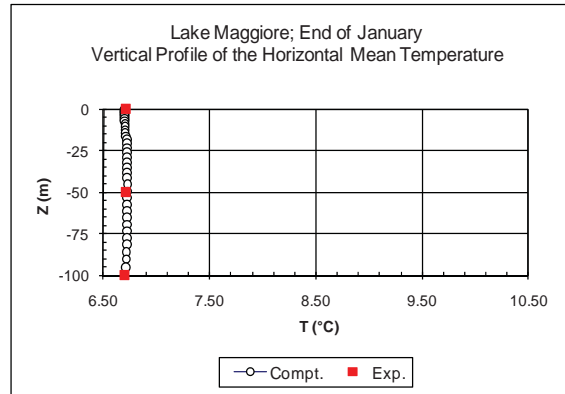


Fig.2.6b. Profilo verticale 0-100 m

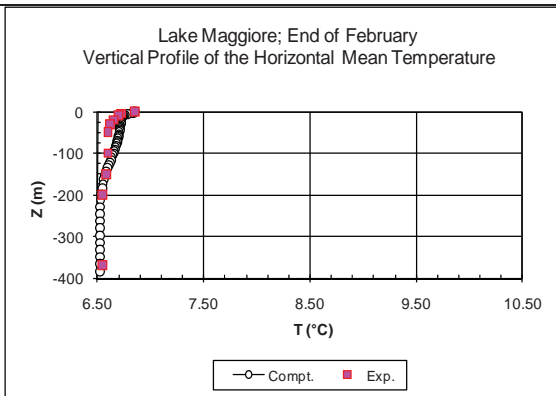


Fig.2.7a. Profilo verticale 0-370 m

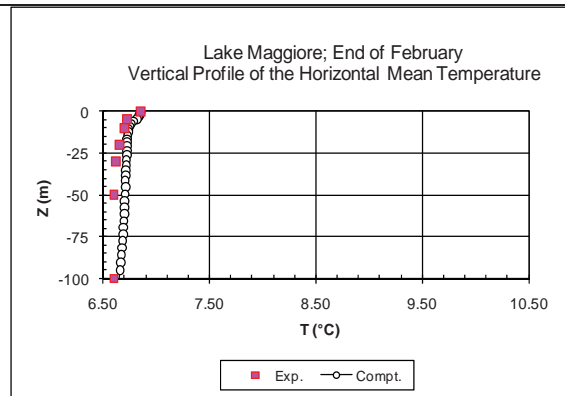


Fig.2.7b. Profilo verticale 0-100 m

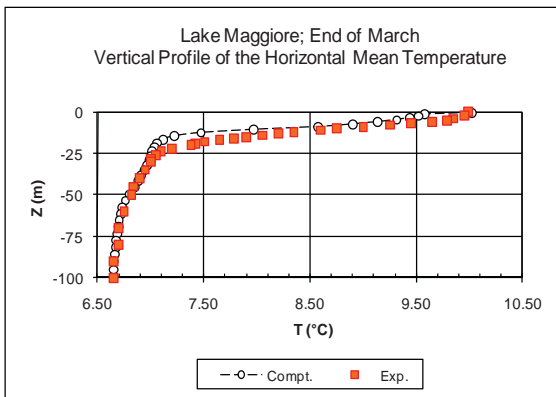


Fig.2.8. Profilo verticale 0-100 m

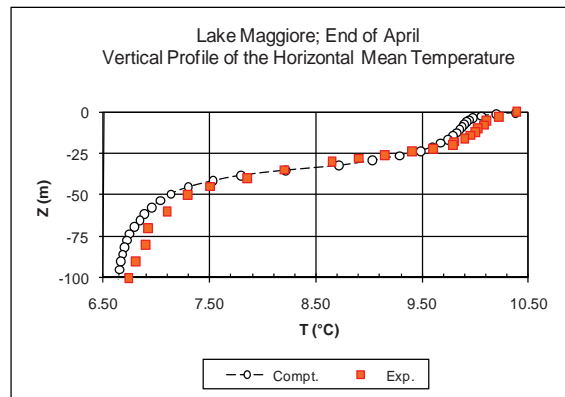


Fig.2.9. Profilo verticale 0-100 m

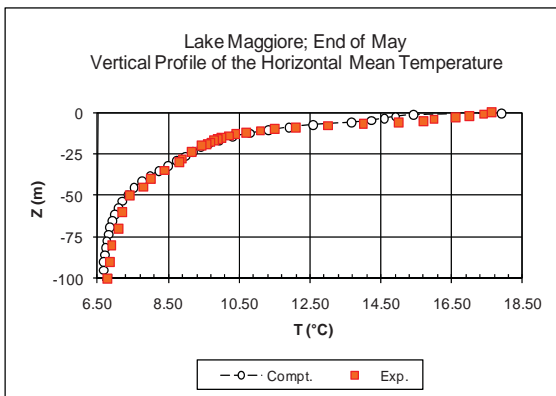


Fig.2.10. Profilo verticale 0-100 m

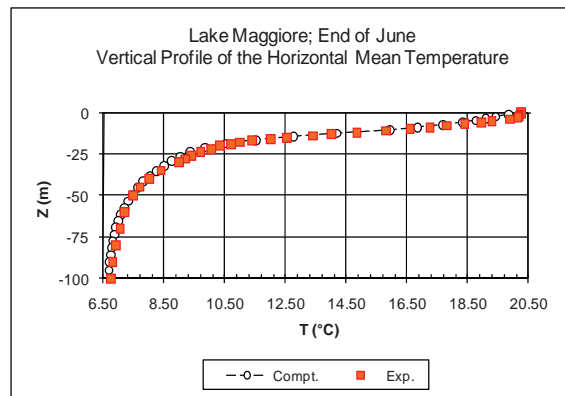


Fig.2.11. Profilo verticale 0-100 m

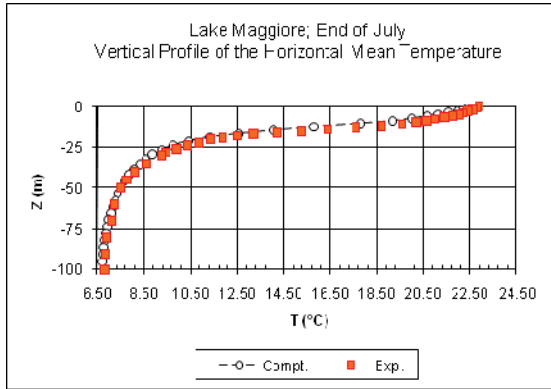


Fig.2.12. Profilo verticale 0-100 m

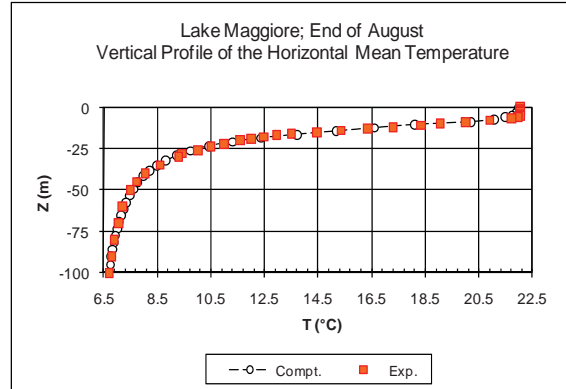


Fig.2.13. Profilo verticale 0-100 m

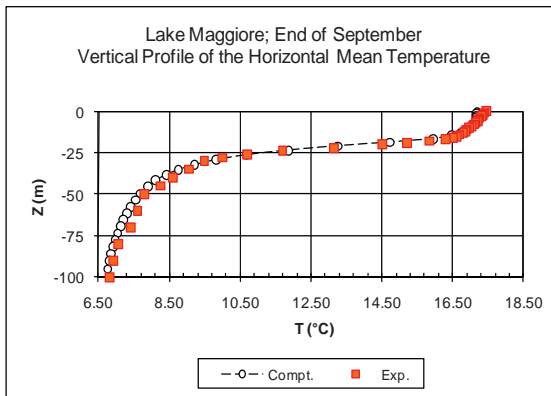


Fig.2.14. Profilo verticale 0-100 m

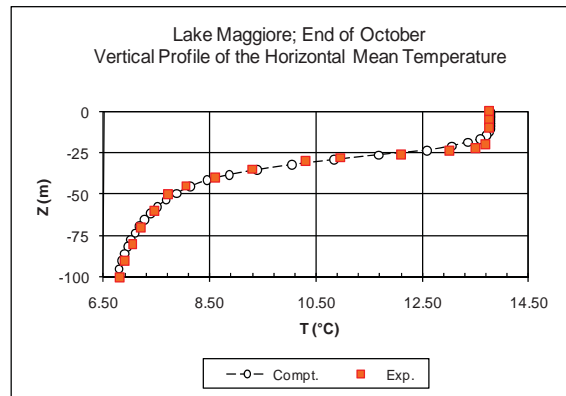


Fig.2.15. Profilo verticale 0-100 m

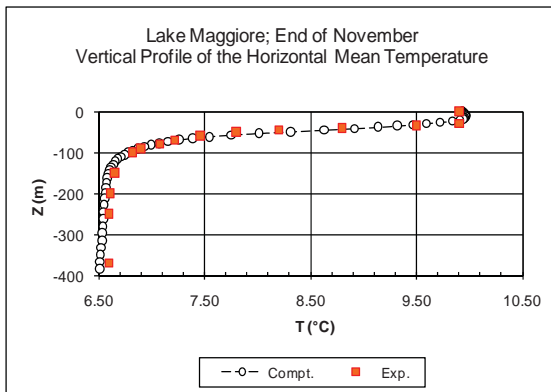


Fig.2.16a. Profilo verticale 0-370 m

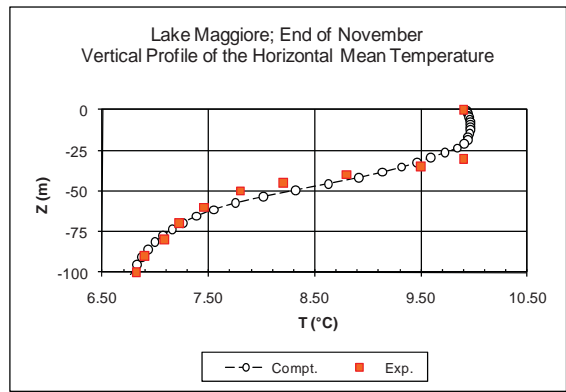


Fig.2.16b. Profilo verticale 0-100 m

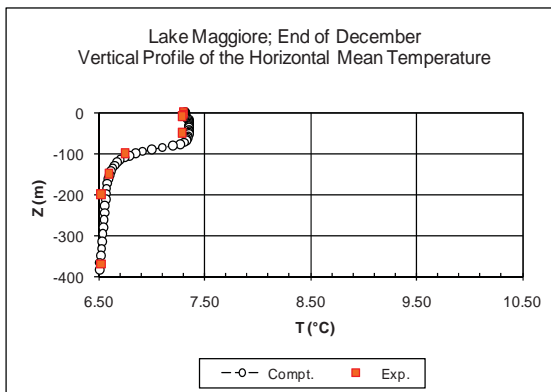


Fig.2.17a. Profilo verticale 0-370 m

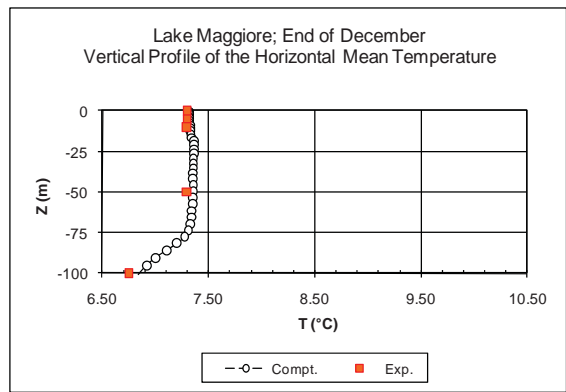


Fig.2.17.b. Profilo verticale 0-100 m

TABLE 4.1 Vertical Behaviour of the Normalized Eddy Viscosity as Computed by the Numerical Simulations

Month	Z (m)	Normalized Eddy Viscosity	Month	Z (m)	Normalized Eddy Viscosity	Month	Z (m)	Normalized Eddy Viscosity
January	0.0↔ -5.0	1.0	April	-25.0 ↔-27.4	0.83	July	-12.0 ↔ -370	<10 ⁻⁵
	-5.0↔ -8.15	1.0		-27.4 ↔-30.3	0.67	August	0.0↔ -9.0	1.0
	-8.15↔ -15.61	1.0		-30.3 ↔-33.8	0.50		-0.9↔ -12.0	0.012
	-15.61 ↔ -24.89	1.0		-33.8 ↔-38.2	0.33		-12.0↔ -15.0	0.01
	-24.89 ↔ -370	<10 ⁻⁵		-38.2 ↔-43.4	0.17		-15.0↔ -42.0	0.001
February	0.0↔ -2.0	1.0		-43.4 ↔-82.0	0.03		-42.0↔ -370.0	<10 ⁻⁴
	-2.0↔ -5.0	0.5		-82.0 ↔ -370	≈0.0	September	0.0↔ -1.0	0.75
	-5.0↔ -8.5	0.5	May	0.0↔ -6.0	1.0		-1.0↔ -2.0	0.875
	-8.5↔ -15.61	0.5		-6.0↔ -33.0	4.0·10 ⁻⁴		-2.0↔ -18.0	1.0
	-15.61 ↔-25.0	0.5		-33.0 ↔ -370	<10 ⁻⁴		-18.0↔ -21.0	0.25
	-25.0↔ -47.58	0.5	June	0.0↔ -6.0	1.0		-24.0↔ -370.0	<10 ⁻⁶
	-47.58 ↔ -370	<10 ⁻⁸		-6.0 ↔ -12.0	0.63	October	0.0↔ -24.0	1.0
March	0.0↔ -2.0	1.0		-12.0 ↔-15.0	0.01		-24.0↔ -370	<10 ⁻⁶
	-2.0↔ -4.0	0.02		-15.0 ↔-42.0	0.001	November	0.0↔ -1.0	1.0
	-4.0↔ -9.0	0.01		-42.0 ↔ -370	<10 ⁻⁴		-1.0↔ -15.0	0.05
	-9.0↔ -10.0	0.005	July	0.0↔ -4.0	1.0		-15.0↔ -370	<10 ⁻⁶
	-10.0↔ -24.0	0.001		-4.0↔ -6.0	0.94	December	0.0↔ -12.0	1.0
	-24.0↔ -370	<10 ⁻³		-6.0↔ -9.0	0.82		-1.2↔ -33.0	0.1
April	0.0↔ -25.0	1.0		-9.0↔ -12.0	0.35		-33.0↔ -370	<10 ⁻⁶

Il valore assoluto di riferimento della eddy viscosità cinematica totale (orizzontale più verticale) ($v_t = u_t/o$) è nell'intervallo tra 10^{-5} e 10^3 m^2/s (il valore molecolare è 10^{-6} m^2/s) compatibile con i risultati trovati da altri autori con ricerche sia per via teorica che sperimentale su altri laghi (Kok 1978; Trevethan e Aoki 2009). Come si può osservare nella Tab. 2.1, la struttura della turbolenza evidenzia notevoli variazioni durante l'anno e il suo effetto si sviluppa entro uno spessore di 48 metri in febbraio e di soli 12 m in luglio. Particolare attenzione merita quanto mostrato in Fig. 2.18 dove è riportato l'andamento mensile dello spessore della zona turbolenta calcolata (zona dove la eddy viscosità è superiore a 10^{-5}). In essa è visibile il massimo in febbraio nel momento di maggiore mescolamento verticale del lago e un decadimento nei mesi primaverili; un minimo piuttosto evidente in luglio quando il lago raggiunge il punto più elevato di stabilità, nel momento in cui il termoclinio presenta il suo massimo gradiente termico. Da settembre la turbolenza subisce una diminuzione, per poi aumentare nel periodo

invernale quando il lago inizia la sua fase di destratificazione con perdita di calore superficiale e aumento dello spessore dello strato mescolato.

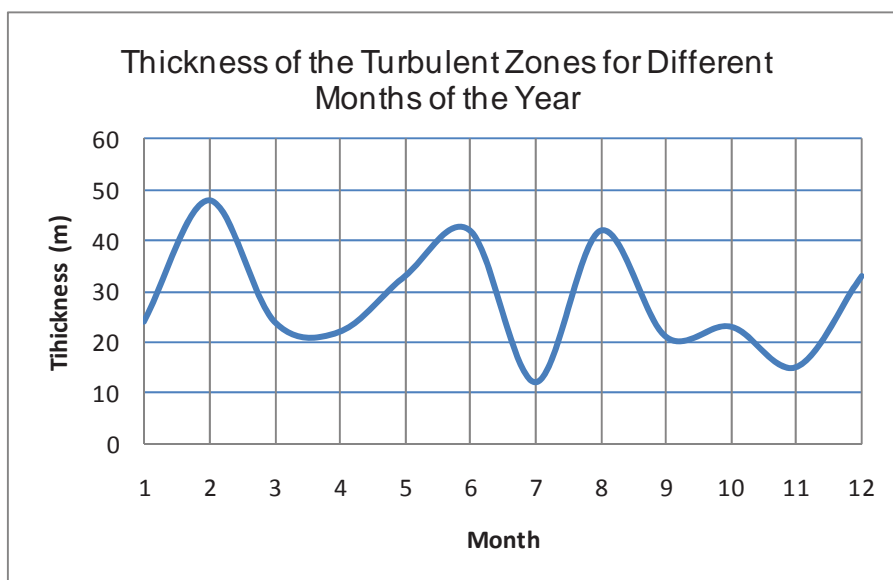


Fig. 2.18. Spessori della zona turbolenta durante l'anno.

La figura pone 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.

Benché basata solo su uno studio numerico, la ricostruzione della struttura grossolana della turbolenza nel Lago Maggiore descritta in questo lavoro sembra essere un risultato plausibile. Il buon accordo tra i dati sperimentali e numerici circa i profili verticali della temperatura, assieme alla somiglianza con i diversi risultati disponibili in letteratura, danno un supporto convincente a questo. 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. Di questo si dovrà tenere conto nel proseguo della determinazione del tempo reale di ricambio delle sue acque.

BIBLIOGRAFIA

- Ambrosetti, W. & L. Barbanti. 1999. Deep water warming in lakes; an indicator of climatic change. *J. Limnol.*, 58(1): 1-9.
- Ambrosetti, V., L. Barbanti, & E.A. Carrara. 2010. Mechanism of hypolimnion erosion in a deep lake (Lago Maggiore, N.Italy). *J. Limnol.*, 69(1): 3-14.
- 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., Barbanti & L., Rolla A. 2010. The Residence Time of the Water in Lago Maggiore (N. Italy): First Results from an Eulerian-Lagrangian Approach, *J. Limnol.*, 69: 15-28.

- Folkard A.M. 2008. Temperature Structure and Turbulent Mixing Processes in Cumbrian Lakes. *North West Geography*, 8: 42-50.
- Kok G.J.G. 1978. *Energy Exchange between Deep Lakes and the Atmosphere and the Consequences for the Wind-Mixed Layer, Modelling the Water Quality of the Hydrological Cycle*, Proceedings of the Baden Symposium, September 1978, convened jointly by IIASA and IAHS, n°125:151-160.
- Saggio A. & J Imberger. 2001. Mixing and Turbulent Fluxes in the Metalimnion of Stratified Lakes. *Limnol. Oceanogr*, 46(2): 392-409.
- Shimizu K., J. Imberger & M. Kumagai. 2007. Horizontal Structure and Excitation of Primary Motions in a Strongly Stratified Lake. *Limnol. Oceanogr*, 52(6): 2641–2655.
- Trevethan M. & S.Aoki. 2009. Initial Observations on Relationship between Turbulence and Suspended Sediment Properties in Hamana Lake Japan. *Journal of Coastal Research*, 56: 1434-1438
- Wüest A.& A. Lorke. 2003. Small-Scale Hydrodynamics in Lake. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 67: 373–412.