

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE
Corso di laurea in Scienze Ambientali

Analisi dati fisici del Mar Mediterraneo

Tesi di laurea in struttura e dinamica dell'atmosfera e dell'oceano

Relatore

Prof. Nadia Pinardi

Correlatore

Dott. Simona Simoncelli

Presentata da

Jessica Valenti

Sessione Anno Accademico 2016/2017

Indice

Abstract	5
Capitolo 1	7
Introduzione.....	7
1.1 SeaDataNet.....	7
1.2 Il Mar Mediterraneo	8
1.2.1 La circolazione generale.....	10
1.2.2 Eastern Mediterranean Transient.....	13
1.2.3 Northern Ionian Reversal.....	14
1.2.4 Principali eventi di formazione delle masse d'acqua	14
1.3 Obiettivi.....	16
Capitolo 2	17
Materiali e metodi.....	17
2.1 Il set di dati	17
2.1.1 Strategia di controllo qualità (Quality Control Strategy, QCS).....	17
2.1.2 Caratteristiche generali del set di dati storici del Mar Mediterraneo.....	19
2.1.3 Analisi di controllo qualità	24
2.2 Metodologia.....	25
2.2.1 Confronto tra set di dati prima e dopo la validazione.....	27
Capitolo 3	31
Analisi delle serie temporali.....	31
3.1 Le regioni del Mar Mediterraneo.....	31
3.1.1 Regione 3.....	31
3.1.2 Regione 10.....	33
3.1.3 Regione 14.....	35
3.2 Analisi dei parametri delle tre regioni	38
3.3 Analisi delle serie annuali e delle tendenze.....	47
3.3.1 Regione 3.....	47
3.3.2 Regione 10.....	49

3.3.3 Regione 14.....	50
3.4 Distribuzioni di frequenza dei dati T e S.....	52
Capitolo 4	56
Conclusioni.....	56
Bibliografia e sitografia.....	59
Ringraziamenti	62

Abstract

In questa tesi vengono analizzate le proprietà idrologiche, quali temperatura e salinità, delle masse d'acqua di specifiche regioni del Mar Mediterraneo degli ultimi 60 anni (1950-2017). I dati utilizzati fanno parte della collezione di dati storici forniti dalla infrastruttura SeaDataNet (<https://www.seadatanet.org/>) e distribuiti dai Centri Dati Oceanografici che fanno parte di tale infrastruttura. Verrà qui descritta la strategia di controllo qualità alla quale sono stati sottoposti i dati, mostrando la differenza tra due set di dati: uno validato e uno non.

Al fine di comprendere meglio i risultati viene prima introdotta una breve descrizione delle dinamiche del Mediterraneo, parlando della sua circolazione e citando alcuni importanti eventi che si sono verificati e che hanno influenzato le proprietà idrologiche che caratterizzano le principali masse d'acqua. La descrizione riguarda il set di dati che ricopre l'intero bacino per poi focalizzarsi su tre aree importanti quali l'area del Golfo del Leone, il Mare Adriatico meridionale e infine la parte settentrionale del bacino Levantino.

L'analisi prende in considerazione i dati di temperatura e salinità suddivisi in tre strati verticali, rappresentativi delle principali masse d'acqua: lo strato superficiale fino a 150 m, influenzato dall'afflusso delle acque provenienti dall'Atlantico, lo strato intermedio tra 150-600 m dominato dall'acqua calda e salata levantina (LIW) formata nel Mediterraneo orientale e uno strato di fondo con profondità superiori a 600 m dove si trovano acque fredde e dense (DW) formate sia nell'est che nell'ovest Mediterraneo.

Per ciascuno di essi sono analizzate le climatologie mensili e le relative deviazioni standard, le serie temporali dagli anni 50' fino ad oggi con l'obiettivo di studiarne l'evoluzione temporale e comprenderne la variabilità stagionale, inter-annuale, decadale e la loro tendenza media annua nel periodo considerato.

Si evince che l'analisi di qualità dei dati è fondamentale nello studio di serie storiche di lungo periodo in cui è necessario tenere in considerazione il massimo numero di dati a disposizione e a cui deve essere associata la massima garanzia di qualità.

Dall'analisi preliminare delle distribuzioni di frequenza dei dati di temperatura e salinità risultata che il tipico modello gaussiano, che si è soliti applicare nel calcolo statistico, potrebbe non rappresentare la reale distribuzione di frequenza di tali dati. La sola analisi visiva non è sufficiente ad eliminare tutti i possibili errori presenti in un set di dati molto

vasto ed occorrerebbe quindi sottoporre questo set di dati anche ad una procedura di controllo più rigorosa di tipo statistico. L'elaborazione dei dati ha quindi permesso di possedere una visione generale e ampia delle tre regioni del Mediterraneo studiate che si può considerare un lavoro preliminare da cui formulare strategie di indagine ancor più rigorose che permetteranno quindi di ottenere risultati più affidabili.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 SeaDataNet

L'accesso ai dati marini è di vitale importanza per la ricerca nel campo dell'oceanografia ed è una questione chiave per vari studi, dalla comprensione alla previsione dei cambiamenti climatici e l'impatto sull'ecosistema marino, all'ingegneria offshore.

Il sistema di osservazione marina è molto frammentato: nei paesi confinanti con i mari europei sono stati identificati oltre 600 centri dati scientifici che comprendono laboratori sia di organizzazioni governative e dell'industria privata. Essi raccolgono dati utilizzando vari sensori a bordo di navi da ricerca, sottomarini, piattaforme fisse e di deriva, aerei e satelliti, per misurare parametri fisici, geofisici, geologici, biologici e chimici, specie biologiche, ecc.

I dati raccolti non sono in generale né facilmente accessibili né standardizzati e non sono sempre convalidati, ma la loro cura e disponibilità devono essere assicurate in futuro. Per questo fine SeaDataNet (SDN) è nata come un'infrastruttura standardizzata per la gestione di grandi e diversi set di dati raccolti dalle flotte oceanografiche e dai sistemi di osservazione automatica. SDN, come infrastruttura di ricerca contribuisce a creare l'eccellenza della ricerca in Europa e collega già più di 100 centri dati oceanografici nazionali e centri dati marini provenienti da 35 paesi ripari a tutti i mari europei.

La qualità, la compatibilità e la coerenza dei dati provenienti da tante fonti sono garantite dall'adozione di metodologie standardizzate per il controllo dei dati, dedicando parte delle attività alla formazione e alla preparazione di prodotti statistici regionali e globali.

L'obiettivo è quello di mettere in rete e migliorare le infrastrutture attualmente esistenti, che sono i centri dati oceanografici nazionali di 35 paesi, attivi nella raccolta di dati. Il collegamento in rete di questi centri dati fornisce on-line set di dati integrati di qualità standardizzata.

L'accesso a tali dati è a discrezione dei fornitori di dati, i quali possono richiedere motivazioni per il loro utilizzo. Questi dati vengono identificati come “dati restricted” mentre

quelli che non richiedono motivazioni e che sono quindi a libero accesso sono i “dati non-restricted”.

L'infrastruttura SDN è stata implementata durante il progetto SeaDataNet (2006-2011) e con la seconda fase, il progetto SeaDataNet 2 (2011-2015), è stata migliorata in un'infrastruttura paneuropea operativa robusta e all'avanguardia per fornire informazioni aggiornate e un accesso di alta qualità ai metadati oceanici e marittimi, ai dati e ai prodotti.

Successivamente è stato ideato il progetto SeaDataCloud (2016-2020) che mira a far avanzare notevolmente i servizi SeaDataNet e ad aumentarne l'utilizzo, adottando la tecnologia cloud e High Performance Computing per prestazioni migliori.

Il software Ocean Data View (ODV) permette l'esplorazione interattiva, l'analisi e la visualizzazione di dati oceanografici e di altri riferimenti geo-referenziati, può visualizzare punti dati originali o campi grigliati in base ai dati originali e può essere utilizzato per produrre mappe di alta qualità.

I set di dati sono disponibili in formato ODV. Il formato dati ODV consente un accesso veloce ai dati e permette di visualizzarne facilmente grandi raccolte con milioni di stazioni.

Il set di dati storici utilizzato per compiere l'analisi delle serie temporali sono stati prima visualizzati e studiati proprio per mezzo del software ODV, grazie al quale è stato poi possibile esportarli in formato NetCDF ed in fine analizzarli tramite l'ambiente di calcolo MATLAB.

1.2 Il Mar Mediterraneo

In questa tesi verranno mostrati ed analizzati dati storici di temperatura e salinità relativi al Mar Mediterraneo, occorre quindi descrivere le dinamiche di questo bacino al fine di comprendere meglio le variazioni delle proprietà che verranno studiate.

Il Mar Mediterraneo è un mare semi-chiuso (Figura 1) che può essere suddiviso in due sotto bacini, il Mediterraneo occidentale e orientale, rispettivamente ad ovest e ad est dello Stretto di Sicilia. La sua circolazione è di tipo anti-estuarino poiché' in corrispondenza dello stretto di Gibilterra le acque superficiali atlantiche entrano in Mediterraneo mentre acque profonde ne fuoriescono, con un'interfaccia posta a circa 150 m di profondità.

La circolazione del Mediterraneo è forzata, come quella di tutte le principali aree oceaniche del mondo, dagli effetti combinati del vento e dei flussi di galleggiabilità.

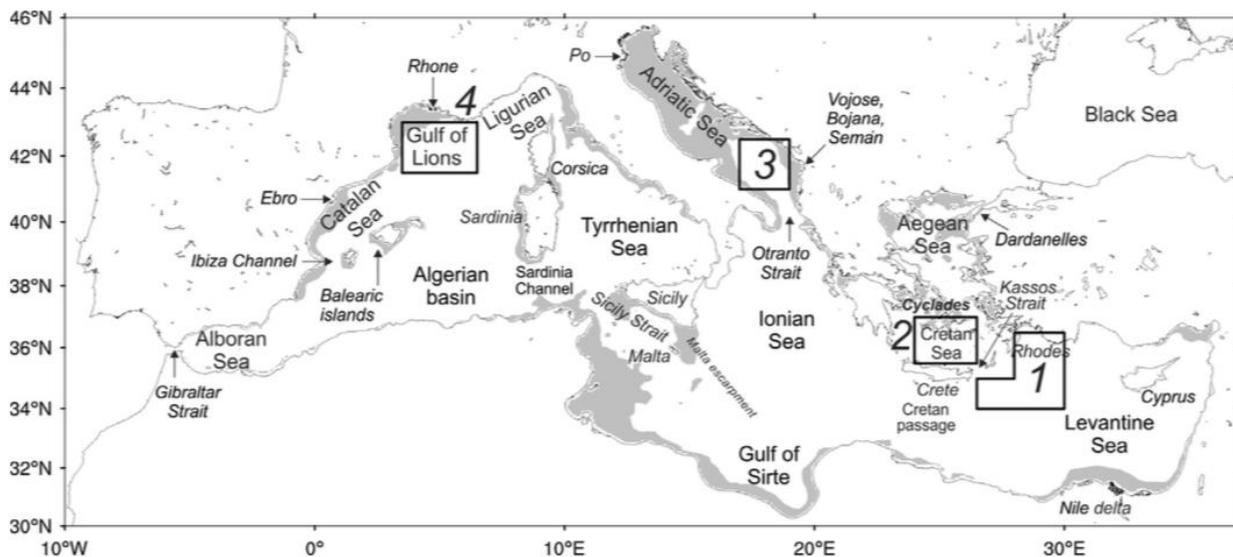


Figura 1 Geometria e nomenclatura del bacino del Mediterraneo per i principali mari e aree. Le aree ombreggiate indicano profondità inferiori a 200 m.

La circolazione del bacino è generalmente caratterizzata nelle regioni settentrionali da strutture di tipo ciclonico (ruotano in senso anti-orario) e nelle sue parti meridionali da strutture anti-cicloniche (ruotano in senso orario) ad eccezione del Tirreno e del Mar Ionio settentrionale. La circolazione del Mar Tirreno è dominata da strutture cicloniche di diversa intensità e intermittenza. La circolazione del Mar Ionio settentrionale è invece caratterizzata da inversioni di segno la cui frequenza è tuttora oggetto di studio da parte della comunità scientifica. Pinardi et al. (2013) hanno rilevato questo fenomeno, utilizzando dati di un modello di circolazione, tra il 1996-1997 e lo hanno chiamato Northern Ionian Reversal.

Essendo un bacino di media latitudine, il Mar Mediterraneo è caratterizzato da un ciclo di formazione delle masse d'acqua, intermedie e profonde, influenzato dall'entrata dell'Atlantic Water (AW) dallo Stretto di Gibilterra. L'acqua più fresca proveniente dall'Atlantico caratterizza lo strato superiore di circa 150 m che sovrasta la Levantine Intermediate Water (LIW) formata nel bacino levantino (Lascaratos et al., 1993). Le masse d'acque profonde sono distinte tra le parti occidentale e orientale del bacino poiché la soglia dello stretto della Sicilia ha una profondità massima di 500 m.

Le regioni in cui avviene la formazione di acque intermedie e profonde sono rappresentate dai riquadri in Figura 1. Le acque profonde del Mediterraneo occidentale (Western Mediterranean Deep Water, WMDW) e quelle del Mediterraneo orientale (Eastern Mediterranean Deep Water, EMDW) sono formate rispettivamente nell'area del Golfo del Leone e nel Mar

Adriatico meridionale, ma possono anche formarsi acque profonde nel Rhodes Gyre (Levantine Deep Water, LDW, Gertman et al., 1994) e nel Mare di Creta (Crete Deep Water, CDW, Tsimplis et al., 1999).

1.2.1 La circolazione generale

La circolazione generale superficiale ed intermedia del Mar Mediterraneo è stata descritta da Pinardi et al. (2013) analizzando dati di rianalisi che coprono il periodo 1987-2007 ottenuti da Adani et al. (2011) ed è rappresentata in Figura 2. Tabella 1 contiene la nomenclatura corrispondente alle principali strutture della circolazione rappresentate in Figura 2.

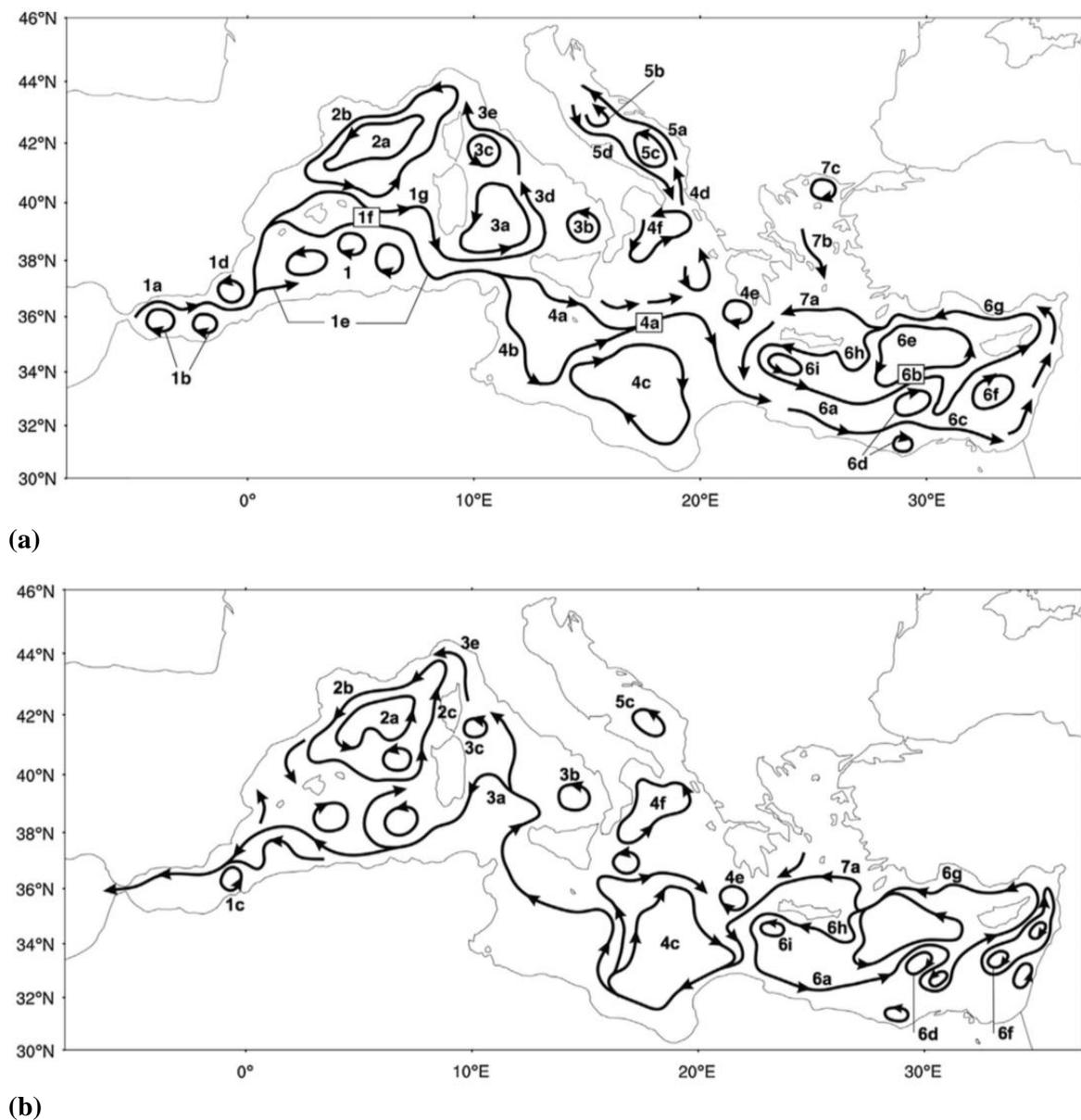


Figura 2 Rappresentazione della circolazione superficiale (a) e dello strato intermedio (b) del Mar Mediterraneo, estratta da Pinardi et al. (2013).

Current systems	Components
System 1	1a: Atlantic Water Current (AWC) 1b: Western and Eastern Alboran Gyres 1c: Almera-Oran front 1d: Almera-Oran cyclonic eddy 1e: Algerian Current segments 1f: Western Mid-Mediterranean Current (WMMC) 1g: Southern Sardinia Current (SCC)
System 2	2a: Gulf of Lion Gyre (GLG) 2b: Liguro-Provenal-Catalan Current (LPCC) 2c: Western Corsica Current (WCC)
System 3	3a: South-Western Tyrrhenian Gyre (SWTG) 3b: South-Eastern Tyrrhenian Gyre (SETG) 3c: Northern Tyrrhenian Gyre (NTG) 3d: Middle Tyrrhenian Current 3e: Eastern Corsica Current (ECC)
System 4	4a: Atlantic-Ionian Stream (AIS) 4b: Sicily Strait Tunisian Current (SSTC) 4c: Syrte Gyre (SG) 4d: Eastern Ionian Current (EIC) 4e: Pelops Gyre (PG) 4f: Northern Ionian Cyclonic Gyre
System 5	5a: Eastern South-Adriatic Current (ESAC) 5b: Middle Adriatic Gyre 5c: South Adriatic Gyre 5d: Western Adriatic Coastal Current (WACC)
System 6	6a: Cretan Passage Southern Current (CPSC) 6b: Mid-Mediterranean Jet 6c: Southern Levantine Current (SLC) 6d: Mersa Matruh Gyre System (MMGS) 6e: Rhodes Gyre (RG) 6f: Shikmona Gyre System (SGS) 6g: Asia Minor Current 6h: Ierapetra Gyre (IPG) 6i: Western Cretan Cyclonic Gyre
System 7	7a: Cretan Sea Westward Current (CSWC) 7b: Southward Cyclades Current (SWCC) 7c: North Aegean Anticyclone

Tabella 1 Nomenclatura delle strutture della circolazione superficiale ed intermedia della circolazione del Mar Mediterraneo, rappresentata in Figura 2, estratta da Pinardi et al. (2013).

A partire dal Mare di Alboran (Figura 1), la circolazione superficiale media è caratterizzata dalla corrente dell'Acqua Atlantica che entra da Gibilterra e serpeggia attorno alle due rotte di Alboran. Qui si forma ciò che viene chiamato il fronte di Almera-Oran, una struttura di circolazione media ben definita che si trova tra il giro di Alboran orientale e un vortice ciclonico.

Dopo il fronte di Almera-Oran si definiscono due correnti intensificate, una verso nord in direzione del canale di Ibiza e l'altra che forma un segmento intensificato della corrente

algerina che si muove lungo la costa in direzione est. Grandi vortici anticiclonici crescono e persistono per diversi mesi, dominando il campo di flusso e muovendosi lentamente in tutte le direzioni. I vortici più grandi si muovono verso il largo nel Mediterraneo centro-occidentale, mentre una corrente a getto forma un meandro libero centrato attorno ai 39,5° N. Questa corrente oceanica verso est viene chiamata Western Mid-Mediterranean Current (WMMC) (Pinardi et al., 2013). Il segmento che scorre verso nord dopo il fronte di Almera-Oran alimenta il WMMC, ramificandosi intorno alle isole di Ibiza e Maiorca. Dopo Maiorca, il WMMC si fonde con il confine meridionale della struttura ciclonica che domina la circolazione a nord dei 40° N, chiamato il Giro del Golfo del Leone.

A est delle Isole Baleari, il WMMC scorre nell'oceano aperto girando verso sud lungo le coste occidentali della Sardegna e formando lì una corrente intensificata, la più grande di ampiezza nel Mediterraneo occidentale, chiamata in seguito la Southerly Sardinia Current (SSC). Nel Canale di Sardegna, il SSC scorre lungo le coste tunisine, formando un segmento della Corrente algerina a partire dagli 8° E. Entrando nel Mar Tirreno meridionale, la corrente algerina riformata si dirama in tre parti, due rami entrano nello stretto di Sicilia e un terzo scorre verso nord-est nel Mar Tirreno.

Nel Tirreno la circolazione è dominata da tre strutture cicloniche: il South-Western Tyrrhenian Gyre (SWTG), il South-Eastern Tyrrhenian Gyre (SETG) e il Northern Tyrrhenian Gyre (NTG), (Artale et al., 1994). Nel mezzo del Tirreno il confine orientale del SWTG forma una corrente nord-ovest saldata, la Middle Tyrrhenian Current (MTC). Intorno alla Corsica (vedi Figura 2) ci sono due correnti dirette verso nord, la prima parte del confine Giro del Golfo del Leone e la seconda è un segmento dell'MTC.

La corrente algerina, entrando nello Stretto di Sicilia, si dirama nella Sicily Strait Tunisian Current (SSTC) lungo le coste meridionali e nell'Atlantic Ionian Stream (AIS) più a nord. A circa 13° E, la SSTC gira verso nord intorno a un grande vortice anticiclonico chiamato da Pinardi et al. (2006) la Sirte Gyre (SG).

Prima di entrare nel Cretan Passage, verso i 20°E, l'AIS gira verso sud raggiungendo le coste del Nord Africa e formando un'ampia corrente, circa dai 21° ai 26° E, che si ramifica nel Mid-Mediterranean Jet (MMJ) e nel Southern Levantine Current (SLC) (Pinardi et al., 2006). L'MMJ è una corrente a getto che fluisce tra il Mersa Matruh Gyre System (MMGS) a sud e il Rhodes Gyre a nord (Milliff et Robinson, 1992) e si allarga intorno ai 31° E diramandosi in una corrente meridionale e occidentale di Cipro, entrambe le quali si uniscono all'Asia Minor Current (Robinson et al., 1991; Özsoy et al., 1993). Nella parte settentrionale del passaggio di Creta, direttamente davanti allo stretto di Kassos (Figura 1), la continuazione

dell'Asia Minor Current forma un grande meandro anticiclonico, immediatamente dopo il Rhodes Gyre, che forma il giro anticiclonico detto Ierapetra Gyre (Robinson et al., 1991).

Il Mare Adriatico mostra generalmente una circolazione ciclonica, dominata da due sotto-strutture cicloniche del Medio e del Sud Adriatico, dalla corrente adriatica orientale e dalla corrente costiera adriatica occidentale (Artegiani et al., 1997).

La struttura della circolazione a profondità intermedia, tra 200 e 300 m, è mostrata in Figura 2b e può essere considerata rappresentativo dello strato della LIW nel Mediterraneo orientale. A media profondità la circolazione è simile alla superficie ad eccezione del flusso di ritorno della LIW nello stretto di Sicilia. La circolazione dello strato di LIW è un componente del flusso di ricircolo del sottosuolo che esce a Gibilterra (Pinardi et Masetti, 2000), e quindi generalmente scorre nella direzione opposta al flusso superficiale nello stretto di Sicilia e nei mari algerini e alborani.

Il percorso della LIW emerge dopo il passaggio di Creta dal Sirte Gyre ed è caratterizzato da due rami principali che iniziano approssimativamente ai 6° E uno diretto a nord, verso il giro del Golfo del Leone, e il secondo verso ovest, direttamente attraverso il bacino algerino, verso lo stretto di Gibilterra.

1.2.2 Eastern Mediterranean Transient

Tra la fine degli anni Ottanta e i primi anni Novanta un grande evento climatico noto come Eastern Mediterranean Transient (EMT, Roether et al., 1996) ha mostrato per la prima volta il contributo del Mar Egeo alle acque profonde del Mediterraneo orientale.

Tale evento ha modificato le caratteristiche di deflusso attraverso lo Stretto di Sicilia e ha portato a cambiamenti significativi anche nel Mar Mediterraneo occidentale.

L'EMT infatti, causato da una combinazione di fattori meteorologici e ideologici, ha modificato la pre-esistente circolazione termoalina del Mediterraneo orientale (Roether et al., 1996). Circa il 20% delle acque profonde di origine adriatica, residenti sotto i 1500 metri nel bacino est, sono state rimpiazzate da giovani acque di origine egea che a sua volta avevano preso il posto della precedente sorgente adriatica delle acque profonde.

In risposta a tale evento gli effetti dell'EMT sono evidenti dal 1992 anche nel Mediterraneo occidentale sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo della dinamica della circolazione. Modificando le caratteristiche termoaline dello strato intermedio, il transiente induce un sollevamento delle vecchie acque profonde dello Ionio favorendo il passaggio di un significativo volume di EMDW nel Canale di Sicilia con conseguente immissione di calore e salinità nel Tirreno (Schroder et al., 2006) Bethoux e al. (1990).

1.2.3 Northern Ionian Reversal

Presumibilmente associato all'EMT, un singolo evento di variabilità decennale molto importante nel bacino si è verificato nel Mar Ionio settentrionale, dove è stato documentato un fenomeno di inversione della corrente dopo il 1997 (Pinardi et al., 2013), che prende il nome di Northern Ionian Reversal.

Prima di tale data l'Atlantic Ionian Stream (AIS) occupava il Mar Ionio settentrionale, producendo un la struttura complessiva della circolazione anticiclonica, mentre dopo il 1997 l'AIS fluisce nel mezzo del bacino ionico e un vortice ciclonico si sviluppa nella parte settentrionale.

1.2.4 Principali eventi di formazione delle masse d'acqua

Uno dei processi più importanti che si verificano nel Mar Mediterraneo è la formazione di masse di acque intermedie e profonde.

La rianalisi fatta da Pinardi et al. (2013) offre l'opportunità di rivisitare la variabilità del tasso di formazione della massa d'acqua (Water Mass Formation, WMF) e gli eventi avvenuti nel periodo compreso tra il 1987-2007. Tale rianalisi si concentra sui tassi di formazione di acque intermedie e profonde che si sono verificati separatamente nel bacino occidentale e orientale del Mediterraneo, in particolare nelle 4 regioni riprodotte in Fig. 1.

Nella regione del Golfo del Leone (area 4 Figura 1) e dell'Adriatico meridionale (area 3 Figura 1) avviene la formazione di acque profonde del Mediterraneo occidentale e orientale rispettivamente, mentre il mare di Creta (area 2 Figura 1) è il sito di formazione di ciò che è noto come Cretan Deep Water (CDW). Infine nella regione che corrisponde all'area 1 in Figura 1, dov'è situato il Rhodes Gyre (a sud dell'isola di Rodi, nel bacino Levantino), avviene principalmente la formazione di acque intermedie chiamate Levantine Intermediate Waters (LIW), che caratterizzano lo strato tra i 200 ed i 600m.

La stima del tasso WMF di Pinardi et al., 2013, viene effettuata seguendo il metodo di Lascaratos et al. (1993), che consiste nella stima per ogni anno del volume delle acque su un determinato intervallo di densità nello strato misto di un'area specifica di interesse, e quindi dividendo questo volume di un anno in secondi. Calcolando i tassi WMF per ogni anno appaiono quattro grandi periodi di eventi nelle serie temporali mostrati in Figura 3.

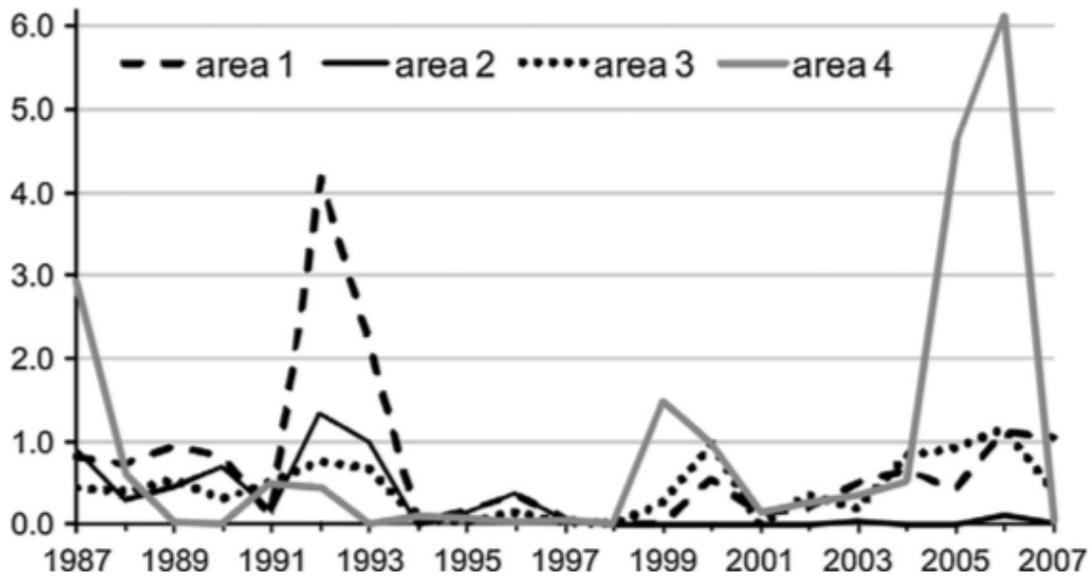


Figura 3 Tassi di formazione delle masse d'acqua calcolati da Pinardi et al. (2013) nelle 4 regioni in Figura 1 nel periodo 1987-2007.

Il primo grande evento di formazione si è verificato nell'area del Golfo del Leone nel 1987, come documentato da Leaman et Kevin (1991), che ha prodotto una grande quantità di WMDW.

Il secondo evento è il processo di formazione della LIW e della LDW, documentato da Gertman et al. (1994), e l'evento di grande formazione CDW del Eastern Mediterranean Transient (EMT) (Roether et al., 1996) che si è verificato tra il 1992 e il 1993.

Il terzo evento si è verificato nel 1999 e nel 2000 nel Golfo del Leone e nel Mare Adriatico. L'evento del 1999 nel mare Adriatico è documentato da Manca et al. (2006) ed è stato collegato alle acque più salate che entrano a profondità intermedia da Otranto, una conseguenza della diffusione del CDW collegata all'EMT.

Il quarto evento si è verificato nel 2005 e nel 2006 nel Golfo del Leone, così come nel Mar Adriatico e nell'area del Rhodes Gyre. Le grandi percentuali di WMDW sono documentate da un recente articolo (Smith et al., 2008). La spiegazione di questo grande evento e della sua area di formazione insolitamente grande è data da (Herrmann et al., 2010) in termini di aumento della salinità delle acque del Mediterraneo occidentale e grandi perdite di calore.

1.3 Obbiettivi

La tesi presentata mostra l'analisi delle serie temporali dei parametri di temperatura e salinità in specifiche aree del Mar Mediterraneo.

Le regioni che corrispondono all'area del Golfo del Leone, all'Adriatico meridionale e al Mar Levantino settentrionale, sono state selezionate poiché rappresentano le aree di formazione delle principali masse d'acqua.

Prima dello svolgimento dell'analisi, l'attenzione è stata focalizzata sul **controllo di qualità dei dati** al quale sono stati sottoposti i dati utilizzati, dimostrandone l'importanza.

L'analisi viene effettuata su tre strati rappresentativi delle principali masse d'acqua del bacino, uno strato superficiale fino a 150 m, uno strato intermedio tra 150-600 m e uno strato inferiore a 600 m. Per ciascuno di essi sono state analizzate le **serie temporali di temperatura e salinità** da cui sono state calcolate le **climatologie mensili con le relative deviazioni standard** e successivamente sono state calcolate le **anomalie standardizzate**. Successivamente sono state calcolate le medie annuali con relative deviazioni standard e i trend lineari. Anche le **distribuzioni di frequenza dei dati** sono state elaborate al fine di verificare se veramente i dati si distribuiscono secondo il modello gaussiano. L'obiettivo generale è di studiare l'evoluzione dei parametri di temperatura e salinità, di capirne la variabilità stagionale, inter-annuale e decadale e la loro tendenza di lungo periodo, partendo dal 1950 ad oggi.

La tesi è strutturata in 4 capitoli: il primo è dedicato ad una **introduzione** che descrive la fonte dei dati storici utilizzati per l'analisi e una descrizione delle dinamiche del Mar Mediterraneo. Il secondo capitolo presenta la **descrizione del set di dati e le metodologie** usate per verificare la loro qualità.

Il capitolo 3 mostra i **risultati dell'analisi delle serie temporali** e grafici che mostrano l'andamento di temperatura e salinità tramite il calcolo di trend e infine l'ultimo capitolo racchiude le **conclusioni**.

Capitolo 2

Materiali e metodi

2.1 Il set di dati

Questa analisi delle serie temporali sui dati di temperatura e salinità del Mar Mediterraneo è stata prodotta utilizzando il set di dati storici resi disponibili all'interno del Progetto SeaDataCloud (formato ODV) per il periodo che va dal 1900 fino ad oggi. L'analisi sarà focalizzata sul periodo successivo al 1950 a causa della ridotta disponibilità di dati prima di questa data.

Per quanto riguarda la descrizione generale del bacino che avverrà in questo capitolo, il dominio considerato per l'analisi copre l'intero Mar Mediterraneo e una parte dell'Oceano Atlantico. Nel capitolo seguente, saranno invece analizzate aree più specifiche.

Infatti successivamente il bacino verrà suddiviso in 17 regioni di cui ne verranno descritte tre: la zona del Golfo del Leone (regione 3), l'Adriatico meridionale (regione 10) e il Mar Levantino settentrionale (regione 14).

Sono stati utilizzati solo i dati ad accesso non ristretto che, prima di essere utilizzati, sono stati sottoposti alla strategia di controllo qualità SDN, in modo da avere un set di dati più completo e corretto possibile.

Tramite ODV è stata elaborata un'analisi generale dell'intero bacino e successivamente i dati relativi a particolari aree del Mediterraneo (vedi Capitolo 3) sono stati selezionati ed esportati in formato NetCDF per essere poi studiati ed elaborati mediante il software MATLAB.

2.1.1 Strategia di controllo qualità (Quality Control Strategy, QCS)

I centri di dati gestiscono grandi quantità di dati marini e oceanici, provenienti da propri istituti e da altre parti del loro paese, in una varietà di sistemi di gestione dei dati e di configurazioni.

Come detto in precedenza, un obiettivo e una grande sfida per SeaDataNet è quello di fornire una panoramica integrata e armonizzata e permettere l'accesso a queste risorse di dati utilizzando un approccio di rete distribuito.

Ciò è ottenuto sviluppando, implementando e gestendo il servizio Common Data Index (CDI) che fornisce agli utenti una visione molto dettagliata sulla disponibilità e la diffusione geografica dei dati marini nei diversi data center in tutta Europa.

Il progetto SeaDataNet II ha perfezionato una Quality Control Strategy (QCS) volta a migliorare appunto la qualità del contenuto di questo database.

Il QCS consiste di quattro fasi principali raffigurate nel diagramma in Figura 4:

- 1. Raccolta dati** di file T e S (temperatura e salinità) eseguita tramite il sistema CDI (Common Data Index) centrale, un utente robot che utilizza il servizio di individuazione e accesso dati CDI, per interrogare, acquistare e recuperare i dati dai centri dati distribuiti della infrastruttura SDN in modo automatico.
- 2. Aggregazione di file e di parametri** nella quale i dati (formato SDN/ODV) e i file csv con metadati CDI vengono elaborati utilizzando il software ODV e inclusi in collezioni di dati in formato ODV. Tutti i file di dati sono analizzati determinando il tipo di dato (profilo, traiettoria o serie temporali) e l'insieme di parametri. I dati vengono aggiunti alla raccolta ODV importando l'intera serie di metadati associati ai dati stessi (informazioni relative al fornitore dati, alla crociera di campionamento, al progetto, dello strumento utilizzato, ecc...).
- 3. L'analisi del controllo di qualità** delle collezioni T e S viene condotta da esperti a livello regionale ed è una procedura armonizzata per facilitare il flusso di dati e informazioni con i fornitori di dati. Tale procedura permette di identificare le anomalie dei dati ed di definire un piano comune per migliorare la qualità del contenuto della banca dati SDN.
- 4. Le anomalie dei dati** vengono organizzate in file e inviate ai fornitori di dati a cui si richiedono ispezione e correzione del dato originale, se necessario. Insieme ad esse vengono fornite linee guida per spiegare le informazioni nei file di anomalie, come apportare correzioni sui dati e come inviare le informazioni risultanti in report dettagliati. Le anomalie confermate sono quindi corrette all'interno del sistema/servizio CDI migliorando la qualità dell'intero database.



Figura 4 Fasi della strategia di controllo di qualità (Quality Check Strategy, QCS) dei dati contenuti all'interno della banca dati SeaDataNet.

L'approccio è iterativo per facilitare l'aggiornamento del database e consente il controllo delle versioni dei prodotti di dati attraverso il rilascio di nuove collezioni alla fine di ogni ciclo QCS e la generazione dei prodotti climatologici derivati dopo un certo intervallo di tempo necessario alle analisi successive.

Durante il progetto SDN II il ciclo QCS è stato completato per tre volte. Un primo ciclo di prova ha prodotto raccolte di dati regionali V1 che non sono state rilasciate. Un secondo ciclo ha permesso di affinare ciascuna fase tecnica e migliorare la qualità sia del contenuto centrale della banca dati sia delle raccolte di dati rilasciate come versione V1.1. Un terzo ciclo QCS ha dato origine alle collezioni di dati storici regionali V2.

Durante il progetto SeaDataCloud i dati sono stati sottoposti ad un ulteriore ciclo QCS, pertanto i dati utilizzati in questa tesi sono i dati più recenti disponibili.

2.1.2 Caratteristiche generali del set di dati storici del Mar Mediterraneo

La raccolta di dati storici del Mar Mediterraneo contiene osservazioni sulla temperatura e sulla salinità tra -9 e 37 gradi di longitudine per il periodo 1950-2017.

La distribuzione spaziale e la densità dei dati delle osservazioni di temperatura e salinità dall'intera raccolta di dati sono mostrati nella Figura 5. La distribuzione spaziale dei dati (Figura 5a) ne

presenta una buona copertura nel bacino del Mediterraneo occidentale e nella parte atlantica, mentre nella parte orientale molte aree sono caratterizzate da pochi dati, come le aree costiere di Tunisia, Libia, Croazia e Turchia. La mappa della densità dei dati (Figura 5b) evidenzia che le osservazioni sono più concentrate lungo le aree costiere della Spagna, della Francia e dell'Italia (Mar Ligure e Adriatico settentrionale). Nella parte orientale del bacino la massima concentrazione di dati si trova lungo le coste israeliana e greca.

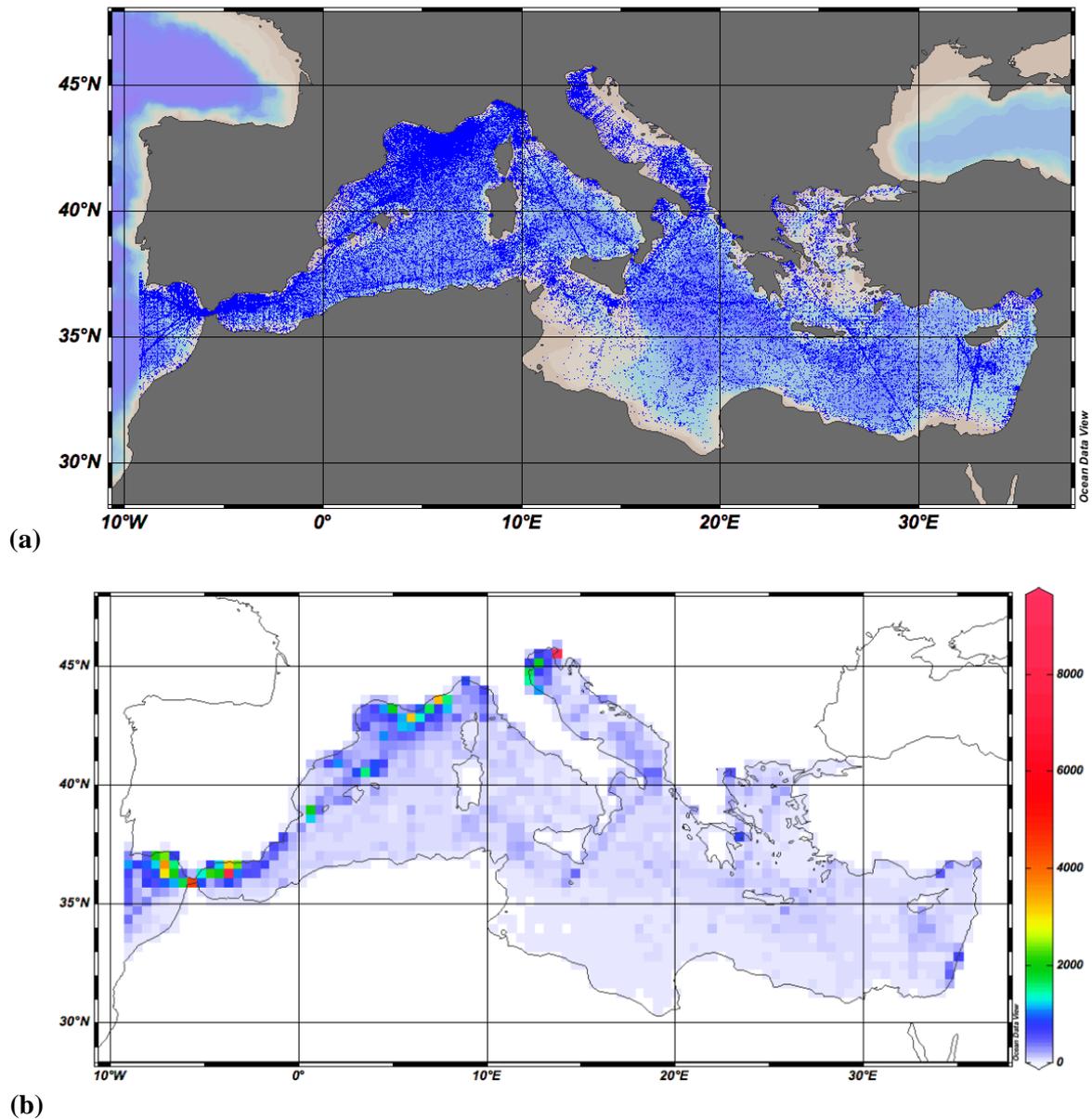
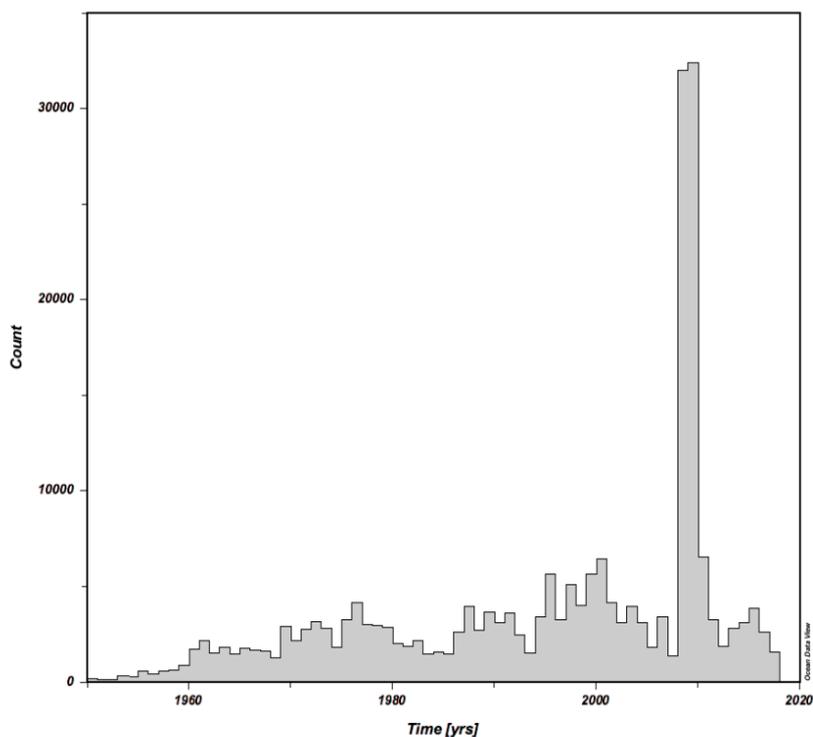


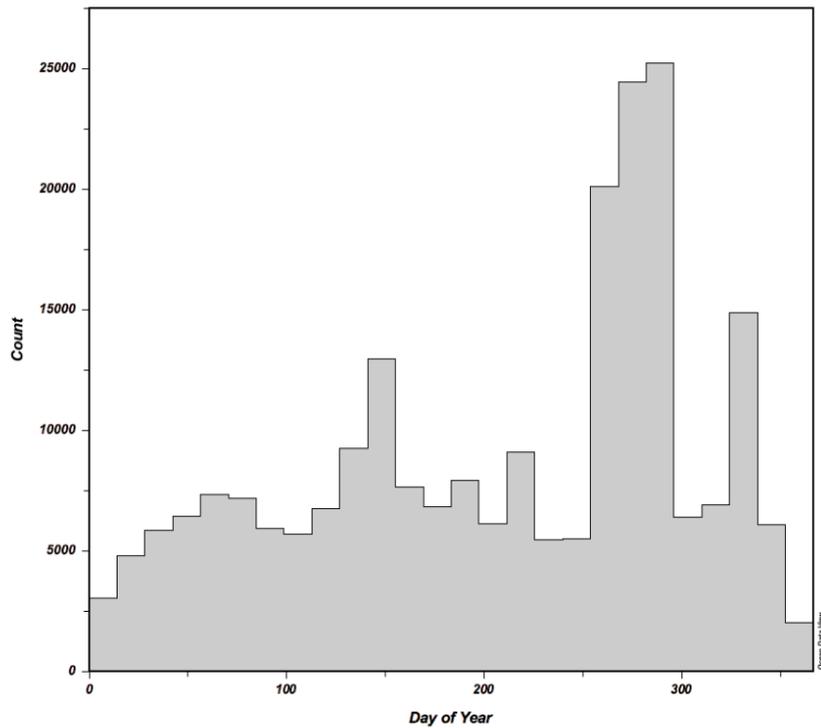
Figura 5 Raccolta dati di temperatura e salinità per il Mar Mediterraneo nel periodo 1950-2017: (a) Mappa di distribuzione dei dati; (b) Mappa della densità dei dati.

La distribuzione temporale dei dati è mostrata in Figura 6. La distribuzione annuale (a) dimostra che i dati sono molto scarsi prima del 1960, da cui cominciano ad aumentare sistematicamente in particolare dalla metà degli anni 90'. Il picco più alto di numero di dati corrisponde agli anni 2008 e 2009, anni in cui sono presenti campagne di monitoraggio ad alta frequenza spaziale alla superficie condotte con navi di opportunità.

La distribuzione stagionale (b) dei dati presenta una buona copertura per tutto l'anno, ma un picco è presente alla fine dell'estate all'inizio dell'autunno (settembre, ottobre). Tale picco è anch'esso dovuto alla massiva presenza dei dati negli anni 2008 e 2009.



(a)



(b)

Figura 6 (a) Distribuzione annuale dei dati e (b) distribuzione dei dati stagioni per il periodo 1950-2017 nel Mar Mediterraneo.

In Figura 7, che mostra la distribuzione dei dati di temperatura (a) e salinità (b), è subito evidente come le osservazioni sulla salinità siano meno numerose rispetto a quelle di temperatura, dimostrato anche in Tabella 2. Entrambe le mappe mostrano la presenza di dati lungo le tracce delle navi di opportunità e lungo i transetti costieri.

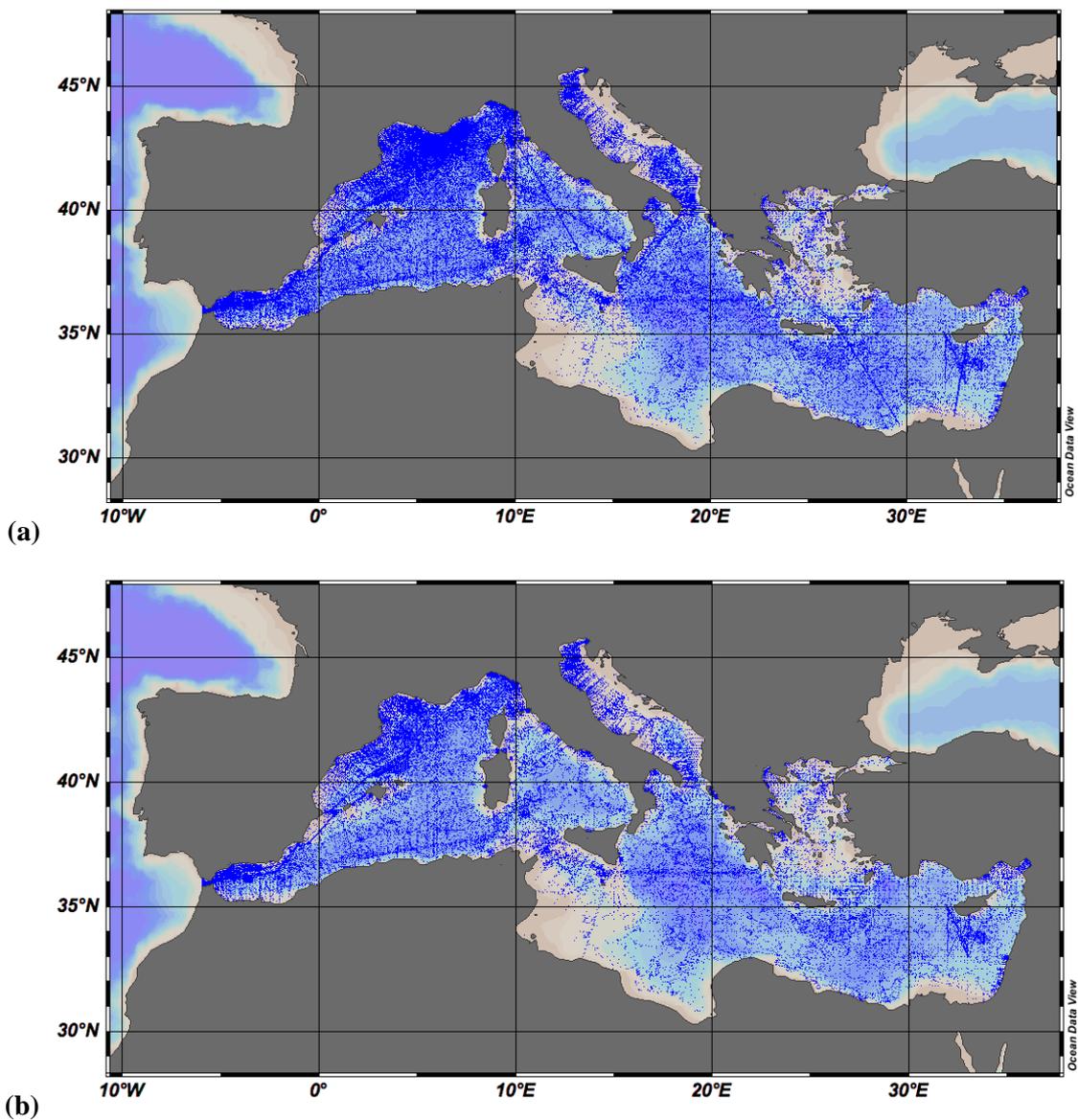


Figura 7 Mappa di distribuzione dei dati per il Mar Mediterraneo: (a) Temperatura; (b) Salinità.

La Tabella 2 condensa il numero di stazioni osservate e la sua ripartizione in stazioni di temperatura, stazioni di salinità e stazioni che hanno campionato sia T che S.

PARAMETRI	STAZIONI
total	229508
T	226863
S	159207
TS	157374

Tabella 2 Numero di dati per temperatura, salinità e coppia TS solo per il Mar Mediterraneo.

2.1.3 Analisi di controllo qualità

La terza fase del QCS è senz'altro un passaggio molto importante che permette di avere dati che forniscono informazioni più attendibili.

Per valutare la loro qualità, le collezioni di dati relative alla temperatura e alla salinità devono essere analizzate e ciò viene fatto attraverso un'analisi QC eseguita utilizzando il software ODV secondo il seguente procedimento:

- Analisi della distribuzione dei dati e della densità dei dati per identificare possibili gap spaziali e set di dati mancanti;
- Analisi della distribuzione temporale (annuale/stagionale) dei dati;
- Grafici di dispersione TS dell'intero set di dati e controllo dell'intervallo;
- Controllo visivo del grafico a dispersione delle osservazioni considerando varie SDN Quality Flags (QF) per identificare i profili errati (valori anomali, picchi);
- Statistiche di Flag di qualità dell'analisi per individuare eventuali errori sistematici da parte dei fornitori di dati;
- Identificazione delle stazioni marine che ricadono erroneamente a terra per sbagliata localizzazione;
- Identificazione di dati errati o mancanti.

Lo schema armonizzato di **quality flags (indici di qualità)** implementato dalla comunità SDN per etichettare i singoli valori dei dati è riassunta in Tabella 3.

0	VALORE NON CONTROLLATO
1	VALORE CORRETTO
2	VALORE INCONSISTENTE CON STATISTICHE
3	VALORE DUBBIO (SPIKE)
4	VALORE FALSO
5	VALORE MODIFICATO DURANTE QC
6-8	NON USATO
9	NESSUN VALORE OSSERVATO

Tabella 3 Schema armonizzato degli indici di qualità con i quali vengono etichettati i valori dei dati.

Il set di dati storici utilizzato per l'analisi delle serie temporali è stato selezionato scegliendo solo i dati di temperatura e salinità con relativa profondità corrispondenti a valori di quality flags uguali ad 1 e 2.

2.2 Metodologia

Come introdotto nel primo capitolo, importanti eventi descritti da Pinardi et al. (2013) si sono verificati in specifiche aree del Mediterraneo e ad essi sono associati cambiamenti nelle proprietà idrologiche che caratterizzano le masse d'acqua.

L'analisi in questa tesi permette di osservare dunque tali cambiamenti osservando le serie temporali ottenute dall'elaborazione dei dati di temperatura e salinità di queste tre regioni principali, studiando l'evoluzione di questi parametri nel tempo.

Occorre considerare che tale studio comprende una mole di dati considerevole (250000 profili verticali circa) in quanto il periodo di tempo considerato è molto ampio, quasi 70 anni dal 1950 a oggi, e anche l'area di interesse è molto estesa. Si ritiene dunque lo studio effettuato un fondamentale punto di partenza, un'analisi preliminare, che permetterà in futuro lo svolgersi di analisi più approfondite, grazie all'attenta valutazione dei risultati ottenuti e la messa a punto di ulteriori tecniche investigative da applicare ai dati storici in maniera iterativa. Questo approccio garantisce un rigoroso trattamento statistico dei dati storici e, di conseguenza, l'ottenimento di risultati attendibili e robusti.

Inizialmente il lavoro svolto si è basato sulla visualizzazione dei dati dell'intero bacino Mediterraneo tramite ODV, filtrando le osservazioni di temperatura e salinità, con le relative profondità, selezionando solo i dati contrassegnati da quality flags uguali ad 1 e 2, e ciò ha portato ad una prima descrizione sulle caratteristiche generali del set di dati del Mediterraneo sopra svolto.

L'analisi dei dati storici SDN viene successivamente eseguita per aree specifiche del Mar Mediterraneo in seguito alla suddivisione del bacino in 17 regioni (Figura 8).

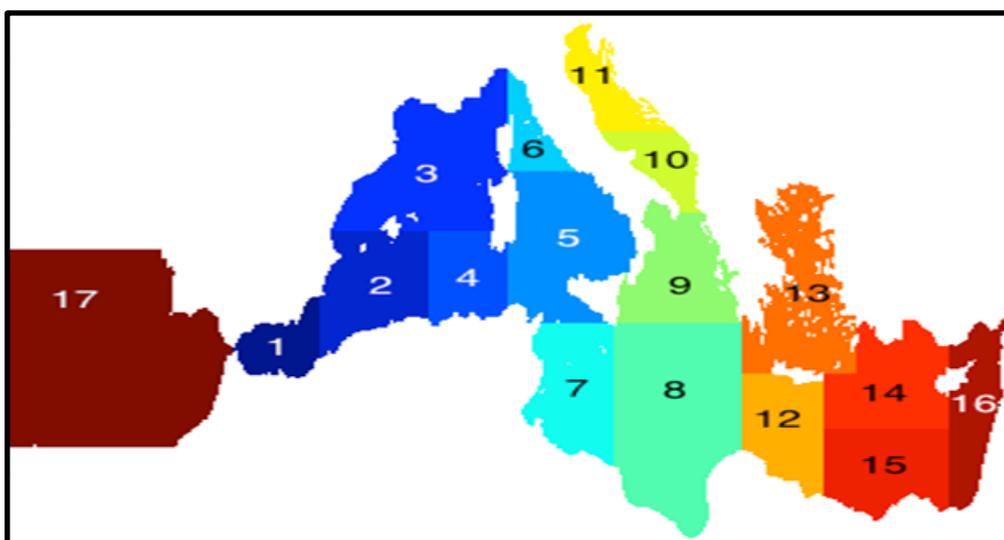


Figura 8 Suddivisione in 17 regioni del Mar Mediterraneo.

Le regioni 3, 10 e 14, che rispettivamente corrispondono all'area del Golfo del Leone (area 4 in Figura 1), all'Adriatico meridionale (area 3 in Figura 1) e al Mar Levantino settentrionale (area 1 in Figura 1), sono state scelte in quanto esse rappresentano le maggiori aree di interesse per la formazione di masse d'acqua.

I dati relativi a queste tre regioni sono stati selezionati da ODV ed esportati in formato NetCDF per permettere il proseguimento dell'analisi mediante il software MATLAB.

Grazie a questo strumento è stato possibile produrre una serie di grafici volti a studiare l'evoluzione di questi parametri fisici, per capirne la variabilità inter-annuale, decadale e la loro tendenza nel periodo considerato.

In primo luogo sono stati prodotti grafici rappresentanti la distribuzione orizzontale e verticale dei dati e la distribuzione annuale dei profili dei dati di temperatura e salinità per il periodo di interesse (1950-2017).

Successivamente l'elaborazione ha prodotto grafici, trattando separatamente temperatura e salinità, nei quali sono stati individuati tre strati rappresentativi delle principali masse d'acqua del bacino:

- uno strato superficiale fino a 150 m influenzato dai processi all'interfaccia aria-mare e dalle acque atlantiche;
- uno strato intermedio tra 150-600 m caratterizzato dalle acque intermedie;
- uno strato inferiore a 600 m in cui fluiscono le acque di fondo.

Per ciascuno di questi strati sono stati quindi sviluppati grafici rappresentanti le climatologie e le serie temporali dei dati di temperatura e salinità, questi ultimi associati a grafici di anomalie standardizzate calcolate sottraendo la relativa climatologia mensile a ciascun valore di temperatura o di salinità e dividendolo per la relativa deviazione standard.

Per anomalia si intende infatti la serie temporale della variabile y a cui viene sottratta la climatologia corrispondente:

$$ANOMALIA = y - \bar{y}$$

dove \bar{y} indica la climatologia.

Le medie climatologiche sono state calcolate per ciascun parametro (T, S) selezionando e mediando i dati appartenenti a ogni singolo mese e per ogni strato. Considerando ad esempio gennaio, tutti i dati raccolti in questo mese negli anni dal 1950 al 2017 vengono mediati.

Nel nostro caso le anomalie sono state standardizzate, cioè divise per la corrispondenti deviazioni standard (indicata con σ):

$$Z = \frac{y - \bar{y}}{\sigma}$$

Z viene utilizzata per poter confrontare la variabilità nel tempo tra parametri diversi, poiché esprime il numero di deviazioni standard di cui il singolo dato si discosta dalla climatologia calcolata.

Per i dati di temperatura e salinità rappresentati nei grafici delle serie temporali sono poi state calcolate le medie annuali, per ciascun strato di ciascuna regione, solo negli anni per i quali abbiamo a disposizione un minimo di trenta osservazioni, in modo da aumentare la significatività delle medie ottenute.

Come misura della variabilità dei dati, per ciascuna media è stata inoltre calcolata la sua rispettiva deviazione standard.

Essa, insieme alla varianza, è una proprietà statistica fondamentale che permette di descrivere la variabilità di una serie temporale. La varianza (σ^2) di una serie di dati è la media dei quadrati degli scarti dei valori osservati dalla loro media e misura la dispersione dei dati intorno alla media, mentre la deviazione standard è la sua radice quadrata.

Per avere una migliore comprensione dell'andamento dei parametri nel periodo considerato, è stata anche studiata la loro tendenza nel tempo calcolando il trend lineare.

Il trend (o componente tendenziale) è la tendenza di fondo del fenomeno considerato spesso espressa mediante una funzione polinomiale, nel nostro caso lineare:

$$T_t = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots + \alpha_p t^p$$

Dove t è il tempo e $\alpha_0 \dots \alpha_p$ sono tutti i parametri da stimare e sono di primo grado.

Per ultimo sono stati prodotti grafici sulla distribuzione di frequenza delle anomalie dei dati, sempre suddivisi per regione e per strato con l'obiettivo di verificarne la reale distribuzione di frequenza che in letteratura viene normalmente assunta di tipo gaussiano.

2.2.1 Confronto tra set di dati prima e dopo la validazione

In questa sezione viene mostrata la differenza tra i set di dati prima e dopo l'analisi di qualità per esplicitare quanto questa procedura sia importante ai fini di ottenere risultati maggiormente affidabili. Figura 9 rappresenta la comparazione tra il data set originale e quello ottenuto al termine dell'analisi di qualità. L'immagine raffigura la serie temporale della salinità media annua, dei dati con quality flags (QF) 1 e 2, di dell'area 3 del Mar Mediterraneo (Figura 8) sui tre strati verticali considerati. I punti rappresentano le medie calcolate, mentre le barre le relative deviazioni standard.

Per essere maggiormente rappresentative, le medie sono state calcolate solo per gli anni in cui si possiedono un minimo di trenta dati.

I punti blu mostrano l'andamento della salinità per il set di dati V3, che qui consideriamo essere il data set prima del controllo qualità, mentre i punti rossi corrispondono ai dati V3QC, sottoposti quindi all'analisi di qualità. Per gran parte della distribuzione i punti dei due data set si sovrappongono ma dove riusciamo a vedere i punti rossi possiamo osservare le differenze.

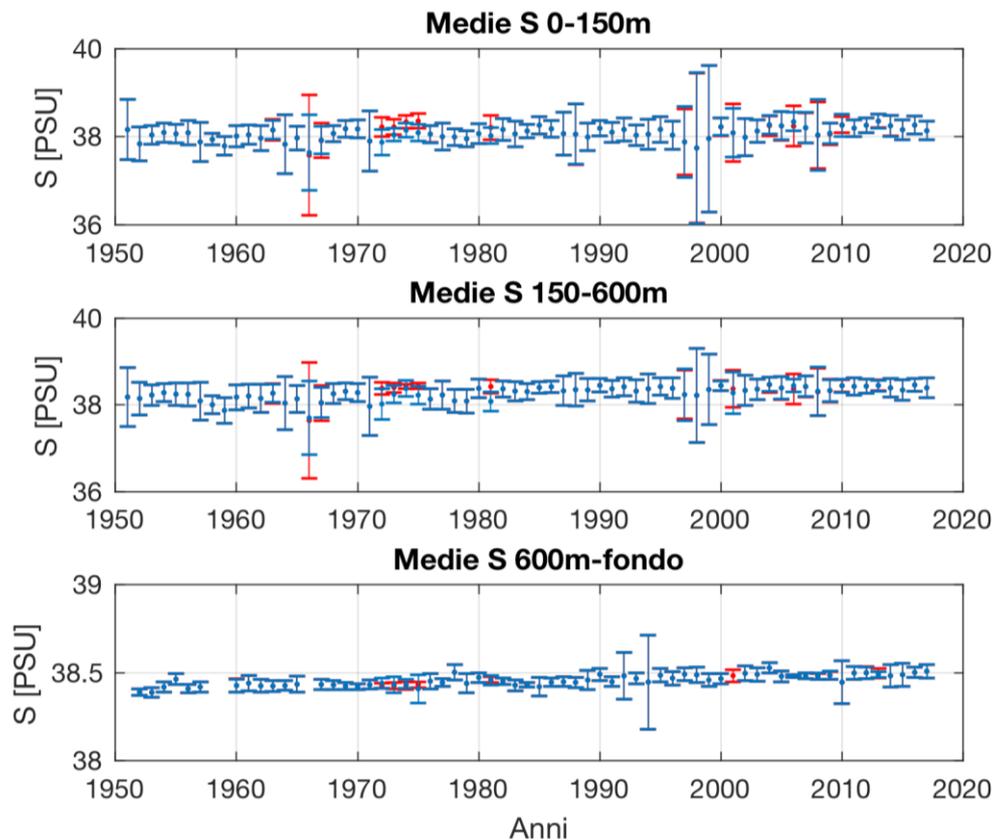


Figura 9 Distribuzione annuale della salinità media annua dei data set V3 (blu) e V3QC (rosso). La distribuzione è divisa per strato: Strato superficiale (0-150 m), strato intermedio (150-600 m), strato profondo (600 m-fondo).

Se il set di dati originali (V3) fosse stato validato in maniera adeguata, una volta eseguito il QC non ci sarebbero state differenze con il V3QC quindi i due set di dati sarebbero risultati esattamente sovrapposti. Perciò dove si vedono i punti blu significa che i dati originali di V3 erano corretti, dove vediamo i punti rossi significa che c'è stata una correzione sostanziale che ne ha determinato una variazione del valor medio. È interessante vedere come in alcuni casi sia il punto a spostarsi e in altri sia solo la barra della deviazione standard a modificarsi.

Entrambi i casi possono avvenire per due ragioni: l'errata assegnazione di quality flags; l'individuazione di molti errori sistematici da parte dei data providers, di outliers o spikes.

Infatti QF errate possono comportare l'aumento o la diminuzione del numero di dati usati per calcolare la media e ciò ha influito conseguentemente sulla sua variabilità nonché sulla media stessa. Così come anche valori errati presenti nel set di dati causano cambiamenti al valore della media.

Un chiaro esempio è mostrato in Figura 9 (in basso) nello strato profondo è possibile osservare che nell'anno 2001 risulta solo un punto rosso, questo significa che nel dataset V3 in quell'anno non c'erano dati sufficienti per calcolare la media. In realtà durante la fase di validazione da parte del gruppo di lavoro SeaDataCloud un 5% circa di dati rispetto al totale originariamente non validati con QF=0 sono stati controllati e promossi a QF=1 o 2, incrementando così il numero di dati affidabili a disposizione per la nostra indagine.

Questo comporta che una volta eseguito il controllo di qualità, il valore della QF è stato modificato, non il dato in se, e dati che prima non erano stati considerati ora vengono reintegrati. Così facendo i dati sono aumentati, superando il limite di almeno trenta dati per anno, ed è per questo che nel set di dati V3QC nell'anno 2001 è comparso quel punto.

A supporto di questo esempio vi sono anche i risultati descritti in Tabella 4 e in Tabella 5, nelle quali sono state inserite le statistiche relative alle varie QF associate al data set V3 prima e dopo del controllo di qualità (V3QC). Da esse infatti emerge che quel 4% presente nel set di dati V3, che corrisponde alla percentuale di osservazioni classificate come “non controllate” rispetto a quelle totali, in Tabella 5 si è spostato nella colonna delle osservazioni qualificate come “probabilmente buone”, che sono proprio quelle usate per calcolare le medie rappresentate nel grafico in Figura 9. Si deduce che l'analisi di qualità è fondamentale nello studio di serie storiche di lungo periodo in cui è necessario tenere in considerazione il massimo numero di dati a disposizione e a cui deve essere associata la massima garanzia di qualità. Questo concetto sta alla base dell'analisi delle proprietà idrodinamiche su cui si fonda lo studio del clima dell'oceano e dei suoi cambiamenti.

Set di dati V3					
	TOT	QF0	QF1	QF2	QF>3
T	25018761	1120151	23832783	63406	2421
		4.47%	95.26%	0.25%	0.01%
S	20698751	845371	19848813	2428	2139
		4.08%	95.89%	0.02%	0.01%
TS	20419843	845270	19505732	32671	36170
		4.14%	95.52%	0.16%	0.18%

Tabella 4 Numero di campioni per Temperatura, Salinità e coppia TS e la loro suddivisione in base a Quality Flags (QF) 0,1,2 e da 3 a 9 per il set di dati V3.

Set di dati V3QC					
	TOT	QF0	QF1	QF2	QF>3
T	25333956	0	23835211	1173943	2522
		0%	94.08%	4.63%	0.01%
S	21672528	0	19844953	847185	2351
		0%	91.58%	3.91%	0.01%
TS	21280633	0	19511373	878423	36275
		0%	91.69%	4.13%	0,17%

Tabella 5 Numero di campioni per Temperatura, Salinità e coppia TS e la loro suddivisione in base a Quality Flags (QF) 0,1,2 e da 3 a 9 per il set di dati V3.1.

Capitolo 3

Analisi delle serie temporali

3.1 Le regioni del Mar Mediterraneo

L'analisi dei dati storici SDN viene qui svolta per aree specifiche del Mar Mediterraneo definite in Figura 8. Il bacino è stato suddiviso in 17 regioni di cui ne sono state selezionate tre: la **3**, la **10** e la **14**, che rappresentano rispettivamente la zona del Golfo del Leone, l'Adriatico meridionale e il Mar Levantino settentrionale.

In primo luogo l'analisi ha prodotto grafici che permettono di osservare, per ciascuna regione, la distribuzione orizzontale e verticale dei dati e la distribuzione annuale dei profili dei dati di temperatura e salinità.

3.1.1 Regione 3

La regione 3 corrisponde al Mediterraneo nord-occidentale, dunque l'area compresa tra -1 e 10E gradi di longitudine e 39,5-45N gradi di latitudine, a nord delle Isole Baleari e a ovest di Corsica e Sardegna. Quest'area è la più grande nonché la più ricca di dati ed è nota per la presenza del gyre del Golfo del Leone, dove avviene la formazione di WMDW.

Possediamo ben 55403 stazioni o profili verticali che possiamo vedere dalla Figura 10, la quale presenta una buona distribuzione spaziale dei dati in particolare nel Golfo del Leone e lungo la costa. Dalla distribuzione verticale dei dati, rappresentata dalla Figura 11, è possibile vedere come i dati siano stati raccolti per lo più nei primi 1000 m e solo pochi campionano l'intera colonna d'acqua fino a 3000m, massima profondità del fondale marino.

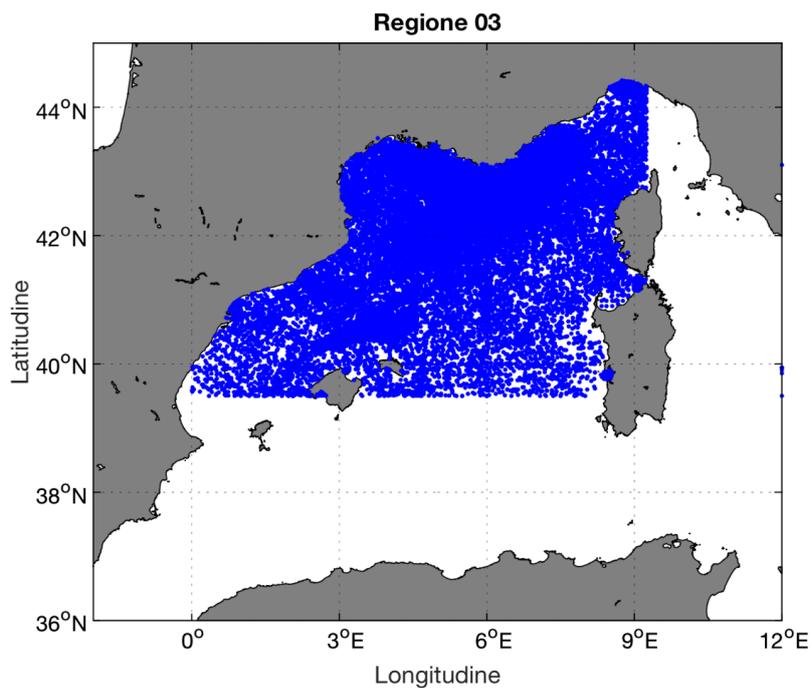


Figura 10 Distribuzione orizzontale dei dati nel periodo 1950-2017 per la regione 3 del Mar Mediterraneo.

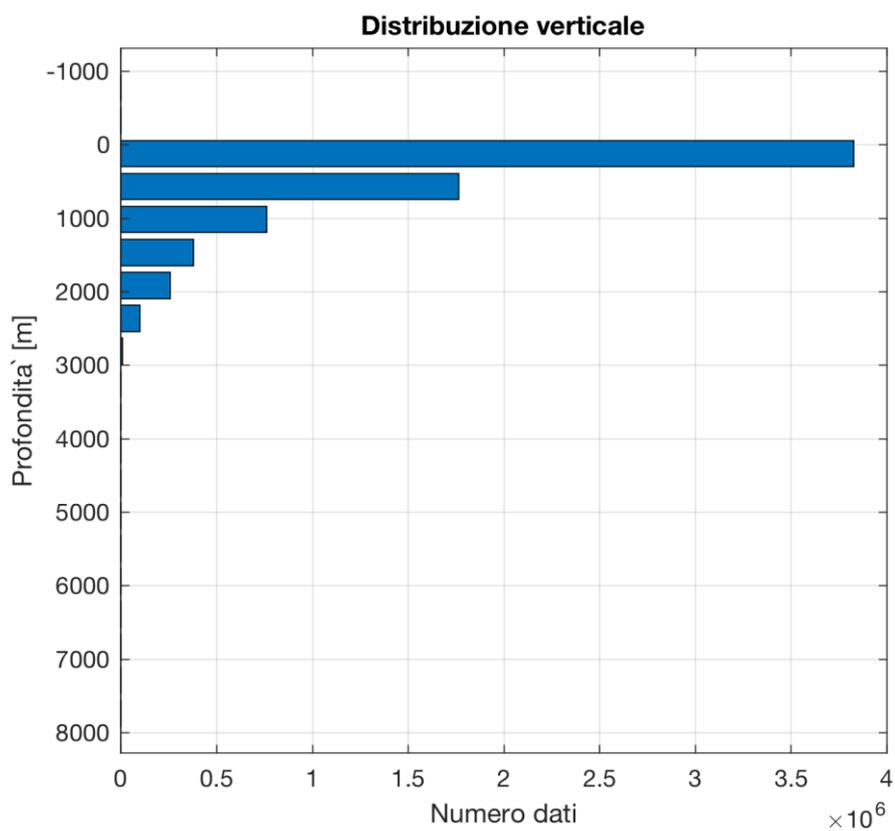
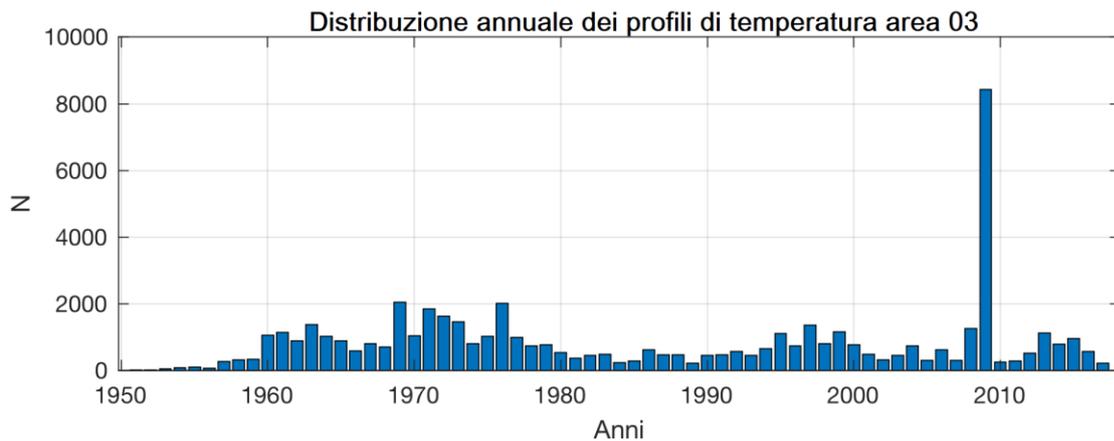


Figura 11 Distribuzione verticale dei dati per la regione 3 del Mar Mediterraneo.

Dai grafici in Figura 12 è possibile osservare la distribuzione annuale dei dati di temperatura (a) e di salinità (b). Per entrambi i parametri prima degli anni 60' risultano poche osservazioni, in particolare per la salinità. La distribuzione diventa poi più costante per tutto il periodo considerato con un picco più alto corrispondente all'anno 2009, in cui sono presenti dati ad alta frequenza spaziale campionati da navi di opportunità. Si nota inoltre che, rispetto alla temperatura, per la salinità il numero di osservazioni risulta notevolmente inferiore.

(a)



(b)

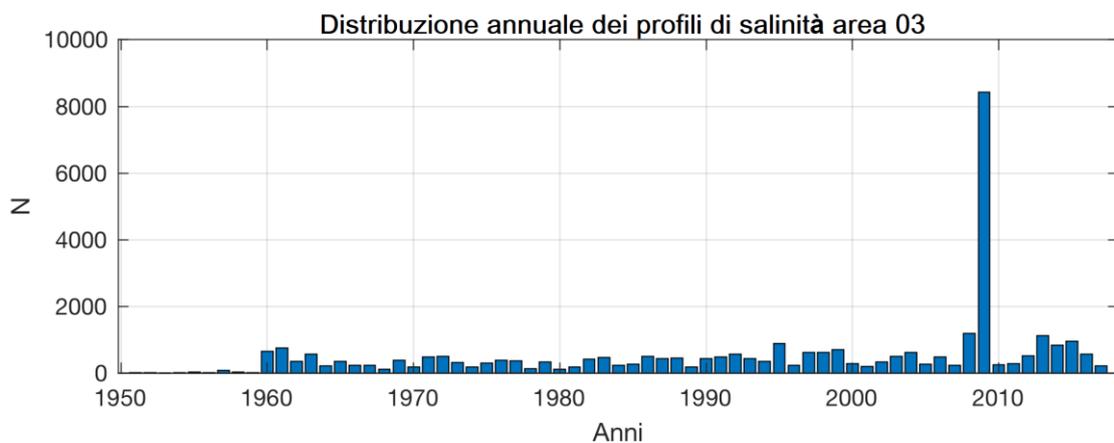


Figura 12 Distribuzione annuale dei profili dei dati nel periodo 1950-2017 per la regione 3 del Mar Mediterraneo: a) Temperatura; b) Salinità.

3.1.2 Regione 10

Questa regione include la parte meridionale del Mare Adriatico comprese tra i 40 e i 42,5 gradi di latitudine. La distribuzione spaziale delle stazioni campionate è mostrata nella Figura 13 e presenta una buona copertura dei dati nell'intera area considerata, in particolare in prossimità dello Stretto di Otranto, così come la distribuzione verticale dei dati (Figura 14) ne mostra una buona copertura lungo tutta la colonna d'acqua.

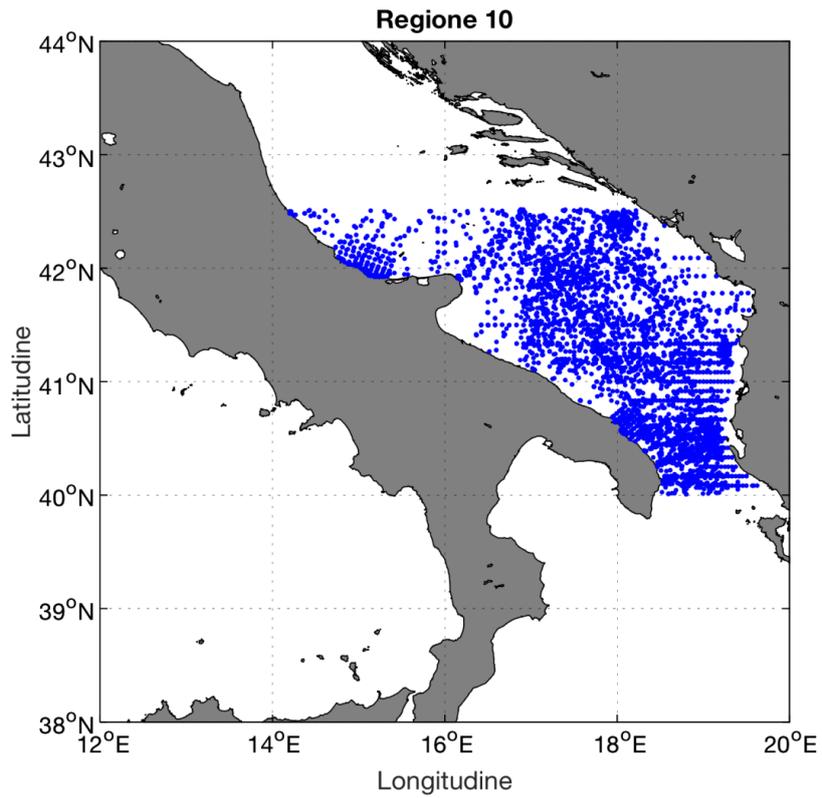


Figura 13 Distribuzione orizzontale dei dati nel periodo 1950-2017 per la regione 10 del Mar Mediterraneo.

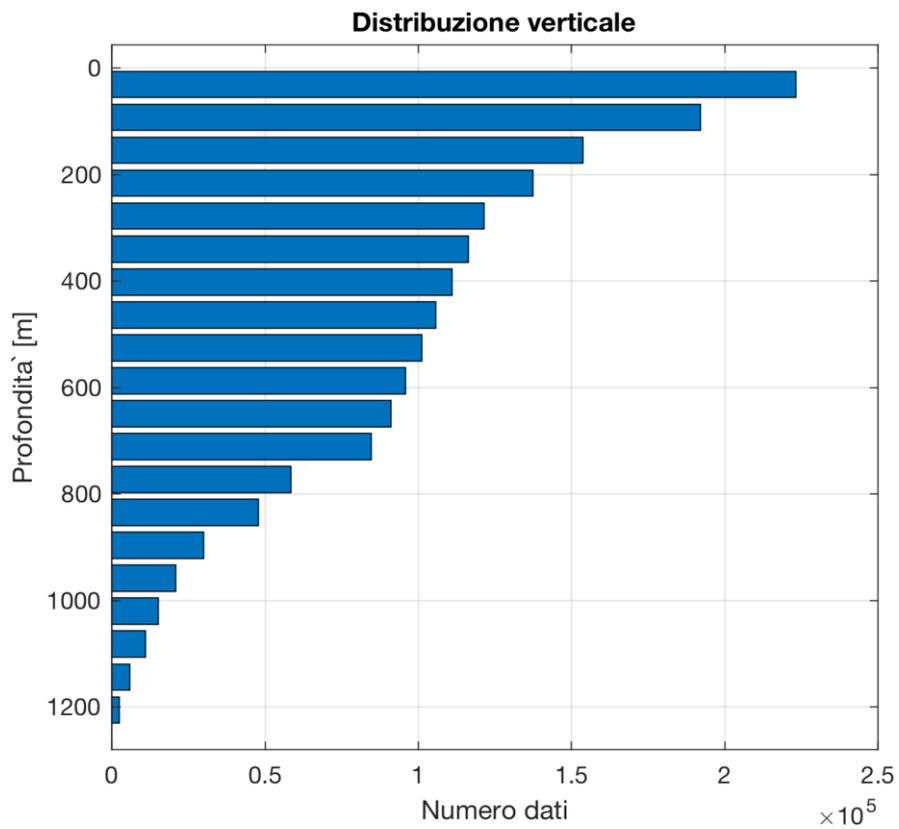
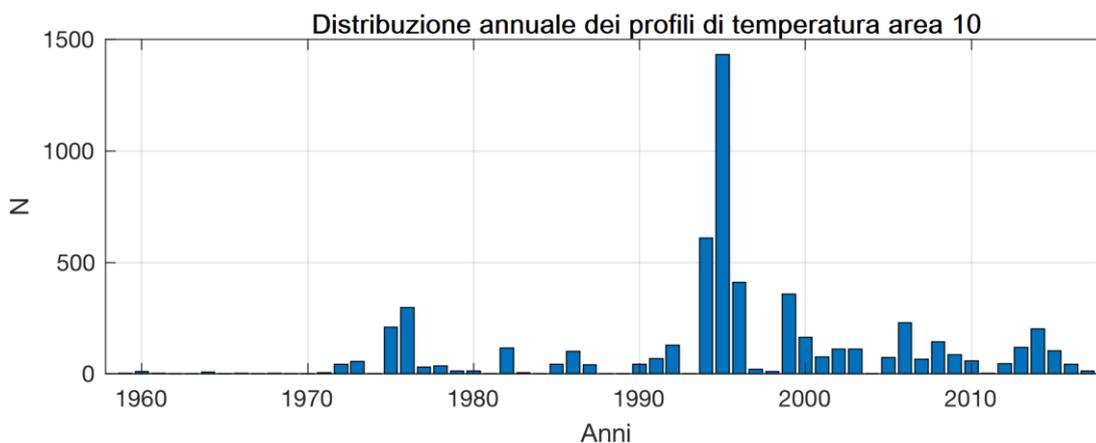


Figura 14 Distribuzione verticale dei dati per la regione 10 del Mar Mediterraneo.

Dai grafici in Figura 15 è possibile osservare la distribuzione annuale dei profili dei dati di temperatura (a) e salinità (b), da cui risulta che le osservazioni erano sono scarse prima degli anni 70'. Il picco più alto corrisponde al 1995.

(a)



(b)

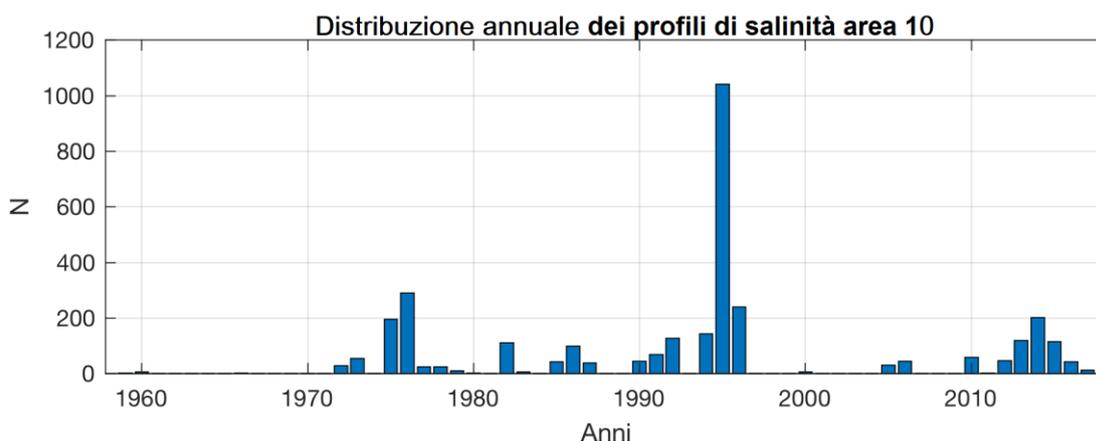


Figura 15 Distribuzione annuale dei profili dei dati nel periodo 1950-2017 per la regione 10 del Mar Mediterraneo: a) Temperatura; b)Salinità.

3.1.3 Regione 14

La regione 14 rappresenta la parte settentrionale del Mar Levantino, dove è situato il Rhodes Gyre (si vedano Figura 2 e Tabella 1), ed è un'area ben nota per la formazione della LIW. La collezione di dati storici di quest'area del Mar Mediterraneo contiene osservazioni sulla temperatura e sulla salinità comprese tra i 26 e 33°E di longitudine e a nord dei 33,6°N di latitudine per il periodo 1950-2017 (Figura 16).

Dalla Figura 17, che rappresenta la distribuzione verticale, risulta che i dati siano stati raccolti maggiormente nella zona superficiale per diminuire gradualmente andando in profondità.

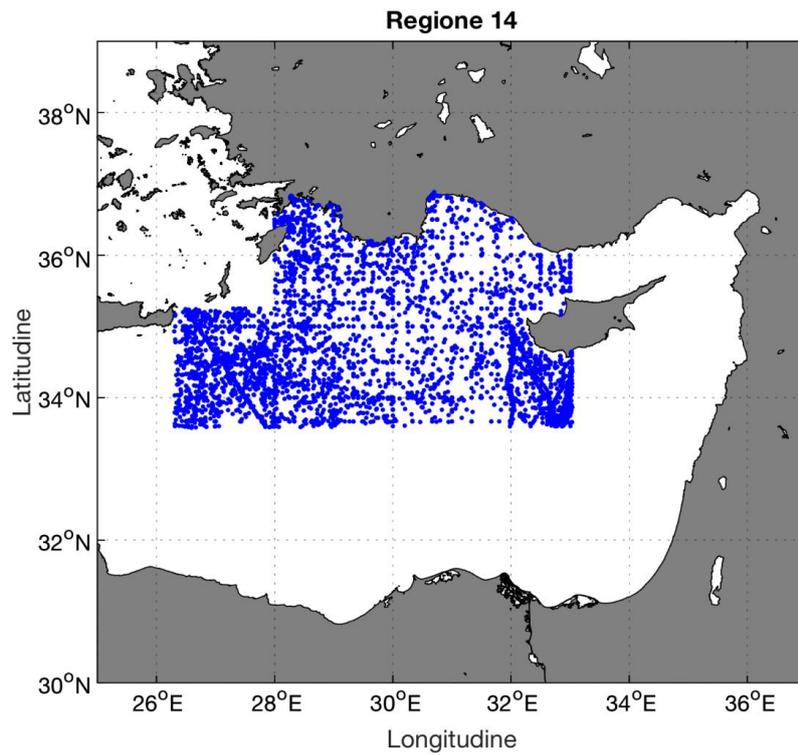


Figura 16 Distribuzione orizzontale dei dati nel periodo 1950-2017 per la regione 14 del Mar Mediterraneo.

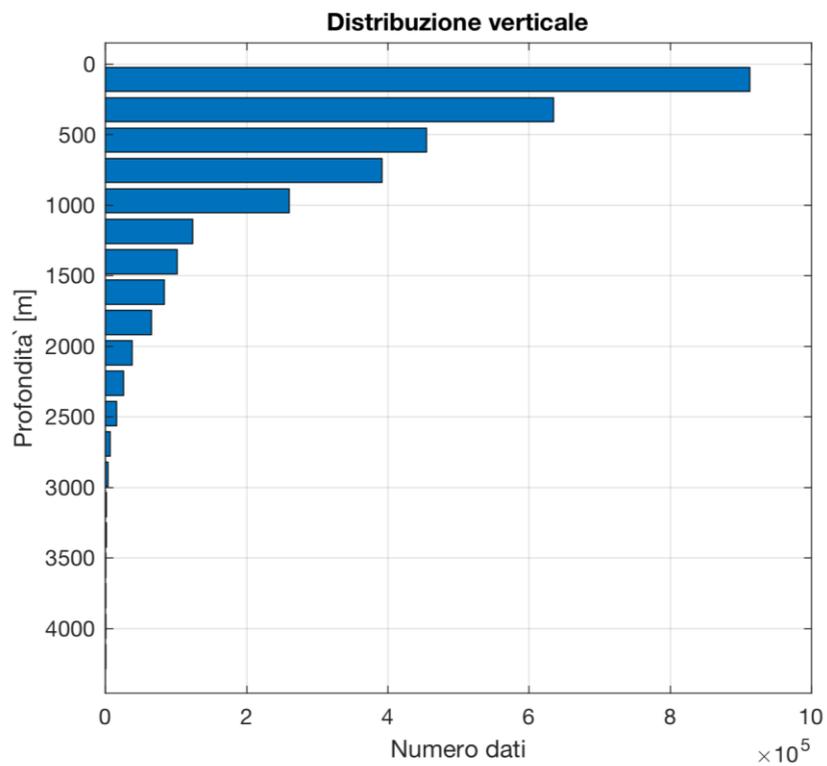
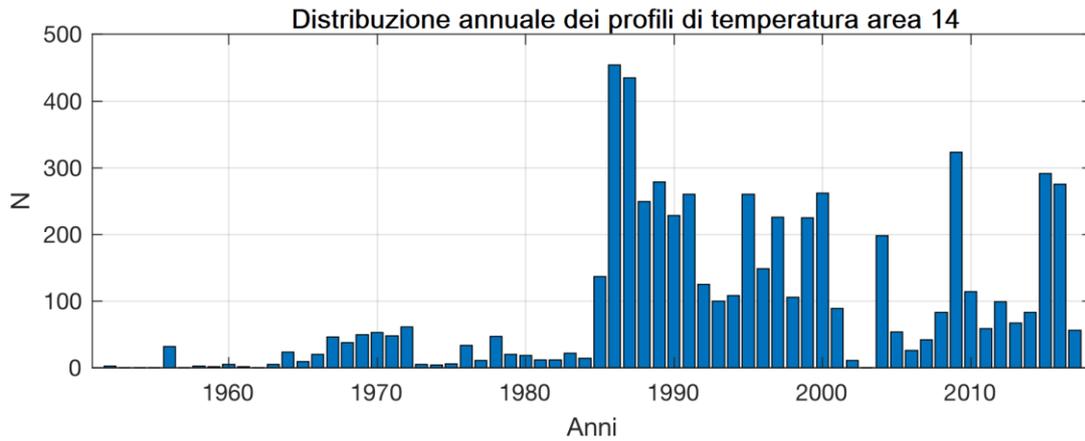


Figura 17 Distribuzione verticale dei dati per la regione 14 del Mar Mediterraneo.

Dai grafici in Figura 18 è possibile osservare la distribuzione annuale dei profili dei dati di temperatura (Figura 18a) e di salinità (Figura 18b). Per entrambi i parametri risultano scarse osservazioni prima della metà degli anni 80'.

(a)



(b)

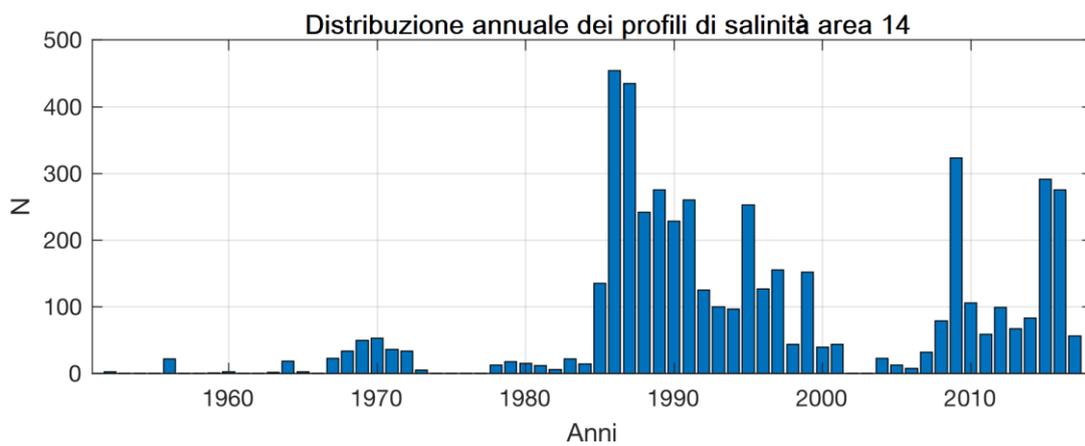


Figura 18 Distribuzione annuale dei profili dei dati nel periodo 1950-2017 per la regione 14 del Mar Mediterraneo:

a) Temperatura; b) Salinità.

3.2 Analisi dei parametri delle tre regioni

In questo paragrafo viene descritta l'analisi delle serie temporali e delle climatologie sui risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati di temperatura e salinità del set di dati storici SDN per le tre regioni del Mar Mediterraneo.

Per l'analisi sono stati considerati tre strati rappresentativi delle principali masse d'acqua del bacino: lo strato superficiale fino a 150 m, dominato dall'afflusso delle acque dell'Atlantico, lo strato intermedio tra 150-600 m dominato dall'acqua calda e salata levantina (LIW) formata nel Mediterraneo orientale e uno strato inferiore a 600 m dove si trovano acque fredde e dense (DW).

I grafici mostrati in questa sezione sono di due tipologie:

- **la climatologia dei dati di temperatura e salinità** (vedi Figura 19, Figura 20, Figura 21). Le medie climatologiche sono state calcolate per ogni strato per ciascun parametro (T, S) selezionando e mediando i dati appartenenti a ogni singolo mese e ad esse sono state calcolate le relative deviazioni standard (rappresentate dalle barre verticali).
- **la distribuzione annuale dei dati di temperatura e salinità** suddivisi per i tre strati e per ciascuna delle tre regioni. Ad ognuno di essi è inoltre associato un grafico che ne mostra le rispettive anomalie, calcolate sottraendo alla serie temporale la media climatologica.

La variabilità delle proprietà idrologiche che caratterizzano le masse d'acqua, ovvero temperatura e salinità, dipendono dai loro principali forzanti. I forzanti atmosferici determinano il flusso di calore e di momento (venti) all'interfaccia aria-mare e dunque influenzano la variabilità della temperatura, principalmente in superficie. Alle medie latitudini questo implica una spiccata stagionalità nell'andamento della temperatura.

Un chiaro esempio è rappresentato dai grafici che mostrano la climatologia mensile della temperatura nello strato superficiale (Figura 19a, c, e), nei quali è evidente il ciclo stagionale dove è infatti possibile individuare due picchi, uno massimo e uno minimo nei mesi estivi e invernali rispettivamente. Di tale influenza stagionale non ne risente invece la salinità e anche questo risulta dalla Figura 19 (b, d, f), poiché l'evaporazione, le precipitazioni e l'apporto fluviale sono i forzanti che la influenzano maggiormente. La variabilità della temperatura, rappresentata dalla deviazione standard (barre di errore verticale), aumenta in tutte e tre le regioni da giugno a novembre, mesi in cui si la colonna d'acqua è stratificata e si forma il termocline. Per la salinità la variabilità massima si ha:

- per la regione 3 in aprile-maggio e novembre (influenza dei fiumi);
- per la regione 10 in settembre;
- per la regione 14 da agosto a novembre.

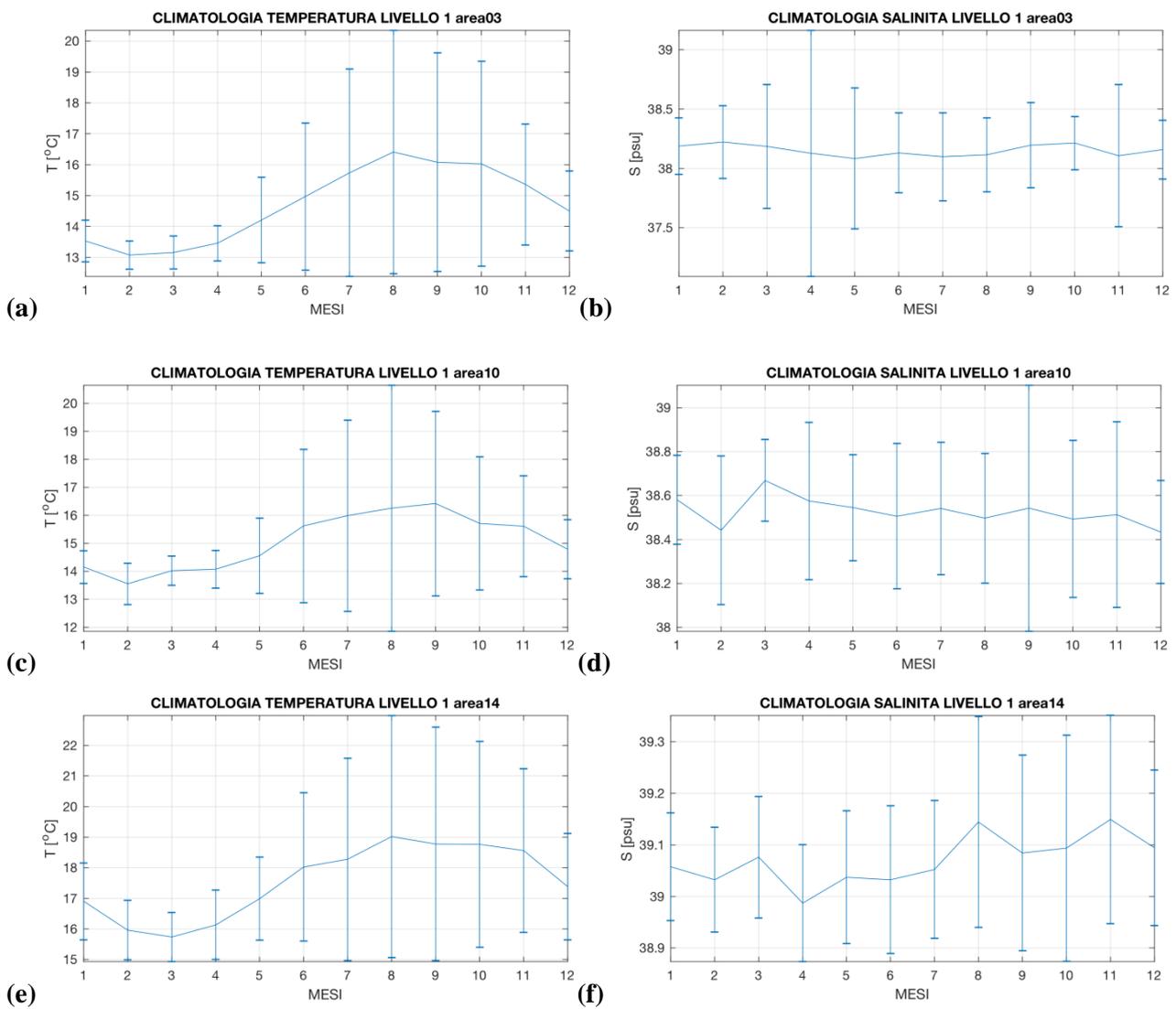


Figura 19 Climatologia dello strato superficiale (0-150 m) dei dati di temperatura (a, c, e) e salinità (b, d, f) per le regioni 3, 10 e 14 del Mar Mediterraneo.

Scendendo in profondità il segnale di stagionalità viene perso anche per la temperatura. Infatti come risulta in Figura 20, che rappresenta lo strato intermedio, il ciclo stagionale è appena visibile per la regione 3 (Figura 20a) e del tutto assente per le regioni 10 e 14 (Figura 20c, e).

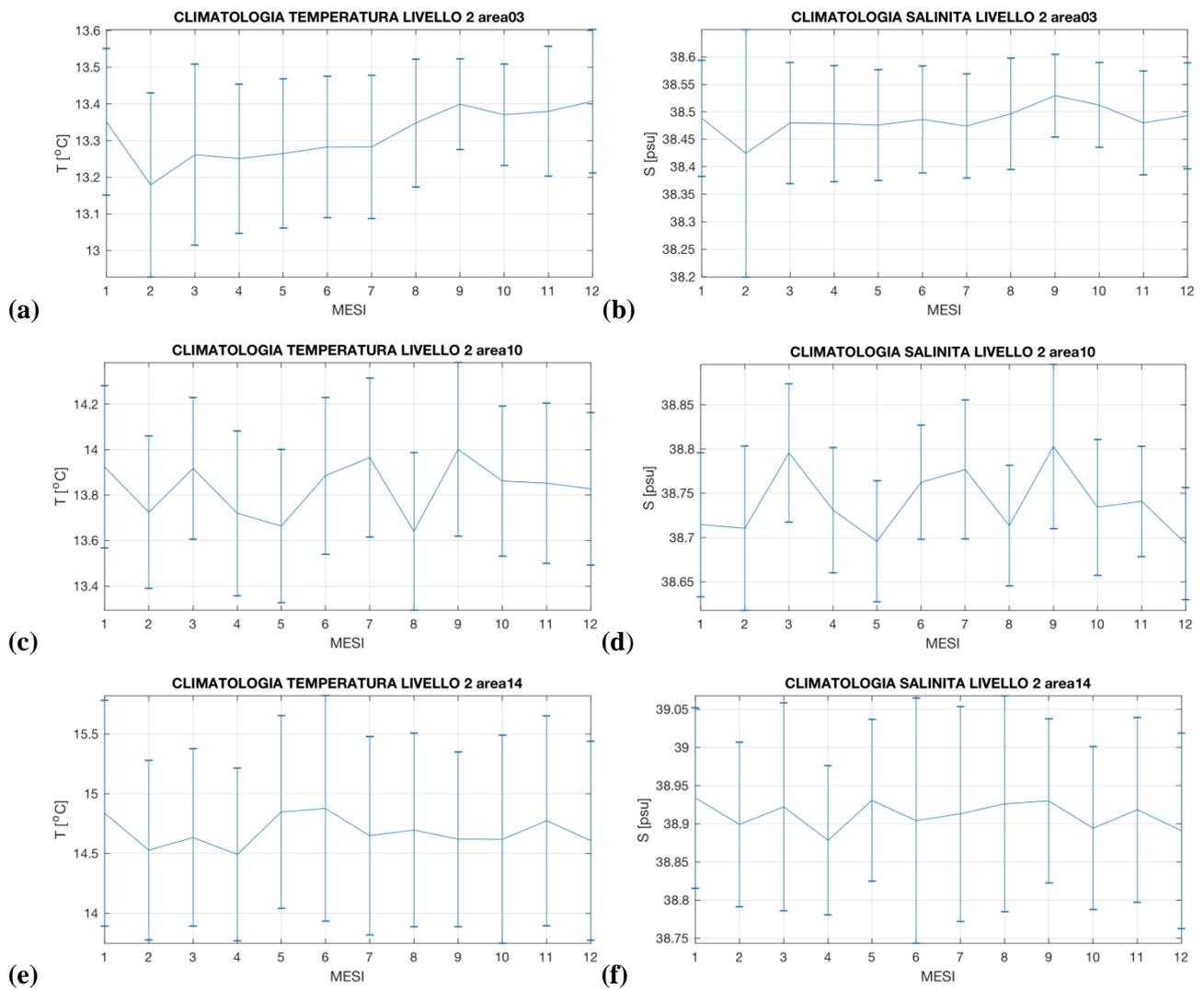


Figura 20 Climatologia dello strato intermedio (150-600 m) dei dati di temperatura (a, c, e) e salinità (b, d, f) per le regioni 3, 10 e 14 del Mar Mediterraneo.

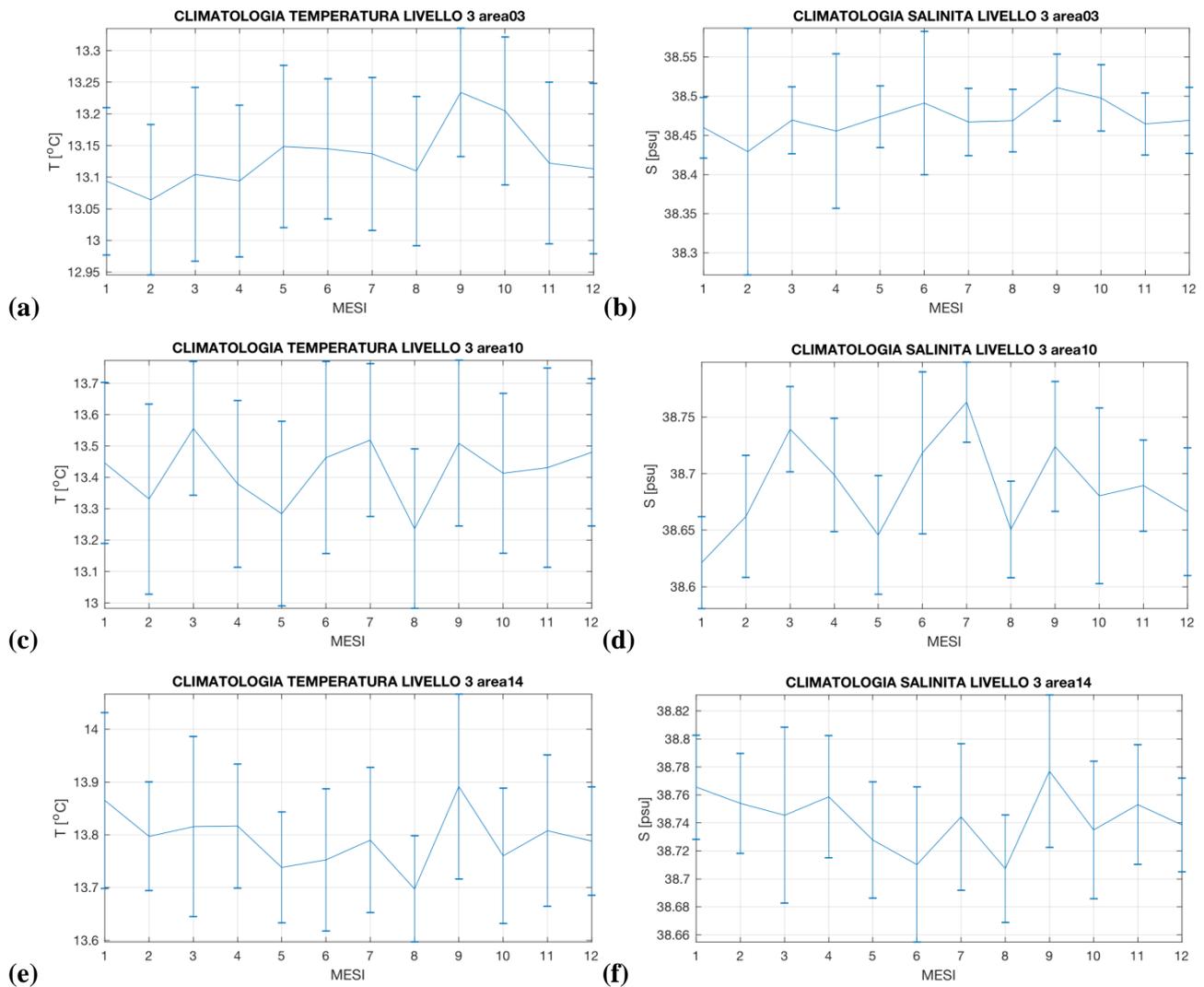


Figura 21 Climatologia dello strato profondo (600 m- fondo) dei dati di temperatura (a, c, e) e salinità (b, d, f) per le regioni 3, 10 e 14 del Mar Mediterraneo.

Un ulteriore esempio dell'influenza stagionale è rappresentato dai grafici che mostrano la distribuzione della temperatura nello strato superficiale (Figura 22a, c, e), nei quali è evidente il ciclo stagionale, che è dato dal cambiamento d'ampiezza dell'intervallo dei valori ogni anno. Ovviamente la stagionalità dipende anche dalla posizione geografica delle regioni, infatti risulta evidente come il ciclo stagionale sia ridotto spostandosi da nord a sud del bacino. Basti guardare per esempio la andamento nella regione 3 (Figura 22a), dove si passa dai 10 $^{\circ}\text{C}$ circa di minimo in inverno ai 28 $^{\circ}\text{C}$ circa in estate, rispetto alla regione 14 (Figura 22e) dove la temperatura varia tra i 14 e i 30 $^{\circ}\text{C}$ circa. In Figura 22 (pannelli b, d, f) sono raffigurate le anomalie standardizzate calcolate sottraendo la relativa climatologia stagionale a ciascun valore di temperatura e dividendolo per la relativa deviazione standard. Il numero indicato nell'asse delle ordinate è il numero di deviazioni standard di cui si discosta ciascun valore dalla propria media climatologica

mensile. Considerando uno strato superficiale abbastanza ampio tale valore oscilla tra ± 10 nella regione 3, tra -6 e +10 circa sia per la regione 10 che la 14.

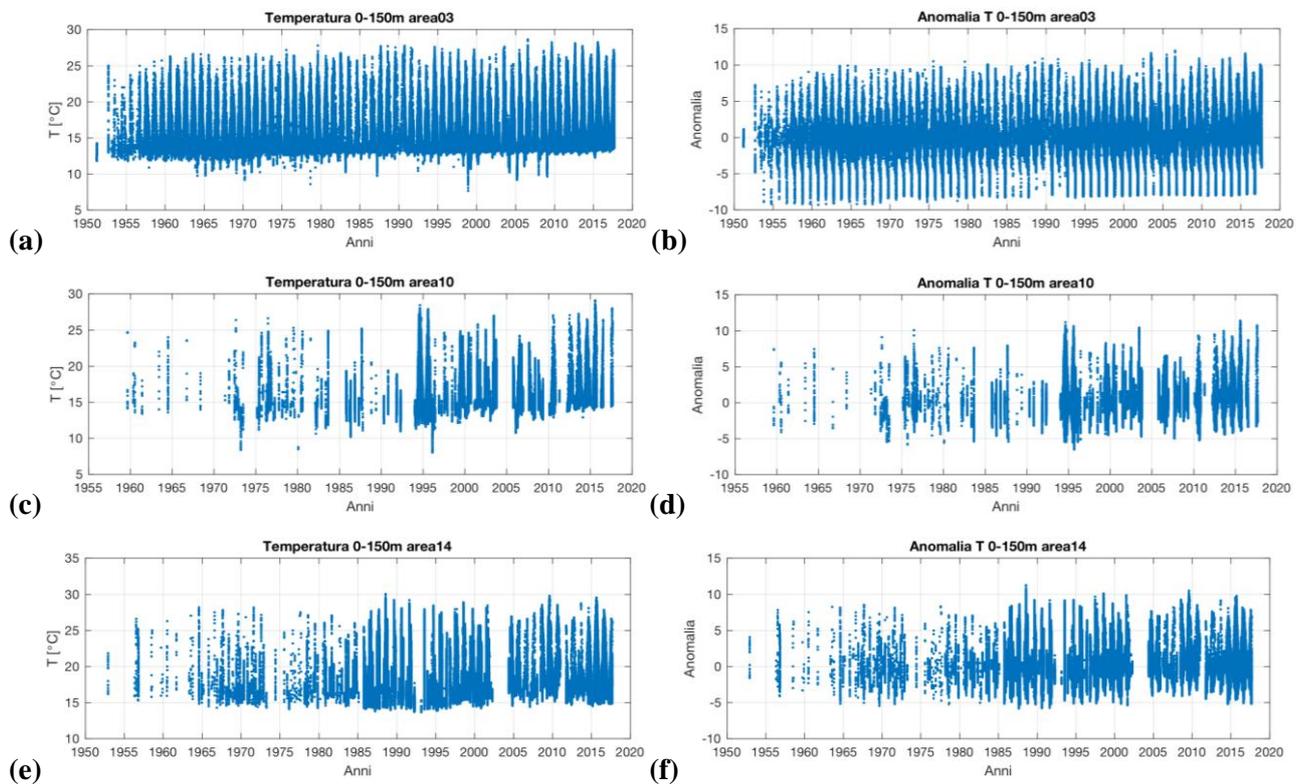


Figura 22 Distribuzione annuale dei dati di temperatura dello strato superficiale (0-150 m) con le rispettive anomalie per le regioni 3 (a, b), 10 (c, d) e 14 (e,f) del Mar Mediterraneo per il periodo 1950-2017,

I valori di salinità risultano più elevati nello strato superficiale (Figura 23a, c, e) rispetto che negli altri strati, infatti ha valori mediamente intorno ai 39/39,5psu Per la regione 10 (Figura 23c) sono evidenti molte lacune dovute probabilmente alla scarsa quantità di dati come già precedentemente mostrato in Figura 15. Nella regione 3 invece si osserva la presenza di parecchie osservazioni che sono state campionate sotto costa vicino alle bocche fluviali con valori di salinità prossimi allo zero, tra gli anni 1985-1990 e 1995-2000. Questa cosa deve essere tenuta in considerazione nelle fasi successive di indagine.

In (Figura 23b, d, f) sono raffigurate le anomalie standardizzate calcolate sottraendo la relativa climatologia stagionale a ciascun valore di salinità e dividendolo per la relativa deviazione standard. La Figura 23b mostra infatti come a valori di salinità prossimi allo zero corrispondano valori di anomalia standardizzata molto elevati in valore assoluto tra le -30, -40 deviazioni standard. L'ampiezza del valore di anomalia standardizzata è molto più ampia rispetto alla temperatura, oscilla infatti tra -38 e +2 nella regione 3, tra -8 e +2 nella regione 10 e tra -4 e +1 nella regione 14. Le anomalie sono caratterizzate da valori negativi molto più grandi rispetto a quelli positivi, proprio a causa della vicinanza dei campioni a bocche fluviali. Anche l'Adriatico meridionale (area 10)

mostra valori di salinità influenzati dall'apporto fluviale, mentre nel bacino Levantino (area 14) questo non emerge.

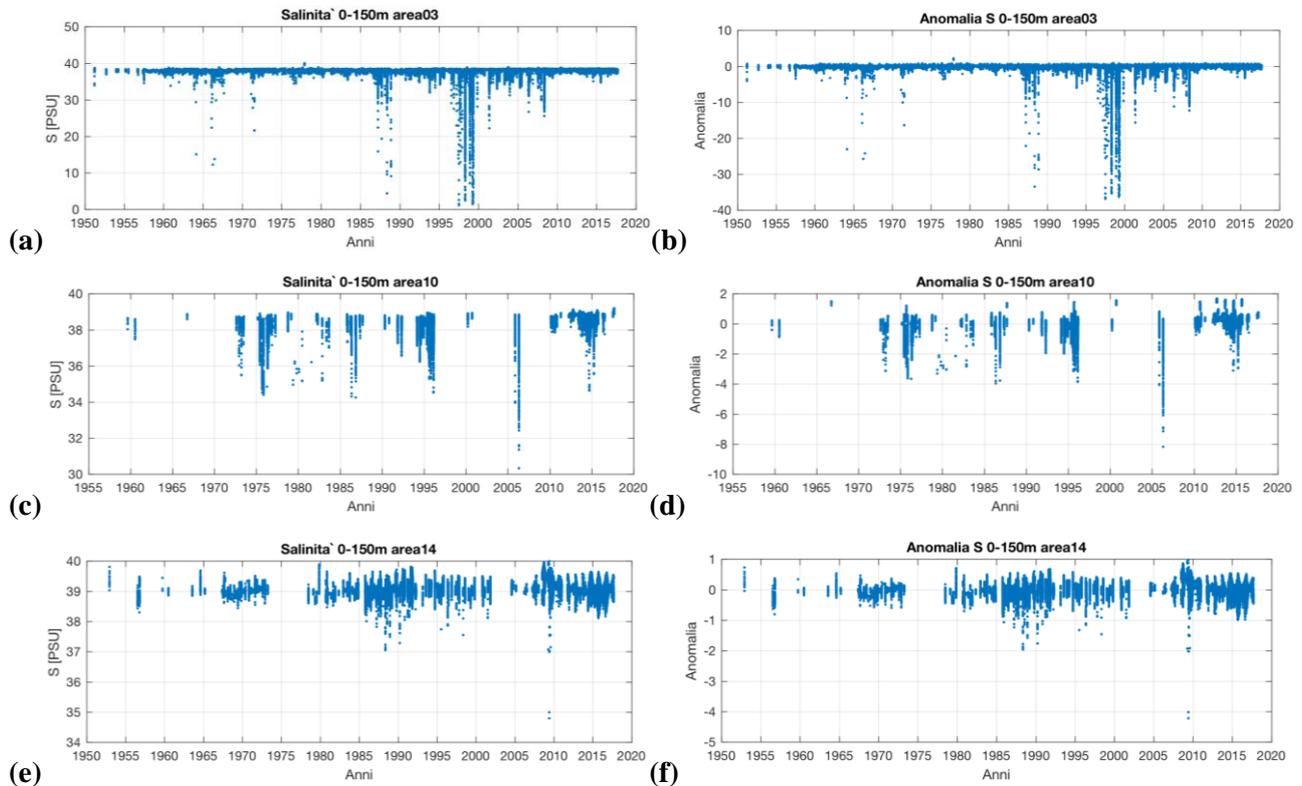


Figura 23 Distribuzione annuale dei dati di salinità dello strato superficiale (0-150 m) con le rispettive anomalie per le regioni 3 (a, b), 10 (c, d) e 14 (e,f) del Mar Mediterraneo per il periodo 1950-2017.

Lo strato intermedio (150-600 m) nel Mar Mediterraneo è caratterizzato dalla presenza della LIW, massa d'acqua che ha origine nel bacino Levantino, ma che si estende in tutto il bacino oltrepassando il Canale di Sicilia. Formatasi durante l'inverno, l'acqua levantina intermedia separa le acque profonde, più fredde ma meno salate, dalle acque superficiali. Verticalmente, lo strato di LIW si estende da 100 a 300 m nel Mar Levantino, approfondendo nel Mediterraneo occidentale fino a tra 300 e 700 m. L'acqua infatti si diffonde verso ovest passando tramite lo Stretto di Sicilia, riempiendo il bacino orientale e il Mar Tirreno e venendo progressivamente trasformata mescolandosi con l'acqua circostante lungo il suo percorso verso il bacino occidentale. Le climatologie globali assegnano a quest'acqua una salinità che va da 39,0 PSU, ad profondità di 200 m nel Levantino (vedi Figura 25e), a 38,5 PSU, ad una profondità di 500 m nel Mediterraneo occidentale (Figura 25a). Per quanto riguarda la temperatura essa va dai 15,58 °C nel Levantino fino ai 13,58 °C nel Mediterraneo occidentale (Figura 24e, a). Per la regione 10 anche nello strato intermedio si rileva una forte discontinuità nella disponibilità di osservazioni sia per quanto riguarda la temperatura (Figura 24c) sia per i valori di salinità (Figura 25c).

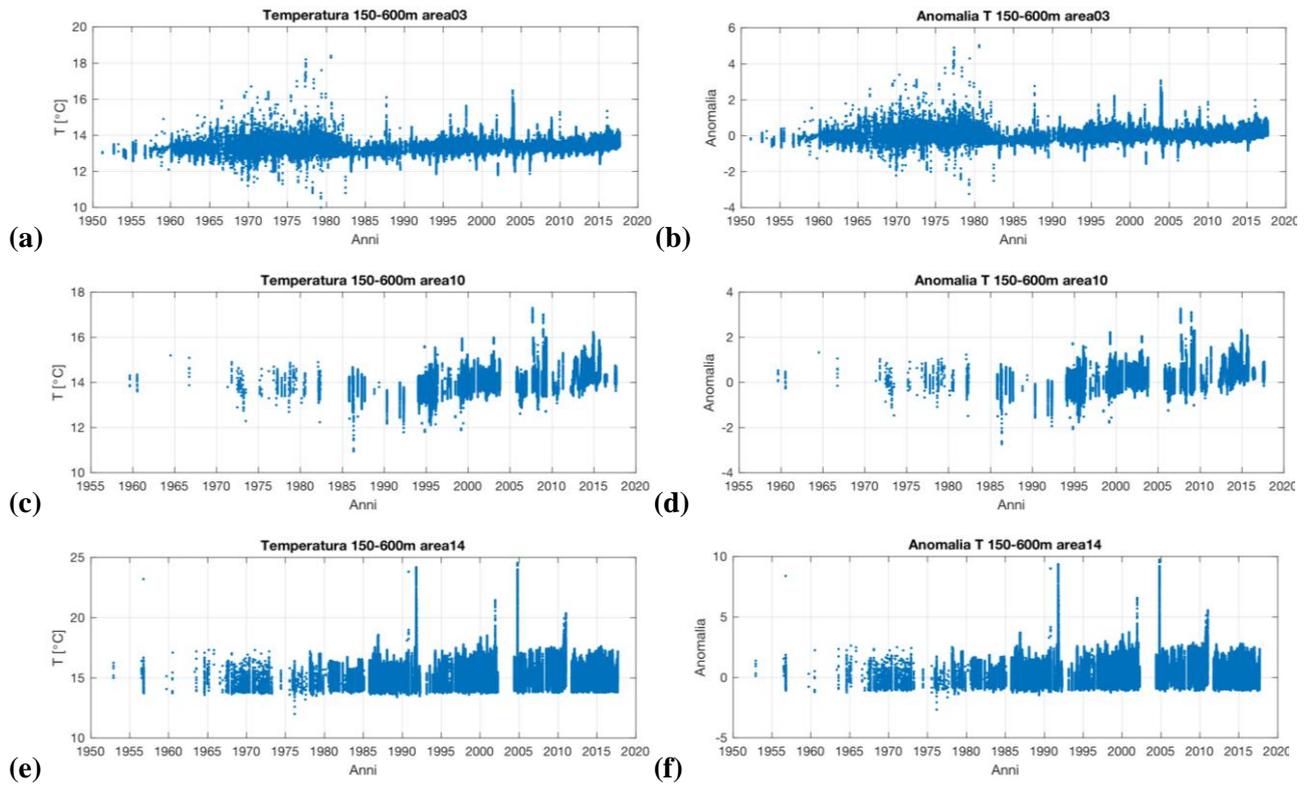


Figura 24 Distribuzione annuale dei dati di temperatura dello strato intermedio (150-600 m) con le rispettive anomalie per le regioni 3 (a, b), 10 (c, d) e 14 (e,f) del Mar Mediterraneo per il periodo 1950-2017.

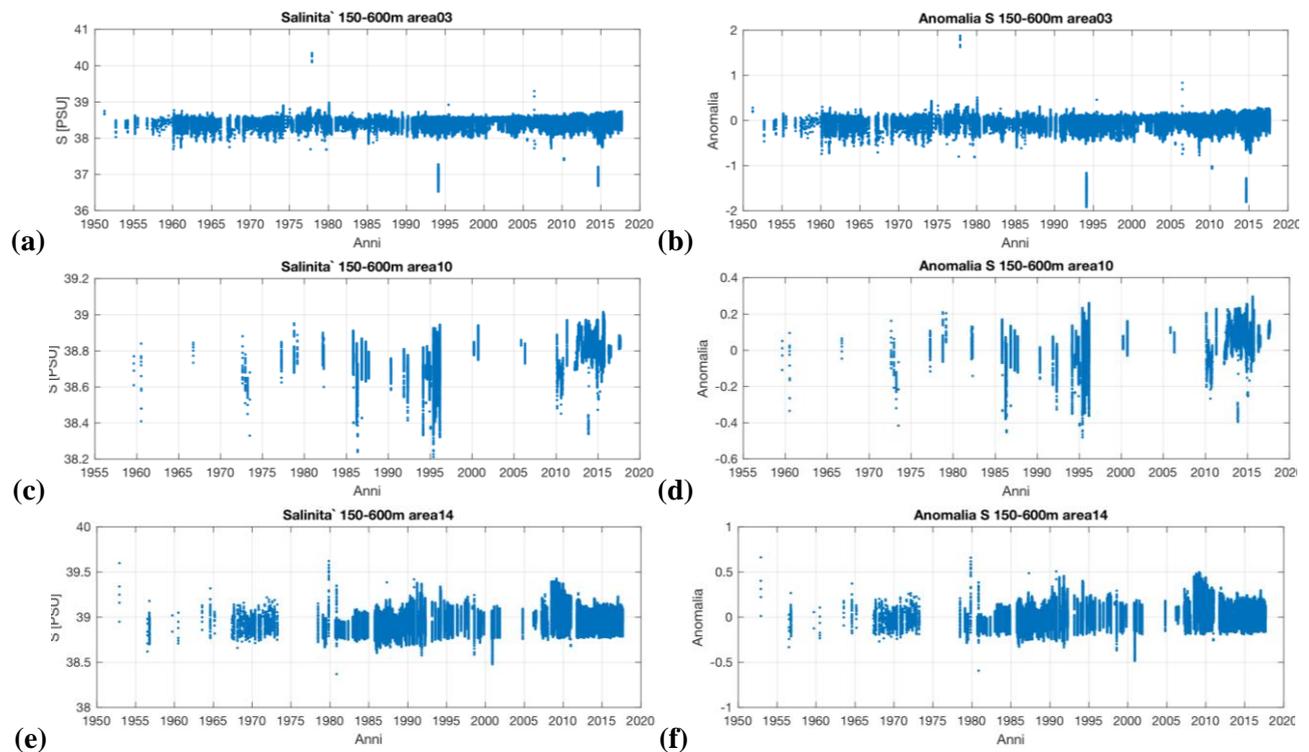


Figura 25 Distribuzione annuale dei dati di salinità dello strato intermedio (150-600 m) con le rispettive anomalie per le regioni 3 (a, b), 10 (c, d) e 14 (e,f) del Mar Mediterraneo per il periodo 1950-2017.

Un importante evento climatologico ha interessato gli strati intermedi e profondi del bacino est alla fine degli anni '80 (Figura 25e, Figura 26e): la fonte di acque profonde che guidava la cella termoalina del Mediterraneo orientale, originariamente situata nel Mare Adriatico, si spostò sul Mar Egeo. La formazione di acque profonde nell'Egeo meridionale diede luogo al famoso Eastern Mediterranean Transient (Roether et al., 1996). L'EMT, che ha modificato le caratteristiche di deflusso attraverso lo Stretto di Sicilia, ha portato a cambiamenti significativi anche nel Mar Mediterraneo occidentale dai primi anni '90. Questo evento è visibile in Figura 22b.

Dai grafici rappresentanti la temperatura nello strato profondo (Figura 26a, c, e) essa risulta meno variabile rispetto allo strato superficiale. Si aggira intorno ai 13/13,5°C nella regione 3, e ai 13/14,5°C circa nelle regioni 10 e 14. La regione 14 risulta quella più variabile, soprattutto nel periodo fine anno 80' inizio anni 90'.

Considerando uno strato profondo molto ampio, dai grafici delle anomalie standardizzate (Figura 26b, d, f) risulta che ciascun valore oscilla tra -2 e +1 nella regione 3, tra -1 e +2 circa sia per la regione 10 che la 14.

Anche la salinità risulta meno variabile in quanto l'ampiezza delle anomalie in Figura 27 (pannelli b, d, e) è molto ristretta. Infatti nella regione 3 oscilla tra $\pm 0,5$, mentre nelle regioni 10 e 14 tra $\pm 0,2$ circa. Come per gli strati precedenti, le osservazioni di salinità sono notevolmente scarse (Figura 27c) e risultano più che altro a partire dal 2010.

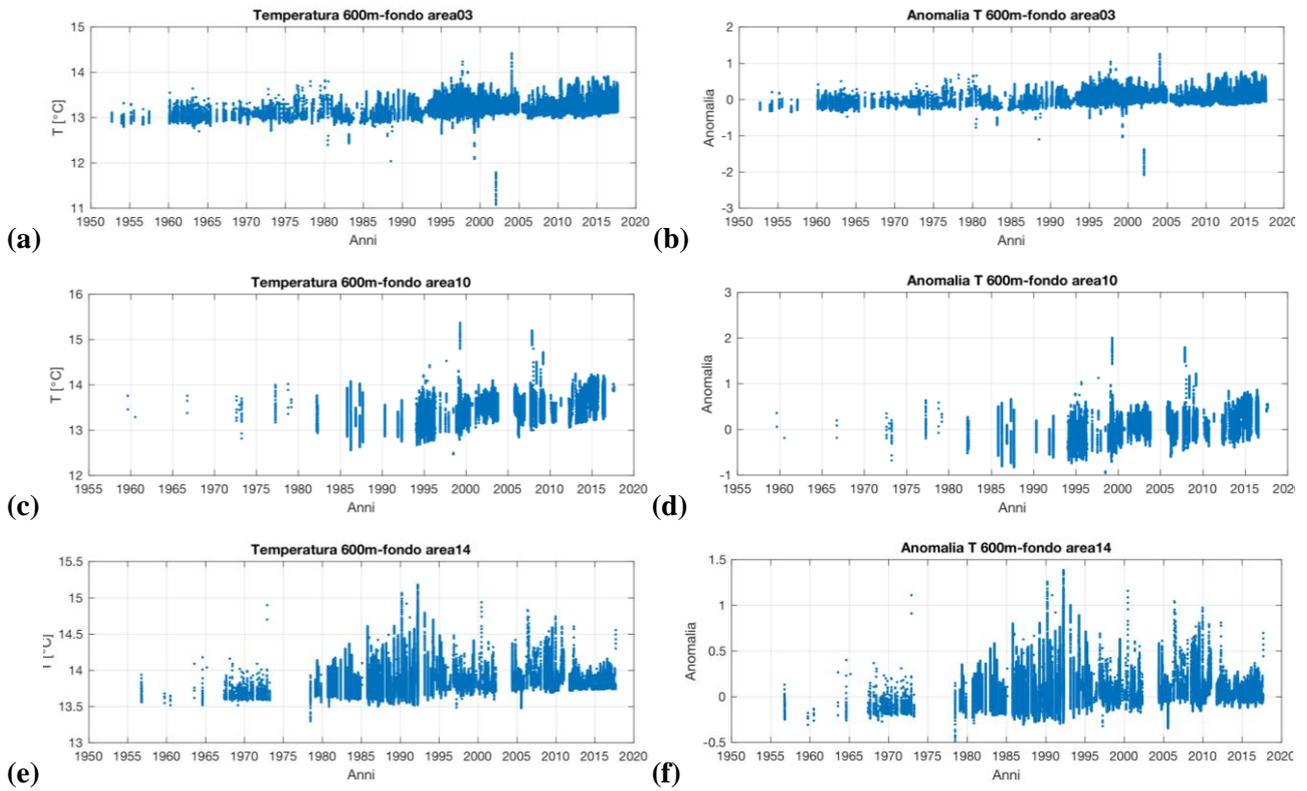


Figura 26 Distribuzione annuale dei dati di temperatura dello strato profondo (600 m-fondo) con le rispettive anomalie per le regioni 3 (a, b), 10 (c, d) e 14 (e, f) del Mar Mediterraneo per il periodo 1950-2017.

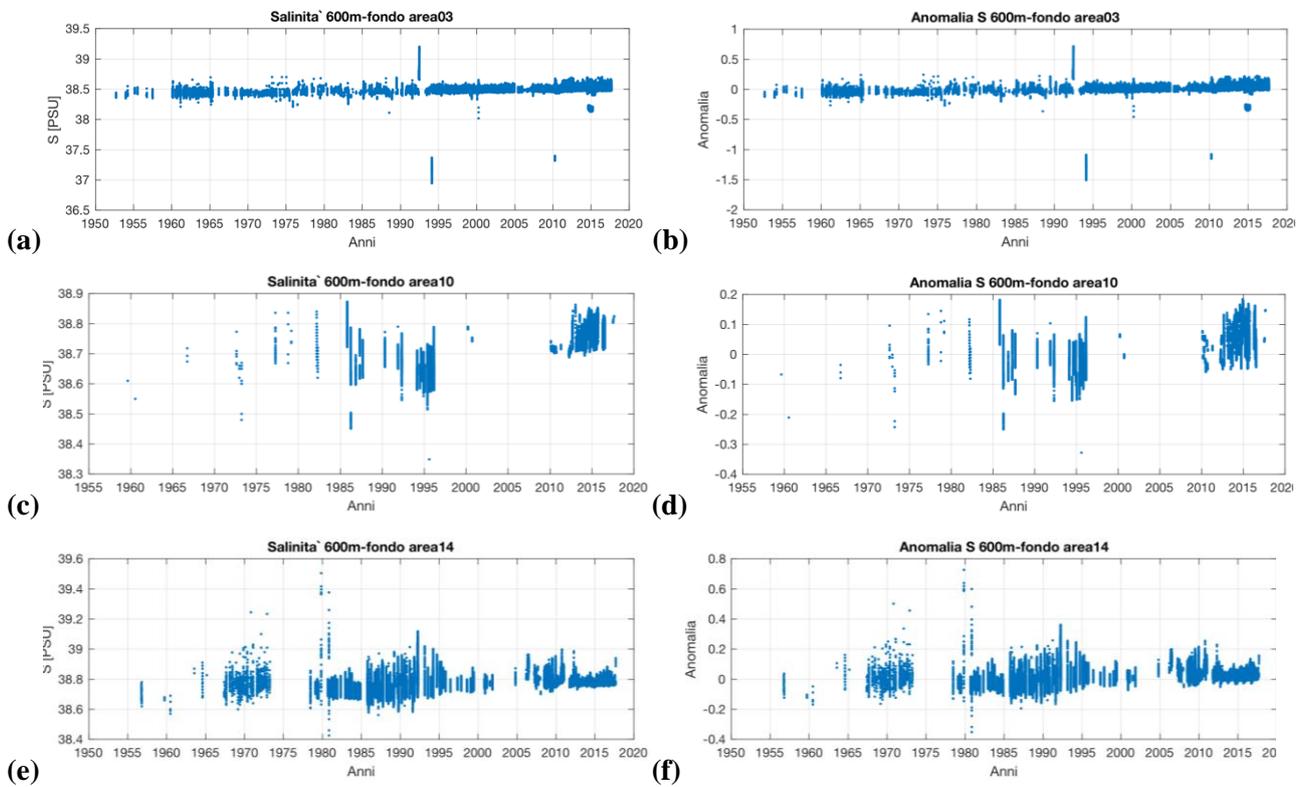


Figura 27 Distribuzione annuale dei dati di salinità dello strato profondo (600 m-fondo) con le rispettive anomalie per le regioni 3 (a, b), 10 (c, d) e 14 (e, f) del Mar Mediterraneo per il periodo 1950-2017.

3.3 Analisi delle serie annuali e delle tendenze

Dai dati di temperatura e salinità per ciascun anno mostrati nei grafici precedenti, sono state elaborate le medie annuali, analizzate per ciascun strato e per ciascuna regione proprio come nel procedimento precedente. Le medie sono state calcolate solo negli anni per i quali abbiamo a disposizione un minimo di trenta osservazioni, in modo che i valori delle medie ottenuti siano maggiormente rappresentativi. Per ciascuna media è stata inoltre calcolata la sua rispettiva deviazione standard, come misura della variabilità dei dati, ed è stato calcolato un trend lineare (rappresentato nei grafici dalla linea rossa).

3.3.1 Regione 3

Data la grande quantità di dati a disposizione per questa regione, per entrambi i parametri abbiamo un andamento delle medie per tutti gli anni con qualche lacuna solo per lo strato più profondo (vedi Figura 28).

Dalla Figura 28 si può osservare che nei primi due strati la temperatura si mantiene pressoché costante, tra i 14 e i 16°C. Nei primi 150 metri si nota un forte aumento nel 2009. Questo si ipotizza essere determinato dalla presenza di numerosi dati alla superficie provenienti da navi di opportunità e campionati a fine estate (si veda Figura 6) che, come descritto in precedenza, hanno influenzato la media annuale e la sua deviazione standard, che appare molto più ampia rispetto a quella associata ad altre medie annuali. Si deduce come sia importante l'attenta osservazione del numero di dati campionati, della loro distribuzione spaziale, sia orizzontale che verticale, della loro distribuzione temporale, per spiegare l'evoluzione delle medie temporali. Si osserva la presenza dello stesso segnale anche nella temperatura annuale dello strato intermedio, per cui ci si riserva di verificare attentamente tali valori. Queste deduzioni vanno poi tenute in considerazione nell'analisi della tendenza annuale calcolata ed eventualmente nella ipotesi di rianalizzare in maniera ancor più scrupolosa le serie temporali di dati andando ad applicare tecniche di controllo di qualità' di dati più rigorose o implementando per esempio l'interpolazione dei dati su livelli verticali standard che permettano il calcolo di medie di volume. Mentre negli strati superficiale ed intermedio la temperatura media annuale sembra diminuire, nello strato più profondo la tendenza sembra completamente opposta.

Per quanto riguarda la salinità rappresentata in Figura 28 (pannello di destra) si notano valori annuali a cui sono associate grandi valori di deviazioni standard: 1967, 1998 e 1999 nello strato superficiale ed intermedio; 1994 e 2010 per lo strato profondo. Anche in questo caso occorre andare a valutarne attentamente le motivazioni.

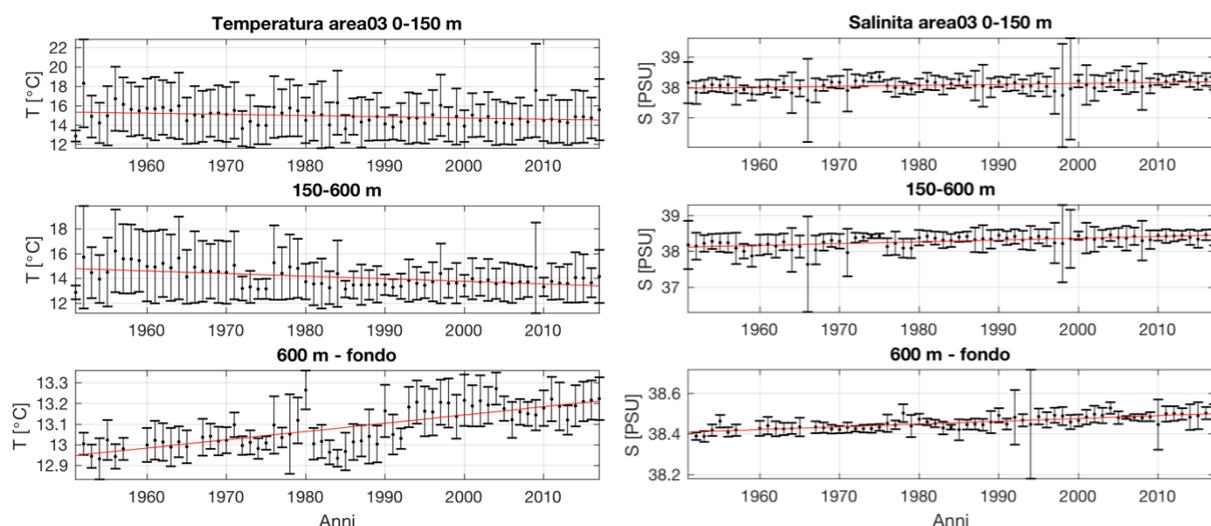


Figura 28 Medie annuali di temperatura (sinistra) e salinità (destra) calcolate per la regione 3 per ogni strato: superficiale (0-150 m), intermedio (150-600 m) e fino al fondo (600 m-fondo). Ad ogni media è associata la relativa deviazione standard, rappresentata dalla barra. La linea rossa rappresenta il trend lineare calcolato.

I valori dei tendenze annuali (trend) sono elencati in Tabella 6, suddivisi secondo i tre strati considerati, corrispondono alla pendenza delle linee rosse in Figura 28. La tendenza annua per il periodo che va dal 1950 al 2017 appare:

- per la temperatura negativo nello strato superficiale ($-0,012 \text{ C}^\circ/\text{anno}$) ed intermedio ($-0,021 \text{ C}^\circ/\text{anno}$), con una riduzione media annua maggiore nello strato intermedio;
- per la salinità la tendenza media annua è positiva, con una crescita media annuale massima nello strato intermedio e minima in quello profondo.

REGIONE 3	Temperatura [$\text{C}^\circ/\text{anno}$]	Salinità [PSU/anno]
Strato superficiale	-0,012	0,003
Strato intermedio	-0,021	0,005
Strato profondo	0,004	0,001

Tabella 6 Valori dei trend annuali per temperatura e salinità in ognuno dei tre strati per la regione 3.

3.3.2 Regione 10

Dai risultati ottenuti dal calcolo delle medie annuali di temperatura e di calcolo dei trend, rappresentati dalla Figura 29 (pannello di sinistra), è possibile osservare che, come già risultante dalla Figura 15a, le osservazioni risultano più omogenee e coerenti a partire dagli anni 90' poiché da tale periodo in poi sono presenti meno lacune e le barre delle deviazioni standard risultano più ridotte. Negli strati superficiale e intermedio per l'area meridionale dell'Adriatico la temperatura sembra leggermente diminuire di $-0.020^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ e $0.039^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ rispettivamente, mentre nello strato più profondo si nota un aumento $0.013^{\circ}\text{C}/\text{anno}$ (Tabella 7).

Per quanto riguarda la salinità (Figura 29 pannello a destra) si osserva un aumento medio in tutti e tre gli strati, tuttavia, data la scarsa quantità di dati a disposizione, in particolare per lo strato profondo, non è sicuro considerare i risultati di questi trend affidabili.

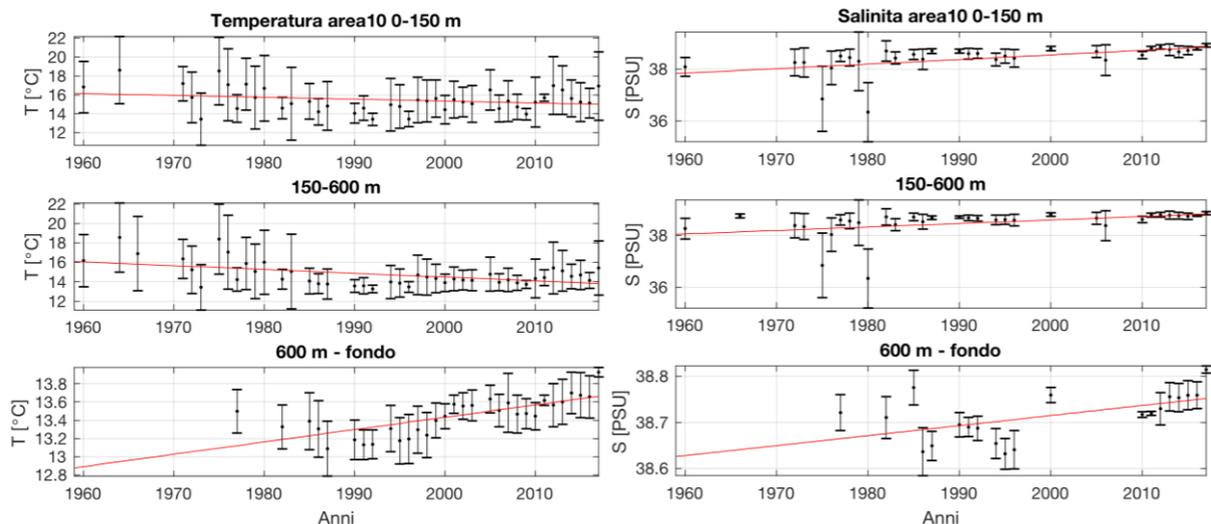


Figura 29 Medie annuali di temperatura (sinistra) e salinità (destra) calcolate per la regione 10 per ogni strato: superficiale (0-150 m), intermedio (150-600 m) e fino al fondo (600 m-fondo). Ad ogni media è associata la relativa deviazione standard, rappresentata dalla barra verticale. La linea rossa rappresenta il trend lineare calcolato.

In Tabella 7 sono espressi i valori dei trend annuali per i due parametri suddivisi per strato. La scarsità di dati non ci consente di affermare che, per la salinità, i valori siano corretti.

REGIONE 10	Temperatura [$^{\circ}\text{C}/\text{anno}$]	Salinità [PSU/anno]
Strato superficiale	-0,020	0,018
Strato intermedio	-0,039	0,013
Strato profondo	0,014	0,002

Tabella 7 Valori dei trend annuali per temperatura e salinità in ognuno dei tre strati per la regione 10.

3.3.3 Regione 14

In questa regione del Mediterraneo, come è stato possibile osservare dalla Figura 16 precedentemente mostrata, prima degli anni 80' la scarsa quantità di dati a disposizione ha portato a delle lacune nella serie temporale rappresentanti le medie dei dati di temperatura e salinità in Figura 30.

Per la temperatura (pannello di sinistra) nello strato profondo vi sono molte lacune prima degli anni 80', mentre nello strato superficiale e intermedio risultano prima della seconda metà degli anni 60' ma le barre di deviazione standard sono comunque ampie.

Grazie a Brankart et Pinardi (2001) sappiamo che un improvviso raffreddamento della LIW si è verificato negli inverni del 1981 e del 1983, come si osserva nello strato intermedio in Figura 30.

Per la salinità (pannello di destra) prima del '78 sono presenti molte lacune, infatti le medie calcolate sono veramente scarse prima di tale periodo e le barre delle deviazioni standard risultano ampie, ma successivamente le osservazioni risultano maggiori, fatta eccezione per una lacuna per il periodo 2002-2003 che si nota sia nello strato superficiale che nello strato intermedio.

Invece negli ultimi anni nello strato profondo le barre risultano molto ristrette e ciò porta a pensare che tali dati siano sufficientemente affidabili.

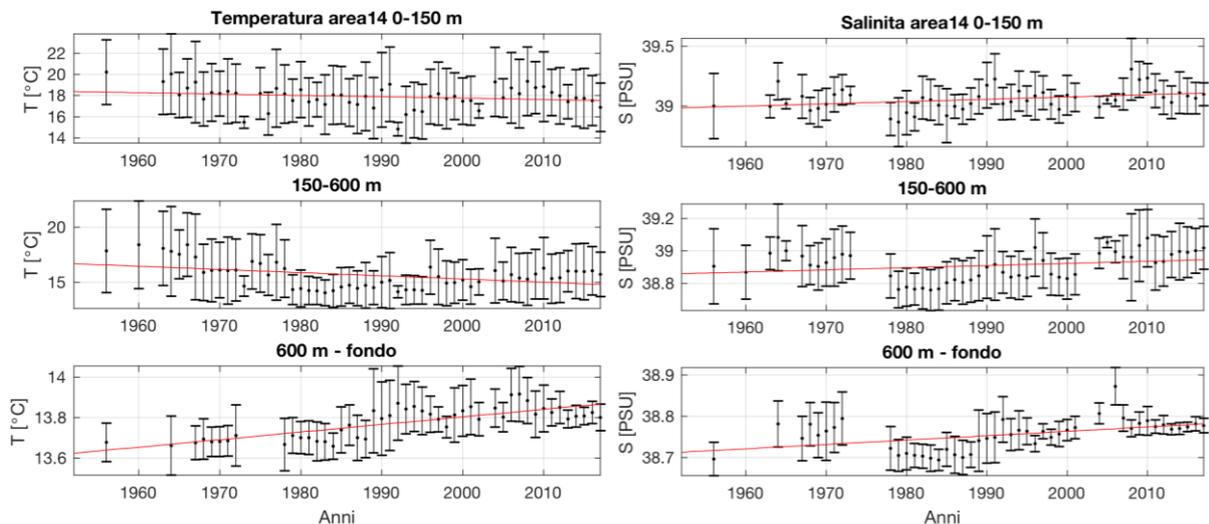


Figura 30 Medie annuali di temperatura (sinistra) e salinità (destra) calcolate per la regione 14 per ogni strato: superficiale (0-150 m), intermedio (150-600 m) e fino al fondo (600 m-fondo). Ad ogni media è associata la relativa deviazione standard, rappresentata dalla barra verticale. La linea rossa rappresenta il trend lineare calcolato.

I valori dei trend annuali, rappresentati in Figura 30 dalla retta rossa, sono elencati in Tabella 8. Da essa risulta che nello strato superficiale ed intermedio la temperatura sia diminuita di -0,013 e -0,024 °C /anno rispettivamente, mentre nello strato superficiale sembra essersi lievemente alzata di 0,004 °C/anno. Per la salinità invece si osserva un aumento in tutti e tre gli strati.

REGIONE 14	Temperatura [C°/anno]	Salinità [PSU/anno]
Strato superficiale	-0,0129	0,0019
Strato intermedio	-0,0241	0,0013
Strato profondo	0,0039	0,0010

Tabella 8 Valori dei trend annuali per temperatura e salinità in ognuno dei tre strati per la regione 14.

Dai risultati ottenuti si evince quindi che per tutte e tre le regioni i valori di salinità risultano aumentati dagli anni 50' ad oggi mentre per i valori di temperatura questo vale solo per lo strato profondo. Per le regioni 10 e 14 le osservazioni sono molto scarse prima degli anni 80' perciò prima di tale periodo nei grafici rappresentanti le medie annuali (Figura 29 e Figura 30) sono presenti molte lacune.

3.4 Distribuzioni di frequenza dei dati T e S

Le tecniche più avanzate ed automatiche di controllo qualità dei dati si basano sull'analisi statistica ed assumono che i dati abbiano una distribuzione di frequenza di tipo gaussiano. Nella teoria della probabilità la distribuzione normale, o gaussiana, è una distribuzione di probabilità continua che è spesso usata come prima approssimazione per descrivere variabili casuali a valori reali che tendono a concentrarsi attorno a un singolo valor medio. Tale distribuzione è simmetrica rispetto a $x = \mu$, cioè rispetto al valor medio della distribuzione, ed ha una tipica forma a campana (Figura 31). Lo scarto quadratico medio σ è uguale alla distanza dei punti di flesso da μ , ossia i punti di flesso hanno ascissa rispettivamente $\mu - \sigma$ e $\mu + \sigma$. La distribuzione normale è completamente individuata dai parametri μ e σ , ossia in corrispondenza di ogni valore di μ e σ la curva si sposta lungo l'asse x o viene più o meno appiattita.

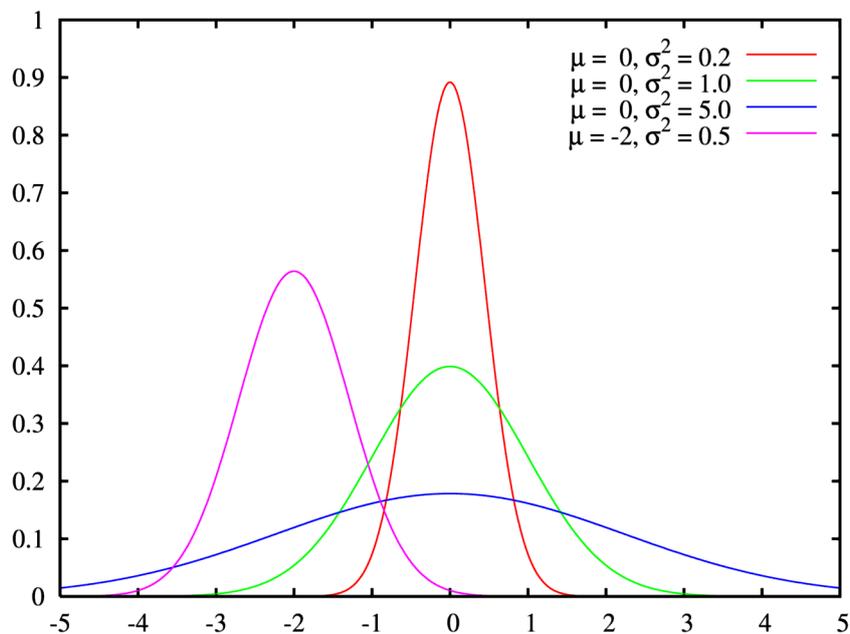


Figura 31 Esempio di distribuzione gaussiana.

Precedentemente si è parlato di come la distribuzione gaussiana sia quella più utilizzata nel calcolo statistico e di come anche lo stesso procedimento di controllo di qualità di tipo statistico si basi su di essa. Questa sezione si focalizzerà sui grafici delle distribuzioni di frequenza delle anomalie standardizzate dei dati di temperatura e salinità, calcolate per i tre strati prima descritti e per ciascuna regione (vedi Figura 32, Figura 33, Figura 34). Tali distribuzioni, se conformi a normale standardizzata teorica, dovrebbero assomigliare alla curva verde in Figura 31.

Nel nostro caso le anomalie sono state standardizzate, cioè divise per la corrispondenti deviazioni standard

Nei grafici il numero indicato nell'asse delle ascisse è il numero di deviazioni standard che indica la distanza di ciascun dato dalla media in termini di numero di deviazioni standard, ma anche con quanta probabilità il valore di un dato è probabile. Infatti più ci si allontana dal valor medio della distribuzione (0), meno i dati sono probabili. Dai grafici si osserva che l'andamento non è sempre quello tipicamente gaussiano in quanto non è evidente la tipica forma a campana.

Dal grafico rappresentante le distribuzione di frequenza delle anomalie dello strato superficiale (Figura 32) infatti si può vedere come solo la "f" sia di tipo gaussiano. Le altre sembrano assumere la forma di curve bimodali (Figura 32c, e) mentre le restanti parrebbero assomigliare a distribuzioni di tipo gamma o weibull (Figura 32a, b, d).

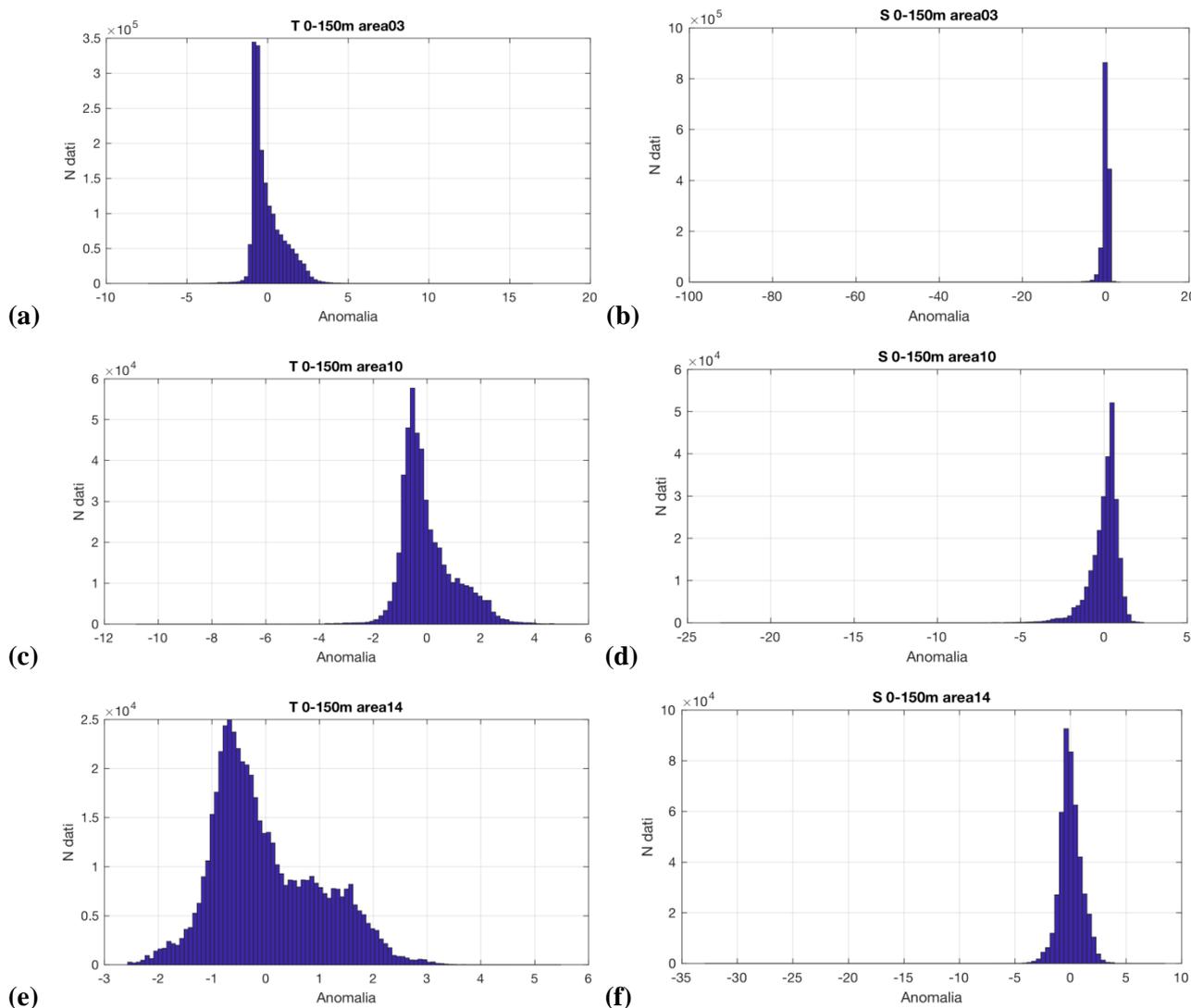


Figura 32 Distribuzione di frequenza delle anomalie standardizzate dei dati di temperatura (a, c, e) e salinità (b, d, f) dello strato superficiale (0-150 m) per le regioni 3, 10, 14 del Mar Mediterraneo.

Anche per le distribuzioni di frequenza degli strati intermedio (Figura 33) e profondo (Figura 34) poche sono le distribuzioni che seguono il tipico andamento gaussiano.

Analisi future potrebbero quindi studiare la reale distribuzione di tali dati prendendo in considerazione altre tipologie di distribuzioni di frequenza, per esempio la distribuzione gamma o la weibull. Da queste distribuzioni però si evince anche che molti valori anomali sono ancora presenti nel set di dati, per cui prima di analizzate il “fit” con varie distribuzioni teoriche è raccomandabile sottoporre i dati a procedure di controllo dei dati più scrupolose ed automatizzate e rielaborare tutte le statistiche fin qui presentate.

Infatti molti in grafici ci sono dati che si discostano dal valore medio della distribuzione persino di un valore di deviazione standard pari a $\sigma + 20$ (Figura 34f) o addirittura a $\sigma - 100$ (Figura 32b). Questi valori potrebbero corrispondere a valori errati o collegati ad eventi estremi che l’analisi visiva dei dati non è riuscita a eliminare.

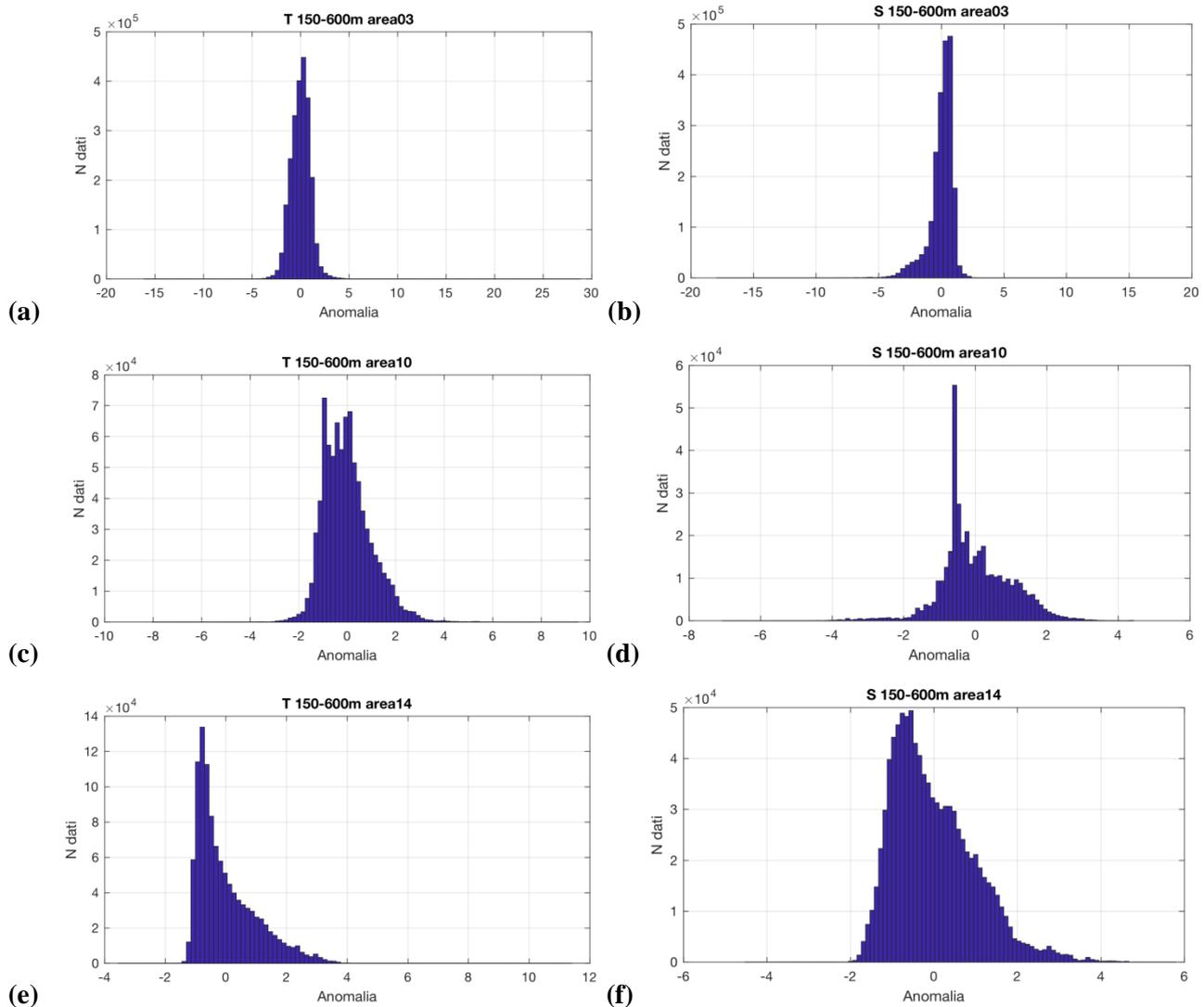


Figura 33 Distribuzione di frequenza delle anomalie standardizzate dei dati di temperatura (a, c, e) e salinità (b, d, f) dello strato intermedio (150-600 m) per le regioni 3, 10, 14 del Mar Mediterraneo.

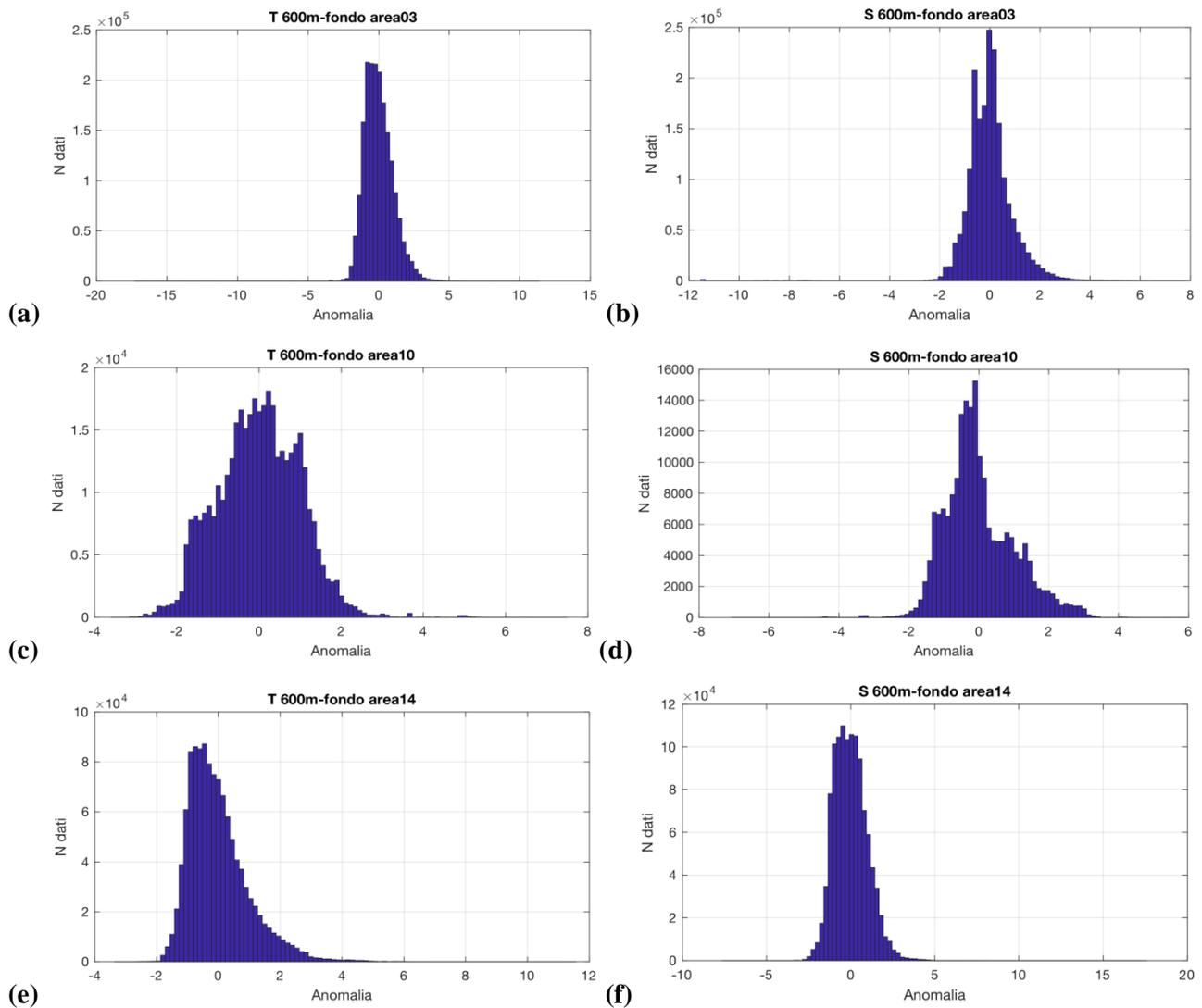


Figura 34 Distribuzione di frequenza delle anomalie standardizzate dei dati di temperatura (a, c, e) e salinità (b, d, f) dello strato profondo (600 m - fondo) per le regioni 3, 10, 14 del Mar Mediterraneo.

Grazie a questa analisi statistica dei dati è stato possibile perciò osservare che, nonostante i dati siano stati sottoposti a un Quality Control (QC) principalmente visivo, sono comunque presenti errori o dati che potrebbero corrispondere ad eventi estremi.

Questo dimostra che l'analisi empirica non è sufficiente ad eliminare tutti gli errori presenti in un set di dati così vasto (250000 profili verticali circa) ed è quindi necessario sottoporli successivamente anche ad una analisi statistica automatica. Una volta individuati gli errori tramite l'approccio statistico bisogna quindi tornare all'inizio dell'analisi svolta in questo elaborato e individuare nel set di dati quei dati altamente improbabili ed escluderli dal calcolo delle medie climatologiche e annuali, delle tendenze medie e dalle distribuzioni di frequenza.

L'iterazione di questi due procedimenti produrrà quindi collezioni di dati più affidabili e corretti e statistiche più robuste ed accurate.

Capitolo 4

Conclusioni

In questa tesi è stata descritta l'**analisi delle serie temporali** di specifiche regioni del Mar Mediterraneo per il periodo 1950-2017. Tale analisi è stata eseguita sui dati di temperatura e salinità provenienti dalle collezioni storiche di dati rese disponibili dal **progetto SeaDataCloud** mediante la **banca dati SeaDataNet**, un'infrastruttura standardizzata per la gestione di grandi set di dati che collega i **centri dati marini nazionali** di 35 paesi.

Nell'introduzione sono state descritte le principali dinamiche della circolazione del Mediterraneo ed alcuni eventi importanti avvenuti nel bacino, come la formazione di masse di acque intermedie e profonde, il fenomeno del Northern Ionian Reversal e dell'Eastern Mediterranean Transient. Tali conoscenze sono fondamentali per la corretta interpretazione dei risultati ottenuti.

Prima di sviluppare i grafici delle serie temporali è inoltre stato descritta la strategia di controllo qualità dei dati sviluppata da SDN, mostrando l'importanza di possedere un set di dati validato e dunque affidabile. Mediante la comparazione di due differenti set di dati, uno validato e l'altro no, si deduce infatti che l'analisi di qualità sia fondamentale nello studio di serie storiche di lungo periodo, in cui è necessario tenere in considerazione il massimo numero di dati a disposizione e a cui deve essere associata la massima garanzia di qualità.

Successivamente all'analisi sulla distribuzione spazio-temporale dell'osservazioni di temperatura e salinità dell'intero bacino, l'attenzione è stata focalizzata su tre specifiche regioni del Mediterraneo: l'area del Golfo del Leone, l'Adriatico meridionale e il bacino Levantino settentrionale. Di queste regioni in primo luogo sono state descritte con maggior dettaglio la distribuzione orizzontale e verticale dei dati e la distribuzione temporale dei profili delle misure di temperatura e salinità. Questa fase è indispensabile per la definizione della strategia d'indagine successiva. In secondo luogo sono state calcolate le climatologie e valutate le serie temporali dei dati dei due parametri suddivisi per strati principali: uno strato superficiale (0-150 m), uno intermedio (150-600 m) e uno al di sotto dei 600 m. Da essi risulta chiaro come la stagionalità sia evidente negli strati superficiali per quanto riguarda la temperatura mentre per la salinità questo non valga. Ciò dipende dal fatto che la variabilità delle di queste due proprietà idrologiche dipendono da forzanti differenti.

La regione 3, che considera l'area del Golfo del Leone, dove avviene la formazione di acque profonde del bacino ovest è la regione di cui abbiamo a disposizione un numero molto elevato di osservazioni. I dati sono orizzontalmente ben distribuiti e verticalmente sono principalmente concentrati nei primi 1000 metri. Essendo situata nella parte nord-ovest del bacino, gli starti superficiali risentono molto dell'influenza stagionale come risulta dai grafici dalle serie temporali, in particolare della temperatura.

La regione 10, rappresentante l'Adriatico meridionale, presenta osservazioni maggiormente concentrate nella zona in prossimità dello stretto di Otranto e distribuite verticalmente lungo tutta la colonna d'acqua. Anche in quest'area si verifica la formazione di masse d'acque profonde. Nei primi anni '90 la fonte di acque profonde che guidava la cella termoalina del Mediterraneo orientale, originariamente situata nel Mare Adriatico, si spostò sul Mar Egeo e questo fenomeno, chiamato Eastern Mediterranean Transient (EMT), ha prodotto cambiamenti drammatici nelle proprietà degli strati profondi e intermedi che dal bacino orientale si sono via via propagate fino al bacino occidentale.

L'area nel bacino Levantino (regione 14) in cui è situato il Rhodes Gyre è invece importante per la formazione delle acque intermedie levantine. Dall'esame delle serie temporali il ciclo stagionale appare ridotto rispetto alle altre due regioni più settentrionali e risulta evidente il fenomeno EMT avvenuto nei primi anni 90'.

Successivamente sono state studiate le medie annuali dei valori di temperatura e salinità ottenute dalle serie temporali, e sono state mostrate le loro tendenze annuali tramite il calcolo dei trend lineari. Dai risultati ottenuti si evince che per tutte e tre le regioni i valori di salinità risultano aumentati dagli anni 50' ad oggi mentre per i valori di temperatura questo vale solo per lo strato profondo. Per le regioni 10 e 14 tuttavia le osservazioni sono molto scarse prima degli anni 80' perciò prima di tale periodo nei grafici rappresentanti le medie annuali sono presenti molte lacune e i trend potrebbero risultare meno affidabili.

Dall'analisi delle distribuzioni di frequenza delle anomalie standardizzate dei dati di temperatura e salinità è inoltre risultato che il tipico modello gaussiano, che si è soliti adottare nel calcolo statistico, potrebbe non rappresentare la reale distribuzione di frequenza di questi dati e occorrerebbe quindi verificarne l'adattabilità ad altre tipologie di distribuzione di frequenza quali la gamma e la weibull.

Inoltre si è compreso che la sola analisi di qualità dei dati di tipo visivo mediante l'uso del software Ocean Data View (ODV) non è sufficiente ad eliminare tutti gli errori presenti in un set di dati così cospicuo ed occorrerebbe quindi sottoporre questo set di dati anche ad una procedura di controllo di tipo statistico, una volta attentamente verificata la reale distribuzione di frequenza dei dati.

L'elaborazione dei dati svolta in questa tesi ci ha quindi permesso di possedere una visione generale e ampia delle tre regioni del Mediterraneo studiate ma essa può si considerare come un lavoro preliminare per future analisi statistiche che permetteranno quindi ulteriori affinamenti delle tecniche di indagine che, oltre a produrre collezioni di dati più affidabili, permetteranno di ottenere dallo studio delle serie storiche risultati significativamente più robusti ed attendibili.

Bibliografia e sitografia

- Artale, V., Astraldi, M., Buffoni, G., Gasparini, G.P., 1994. Seasonal variability of gyrescale circulation in the northern tyrrhenian sea. *Journal of Geophysical Research* 99 (C7), 14 127–14 137. <http://dx.doi.org/10.1029/94JC00284>.
- Artegiani, A., Paschini, E., Russo, A., Bregant, D., Raicich, F., Pinardi, N., 1997. The adriatic sea general circulation. Part ii: Baroclinic circulation structure. *Journal of Physical Oceanography* 27 (8), 1515–1532. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027h1515:TASGCPi2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027h1515:TASGCPi2.0.CO;2).
- Brankart, J. M. and Pinardi, N., 2001. Abrupt Cooling of the Mediterranean Levantine Intermediate Water at the Beginning of the 1980s: Observational Evidence and Model Simulation.
- Gertman, I., Ovchinnicov, I., Popov, Y., 1994. Deep convection in the eastern basin of the Mediterranean Sea. *Oceanology* 34, 19–25.
- Herrmann, M., Sevault, F., Beuvier, J., Somot, S., 2010. What induced the exceptional 2005 convection event in the northwestern mediterranean basin? Answers from a modeling study. *Journal of Geophysical Research* 115 (C12), C12 051. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JC006162>.
- Lascaratos, A., Williams, R.G., Tragou, E., 1993. A mixed-layer study of the formation of levantine intermediate water. *Journal of Geophysical Research* 98 (C8), 14 739–14 749. <http://dx.doi.org/10.1029/93JC00912>.
- Leaman, F.A.S., Kevin, D., 1991. Hydrographic structure of the convection regime in the gulf of lions: Winter 1987. *Journal of Physical Oceanography* 21, 575–598.

- Manca, B.B., Ibello, V., Pacciaroni, M., Scarazzato, P., Giorgetti, A., 2006. Ventilation of deep waters in the adriatic and ionian seas following changes in thermohaline circulation of the eastern mediterranean. *Climate Research* 31(2-3), 239-256, <<http://www.int-res.com/abstracts/cr/v31/n2-3/p239-256/>>.
- Milliff, R.F., Robinson, A.R., 1992. Structure and dynamics of the rhodes gyre system and dynamical interpolation for estimates of the mesoscale variability. *Journal of Physical Oceanography* 22 (4), 317-337. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1992\)022h0317:SADOTRi2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022h0317:SADOTRi2.0.CO;2).
- Ozsoy, E. et al., 1993. A synthesis of the levantine basin circulation and hydrography, 1985-1990. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 40 (6), 1075-1119, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096706459390063S>>.
- Pinardi, N., Masetti, E., 2000. Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 158 (3-4), 153-173, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018200000481>>.
- Pinardi, N., Zavatarelli, M., Adani, M., Coppini, G., Fratianni, C., Oddo, P., Simoncelli, S., Marina Tonani, Lyubartsev, V., Dobricic, S., Bonaduce, A., 2013. Mediterranean Sea large-scale low-frequency ocean variability and water mass formation rates from 1987 to 2007: A retrospective analysis.
- Pinardi, N., Zavatarelli, M., Arneri, E., Crise, A., Ravaioli, M., 2006. The physical, sedimentary and ecological structure and variability of shelf areas in the Mediterranean Sea. In: Robinson, A., Brink, K. (Eds.), *THE GLOBAL The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses*, vol. 14.
- Harvard University Press, *The Sea* (Chapter 32).
- Robinson, A.R. et al., 1991. The eastern mediterranean general circulation: features, structure and variability. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 15 (3-5), 215-240, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377026591900217>>.

- Roether, W., Manca, B.B., Klein, B., Bregant, D., Georgopoulos, D., Beitzel, V., Kovac̃ević, V., Luchetta, A., 1996. Recent changes in eastern mediterranean deep waters. *Science* 271 (5247), 333–335. <http://dx.doi.org/10.1126/science.271.5247.333>, <<http://www.sciencemag.org/content/271/5247/333.abstract>>, <<http://www.sciencemag.org/content/271/5247/333.full.pdf>>.
- Smith, R., Stansfield, K., Bryden, H.L., 2008. Observations of new western mediterranean deep water formation observations of new western mediterranean deep water formation using argo floats 2004–2006. *Ocean Science* 4, 133–149.
- Tsimplis, M., Velegrakis, A., Drakopoulos, P., Theocharis, A., Collins, M., 1999. Cretan deep water outflow into the eastern mediterranean. *Progress In Oceanography* 44 (4), 531–551, <<http://eprints.soton.ac.uk/180303/>>.

Ringraziamenti

Ringrazio in primo luogo la mia relatrice, la Professoressa Pinardi, che ha sempre avuto fiducia nelle mie capacità e mi ha spronata per svolgere al meglio questo lavoro.

Ringrazio veramente tanto Simona, il cui aiuto è stato fondamentale, poiché mi ha seguito passo per passo in questo percorso e Luca senza il quale, nella parte di lavoro informatico, non avrei cavato un ragno dal buco.

Un grazie speciale ai miei genitori che mi hanno sempre sostenuta e ascoltata nei miei momenti di debolezza.

Ringrazio anche le mie complici, Rebecca, Alice e Giulia, sulle quali so di poter sempre contare.