

### 4.3. Caratteristiche idrodinamiche del Lago Maggiore

Gli aspetti idrodinamici che hanno caratterizzato il Lago Maggiore negli ultimi decenni derivano dal quel complesso di meccanismi che riguardano l'interconnessione tra il lago e gli ambienti circostanti, in particolare gli scambi di massa e di energia calorica e meccanica con l'atmosfera sovrastante e con l'areale che circonda il corpo idrico. In questo contesto saranno qui trattati quegli aspetti che, oltre a fornire un quadro generale della dinamica fisica del lago, sono anche di vitale importanza per i processi chimici e biologici.

Del corpo idrico saranno quindi analizzate le serie storiche pluriennali relative a:

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

#### 4.3.1. Contenuto di calore

Dai dati pluriennali di temperatura dell'acqua del Lago Maggiore relativi agli anni 1962-2007 è stata valutata la distribuzione verticale, metro per metro, del suo contenuto calorico con cadenza mensile, il cui andamento è rappresentato in figura 4.3.1a. Oltre alla marcata evidenza del ciclo stagionale, va notata la grande variabilità dei massimi e minimi annuali ed anche il trend generale della serie che mostra un netto incremento determinato sopra tutto dai dati riscontrati fino al termine degli anni novanta che si sono poi stabilizzati, o sono in leggero calo, dopo il 1998.

I valori minimi annuali, che si collocano normalmente in Febbraio-Marzo, sono compresi tra  $104.678 \text{ cal cm}^{-2}$  (1963) e  $121.934 \text{ cal cm}^{-2}$  (1998), mentre i più elevati, che si ritrovano in Agosto-Settembre, risultano compresi tra  $131.850 \text{ cal cm}^{-2}$  (1963) e  $152.892 \text{ cal cm}^{-2}$  (1998).

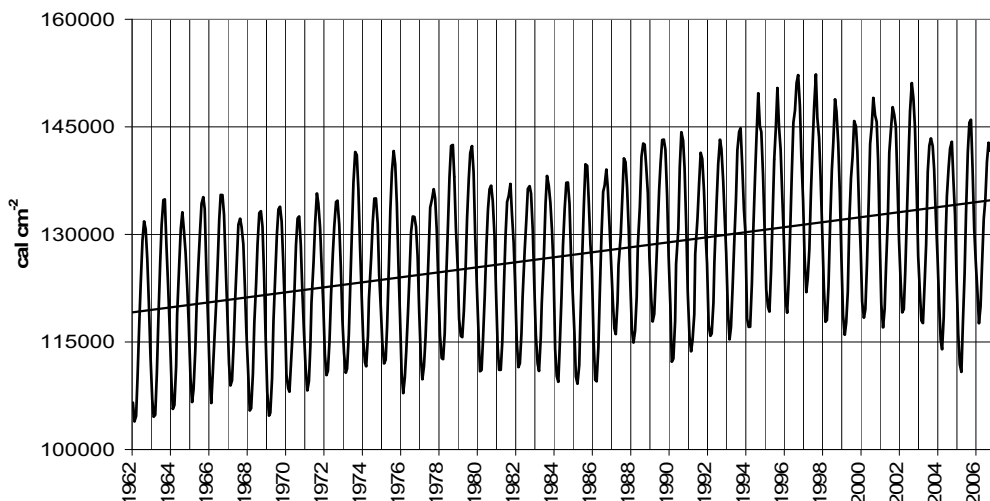


Fig. 4.3.1a. Andamento del contenuto totale di calore nel Lago Maggiore dal 1962 al 2007.

Alle medesime conclusioni si arriva, e in maniera più evidente, con l'esame della figura 4.3.1b nella quale è rappresentata la curva della media mobile centrata a 36 mesi

degli stessi dati di contenuto calorico mensile: il Lago Maggiore si è infatti riscaldato in modo palese sino al 1998, pur con la presenza di evidenti situazioni idrometeorologiche particolari evidenziate dalle rotture della pendenza della curva, mentre dopo la suddetta data e sino ad oggi la curva ha subito una netta flessione.

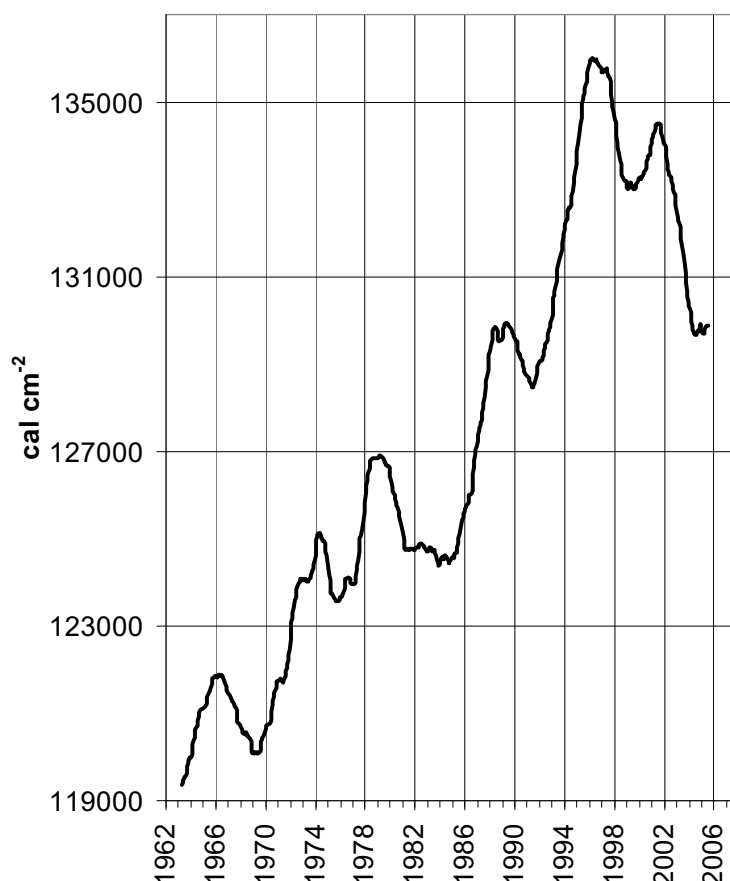


Fig. 4.3.1b. Andamento della media mobile centrata a 36 mesi del contenuto totale di calore nel Lago Maggiore negli anni 1962-2007 (cal cm<sup>-2</sup>).

I contenuti calorici massimi e minimi annuali presenti nel lago nello stesso periodo di osservazioni sono riportati in figura 4.3.1c e per ambedue le serie si conferma il trend in generale ascesa sino al termine degli anni novanta e la successiva diminuzione sino al 2007, come riscontrato in precedenza. Nella stessa figura è rappresentata anche la serie dei bilanci termici annuali del lago che mostra invece un andamento molto variabile, abbastanza simile a quello del contenuto massimo di calore. È quindi evidente che il bilancio termico annuale del lago dipende in modo precipuo dalla quantità di calore assorbita durante la stagione calda come dimostra anche il fatto che la correlazione statistica tra il bilancio termico (Bt) e il contenuto massimo di calore ( $Q_{t_{max}}$ ) è significativa ( $r = 0,64$ ), mentre non lo è quella tra Bt e il contenuto minimo ( $Q_{t_{min}}$ ).

Da rilevare che l'incremento medio annuo del contenuto massimo estivo nel periodo considerato è stato di 384,5 cal cm<sup>-2</sup> per anno, superiore a quello del contenuto minimo invernale che risulta di 302,1 cal cm<sup>-2</sup> per anno, mentre quello del bilancio annuale si è assestato su 81,2 cal cm<sup>-2</sup> per anno.

Per quanto riguarda l'ultimo quinquennio è invece evidente una diminuzione di contenuto calorico, sia nei suoi valori massimi sia nei minimi e ciò è dovuto, come si vedrà con maggior dettaglio nei paragrafi successivi, soprattutto all'inserimento in profondità di acqua fredda avvenuto nei periodi tardo-invernali.

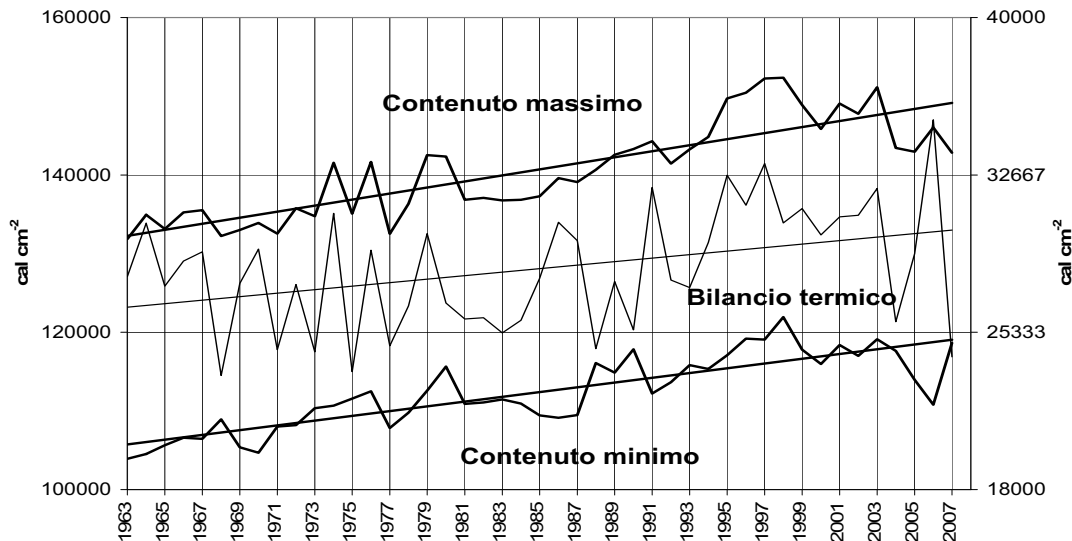


Fig. 4.3.1c. Andamento del contenuto massimo (estivo), minimo (invernale) di calore e del relativo bilancio termico (riferito all'asse secondario) nel Lago Maggiore dal 1963 al 2007 (cal cm<sup>-2</sup>).

#### 4.3.2. Profondità del mescolamento invernale

Un'importante caratteristica idrodinamica dei laghi profondi sudalpini riguarda la modalità con cui avviene il mescolamento verticale che, per la loro collocazione geografica nella fascia temperata, avviene una sola volta all'anno e cioè al termine dell'inverno limnologico (nel Maggiore all'incirca alla fine di Febbraio). La perdita di energia calorica è dovuta all'effetto dei moti convettivi innescati, ad iniziare dall'autunno, dal raffreddamento degli strati superficiali a più diretto contatto con l'atmosfera ed è facilitata anche dall'azione turbolenta operata dal vento. Poiché nel nostro caso si tratta di bacini di elevata profondità, l'omogeneizzazione delle acque può avvenire in maniera completa, cioè giungere sino al fondo del lago, o interessare solo una parte più o meno cospicua della massa liquida e ciò in dipendenza di caratteristiche meteorologiche invernali particolarmente fredde e ventose o relativamente miti. Gli eventi di circolazione totale, tuttavia, a seguito dei mutamenti climatici in atto, in particolare per l'incremento invernale della temperatura dell'aria e per la riduzione del vento, sembrano destinati a diventare l'eccezione anziché la regola, come è stato accertato nel Lago Maggiore.

Come già specificato a proposito delle indagini di limnologia fisica portate avanti nel 2007, le profondità di mescolamento verticale sono state determinate con un doppio sistema di valutazione. La misura diretta in lago di alcuni elementi capaci di identificarla (temperatura, concentrazione di ossigeno disciolto, nitrati e silicati) ed il calcolo di un parametro (M) che tiene conto delle variabili meteorologiche, che intervengono nell'omogeneizzazione delle acque.

La serie delle suddette profondità riscontrate dal 1951 ad oggi con le due metodiche sono riportate in figura 4.3.2: le differenze che si notano tra esse in alcuni anni stanno

ad indicare che fra i meccanismi responsabili della circolazione verticale delle acque del lago, oltre alla convezione, sono intervenute altre dinamiche capaci di convogliare acqua in profondità quali, per esempio l'inserimento degli apporti idrici veicolati dai tributari o movimenti a nastro trasportatore (si veda a questo proposito quanto esposto in Ambrosetti & Barbanti [22]; Ambrosetti & Barbanti [23]; Ambrosetti *et al.* [24]; e nel Rapporto CIP AIS quinquennale 1998-2002).

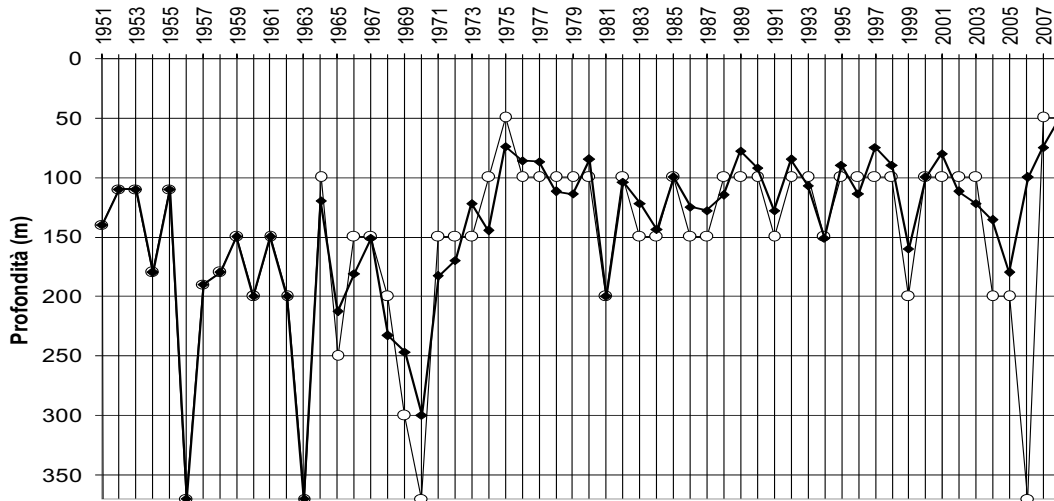


Fig. 4.3.2. Profondità del mescolamento verticale tardo invernale nel Lago Maggiore nel periodo 1951-2008. La linea sottile indica quelle determinate mediante misure *in situ*, quella pesante attraverso il parametro M.

#### 4.3.3. Parametri meteorologici responsabili dell'idrodinamica del Lago Maggiore

Fra gli elementi meteorologici responsabili dei movimenti delle acque lacustri e, in particolare, del loro mescolamento verticale al termine dell'inverno limnologico, sono stati individuati la temperatura atmosferica, l'intensità del vento e la radiazione solare che intervengono nella fase di destratificazione delle acque. Ne seguiremo le vicende per l'intero periodo delle nostre osservazioni, sottolineando in particolare quanto accaduto nell'ultimo quinquennio, attraverso l'analisi delle rispettive serie storiche rilevate nella stazione meteorologica della stazione di Pallanza [25].

##### 4.3.3.1. Temperatura dell'aria

In figura 4.3.3.1a è rappresentata la serie pluriennale delle temperature medie annue dell'aria, quale risulta dalle registrazioni di Pallanza. L'aspetto più evidente del suo andamento temporale è rappresentato da un netto trend all'incremento quantificabile in un aumento della temperatura di circa 1,2 °C: essa è infatti passata dai valori intorno a 12 °C del 1951 a quelli superiori a 13 °C del 2007. La temperatura media degli oltre 50 anni è stata di 12,44 °C con tutti i valori medi annui compresi tra il massimo di 14,27 °C (2003) ed il minimo di 11,16 °C (1956).

L'andamento termico generale dell'atmosfera in questo periodo ultracinquantennale, come risulta dalla linea delle medie mobili, evidenzia la presenza di una concavità che è persistita per quasi l'intero periodo, il cui minimo è stato di circa 11,5 °C, collocato nei primi anni '80.

Per quanto riguarda l'ultimo quinquennio, si noti come le temperature medie del 2003 (14,27 °C) e del 2007 (14,0 °C) siano state le più elevate in assoluto.

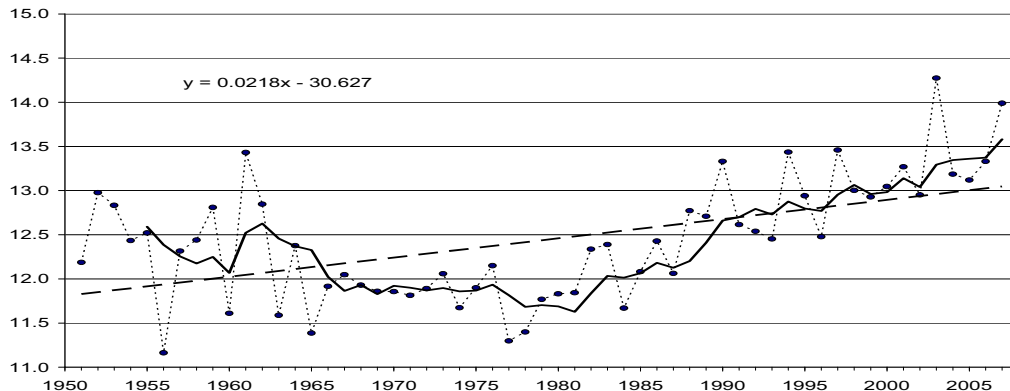


Fig. 4.3.3.1a. Andamento della temperatura media annua dell'aria a Pallanza nel periodo 1952-2007.

Ai fini della valutazione del mescolamento verticale invernale è però importante analizzare la temperatura dell'aria in inverno in tutte le sue componenti: media, minima e massima. Nella figura 4.3.3.1b la retta di tendenza di quella media è chiaramente diretta all'incremento mentre la curva delle medie mobili evidenzia una forte variabilità non riscontrabile nella precedente figura relativa alla temperatura media annua: le fluttuazioni riguardano, sopra tutto gli anni 1970-1980 e 2000-2005.

Da rilevare negli ultimi 5 anni il netto contrasto termico tra il 2006 (2,45 °C) ed il 2007 (5,86 °C), con una differenza cioè di 3,41 °C.

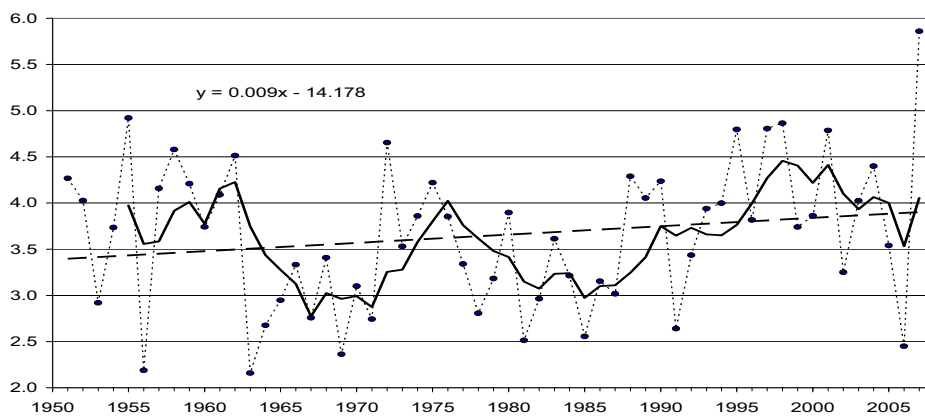


Fig. 4.3.3.1b. Andamento della temperatura media invernale dell'aria a Pallanza nel periodo 1952-2007.

Quanto alle rette di tendenza delle medie invernali delle temperature minime e massime dell'aria, rappresentate rispettivamente nelle figure 4.3.3.1c e 4.3.3.1d, la prima mostra un progressivo decremento nel tempo, nonostante l'innalzamento considerevole registrato nel 2007 rispetto all'anno precedente, mentre un progressivo aumento con il passare degli anni caratterizza la tendenza dei massimi invernali e, tra questi va indicato quello assoluto del 2007, con 10,1 °C.

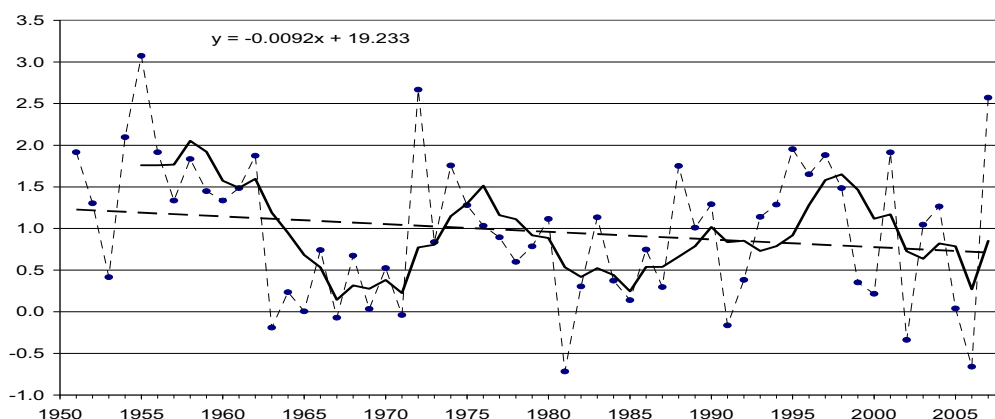


Fig. 4.3.3.1c. Andamento della media delle temperature minime invernali dell'aria a Pallanza nel periodo 1952-2007.

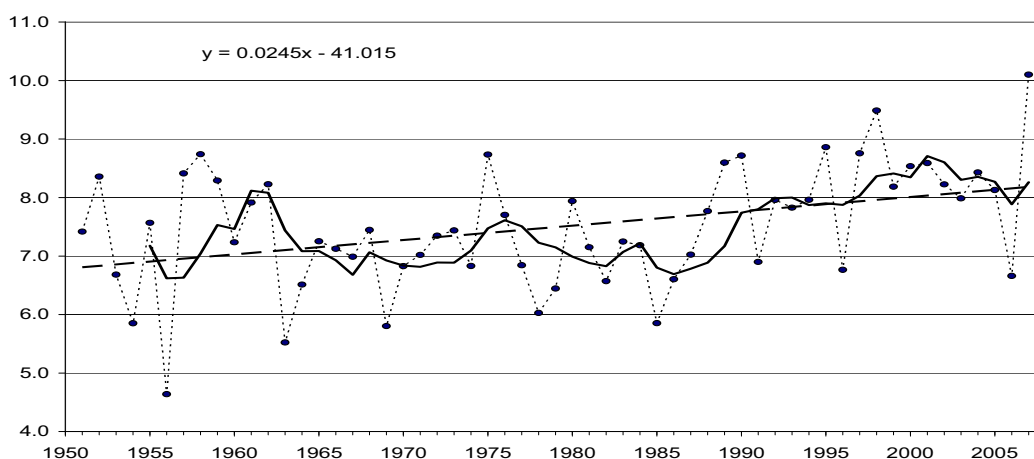


Fig. 4.3.3.1d. Andamento della media delle temperature massime invernali dell'aria a Pallanza nel periodo 1952-2007.

#### 4.3.3.2. Percorso del vento

Notevole è stata la diminuzione della quantità di vento filato a Pallanza nel corso degli ultimi cinquanta anni come risulta dalla retta di tendenza, per altro statisticamente significativa, in figura 4.3.3.2a: si è passati infatti da 21.000 km di percorso della fase iniziale del periodo a valori intorno a 10.000-11.000 km negli ultimi anni. Va precisato che, per evidenti ragioni di confronto, e diversamente dai dati presentati nel paragrafo sulla meteorologia, questi sono stati tutti registrati dall'anemometro autogeneratore, ancora operante presso il sito.

L'andamento della curva delle medie mobili si presenta suddivisa in due parti con la prima, che comprende gli anni iniziali fino al 1980 circa, indica una netta progressiva diminuzione dei percorsi annuali del vento, mentre la seconda, che arriva fino ai giorni nostri, ha un andamento praticamente orizzontale, o in debole ascesa; ad indicare come la diminuzione dei percorsi del vento si sia concentrata essenzialmente nei primi anni del periodo di osservazioni.

I percorsi annuali del vento sono compresi fra il massimo di 27.980 km del 1958 ed il minimo di 10.339 km registrato nel 1978, con una media di 15.371 km.

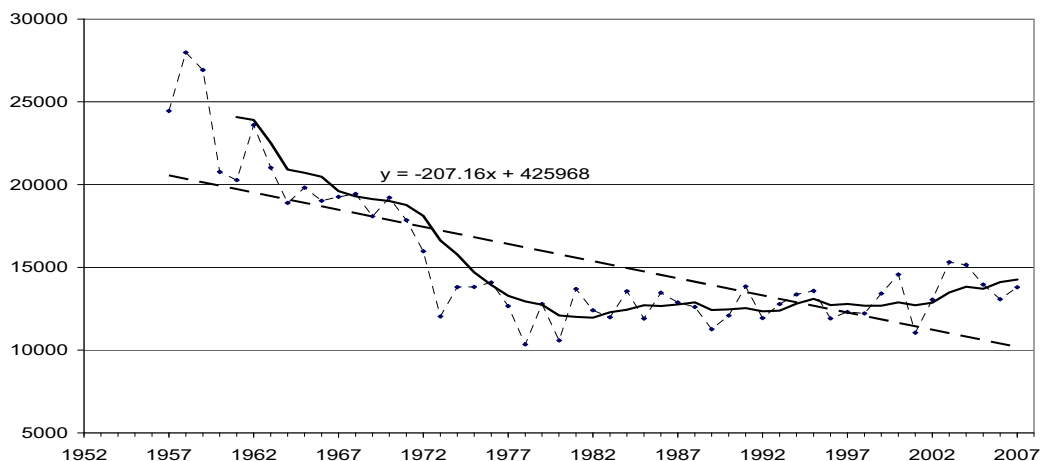


Fig. 4.3.3.2a. Andamento del percorso annuo del vento a Pallanza nel periodo 1957-2007.

La flessione dei percorsi annuali del vento registrata nel corso del cinquantennio d'osservazioni è pienamente confermata anche dalla serie storica dei soli dati invernali (Fig. 4.3.3.2b), la cui retta di tendenza presenta una pendenza negativa molto pronunciata. Da rilevare nella stessa figura il valore del 2007 (1.312 km) che rappresenta il minimo assoluto della serie.

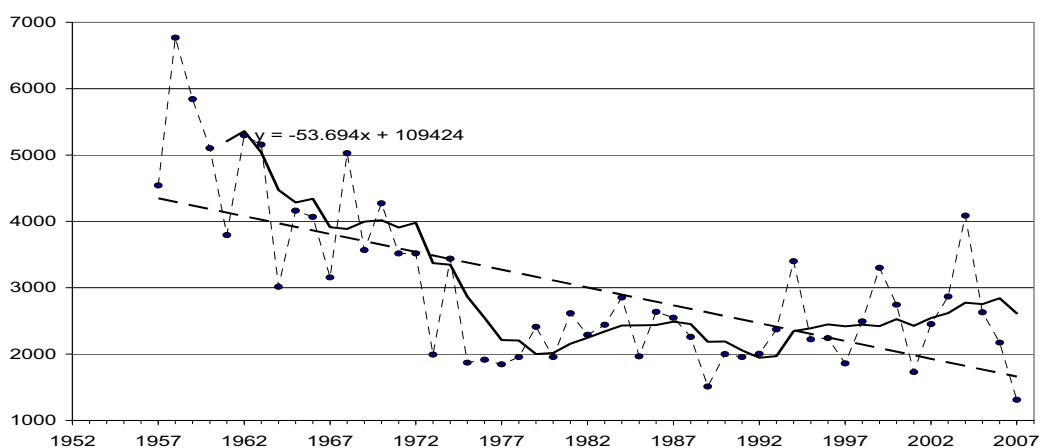


Fig. 4.3.3.2b. Andamento del percorso invernale del vento a Pallanza (1957-2007).

#### 4.3.3.3. Radiazione solare

Negli anni delle nostre osservazioni la quantità annua di energia radiante di provenienza solare ha registrato un incremento seppur contenuto (Fig. 4.3.3.3a). La media pluriennale di  $105.469 \text{ cal cm}^{-2}$  mostra però una variabilità interannuale molto accentuata che copre un intervallo di quasi  $30.000 \text{ cal cm}^{-2}$ , compreso tra il minimo di  $90.145 \text{ cal cm}^{-2}$  del 1954 ed il massimo di  $119.347 \text{ cal cm}^{-2}$  del 1961.

Dall'andamento della curva delle medie mobili risulta che fino alla metà degli anni '50 la radiazione era in diminuzione, successivamente si è verificato un progressivo incremento fino ai primi anni '60 quando si ebbe il massimo dell'intero periodo. È

seguita una lunga fase con i valori di energia radiante in decremento e costantemente sotto alla media fino agli anni '80, decennio caratterizzato da un ciclo molto pronunciato che ha visto i valori risalire fino a circa 108.000 cal cm<sup>-2</sup> nel 1985 per ridiscendere nettamente nel 1990. Da questo momento, la radiazione è stata in progressiva continua risalita fino a superare i 117.000 cal cm<sup>-2</sup> negli anni più recenti. Da rilevare le 118.970 cal cm<sup>-2</sup> del 2003 hanno sfiorato il massimo assoluto del 1961.

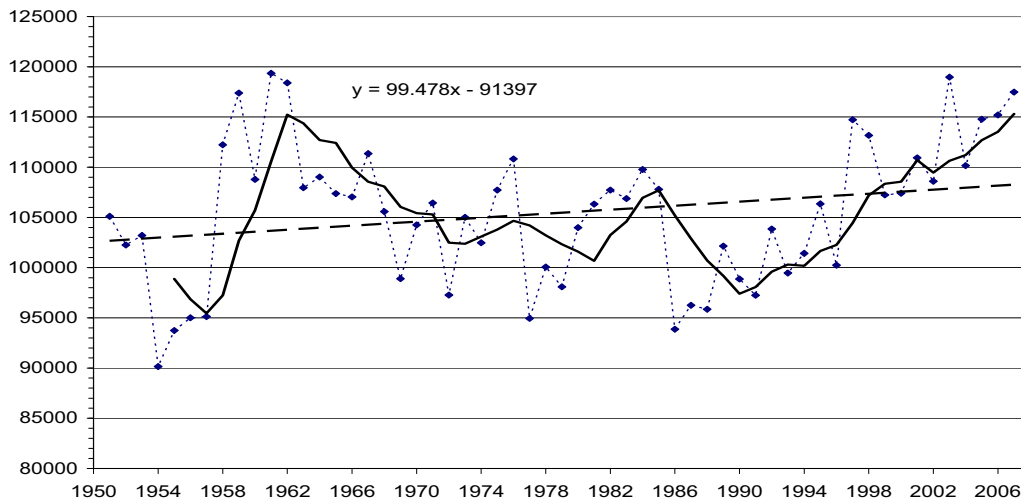


Fig. 4.3.3.3a. Andamento dei totali annuali della radiazione solare a Pallanza nel periodo 1952-2007.

Come si evince dalla figura 4.3.3.3b relativa alla serie storica dei totali invernali della radiazione solare, la retta di tendenza ha una pendenza più pronunciata verso l'incremento rispetto alla corrispondente riguardante le quantità annuali ad indicare un aumento che, nell'intero periodo, è stato superiore alle 3.000 cal cm<sup>-2</sup>.

Si osservi come su tale tendenza abbiano influito anche i valori di radiazione solare invernale dell'ultimo quinquennio e soprattutto quello dell'inverno 2005 con 20.253 cal cm<sup>-2</sup>, di gran lunga il massimo della serie.

Dall'andamento e dalla elevata variabilità interannuale dei tre parametri meteorologici, responsabili nel periodo invernale della profondità raggiunta dal mescolamento verticale, e della conseguente ossigenazione delle acque, deriva la comprensione del perché la circolazione delle acque per moti convettivi possa manifestarsi in forma totale, cioè fino al fondo del lago, o solo parzialmente come si sta verificando ormai da un trentennio.



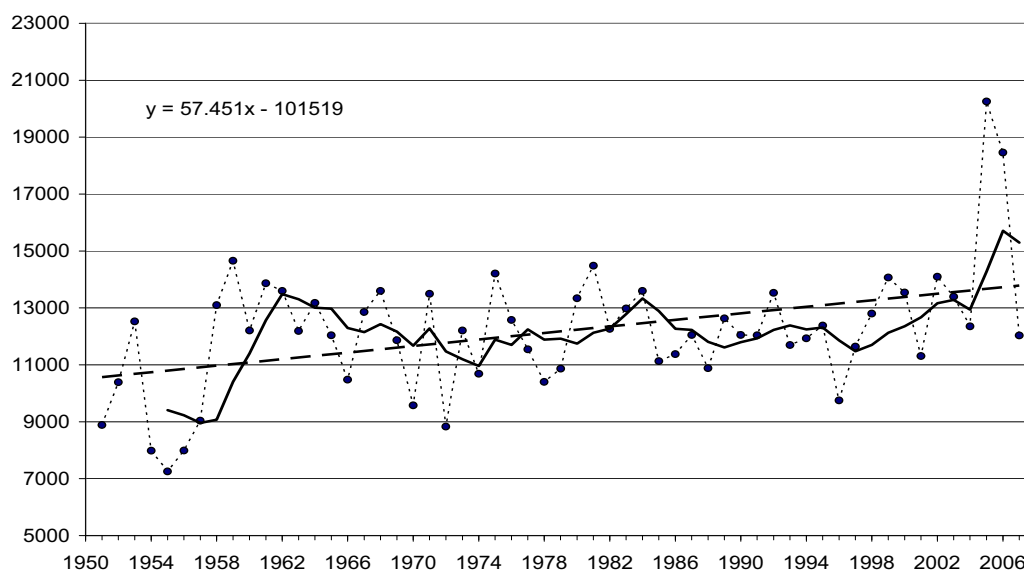


Fig. 4.3.3.3b. Andamento dei totali invernali della radiazione solare a Pallanza nel periodo 1952-2007.

#### 4.3.4. Stabilità termica

Sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti si evince che la circolazione verticale invernale di tipo convettivo in un lago profondo come il Maggiore è un evento che oggi si verifica in maniera completa solo in casi del tutto particolari. Infatti, il lavoro necessario per ottenere l'omogeneizzazione della massa d'acqua deve essere in grado di vincere non solo il gradiente di densità tra i vari strati, che deriva dalla loro differenza di temperatura o dalla presenza eventuale di soluti, ma anche di superare la pressione idrostatica della colonna d'acqua che determina un incremento della stabilità del lago con la profondità. L'incidenza sulla densità dell'acqua è tale da determinare ogni 100 m un suo aumento pari a quello causato dalla diminuzione di temperatura di 0,2 °C.

In figura 4.3.4 sono riportate, per il periodo 1963-2007, l'andamento delle stabilità termiche totali, relative cioè all'intera colonna d'acqua, valutate nei due momenti cruciali della dinamica lacustre, ossia in occasione del contenuto calorico minimo, che si verifica con la circolazione verticale invernale più profonda possibile, e del suo contenuto massimo che si ha con la più pronunciata stratificazione termica estiva. Mentre, esiste un'elevata significatività di correlazione tra i contenuti minimo e massimo di calore, perchè la quantità presente in inverno influenza anche quella che si ritrova in estate, non sussiste significatività statistica tra la stabilità invernale ed estiva: la ragione di ciò va ricercata nel fatto che il ruolo determinante della stabilità è assunto dalle dimensioni degli strati mescolati sia in estate sia in inverno e tra queste non vi è relazione evidente.

Da rilevare nel grafico l'elevato valore assunto dalla stabilità nel Febbraio 2007, evento determinato dal forte riscaldamento dello strato superficiale che ha fatto seguito a quelle condizioni climatiche estremamente "calde", che si è avuto modo di sottolineare nel capitolo riguardante la situazione meteorologica invernale del 2007.

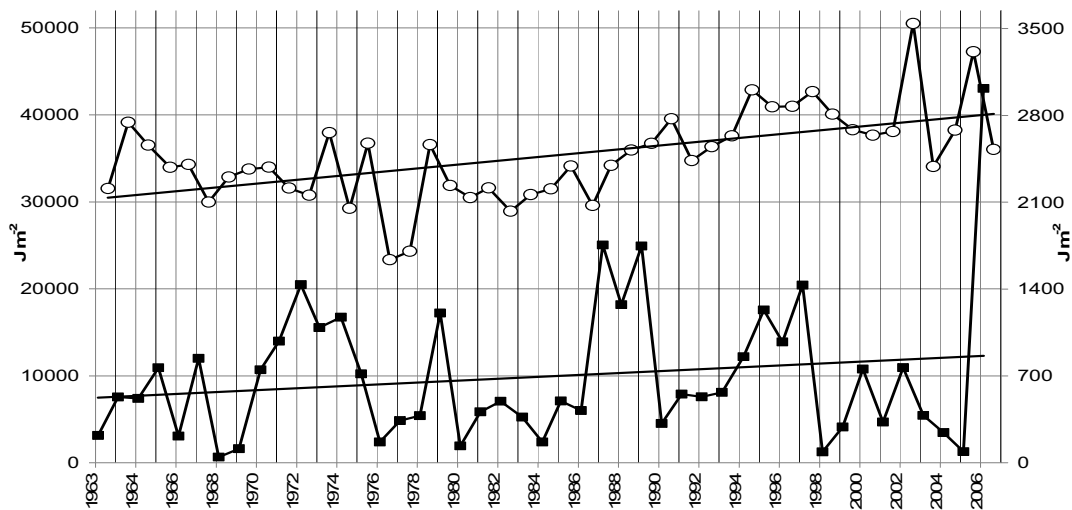


Fig. 4.3.4. Andamento della stabilità termica massima estiva e minima invernale ( $J m^2$ ) nel Lago Maggiore dal 1963 al 2007. All'asse secondario vanno riferiti i valori minimi.

#### 4.3.5. Ossigenazione

In figura 4.3.5 sono riportati gli andamenti del contenuto medio di ossigeno disciolto ( $mg l^{-1}$ ) riscontrati negli ultimi cinque anni lungo la colonna d'acqua nello strato compreso tra 250-370 m. L'anno del quinquennio in cui nell'ipolimnio profondo si è registrato il più basso contenuto medio di ossigeno disciolto (valori compresi tra 7 e 8  $mg l^{-1}$ ) è stato il 2003.



Fig. 4.3.5. Andamento del contenuto medio di ossigeno disciolto nell'ipolimnio profondo (strati tra 200-370 m, 250-370 m e 300-370 m - Quinquennio 2003-2007).

La figura mette anche in evidenza i tre episodi di ossigenazione dell'ipolimnio profondo occorsi, rispettivamente, agli inizi degli anni 2004, 2005 e 2006. Come discusso nei relativi Rapporti CIP AIS queste ossigenazioni non sono da imputarsi a mescolamenti verticali conseguenti ai moti convettivi ma piuttosto alla discesa in profondità di acqua densa e fredda di provenienza fluviale o litorale. Dalla primavera del 2006, cioè dopo l'ultimo episodio di ossigenazione profonda, l'ipolimnio profondo

ha subito una graduale diminuzione del contenuto di ossigeno disciolto passando dai valori vicini a  $10 \text{ mg l}^{-1}$  degli anni precedenti a circa  $8 \text{ mg l}^{-1}$ .

Quindi, anche se i processi convettivi non hanno determinato alcuna circolazione completa, altri eventi idro-meteorologici hanno provveduto all'ossigenazione delle acque profonde, e tali eventi [26] sono diventati più frequenti negli ultimi anni, probabilmente per effetto dei cambiamenti climatici in atto e di questi ultimi è pertanto sottolineata la complessità e le tante possibili conseguenze.

#### 4.3.6. Livello del lago

Il Lago Maggiore, per la particolare morfologia dell'areale imbrifero e per il suo inserimento in una zona climatica ad elevate precipitazioni, è un corpo d'acqua a forte rischio idrologico, anche a prescindere dagli interventi dell'uomo che non sempre sono stati praticati opportunamente ed adeguatamente. Il rischio è legato soprattutto all'alternarsi di episodi di piena e di magra che riguardano non solo il lago ma l'intera rete idrografica, che compresa quella del Ticino emissario arriva a coinvolgere anche il Fiume Po.

Gli studi che hanno preceduto la realizzazione dell'opera di regolazione del lago, e che hanno dettato le modalità della sua gestione, si sono occupati prevalentemente del controllo delle piene del lago, dei tributari e degli effetti sulle aree rivierasche; oltre che importanti sono estremamente gravi dal punto di vista socio-economico. Un'attenzione di gran lunga minore è stata invece riservata agli eventi di magra che si manifestano sicuramente con minor spettacolarità ma che investono problematiche altrettanto gravi.

In occasione dell'ultimo Rapporto Quinquennale CIPAS (2002), era stato posto in evidenza l'aumento della frequenza delle esondazioni dal 1952, ma negli ultimi cinque anni anche il fenomeno delle magre si è ripetuto più volte e pertanto va considerato uno degli aspetti idrologici più importanti del Lago Maggiore.

Dall'esame dell'andamento dei suoi livelli registrati all'idrometro di Pallanza (C.N.R.-I.S.E.) negli anni successivi al 1952, quindi in regime di lago regolato, si è avuta l'opportunità di fissare la quota di m 193 s.l.m. come limite sotto al quale è definito lo stato di magra. Il motivo di tale scelta deriva, oltre che da considerazioni storico-statistiche sui livelli lacustri e, in particolare, dall'esame delle linee segnalatrici dei casi critici minimi del regime idrometrico mensile, anche da osservazioni dirette riguardanti i danni e gli inconvenienti che si manifestano nella fascia rivierasca con il livello del lago sotto alla suddetta quota.

In modo analogo è stato fissato in 195,5 m il livello idrometrico oltre il quale si ritiene che sia in atto un evento di piena: a questa quota, tra l'altro, inizia l'esondazione del lago a Pallanza.

Se si analizza la figura 4.3.6, che riporta l'andamento giornaliero dei livelli del lago nel periodo 2003-2007, si rileva la presenza di una sola piena che ha raggiunto 196,02 m s.l.m. il 3 Novembre 2004 (con una durata di 4 giorni). Le magre riscontrate negli stessi anni sono state invece sei, con minimi assoluti compresi tra 192,55 e 192,70 m s.l.m. e con una durata complessiva di 329 giorni. Considerazioni analoghe sulle durate degli eventi di piena e magra possono essere dedotte anche con riferimento all'intero periodo delle nostre osservazioni (1952-2007): i giorni in cui il livello del lago è stato sotto alla quota di magra sono stati complessivamente 1.837 a fronte di 329 giorni con acqua del lago esondata.

Pertanto, considerata l'importanza degli eventi di magra nel contesto idrologico generale del Lago Maggiore, si è ritenuto opportuno procedere ad un'analisi più approfondita della loro origine e della loro distribuzione nel ciclo stagionale, sopra tutto in rapporto alle conseguenze di natura ecologica che esse provocano sulle fasce spondali e sull'intero ecosistema lacustre. L'analisi dei rapporti che intercorrono tra le magre e le precipitazioni atmosferiche, nonché dell'influenza esercitata sugli afflussi al lago e sui suoi livelli dai serbatoi idroelettrici di monte, unitamente agli effetti determinati dallo sbarramento di regolazione dei deflussi che opera al suo incile, è stata ampiamente discussa in una recente pubblicazione [27].

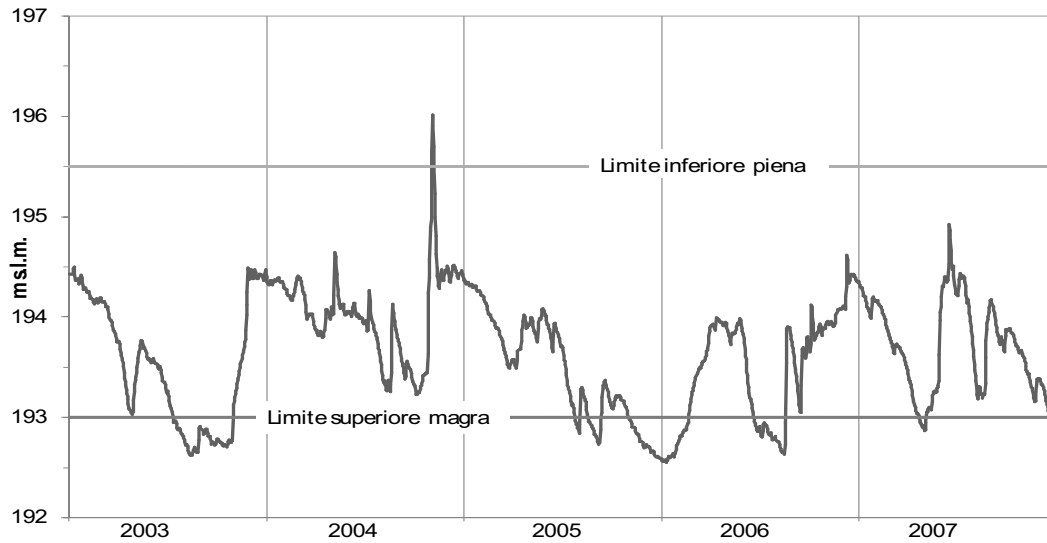


Fig. 4.3.6. Andamento giornaliero dei livelli del Lago Maggiore nel periodo 2003-2007.