

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente

**ANALISI DI DATI OCEANOGRAFICI
AD ALTA ED ALTISSIMA
RISOLUZIONE**

Tesi di Laurea in
Oceanografia Fisica

Relatore:
Prof.ssa
Nadia Pinardi
Correlatore:
Dott. Paolo Oddo

Presentata da:
Matteo Lisi

Sessione Unica
Anno Accademico 2018 - 2019

Un ringraziamento speciale va a tutti
quelli che mi hanno supportato
in questi anni di studio e che mi hanno
dato la possibilità di migliorare per
raggiungere ambizioni sempre più alte.

Indice

1	INTRODUZIONE	1
1.1	Cenni Storici	2
1.2	Dietro a REA	4
1.3	Mesoscala e sottomesoscala	5
1.4	MREA e gli esperimenti italiani	7
1.5	Obiettivi della Tesi	13
2	CAMPIONAMENTO E STRUMENTI DI MISURA	15
2.1	Area di studio	15
2.2	Strategia di campionamento	17
2.3	Strumentazione impiegata	19
3	ANALISI PROFILI	25
3.1	Bias correction e profili medi di T ed S	25
3.1.1	Variabilità media giornaliera: Temperatura e Salinità	27
3.2	Confronto tra scanfish e CTD	29
3.3	Ossigeno disciolto e Clorofilla	34
3.3.1	Variabilità media giornaliera: Ossigeno	36
3.3.2	Variabilità media giornaliera: Clorofilla	36
3.4	Irradianza	36
3.5	Diagramma TS	38
4	MAPPATURA DELLE VARIABILI	41
4.1	Analisi spaziale dei dati oceanografici	41
4.2	Esperimenti di analisi oggettiva	44
4.2.1	Analisi spaziale di T ed S	47
5	CONCLUSIONI	61
	Appendices	65
	Bibliografia	70

Elenco delle figure

1.1	Corrente di Kuroshio. Si notano con chiarezza i vortici lungo il flusso della corrente. © US Marine-Naval Research Laboratory, Global NLO Nowcast Forecast, domaine public	6
1.2	Esempio di sottomesoscala considerando la vorticità relativa alla superficie. Si nota come alla periferia degli eddies di mesoscala ci siano vortici a scala minore[5]	7
1.3	<i>Stazioni campionate nella prima (sinistra) e nella seconda (destra) campagna durante MREA07, [7].</i>	9
1.4	Strategia di campionamento applicata a MREA16 nel Golfo di Taranto	12
2.1	<i>Batimetria della porzione del Mar Ligure antistante il Golfo di La Spezia segnalata con il puntino rosso.</i>	16
2.2	<i>Schema della circolazione media superficiale (in alto) e intermedia (in basso). La ECC e la WCC sono identificate con 3e e 2c [16].</i>	16
2.3	<i>Percorso ipotetico che CRV Leonardo avrebbe potuto seguire per collezionare SM500 e SM250. Nella metà superiore della figura è riportata una strategia singola per ognuna della due campagne mentre nella metà inferiore un strategia ibrida in due varianti che misurano una lunghezza complessiva di 72.5km (sinistra) e di 69km (destra).</i>	17
2.4	<i>Campagne condotte da CRV Leonardo, partendo da sinistra SM500, SM250 e la replica di SM500.</i>	18
2.5	<i>Nell'immagine di sinistra è mostrata l'area di campionamento complessiva delle operazioni condotte sia da RV Aretusa che da CRV Leonardo. A destra è proposto un'ingrandimento dell'area di campionamento di CRV Leonardo. In blu le stazioni relative a LS, in rosso quelle appartenenti a SM.</i>	18
2.6	<i>A sinistra l'ADCP, si noti le quattro teste arancioni che identificano il punto di emissione del segnale acustico. A destra la sonda CTD Idronauts montata nella rosetta.</i>	20
2.7	<i>A sinistra è mostrata la modalità con cui è stato utilizzato lo scanfish durante MREA17, ovvero per traino da parte di CRV Leonardo. A destra il ROTV Scanfish Mk II nel momento del recupero.</i>	20
2.8	<i>Tipica schermata del software per il controllo dello Scanfish, attraverso questa interfaccia è possibile visualizzare i dati in tempo reale e l'assetto del veicolo.</i>	21
2.9	<i>Acquisizione della radiazione superficiale riflessa con lo strumento ASD FieldSpec 4.</i>	22

3.1	<i>In figura è riportato il confronto tra il profilo di medio di salinità campionata dallo Scanfish (nero) mentre in rosso quella ottenuta dalla sonda CTD. In verde la correzione del bias di salinità.</i>	26
3.2	<i>A sinistra è mostrato l'andamento medio della temperatura nell'intero periodo della campagna(a). A destra il relativo profilo verticale medio della salinità (b). L'area in grigio identifica la deviazione standard. . .</i>	27
3.3	<i>Profili medi verticali di temperatura suddivisi in base alla giornata di campionamento.</i>	28
3.4	<i>Profili medi verticali di salinità suddivisi in base alla giornata di campionamento.</i>	28
3.5	<i>Sono visibili le sette stazioni CTD (punti rossi) che racchiudono una o più stazioni scanfish in un raggio di 500m (circonferenza rossa). In nero sono mostrate tutte le stazioni scanfish mentre con i colori blu, verde e magenta le stazioni scanfish compionate rispettivamente il 27, il 28 e il 29 settembre.</i>	29
3.6	<i>Andamento di salinità (sinistra) e temperatura (destra) per quanto riguarda le stazioni CTD 18(a) e 19(b) e le relative stazioni scanfish. . .</i>	31
3.7	<i>Andamento di salinità (sinistra) e temperatura (destra) per quanto riguarda le stazioni CTD 24(a) e 25(b) e le relative stazioni scanfish. . .</i>	32
3.8	<i>Andamento di salinità (sinistra) e temperatura (destra) per quanto riguarda le stazioni CTD 26(a) e 29(b) e le relative stazioni scanfish. . .</i>	33
3.9	<i>Andamento di salinità (a) e temperatura (b) per quanto riguarda la stazione CTD 30 e le relative stazioni scanfish.</i>	34
3.10	<i>Profilo medio di ossigeno disciolto(sinistra) e clorofilla(destra)</i>	35
3.11	<i>Profili medi verticali di ossigeno disciolto suddivisi in base alla giornata di campionamento.</i>	37
3.12	<i>Profili medi verticali di clorofilla suddivisi in base alla giornata di campionamento.</i>	37
3.13	<i>Profili medi verticali della radiazione elettromagnetica che penetra nell'oceano studiata in quattro diverse lunghezze d'onda.</i>	38
3.14	<i>Diagramma TS,i tre cerchi colorati individuano tre water types.</i>	39
4.1	<i>Funzione di correlazione in funzione della distanza r.</i>	44
4.2	<i>Campo di temperatura a 15m.</i>	51
4.3	<i>Campo di salinità a 15m.</i>	52
4.4	<i>Campo di densità a 15m.</i>	53
4.5	<i>Campo di temperatura a 40m.</i>	54
4.6	<i>Campo di salinità a 40m.</i>	55
4.7	<i>Campo di densità a 40m.</i>	56
4.8	<i>Campo di temperatura a 60m.</i>	57
4.9	<i>Campo di salinità a 60m.</i>	58
4.10	<i>Campo di densità a 60m.</i>	59
1	<i>Campo di temperatura a 40m prodotto con tre differenti coppie di parametri A e B; 17 e 13km, 10 e 6km ed 8 e 4km.</i>	68
2	<i>Campo di temperatura a 40m prodotto considerando una maschera di errore del 30% e del 10%.</i>	68

3	<i>Campo di temperatura a 40m ottenuto con diversi valori dei parametri LIMIT e DIST.</i>	69
4	<i>Campo di temperatura a 40m ottenuto variando il passo griglia da 90m a 250m</i>	69

Elenco delle tabelle

2.1	Riassunto attività MREA17	23
4.1	Parametri dell'analisi oggettiva.	44
4.2	Primo esperimento	46
4.3	Secondo esperimento	46
4.4	Terzo esperimento	46
4.5	Quarto esperimento	47
4.6	Schema riassuntivo dei test più significativi	47
1	Parametri che influenzano l'analisi oggettiva.	67

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Il monitoraggio ambientale è una pratica sempre più diffusa e importante e il miglioramento tecnologico permette di compiere analisi sempre più precise e accurate sullo stato dell'ambiente. Grazie alla raccolta dati è possibile inizializzare modelli che permettono di svolgere simulazioni per quanto riguarda un particolare aspetto ambientale di cui, per esempio, se ne vuole studiare la variabilità spaziale e/o temporale. Le previsioni sono solo uno dei prodotti che interessa a chi lavora in campo ambientale che risulterà altrettanto interessato allo stato dell'ambiente nel momento in cui si effettua il monitoraggio per quanto riguarda, ad esempio, la dispersione di un inquinante in atmosfera. In altre parole possiamo riassumere il tutto con il concetto di Valutazione Ambientale ovvero uno strumento di supporto per l'autorità decisionale in senso lato, finalizzato a individuare, descrivere e valutare una certa condizione ambientale con tempistiche più o meno lunghe. Sono presenti innumerevoli valutazioni ognuna elaborata ad hoc, si ricorda per esempio la Valutazione degli Impatti Ambientali (Environmental Impact Assessment) comunemente detta VIA ovvero una *procedura tecnico-amministrativa che ha lo scopo di individuare, descrivere e valutare, in via preventiva alla realizzazione delle opere, gli effetti sull'ambiente biogeofisico, sulla salute e benessere umano di determinati progetti pubblici o privati, nonché di identificare le misure atte a prevenire, eliminare o rendere minimi gli impatti negativi sull'ambiente, prima che questi si verifichino effettivamente* [25].

Un altro esempio altrettanto importante è quello della Valutazione Ambientale Strategica, la VAS, definibile come una *valutazione ambientale di piani e programmi che possono avere un impatto significativo sull'ambiente, secondo quanto stabilito nell'art. 4 del D. Lgs. 152/2006 e s.m.i., "ha la finalità di garantire un elevato livello di protezione dell'ambiente e contribuire all'integrazione di considerazioni ambientali all'atto dell'elaborazione, dell'adozione e approvazione di detti piani e programmi assicurando che siano coerenti e contribuiscano alle condizioni per uno sviluppo sostenibile* [24].

Si intuisce chiaramente quanto queste valutazioni siano importanti e assolutamente

necessarie per studiare e comprendere l'ambiente che ci circonda. Nel lavoro di tesi proposto verranno presentati i risultati di un'analisi ad alta e altissima risoluzione nell'ambito di una valutazione ambientale applicata in campo oceanografico. L'elaborato si presenterà in cinque capitoli, nel primo, successivamente a questa breve introduzione verranno presentati alcuni cenni storici sulla valutazione ambientale in esame, una breve descrizione degli aspetti oceanografici interessati, gli esperimenti condotti fino ad ora e gli obiettivi della tesi. Il secondo capitolo farà luce sulla strumentazione utilizzata e sul tipo di campionamento applicato all'area di studio mentre nel terzo capitolo verranno mostrati i risultati derivanti da una prima analisi dei dati. Il capitolo quattro sarà costituito dalle mappe di temperatura e salinità tramite la tecnica di analisi oggettiva. In fine, il quinto capitolo riporterà le conclusioni.

1.1 Cenni Storici

Nei primi anni '90 e in particolare nel 1992-1993 il Consiglio del Nord Atlantico, suprema istanza civile che regge la NATO (North Atlantic Treaty Organization) diede il via libera ad una serie di operazioni marittime nel Mar Adriatico con lo scopo di tenere sotto controllo il rispetto delle sanzioni imposte dall'ONU alla Serbia e al Montenegro e in secondo luogo quello condurre delle campagne di monitoraggio e sorveglianza [1]. Dal momento che la NATO doveva applicare una forma di controllo politico/militare, era necessario avere a disposizione dati ambientali in maniera rapida ma allo stesso tempo era fondamentale che questi fossero ad alta risoluzione, con un alto livello di dettaglio e collezionati maggiormente in acque costiere. Il problema principale che si riscontrò era quello relativo alla mancanza di tecnica, equipaggiamento e procedure e ciò indusse il centro SACLANT (Supreme Allied Commander Atlantic) a ideare la cosiddetta Valutazione Ambientale Rapida (Rapid Environmental Assessment da qui in avanti REA) tanto che nel 1995 fu definita come nuovo requisito operativo per la guerra sottomarina (ASW - anti submarine warfare) e per le operazioni antimine (MCM - mine countermeasure operations) [1].

Al fine di istituire REA il gruppo di oceanografia militare della NATO, MILOC (Military Oceanographic group) condusse le cosiddette Rapid Response survey dal 1996 al 1998 il cui scopo, come riporta [17], era quello di testare il nuovo sistema REA e le relative procedure in un contesto operativo al fine di fornire supporto alle forze NATO durante le esercitazioni militari. In seguito SACLANT e il centro di Oceanografia fisica costiera dell'Università Old Dominion, che forniva la conoscenza tecnico-scientifica, si resero conto che il concetto di REA poteva essere applicato anche all'oceanografia civile dato che agenzie governative ed enti di ricerca avevano sempre più bisogno di ottenere

dati e informazioni in tempo reale per la protezione e la salvaguardia dell'ambiente costiero.

La dicitura Rapid Environmental Assessment è spesso recepita in modo sbagliato perchè, come scrive [20], è troppo generale per descrivere il concetto di REA; a dimostrazione di ciò si può riportare un semplice esempio, nel momento in cui si notano delle nuvole scure nel cielo si potrebbe ipotizzare che presto piovnerà, tutto ciò non ha nulla a che vedere con REA. La parola *rapid* non si riferisce alla scala temporale della variabilità ambientale o alla durata di una determinata operazione miliare; si riferisce al tempo impiegato nel fornire un certo tipo di prodotto contenente le informazioni ambientali richieste e questo significa che la parola *rapid* è sinonimo di *near-real time*. La reale importanza che una valutazione ambientale in tempo reale ha può essere meglio compresa con una serie di esempi; in una operazione anfibia sotto copertura un subacqueo ha bisogno di sapere quando e dove le correnti e la visibilità in immersione saranno favorevoli per la buona riuscita dell'azione. In questo caso le serie temporali delle correnti e le mappa di ocean color sono informazioni completamente inutili. Allo stesso modo ma in un contesto di guerra antisottomarina, un operatore radar sarà interessato a conoscere quali condizioni ambientali costituiranno un impatto istantaneo sul raggio di acquisizione del radar [26]. Per quanto riguarda il settore civile, la gestione delle Zone Economiche Esclusive (EEZ) e delle zone costiere ma anche la pianificazione di operazioni come dragaggi, la gestione di crisi improvvise come nel caso di oil spill e incidenti relativi a navi o aree sono solo alcuni dei campi a cui REA è applicabile.

Dal momento che REA si basa su una serie di premesse che possiamo riassumere come segue:

1. la conoscenza dell'ambiente è una condizione che sta alla base delle scelte tattiche e dei sistemi di combattimento.
2. non sempre i parametri ambientali costanti sono noti con un sufficiente livello di dettaglio.
3. a differenza delle previsioni meteo non è possibile costruire una rete di osservazione permanente nell'oceano.
4. nuovi strumenti scientifici riducono il tempo di acquisizione dei dati [20].

si possono identificare due possibili definizioni:

- il concetto di REA è quello di fornire nowcast ¹ e forecast sufficientemente accurate ed efficienti al fine di supportare le attività operative in svariate aree costiere e

¹Processo tramite il quale un modello (in questo caso oceanografico) viene inizializzato con le osservazioni che successivamente verranno usate per produrre campi di parametri consistenti con le osservazioni [18]

consegnare una risposta alla richiesta di informazioni pervenute come pochissimo preavviso [18].

- REA è una metodologia che è stata implementata con lo scopo di colmare le lacune di conoscenza e di fornire informazioni ambientali utili in una piccola finestra temporale.

Quello che emerge è appunto il concetto della rapidità nella consegna del risultato finale. Come riporta [20] le campagne tradizionali operate da MILOC sono consone alla costruzione di database e di climatologie mentre il sistema sviluppato per REA è ideale per distribuire informazioni valide per un tempo limitato. Si può dire che REA aggiunge una conoscenza ambientale in tempo reale ai database oppure in senso lato che aggiunge il *tempo* al *clima*.

1.2 Dietro a REA

L'oceano è intermittente e non lineare con una circolazione caratterizzata da molteplici processi dinamici che si verificano in un'ampia gamma di scale spazio-temporali. L'intermittenza e la varietà di scale ha portato al concetto di campionamento adattivo e all'uso di modelli annidati per quanto riguarda le previsioni. Le osservazioni vengono utilizzate per inizializzare le previsioni attraverso tecniche di assimilazione che producono la migliore stima della realtà al tempo iniziale della previsione.

Dal punto di vista operativo, collezionare le osservazioni è difficoltoso, costoso e con una distribuzione che non è dettata dal modello e dalla fisica dei processi bensì dalle opportunità che i dati collezionati per scopi diversi possano essere riutilizzati per inizializzare le previsioni. Sarebbe impossibile campionare una regione uniformemente su una griglia spazio-temporale predeterminata, adeguata a risolvere le scale e i tempi sinottici. A questo punto entra in gioco il campionamento adattivo che permette di ridurre drasticamente il numero di osservazioni richieste attraverso una strategia di campionamento REA.

Per migliorare la precisione delle previsioni è necessario correggere la condizione iniziale con le osservazioni tramite le tecniche di assimilazione dati. Il sistema accoppiato necessario per le previsioni è composto da:

- rete di osservazioni.
- modelli numerici dinamici .
- data assimilation.

ed è stato chiamato Ocean Observing and Prediction System (OOPS) [18] .

L'oceano è un sistema nonlineare con processi e forzanti stocastici, questo significa che può essere predetto solo con una precisione limitata e che tali previsioni perdono di validità velocemente quando i termini nonlineari aumentano la differenza tra la previsione e la realtà.

Secondo un visione realistica, una valutazione della condizione iniziale in tempo reale è basata sulle osservazioni che si presume siano coincidenti nel tempo e con una risoluzione spaziale sufficientemente alta per risolvere il processo di interesse. La condizione iniziale corretta dai dati è anche chiamata nowcast. Usando le nowcast come punto di partenza il modello viene integrato per un certo tempo, guidato dalle dinamiche interne e dalle previsioni dei forzanti esterni. Le previsioni sono affidabili solo per un certo periodo di tempo che dipende da tre fattori:

1. qualità e densità delle osservazioni.
2. correttezza nelle approssimazioni fisiche applicate al modello di previsione.
3. qualità e risoluzione delle previsioni. [18].

1.3 Mesoscala e sottomesoscala

La circolazione oceanica è turbolenta nel senso che il movimento si trasmette lungo una vasta serie di scale spazio-temporali passando dalle migliaia di chilometri dove le dinamiche oceaniche sono caratterizzate da forzanti esterni (venti su larga scala e flussi di calore ed acqua dolce) a pochi centimetri dove l'energia viene dissipata sottoforma di calore [14]. Quando la circolazione a larga scala è soggetta a instabilità si ha la formazione di vortici chiamati Eddies con conseguente cambio di scala, tra 10 e 100km e tra pochi giorni e diversi mesi. Gli eddies, che possono essere ciclonici o anticiclonici, sono i principali meccanismi di trasporto del calore, del sale e dei nutrienti disciolti nella circolazione oceanica. Nella fig.1.1 sono mostrati i vortici di mesoscala della corrente di Kuroshio che lambisce le coste orientali del Giappone [11]. Ulteriori instabilità della mesoscala portano alla formazione di meandri ai bordi dei vortici, eddies più piccoli, filamenti e fronti che tessono una rete di flussi propri della sottomesoscala con dimensioni spaziali tra 100 e 1000m e intervalli temporali di qualche giorno. Studi condotti con l'ausilio di simulazioni numeriche ad alta risoluzione suggeriscono che la variabilità della mesoscala e sottomesoscala e i loro processi di interscambio non sono indipendenti ma vanno considerati accoppiati includendo tutta una serie di meccanismi per il trasferimento non lineare di energia che avviene tra scale diverse [14]. Come riportato in [22] infatti, gran parte dell'energia cinetica dell'oceano è immagazzinata a

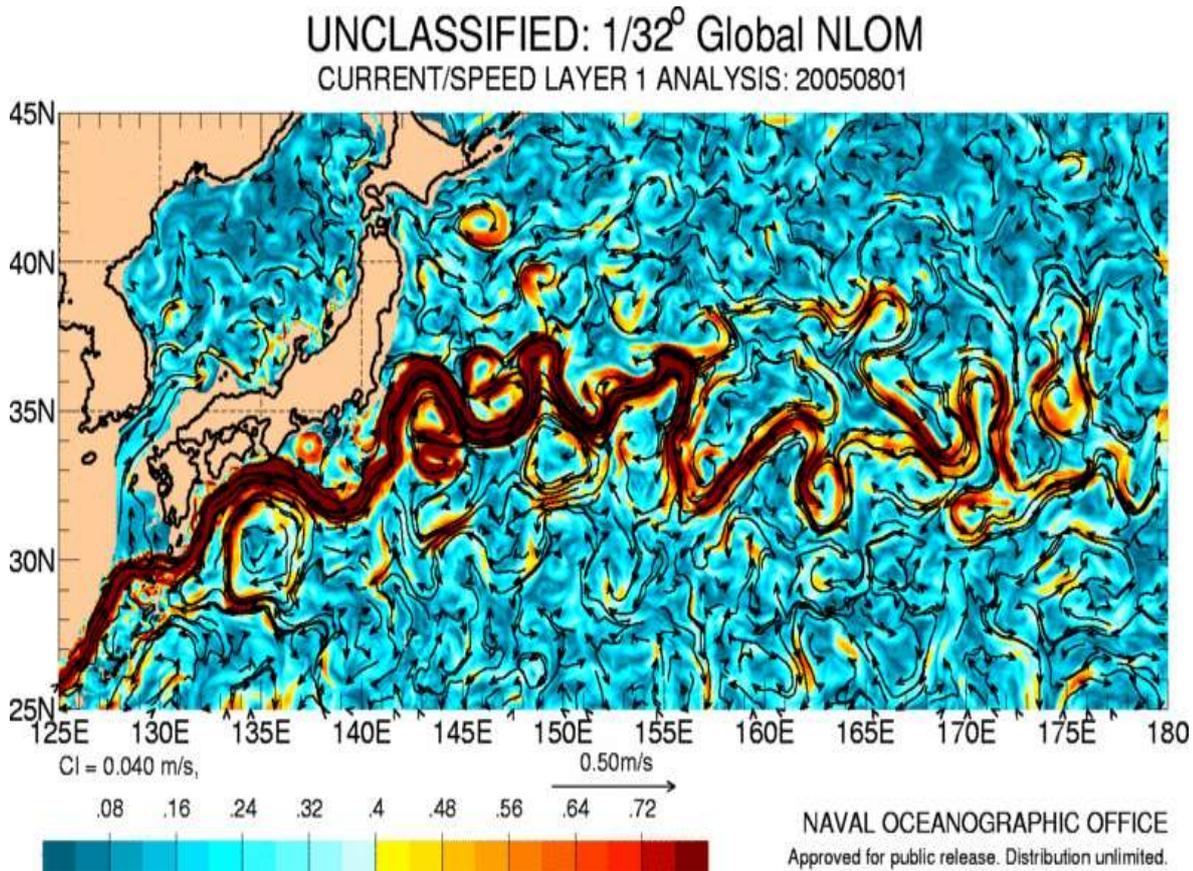


Figura 1.1: Corrente di Kuroshio. Si notano con chiarezza i vortici lungo il flusso della corrente. © US Marine-Naval Research Laboratory, Global NLO Nowcast Forecast, domaine public

livello di meso e larga scala dove il flusso può essere considerato bidimensionale ² e in equilibrio sia idrostatico che geostrofico da cui è ben difficile estrarre energia. I vortici a livello di sottomesoscala si presentano intensi e non-geostrofici e fungono da estrattori e trasportatori di energia dalle scale bidimensionali a quelle più piccole dove tale energia viene dissipata in processi tridimensionali. Sempre da [22] emerge che le dinamiche di sottomesoscala generano velocità verticali dell'ordine di $O(10^{-3} \text{ ms}^{-1})$ cioè un ordine di grandezza maggiore rispetto alle corrispondenti della mesoscala. Dovuti proprio a queste velocità verticali i processi di sottomesoscala sono fondamentali nel trasferimento di proprietà e traccianti tra la superficie e le porzioni più interne dell'oceano. In particolare tali scambi verticali regolamentano l'apporto di nutrienti e lo scambio di gas disciolti con l'atmosfera. [22] fornisce anche una definizione di sottomesoscala che è

²I vortici di mesoscala hanno una dinamica quasi-bidimensionale perchè le velocità verticali sono molto minori di quelle orizzontali in quanto le scale orizzontali sono molto maggiori di quelle verticali.

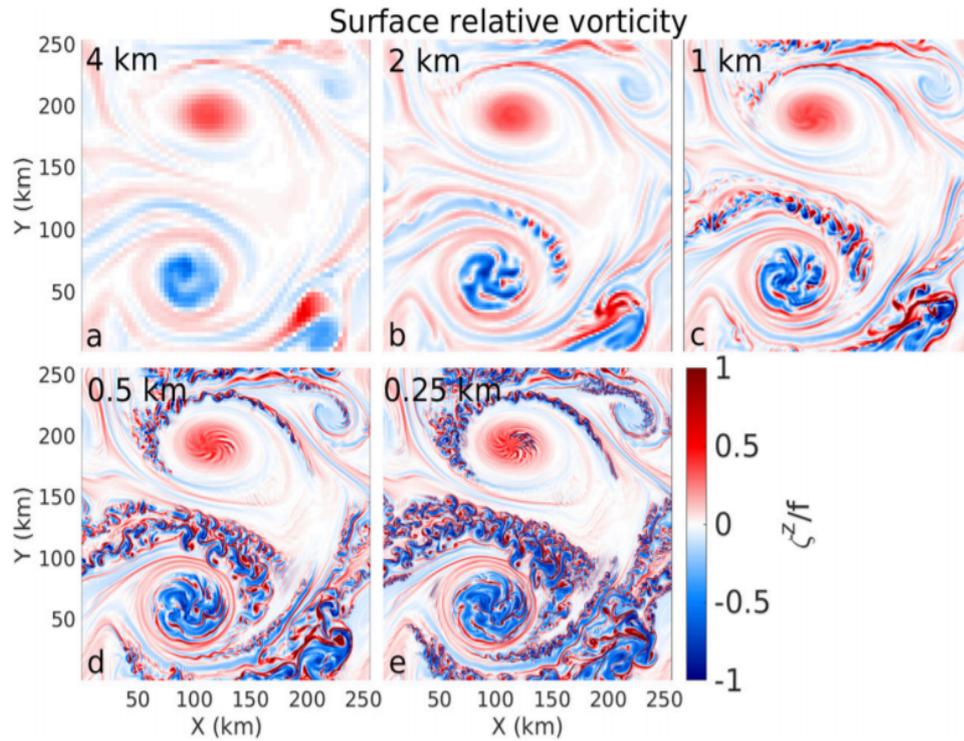


Figura 1.2: Esempio di sottomesoscala considerando la vorticità relativa alla superficie. Si nota come alla periferia degli eddies di mesoscala ci siano vortici a scala minore[5]

quella per cui il numero di Rossby e quello di Richardson sono entrambi di $O(1)$.³

Si è visto infine che le dinamiche di sottomesoscala sono strettamente legate a quelle dello strato rimescolato e pertanto risultano più intense durante la stagione invernale rispetto a quella estiva ovvero quando la stratificazione è più intensa.

1.4 MREA e gli esperimenti italiani

Sulla base degli studi compiuti negli anni 90, è stata sviluppata la Marine Rapid Environmental Assessment (da qui in poi MREA) che ha lo scopo di collezionare dati oceanografici utili al fine di aumentare la conoscenza delle dinamiche e dei processi oceanografici e di incrementare la capacità nel produrre nowcast e forecast. Al fine di raggiungere questi obiettivi l'acquisizione dei dati e l'analisi devono essere sviluppate in modo che sia considerata la sinotticità delle scale temporali e la ripetibilità delle campagne di raccolta dati. MREA è una delle strategie ottimali per collezionare l'e-

³Il numero di Rossby (Ro) e il numero di Richardson (Ri) sono due numeri adimensionali rispettivamente

$$Ro = \frac{U}{\Omega L}, \quad Ri = \left(-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right) / \left(\frac{dU}{dz} \right)^2 \quad (1.1)$$

Indicano il rapporto tra l'accelerazione inerziale e quella di Coriolis, il primo e il rapporto tra energia potenziale ed energia cinetica il secondo.

videnza definitiva della mesoscala al fine di migliorare le capacità predittive [13]. Gli esperimenti italiani MREA sono stati ideati per contribuire a:

1. impostare una strategia di collezionamento dati applicabile in aree diverse per la risoluzione dei processi di interesse.
2. studiare i processi superficiali e sottosuperficiali che riguardano i sistemi accoppiati onde e correnti, processi fisici e biochimici dalle zone costiere al mare aperto.
3. validare i modelli numerici di previsione delle correnti a scala regionale e locale.

In particolare fino ad ora sono stati compiuti cinque diversi esperimenti che si identificano con i seguenti tags: MREA07, MREA08, MREA14, MREA16 e MREA17.

1. MREA07: Si è svolta nel Mar Ligure e gli obiettivi principali erano:
 - (a) collezionare dati oceanografici e trasmetterli in tempo reale.
 - (b) lo sviluppo di metodi per il campionamento strategico, l'analisi e la previsione in tempo reale della circolazione a scala di bacino e costa.
 - (c) elaborare una previsione dello spostamento di inquinanti con i modelli e metodi MREA.

Attraverso la tecnica di MREA venivano prodotte previsioni dei campi di correnti ad altissima risoluzione orizzontale basandosi sui modelli esistenti e sulle osservazioni collezionate. La formulazione di previsioni attraverso l'uso di modelli rilocabili e annidati sarebbe servita per studiare la dispersione degli inquinanti sia in mare aperto che vicino alla costa al fine di generare una migliore gestione dell'evento ma anche un'efficiente organizzazione nel caso si verificasse una situazione di crisi, ad esempio uno sversamento in mare.

MREA07 era costituita da due leg, effettuate da Aretusa e Galatea. Il campionamento prevedeva l'uso di CTD i cui dati sarebbero serviti ad inizializzare il modello numerico di circolazione ma anche quello rilocabile (Harvard Ocean Prediction System).

A partire dal primo, Mediterranean Forecasting System (MFS), sono stati effettuati degli annidamenti successivi con un aumento della scala risolutiva delle correnti al fine di individuare quale scala fosse quella ottimale per avere delle traiettorie realistiche delle particelle di inquinante. Gli annidamenti hanno seguito la seguente scaletta:

- passaggio da 6km a 3km di risoluzione orizzontale.

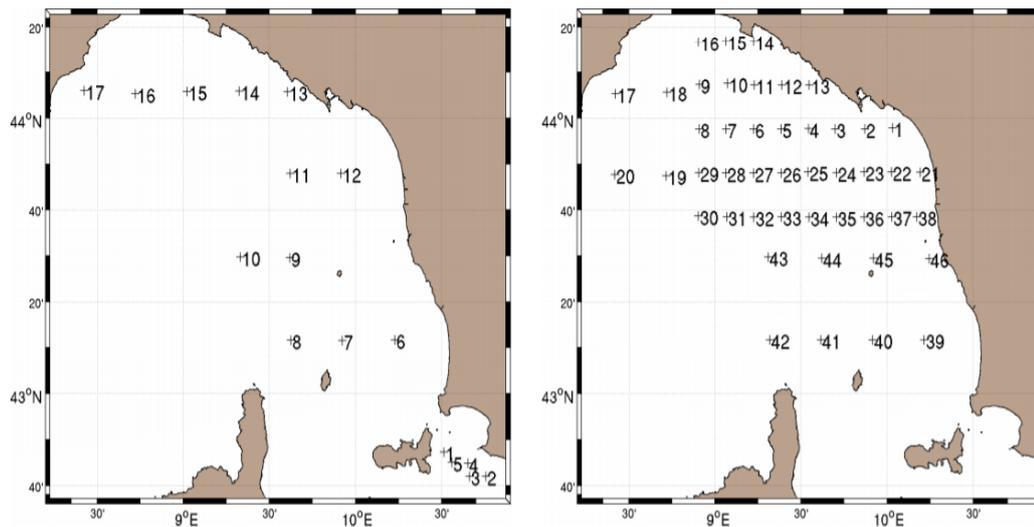


Figura 1.3: Stazioni campionate nella prima (sinistra) e nella seconda (destra) campagna durante MREA07, [7].

- passaggio da 3km a 1.5km di risoluzione orizzontale.
- passaggio da 1.5km a 750m di risoluzione orizzontale.

i risultati del modello rilocabile, ovvero i campi delle correnti, sono stati utilizzati per la previsione delle dispersione delle particelle ottenuta attraverso un modello lagrangiano di previsione accoppiato con HOPS [7].

Da MREA07 è emersa un' elevata capacità di campionamento funzionale allo sviluppo dei metodi di REA da parte degli organi interessati. Le informazioni ambientali così conseguite hanno permesso, nei mesi successivi alla campagna, di escogitare un modo per migliorare le previsioni per quanto riguarda la dispersione di inquinanti per quella determinata zona e di estenderle anche al bacino del Mediterraneo.

2. MREA08: allo stesso modo di MREA07 anche nel 2008 la campagna REA è stata svolta nel Mar Ligure. A differenza di quella precedente questa si è svolta in autunno piuttosto che in primavera/estate ed era costituita da tre campagne anziché da due. A livello operativo oltre che all'uso di CTD, XBT e drifters sono stati impiegati anche dei gliders. Gli obiettivi principali si possono riassumere come segue:

- (a) collezionare dati oceanografici per calibrare e validare la strategia MREA sia in mare aperto che sotto costa.
- (b) Calibrare e validare un modello rilocabile ad alta risoluzione innestato in un modello oceanografico operativo a grande scala

- (c) dimostrare l'utilità del modello MREA per quanto riguarda la previsione di dispersione degli inquinanti
 - (d) studiare i processi di mesoscale nel Mar Ligure e la loro importanza nella dispersione dei contaminanti [8].
3. MREA14: Nel 2014 la campagna MREA prevedeva quattro obiettivi principali e si è svolta nel Golfo di Taranto comprendendo anche il Mar Grande.
- (a) Progettare e validare un concetto innovativo di MREA applicato alla risposta alle emergenze ambientali a mare, sia dal punto di vista osservativo che modellistico.
 - (b) Formulare vari schemi di campionamento a stazioni di CTD che riescano a migliorare il forecast a 5-10 giorni nell'area del Golfo di Taranto.
 - (c) Progettare la validazione del sistema di modelli idrodinamici annidati, a partire dalla scala di bacino (MFS) a quella dei modelli costieri, sia con griglie strutturate che non strutturate.
 - (d) Cominciare una strategia di campionamento della variabilità interannuale e climatologica del Golfo di Taranto [**mrea14**].

Gli esperimenti effettuati hanno mostrato per la prima volta la sinotticità⁴ della circolazione a larga scala associata alla variabilità della mesoscala. La strategia di campionamento adottata è quella di tipo classico e prevedeva quattro campagne in tre aree del Golfo di Taranto. Le prime due, identificate con LS1 e LS2 si occupavano della larga scala e comprendevano tutto il golfo con una griglia di campionamento di 15km in tre giorni. Per quanto riguarda l'area costiera il campionamento si è svolto con 24 stazioni effettuate in un giorno a 5km di distanza l'una dall'altra. Infine l'area del Mar Grande è stata coperta con un campionamento di 1km di risoluzione effettuato in 12 ore. L'analisi delle masse d'acqua ha mostrato che la struttura termoalina verticale è regolata da quattro masse d'acqua. La prima si colloca in superficie e arriva fino a 30m, è caratterizzata da acqua relativamente dolce e calda. La seconda caratterizza il termocline mentre la terza, indentificabile come Modified Levantine Intermediate Water (MLIW) con temperatura e salinità sottosuperficiale massime. Infine la quarta che è quella più profonda ha probabilmente origine adriatica. La colonna d'acqua è molto stratificata con un termocline che va dai 30 ai 100m. La presenza un evento piovoso avvenuto tra LS1 e LS2 ha provocato un abbassamento della salinità di 0.1 PSU in concomitanza di una variazione della temperatura di 0.5°C a causa

⁴significa in un arco temporale di al massimo tre giorni.

di un'intensificazione del vento. La mappatura di temperatura e salinità è stato ottenuta con l'ausilio dell'Analisi Oggettiva e partendo dallo strato di rimescolamento si è potuto notare che le strutture della larga scala si sono modificate passando da una campagna all'altra per via del fatto che sono (growth and decay of small-scale), e si è intensificato il vortice ciclonico dello strato di rimescolamento. Per quanto riguarda il termoclino si ha la presenza di un gyre anticiclonico che domina il Golfo di Taranto. Le zone più periferiche del gyre sono caratterizzate da upwelling e questo si deduce dalle basse temperature e dagli valori di salinità, specialmente nella parte nord orientale del golfo. La corrente marginale del gyre era idrodinamicamente instabile e generava frontogenesi e delle correnti marginali più intense. Nel lasso di tempo intercorso tra LS1 e LS2 si sono sviluppati e poi decaduti due vortici ciclonici di cui uno di questi può essere considerato appartenente alla sottomesoscala per via delle sue dimensioni, osservabili sono con uno schema di campionamento ad alta risoluzione. La mappatura del Mar Grande suggerisce molteplici fonti di compensazione della densità e una bassa stratificazione che si presume sia connessa con la circolazione estuarina verticale. L'instabilità della corrente al margine del gyre connessa con le strutture frontali delle temperature danno origine a vortici dovuti a processi ciclogenetici come ad esempio le instabilità barocliniche-barotropiche. Nel caso studiato da MREA14 le osservazioni mostrano che le instabilità si verificano in un periodo di una settimana circa ma cosa ancora più importante modulano in fenomeni di upwelling nella zona di interfaccia tra mare aperto e piattaforma continentale. La conclusione di MREA14 è che un campionamento su griglia regolare permette di osservare gran parte della variabilità dell'oceano ma questo si verifica nel caso in cui fosse adeguatamente calibrato per la risoluzione delle osservazioni in direzione oceano aperto-costa. Al fine di mappare la variabilità stagionale dei gyre anticiclonici, le strutture delle zone di upwelling e la loro influenza sui processi biogeochimici e sull'ecosistema costieri, sono necessarie un numero maggiore di stazioni. Va precisato che per la prima volta è stato osservato il campo di flusso a livello della sottomesoscala [15].

4. MREA16: Può essere considerata una replica di MREA14 ma volta al miglioramento e basata su ciò che era stato appreso nell'edizione precedente. Gli obiettivi peculiari si possono riassumere come segue:
 - Collezionare un secondo data set a larga scala nel Golfo di Taranto per valutare la variabilità stagionale (Luglio).
 - Il campionamento doveva focalizzare sui specifici processi dove ancora non esiste validazione in situ:

- a. ciclo giornaliero della temperatura;
 - b. interazione oceano-atmosfera;
 - c. moti inerziali delle correnti;
 - d. radiazione e ottica;
- La parte modellistica doveva occuparsi di accoppiare modelli d'onda, modelli ottici a quelli idrodinamici e validarli.

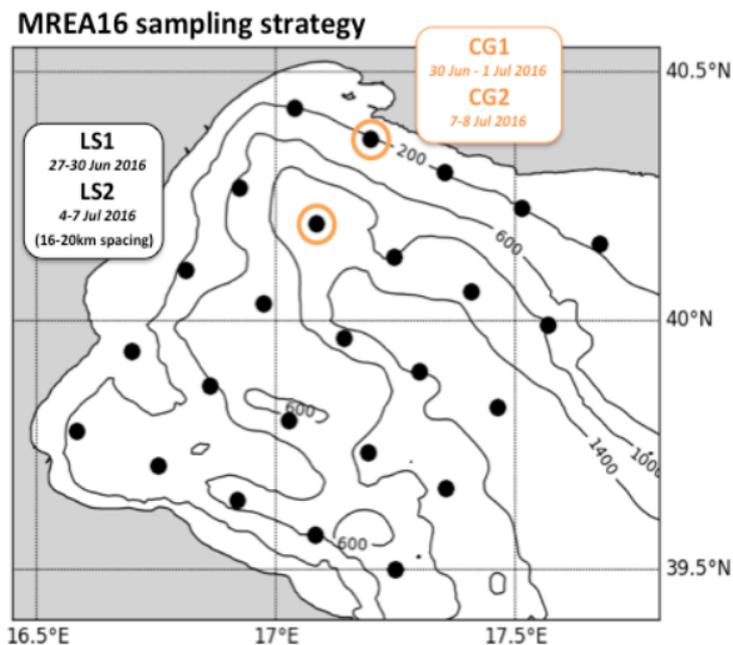


Figura 1.4: Strategia di campionamento applicata a MREA16 nel Golfo di Taranto

Sulla base di MREA14 è stato messo in atto lo stesso esperimento ma in estate (Giugno-Luglio 2016) piuttosto che in autunno osservando i possibili cambiamenti nella circolazione delle correnti. Inoltre il classico campionamento che si avvaleva di sonde CTD è stato integrato con misure di correnti rilevate da un ADCP montato a scafo. Con questo strumento si può validare i risultati prodotto dalla tecnica di analisi oggettiva che utilizza i dati CTD. L'analisi condotta sulla circolazione ha svelato la possibile presenza delle strutture della sottomesoscala che possono essere risolte attraverso uno schema di campionamento ad alta risoluzione. Per quanto riguarda la larga scala MREA16 ha mostrato la presenza di un gyre ciclonico che persiste durante l'estate, contrariamente a MREA14 che ha individuato un gyre anticiclonico autunnale. La presenza di questa di circolazione opposta è probabilmente connessa:

- all' impatto della Western Adriatic Coastal Current (WACC).

- all'effetto del Northern Ionian Sea outflow–inflow system nelle diverse stagioni.
 - al forzante atmosferico locale [9].
5. MREA17: è l'ultima campagna effettuata e si è svolta al largo di La Spezia dal 27 al 29 di Settembre 2017. In concomitanza di MREA17 ha avuto luogo anche LOGMEC17 (Long Term Glider Mission for Environmental Characterization) supervisionata dal CMRE, organo di ricerca della Nato Underwater Research Centre. Gli obiettivi di LOGMEC17 erano quelli di condurre uno studio sulla variabilità e predittibilità per quanto riguarda l'acustica in campo oceanografico. L'obiettivo principale di MREA17 invece, era quello di trovare la procedura ottimale per estrapolare dati di telerilevamento della superficie combinando misurazioni in situ e da remoto. Per quanto riguarda la parte acustica l'attenzione maggiore era rivolta al collezionamento delle fluttuazioni di energia dovute alla variabilità dell'ambiente tramite l'ausilio di mooring e gliders. MREA17 è la campagna di misurazione che ha fornito i dati per l'analisi ad alta ed altissima risoluzione proposta in questa tesi.

1.5 Obiettivi della Tesi

Gli obiettivi della presente tesi si riassumono in:

1. *partecipare alla raccolta dati*: contribuire all'acquisizione dati a bordo dell'imbarcazione deputata.
2. *Misurare la mesoscala e la submesoscala in una regione del Mar Ligure*: ovvero esplorare l'area di mare prescelta al fine di trovare evidenze sulla presenza di strutture di mesoscala e sottomesoscala applicando un campionamento annidato a scala risolutiva sempre maggiore.
3. *analizzare i campi termodinamici di temperatura (T), salinità (S) e densità (σ) a diverse risoluzioni*: attraverso la tecnica dell'analisi oggettiva dei campi su griglia uniforme e studiare le scale che emergono dalle varie strategie di campionamento.

Capitolo 2

CAMPIONAMENTO E STRUMENTI DI MISURA

Nel presente capitolo verrà presentata la strategia di campionamento adottato durante MREA17 e la strumentazione utilizzata per collezionare i dati.

2.1 Area di studio

L'area di svolgimento di MREA17 si colloca sul ciglio della piattaforma continentale (fig.2.1) della parte orientale del bacino ligure che, insieme a quello ligure-provenzale, fa parte dell'area più settentrionale del Mediterraneo Occidentale. Dal punto di vista delle correnti il Mar Ligure è interessato da una circolazione ciclonica e risente sia delle correnti superficiali che di quelle intermedie. Le prime sono condizionate dalla Modified Atlantic Water (MAW) proveniente dall'Oceano Atlantico e passante per lo stretto di Gibilterra mentre le seconde sono influenzate generalmente dalla Levantine Intermediate Water (LIW) che ha origine nel bacino orientale del Mediterraneo. Più in particolare la corrente superficiale che transita per il bacino ligure orientale prende il nome di Eastern Corsica Current (ECC) mentre la corrispondente corrente intermedia è data dalla confluenza dell'ECC e della Western Corsica Current (WCC) che insieme contribuiscono ad alimentare la circolazione ciclonica del Golfo di Genova [16]. Da [3] emerge che la ECC è il proseguimento della Tyrrhenian Current (in fig.2.2 indicata con il simbolo 3d) caratterizzata da un'alta energia in inverno e primavera ma che diminuisce considerevolmente in estate ed autunno. Gli stessi autori riportano che la variabilità è dovuta alle diverse condizioni termocline tra il Mar Tirreno e quello Ligure. Si ha che, in risposta al raffreddamento del Mar Ligure attribuito al vento di Maestrale [2] e alla conseguente perdita di calore, un flusso stagionale di acqua calda proveniente dal Mar Tirreno aumenta per riequilibrare il bilancio di calore della colonna d'acqua.

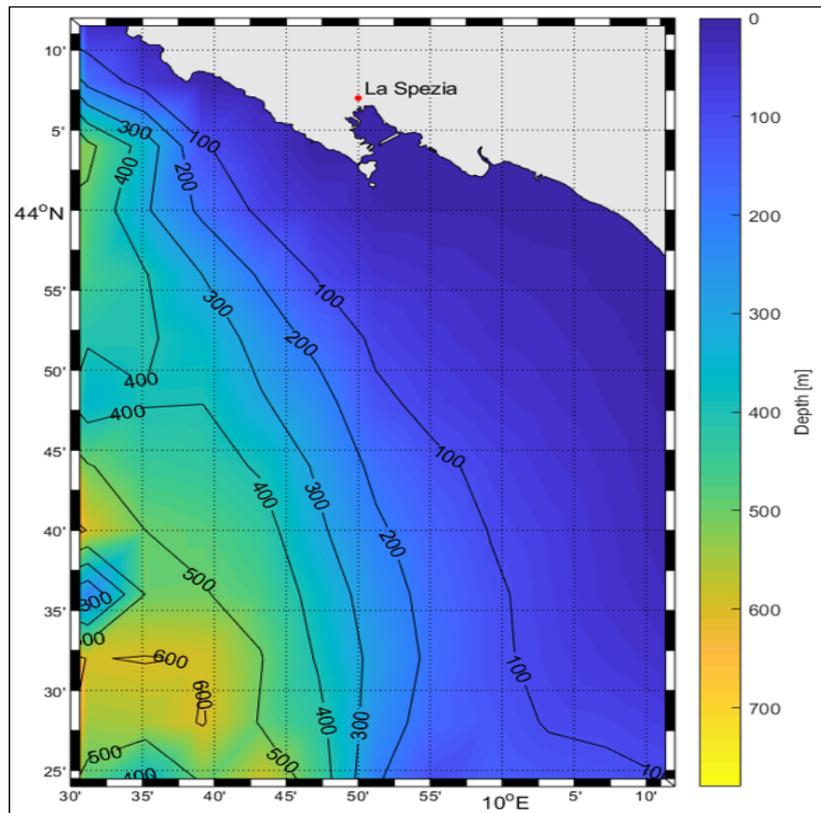


Figura 2.1: *Batimetria della porzione del Mar Ligure antistante il Golfo di La Spezia segnalata con il puntino rosso.*

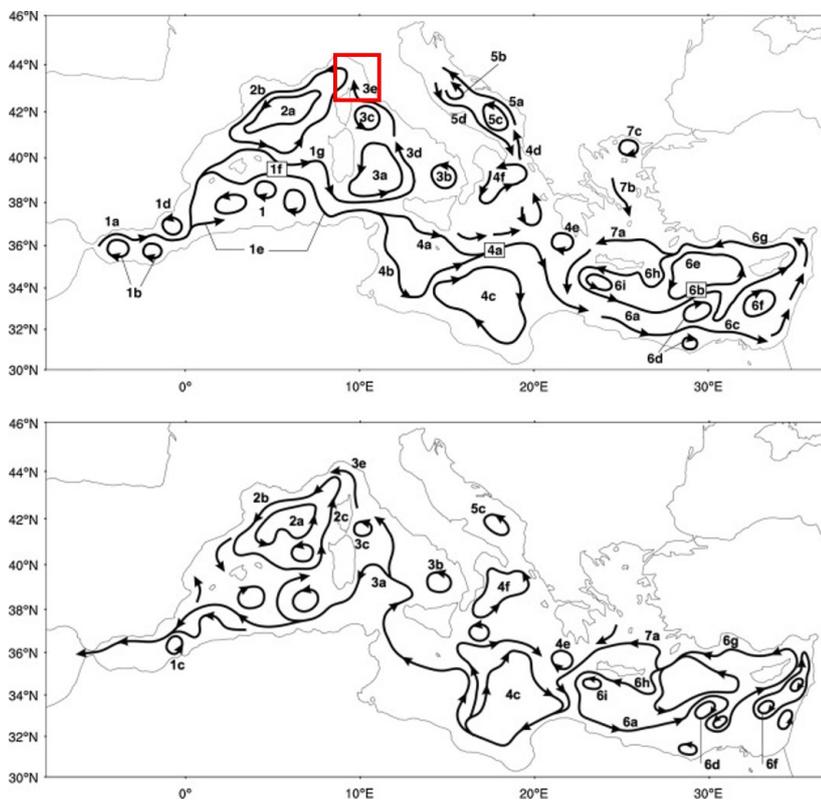


Figura 2.2: *Schema della circolazione media superficiale (in alto) e intermedia (in basso). La ECC e la WCC sono identificate con 3e e 2c [16].*

2.2 Strategia di campionamento

La zona di mare dove effettuare il monitoraggio è stata scelta sulla base delle precedenti esperienze che hanno messo in luce l'elevato dinamismo dell'area che, inoltre, è in una posizione strategica per quanto riguarda il traffico marittimo in generale. Nonostante nel capitolo precedente sia stato espresso il concetto di campionamento adattivo come metodo da usare in una strategia di REA, in MREA17 non è stato applicato, si è usato invece un campionamento in stile classico identificabile con l'appellativo di *lawnmower*; proprio come un tagliaerba segue un percorso a scalini come mostrato dalla fig.2.3. Come riporta [15] infatti, non è ancora chiaro se un campionamento sinottico in stile classico sia una strategia peggiore rispetto ad un campionamenti adattivo. MREA17

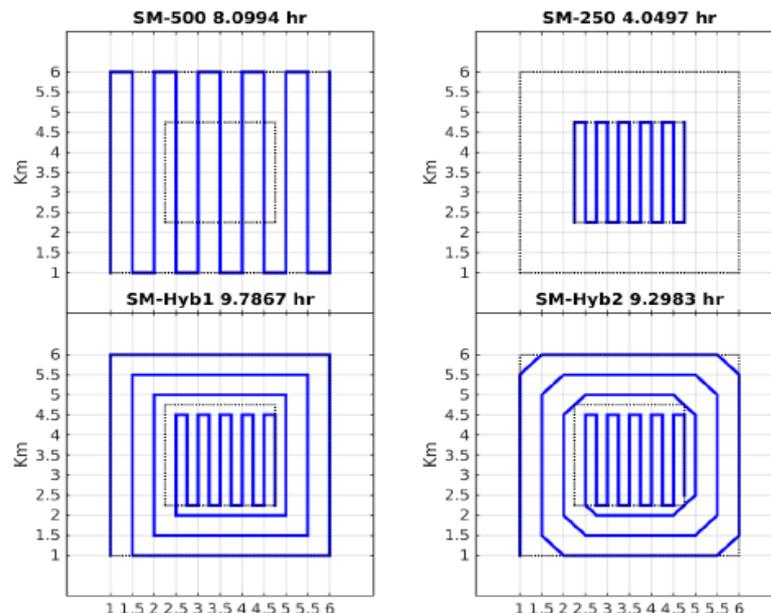


Figura 2.3: Percorso ipotetico che CRV Leonardo avrebbe potuto seguire per collezionare SM500 e SM250. Nella metà superiore della figura è riportata una strategia singola per ognuna delle due campagne mentre nella metà inferiore un strategia ibrida in due varianti che misurano una lunghezza complessiva di 72.5km (sinistra) e di 69km (destra).

si struttura in tre campagne, ciascuna ad una scala di risoluzione differente, il tutto pensato in modo da effettuare un campionamento sinottico che riuscisse a collezionare le strutture della mesoscala e della sottomesoscala e che ottimizzasse il tempo in mare riducendo il numero di virate. La mesoscala è visibile già con la scala risolutiva più bassa ovvero quello che da ora in poi chiameremo Large Scale (LS). LS è iniziata la sera del giorno 27 Settembre 2017 (21:38 UTC) ed è terminata a metà pomeriggio del 29 Settembre 2017 (16:33 UTC), ha permesso di campionare 49 stazioni distanti l'una dall'altra circa 2500m ed è stata condotta dal RV Aretusa dell'Istituto Idrografico della Marina (IIM). Così facendo alla velocità di 3 nodi è stata coperta un'area di 15km².

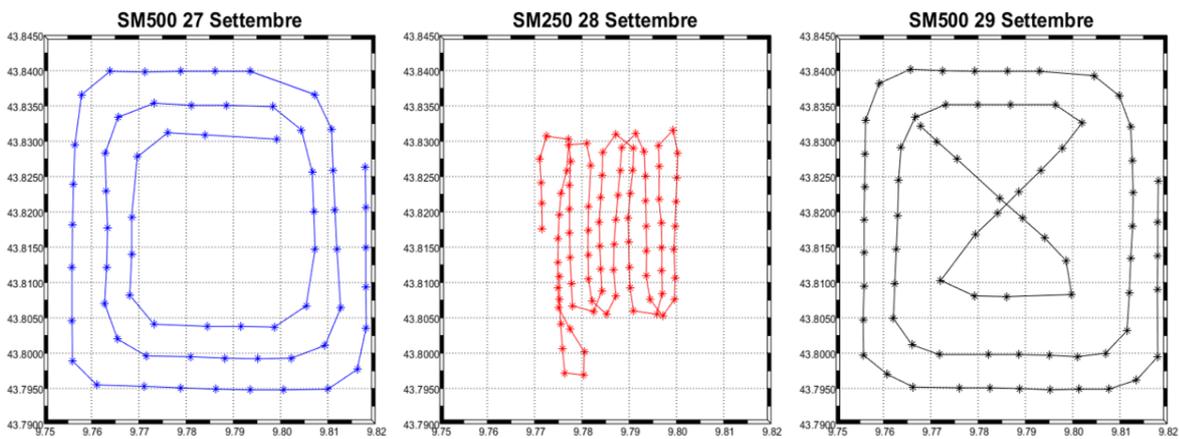


Figura 2.4: Campagne condotte da CRV Leonardo, partendo da sinistra SM500, SM250 e la replica di SM500.

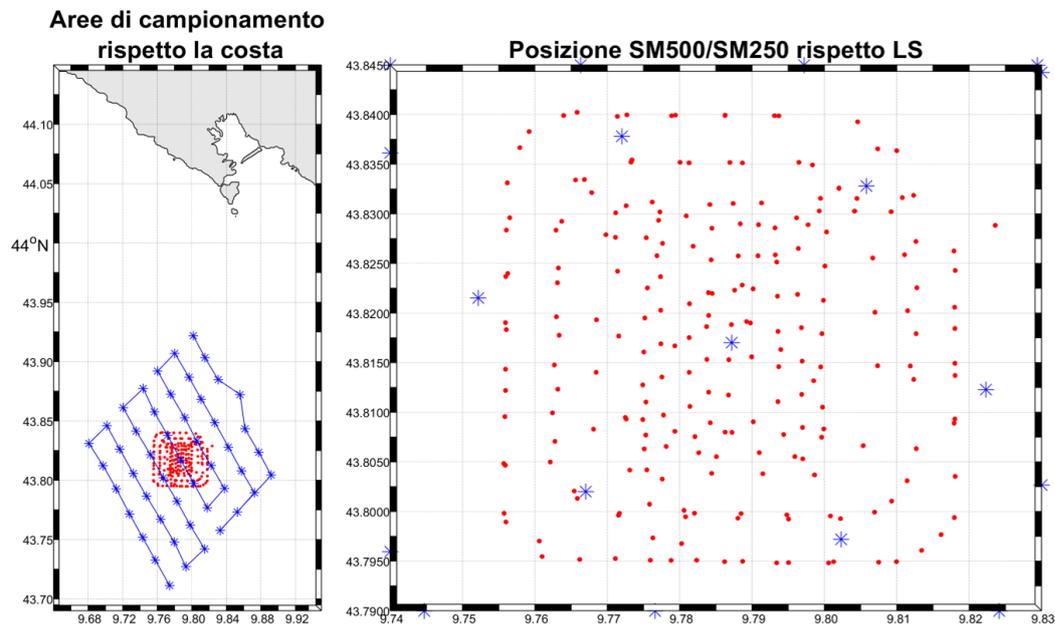


Figura 2.5: Nell'immagine di sinistra è mostrata l'area di campionamento complessiva delle operazioni condotte sia da RV Aretusa che da CRV Leonardo. A destra è proposto un'ingrandimento dell'area di campionamento di CRV Leonardo. In blu le stazioni relative a LS, in rosso quelle appartenenti a SM.

Per campionare la sottomesoscala è stato necessario adottare un campionamento che considerasse scale a risoluzione maggiori come quelle battute dal CRV Leonardo della NATO. In questo caso si parla di Small scale a 500m e a 250m (da ora in poi SM500 e SM250) di risoluzione intese come la distanza che intercorre tra due stazioni (fig.2.3). La strategia finale adottata è quella rappresentata del riquadro in basso a destra della fig.2.3 denominata SM-Hyb2. Durante la giornata del 27 Settembre il CRV Leonardo ha collezionato dati relativi alla porzione a spirale di SM-Hyb2 che identifica SM500 ovvero la campagna a scala intermedia. Il giorno successivo invece è stato impiegato per la SM250 e quindi la parte interna del percorso ibrido. L'ultimo giorno di MREA17, il 29 Settembre, è stato dedicato al compimento di una replica di SM500. La strategia di RV Aretusa si intersecava sia spazialmente che temporalmente, con quella di CRV Leonardo, con lo scopo di avere misurazioni a risoluzione diverse compiute nello stesso tempo e nella stessa zona. ¹

2.3 Strumentazione impiegata

Per il campionamento della larga scala sono stati impiegati una sonda CTD e due ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Il profilatore CTD è della casa produttrice Idronauts, in particolare della tipologia OCEAN SEVEN 316 la cui caratteristica principale è quella di permettere la visualizzazione in tempo reale di ciò che registra. In questo caso oltre a conduttività, pressione e temperatura la sonda era dotata del sensore per l'ossigeno disciolto. L'ADCP è uno strumento che misura la velocità della corrente tramite onde acustiche avvalendosi dell'effetto Doppler. In particolare funziona inviando delle onde acustiche a frequenza costante nell'acqua, nel momento in cui incontrano il particolato in sospensione rimbalzano e vengono riflesse indietro verso lo strumento. A questo punto entra in gioco l'effetto Doppler, se la particella che viene colpita dal fronte d'onda è in fase di allontanamento dallo strumento l'onda riflessa avrà una frequenza minore rispetto a quella incidente, viceversa se invece si sta avvicinando la frequenza riflessa sarà maggiore. Tramite lo spostamento doppler, dato dalla differenza tra le frequenze emessa e ricevuta, l'ADCP è in grado di calcolare la velocità con cui si muovono le particelle e quindi le correnti d'acqua. Dal momento che più una particella è lontana e più tempo l'onda acustica impiega per raggiungerla, il profiler, misurando il tempo necessario per il rimbalzo delle onde e lo spostamento Doppler, è in grado di misurare la velocità corrente a diverse profondità con ogni serie di segnale acustico inviato. Le onde sonore che colpiscono particelle lontane dal profiler richiedono più tempo per tornare indietro rispetto alle onde che colpiscono da vicino.

¹Questo è il motivo per cui si è voluto effettuare un campionamento sinottico.



Figura 2.6: A sinistra l'ADCP, si noti le quattro teste arancioni che identificano il punto di emissione del segnale acustico. A destra la sonda CTD Idronauts montata nella rosetta.

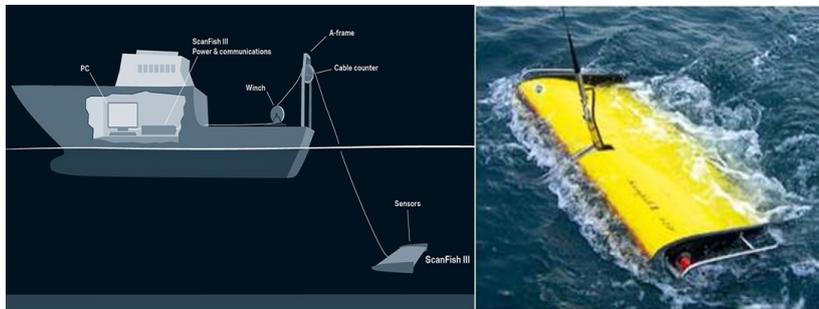


Figura 2.7: A sinistra è mostrata la modalità con cui è stato utilizzato lo scanfish durante MREA17, ovvero per traino da parte di CRV Leonardo. A destra il ROTV Scanfish Mk II nel momento del recupero.

Misurando il tempo necessario per il rimbalzo delle onde e lo spostamento Doppler. RV Aretusa è stata equipaggiata con un ADCP più potente da 600KHz che misurava fino a 30m di profondità ed uno a frequenza minore da 150kHz montato a scafo che operava tra i 4 e i 350m.

Per le campagne a più alta risoluzione non è stato possibile adoperare una sonda CTD. Dal momento che per avere una buona risoluzione sarebbero state necessarie circa 300 stazioni il campionamento non sarebbe più stato sinottico e quindi non avrebbe rispettato gli standard di REA. A tal fine, per non rinunciare al fitto campionamento ipotizzato per osservare la sottomesoscala, è stata impiegata la piattaforma di campionamento chiamata ScanFish della casa EIVA. Tale dispositivo rientra sotto la categoria dei ROTV acronimo che sta per remotely operated towed vehicles ovvero un veicolo che viene trascinato e controllato da remoto. Lo Scanfish si è rivelato molto utile e comodo in termini di quantità di dati pervenuti per unità di tempo, la sua caratteristica principale è infatti la continuità di acquisizione dal momento che viene immerso in acqua fino al suo recupero.

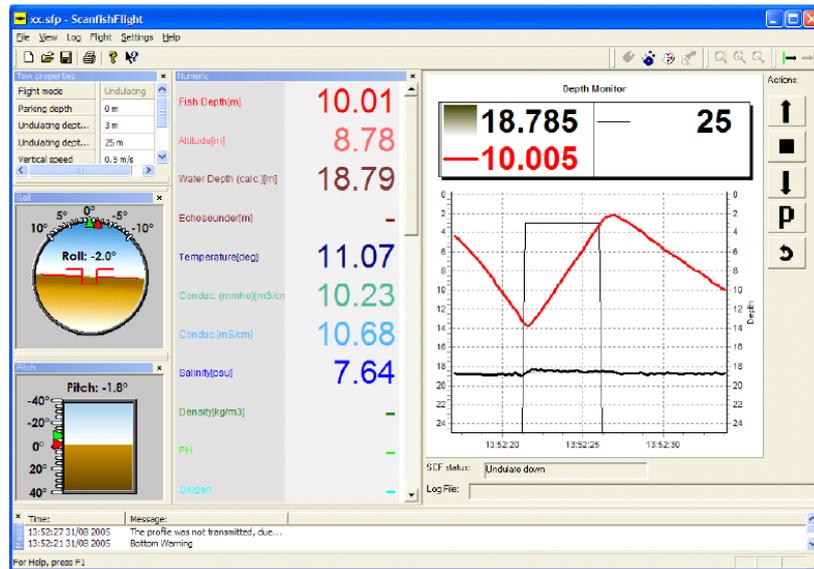


Figura 2.8: Tipica schermata del software per il controllo dello Scanfish, attraverso questa interfaccia è possibile visualizzare i dati in tempo reale e l'assetto del veicolo.

Può essere equipaggiato con molteplici strumenti in base ai requisiti richiesti, nel caso di MREA17:

- due sonde CTD seabird 49: allo stesso modo della sonda a bordo di RV Aretusa anche quelle sullo scanfish erano deputate a rilevare conduttività, temperatura e pressione.
- un sensore di ossigeno seabird 43.
- un sensore satlantic OCR a 4 canali di irradianza: grazie a questo sensore è stato possibile osservare come quattro diverse lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica penetrassero la massa d'acqua.
- un wetlabs eco puck che comprendeva, un sensore ottico a tre canali, uno per la chlorofilla e due per il backscatter a 400 nm e 700nm.

Lo scanfish viene agganciato ad un cavo elettromeccanico che permette sia la trasmissione dei dati in tempo reale sia la trazione nel momento in cui viene immerso in acqua. Grazie al suo sistema di controllo e ai flap che monta sulla parte terminale della sua carena, lo scanfish può compiere un'oscillazione tra la superficie e una profondità preventivamente designata disegnando il tipico andamento a dente di sega. In alternativa può essere posizionato ad una profondità o altitudine fissata. Per tutte queste caratteristiche lo scanfish si rivela essere un'ottima piattaforma di campionamento che offre costi ridotti per quantità di dati registrati [19].

In aggiunta all'attività dello scanfish sono state effettuate misurazioni utilizzate per l'ocean color ovvero veniva misurata la radiazione superficiale riflessa dai primi centimetri dell'acqua. A tal fine, contemporaneamente al traino del ROTV CRV Leonardo rallentava la sua velocità da 4 a circa 1 nodo al fine di consentire la misurazione.



Figura 2.9: *Acquisizione della radiazione superficiale riflessa con lo strumento ASD FieldSpec 4.*

La fig.2.9 mostra una tipica acquisizione di radiazione superficiale. Per effettuare questo tipo di rilievo sono necessari due operatori. Una volta avviato lo strumento (visibile al centro nella custodia beige) e collegato al pc che ha installato il relativo software il primo operatore (a sinistra) dà il via al secondo che tramite una pista recante il sensore fa una prima acquisizione su un materiale non riflettente (mattonelle grigia posta sulla bitta). Rilevato il 'bianco' si provvede rivolgendo la sensoristica verso la superficie dell'acqua con un angolo il più possibile uguale a 45° . Si ripete altre due volte in modo da minimizzare l'errore dato anche dalle paratie bianche della nave.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva delle attività svolte nella campagna.

Tabella 2.1: Riassunto attività MREA17

ID CROCIERA	PERIODO	INIZIO (UTC)	FINE (UTC)	TEMPO
LS	27-29/09/2018	21:38:15	16:33:32	1d18:54:27
SM500-1	27/09/2018	08:40:27	15:03:13	6:22:46
SM250	28/09/2018	09:48:58	14:35:53	4:46:55
SM500-2	29/09/2018	08:21:21	14:22:24	6:01:03

ID CROCIERA	RISOLUZIONE (m)	PIATTAFORMA	STRUMENTI	VARIABILI
LS	2500	CTD		P T S O SV
SM500-1	500	SF	CTD ECOPUCK CTD SATLANTIC	P T S SV O ρ P CHL P T S SV O ρ P R
SM250	250	SF	CTD ECOPUCK CTD SATLANTIC	P T S SV O ρ P CHL P T S SV O ρ P R
SM500-2	500	SF	CTD ECOPUCK CTD SATLANTIC	P T S SV O ρ P CHL P T S SV O ρ P R

Capitolo 3

ANALISI PROFILI

Nel presente capitolo verrà presentata l'analisi dei profili verticali medi riferiti a temperatura, salinità, clorofilla, ossigeno disciolto e irradianza. Successivamente sarà mostrato il diagramma TS utile nell'individuare la provenienza dei vari tipi di acque presenti nell'area di campionamento.

3.1 Bias correction e profili medi di T ed S

Da un'analisi preliminare che ha confrontato i profili verticali medi di salinità delle osservazioni CTD rispetto a quelle dello Scanfish è emersa la presenza di un bias. Come mostrato in fig.3.1 l'andamento della curva riferita al CTD è pressochè parallelo a quello dello scanfish e per buona parte ricade al di fuori da 2σ . Una possibile spiegazione di questo fenomeno è data da una errata calibrazione degli strumenti, rimane però da capire quale dei due sia quello impostato scorrettamente. Al fine di risolvere questo problema affinché ne fosse permesso l'utilizzo dei dati in particolare per la tecnica di analisi oggettiva riportata nel capitolo 4, è stato necessario decidere quale delle due piattaforme di campionamento fosse quella da inputare e si è giunti alla conclusione che il rilevamento scorretto fosse quello condotto dalla sonda CTD per via della comprovata meticolosità dei tecnici CMRE.

Per la risoluzione del bias in primis è stata calcolata la media per quanto riguarda le osservazioni del ROTV, successivamente tale procedura è stata applicata anche a quelle CTD con la differenza che in questo caso la media è stata conteggiata solo dai 50m di profondità in poi in quanto da questo limite in poi la variabilità è nettamente inferiore. A questo punto la differenza tra i valori medi è stata addizionata ad ogni singolo valore di salità delle osservazioni CTD. Il risultato finale di questa operazione, soprannominata *bias correction*, è visibile in fig.3.1 con la curva di colore blue che

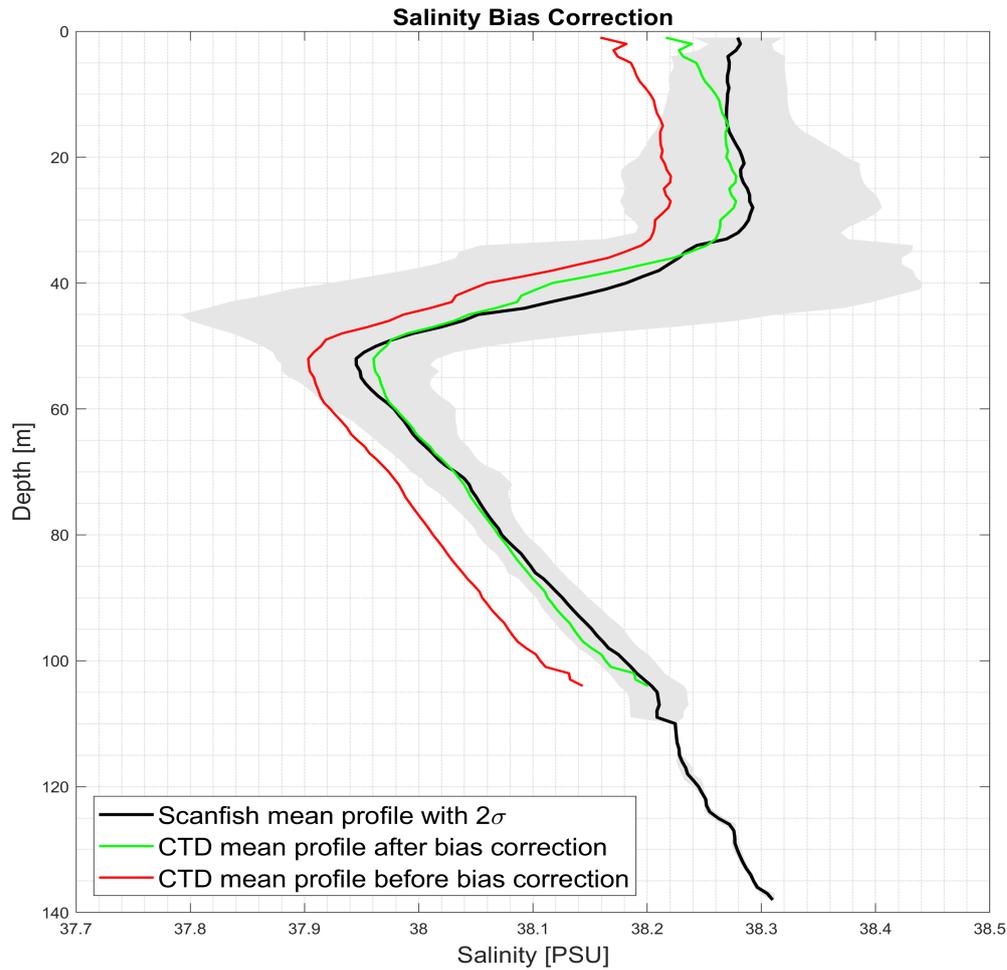


Figura 3.1: In figura è riportato il confronto tra il profilo di medio di salinità campionata dallo Scanfish (nero) mentre in rosso quella ottenuta dalla sonda CTD. In verde la correzione del bias di salinità.

ora ricade entro 2σ dal profilo Scanfish. Da questo momento in poi i valori di salinità relativi al CTD si intendono corretti.

I profili verticali medi sono mostrati in fig.3.2. Ciascun profilo medio è stato ricavato considerando la media aritmetica tra tutte le osservazioni su una griglia regolare verticale di 1m in un arco temporale di tre giorni. La struttura della temperatura (fig.3.2a), mostra uno strato non rimescolato che interessa i primi 5m successivamente tra la superficie e circa 20m di profondità si nota un rimescolamento relativamente accentuato. A seguito si ha l'inizio del termocline che però si esplica meglio a partire da circa 38-40m fino attorno ai 55m. Complessivamente si ha una variazione di circa 6.5°C .

Per quanto riguarda la salinità (fig.3.2b) presenta una struttura che mostra uno

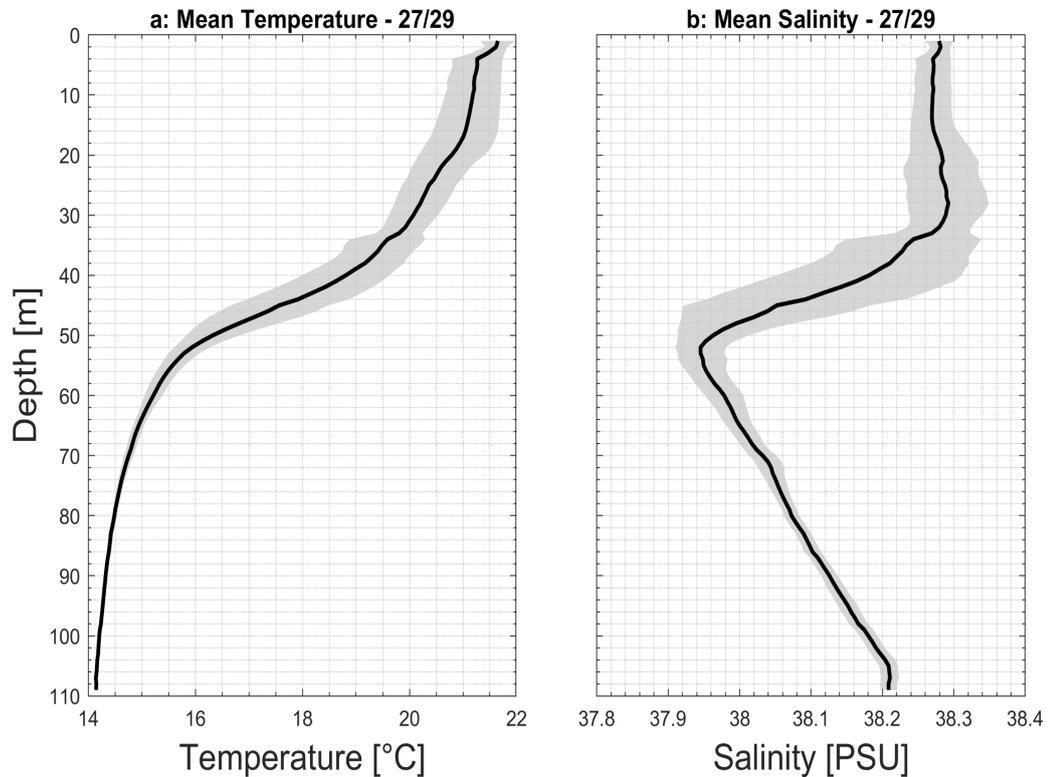


Figura 3.2: A sinistra è mostrato l'andamento medio della temperatura nell'intero periodo della campagna (a). A destra il relativo profilo verticale medio della salinità (b). L'area in grigio identifica la deviazione standard.

strato rimescolato nei primi 30m oscillando tra 38.26 e 38.3 PSU. Immediatamente dopo diparte l'alocline che raggiunge una profondità attorno poco maggiori dei 50m. A questo punto si ha un'inversione dell'andamento che dal minimo di salinità, circa 37.95 PSU, raggiunge i 38.2 PSU.

Per entrambi i profili verticali è chiaramente visibile come la variabilità sia molto più significativa nelle porzioni più superficiali piuttosto che in profondità ed in particolare a ridosso del termocline e alocline.

3.1.1 Variabilità media giornaliera: Temperatura e Salinità

La variabilità media giornaliera di temperatura e salinità è riportata nelle fig.3.3 e 3.4. Per la prima non si hanno variazioni significative se non nei primi 4m e all'inizio del termocline attorno ai 35m. Per quanto riguarda la superficie la variabilità può essere attribuita sia alla stabilità dello strumento nel momento in cui ha registrato la misura sia al fatto che questi profili descrivono una tipica situazione di fine settembre in cui

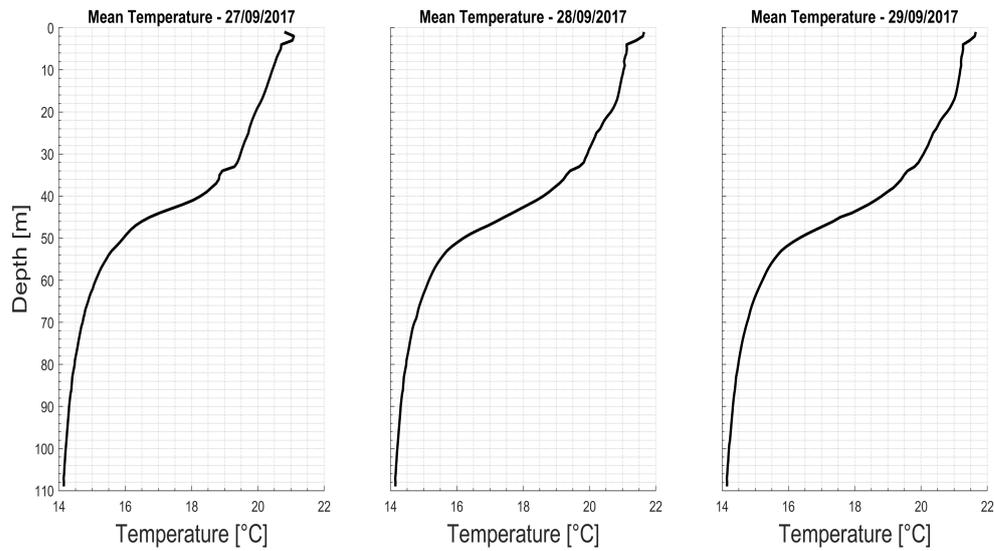


Figura 3.3: *Profili medi verticali di temperatura suddivisi in base alla giornata di campionamento.*

si sta formando lo strato di rimescolamento.

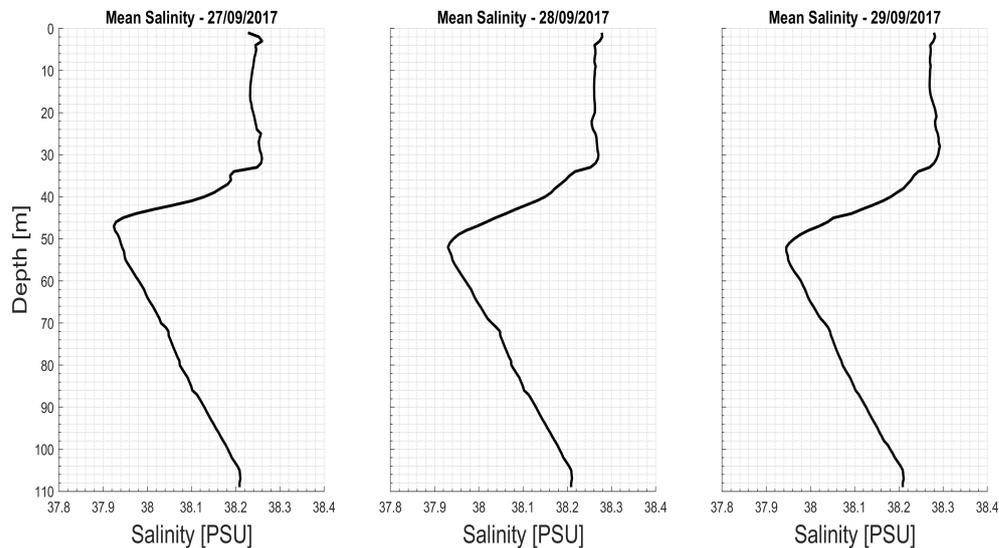


Figura 3.4: *Profili medi verticali di salinità suddivisi in base alla giornata di campionamento.*

Allo stesso modo della temperatura anche la salinità non presenta particolari differenze visibili nei profili verticali medi, lo strato di rimescolamento copre i primi 35m circa della colonna d'acqua lasciando il posto all'alocline che raggiunge il minimo di salinità rispettivamente di 37.92, 37.93 e 37.94 PSU attorno ai 45m.

3.2 Confronto tra scanfish e CTD

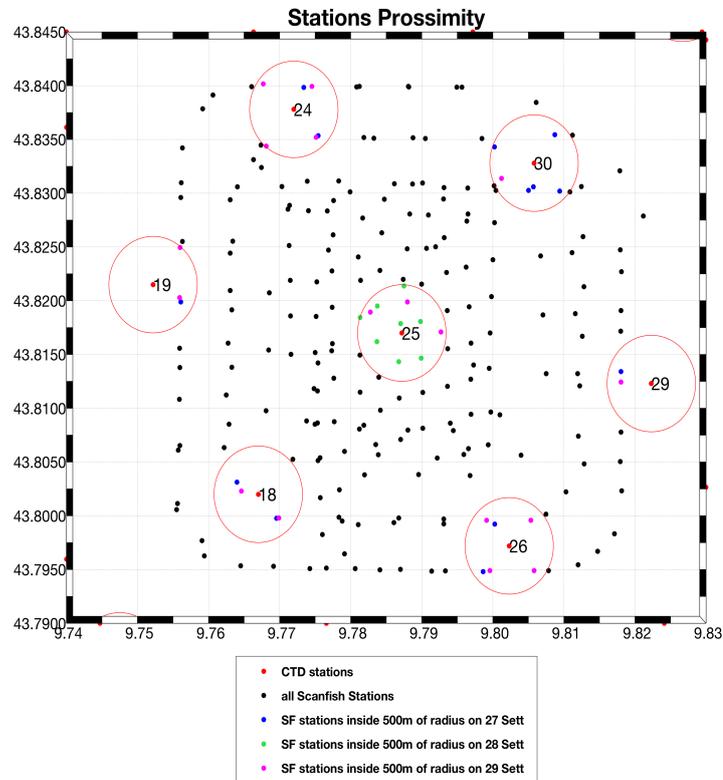


Figura 3.5: Sono visibili le sette stazioni CTD (punti rossi) che racchiudono una o più stazioni scanfish in un raggio di 500m (circonferenza rossa). In nero sono mostrate tutte le stazioni scanfish mentre con i colori blu, verde e magenta le stazioni scanfish compionate rispettivamente il 27, il 28 e il 29 settembre.

Nella fig.3.5 è riportata la posizione relativa di quelle stazioni CTD limitrofe al percorso di campionamento dello scanfish. In particolare si voluto studiare la variabilità dei profili dello scanfish rispetto alla stazione CTD più vicina in un raggio di 500m. Il motivo che ha spinto ad intraprendere un'analisi di questo tipo risiede nel fatto che stazioni molto vicine risultano essere state collezionate in tempi diversi pertanto, in questo modo, si può evidenziare come e quanto il fattore tempo potrebbe aver influito sulla variabilità di temperatura e salinità. Di tutte le stazioni CTD campionate solo sette presentavano stazioni scanfish all'interno del raggio designato e di queste solamente la stazione 30 risale al terzo giorno di campagna, tutte le altre sono state effettuate il secondo giorno (28 settembre).

Da questa indagine emerge una notevole variabilità della salinità oltre che un discreto rumore presente nei dati come mostrano le fig.3.6 e seguenti. Al termine dell'alocline

a circa 40-50m, si nota la presenza di un'oscillazione compresa tra 37.9 PSU e circa 38.02 PSU. L'aspetto in comune tra scanfish e CTD è la presenza di uno strato più o meno rimescolato che interessa i primi 20-25m. Rispetto alla salinità per la temperatura non si notano particolari variazioni da una stazione all'altra. Ciò che risalta è l'andamento della curva relativa al primo giorno di campagna per quanto riguarda lo scanfish. Nei profili che interessano questo giorno infatti la curva di temperatura si colloca a profondità minori rispetto ai rimanenti due giorni di attività in particolare si ha che per la stazione CTD 18,19 e 24 la profondità alla quale i profili si dividono è circa 40m (fig.3.6, fig.3.7a). Per le stazioni 26,29 e 30 da 40m metri si passa rispettivamente a 50, 65 e 50m (fig.3.8 e fig.3.9b). Un'altra caratteristica dei profili verticali di temperatura è la presenza di un andamento a gradini che interessa i primi 35m circa e che vede appunto intervallarsi zone a variabilità quasi nulla con altre in cui si passa da 21.5 a 20.5°C identificando un termocline più piccolo prima di quello vero e proprio. In un raggio di 500m dalla stazione CTD 18 (fig.3.6a) sono presenti quattro stazioni scanfish, due campionate il 27 settembre, colorate di blu e le rimanenti due il 29 settembre evidenziate con il magenta. E' ben visibile la variazione di salinità che interessa la parte terminale dell'alocline tra i 50 e i 60m sia per i dati CTD sia per le stazioni scanfish. Per quanto riguarda i primi 35-40m si nota una variazione di salinità alla stessa profondità a cui la temperatura varia di un grado. Allo stesso modo si ha uno strato più omogeneo di salinità dove la variazione di temperatura è pressochè nulla. La fig.3.6b, mostra la situazione che si ha attorno alla stazione CTD 19. Gli andamenti di questa stazione sono piuttosto simili a quelli della stazione 18 con l'unica differenza che conta tre stazioni scanfish al posto di quattro. Ciò che mostra la fig.3.7a sembra quasi una ripetizione delle precedenti anche se con qualche lieve differenza. Al di là del numero di stazioni scanfish che in questo caso arrivano fino a sei, la differenza principale è collocabile nella zona dello strato di rimescolamento sia per la salinità che per la temperatura. Per quanto riguarda il profilo CTD, l'andamento della salinità è caratterizzato da una variazione quasi nulla solo nei primi 10m circa, dettaglio che condivide con la temperatura; diminuendo leggermente la profondità a cui inizia l'alocline e il termocline. Le stazioni scanfish interessate propongono un andamento diverso sia se confrontate tra loro sia se rapportate con il profilo CTD. La curva blu è quella che mostra un andamento più differente dalle altre, a circa 30m indica uno strato omogeneo con salinità di 38.3PSU quando le curve magenta e rossa testimoniano una variazione non indifferente.

La figura fig.3.7b si riferisce alla venticinquesima stazione CTD che, come illustra la fig.3.5 è quella al centro di tutta l'area di campionamento e all'interno dei suoi 500m di raggio racchiude il maggior numero di stazioni scanfish, undici per la precisione. La peculiarità di questa stazione è che la maggior parte delle stazioni scanfish presenti sono

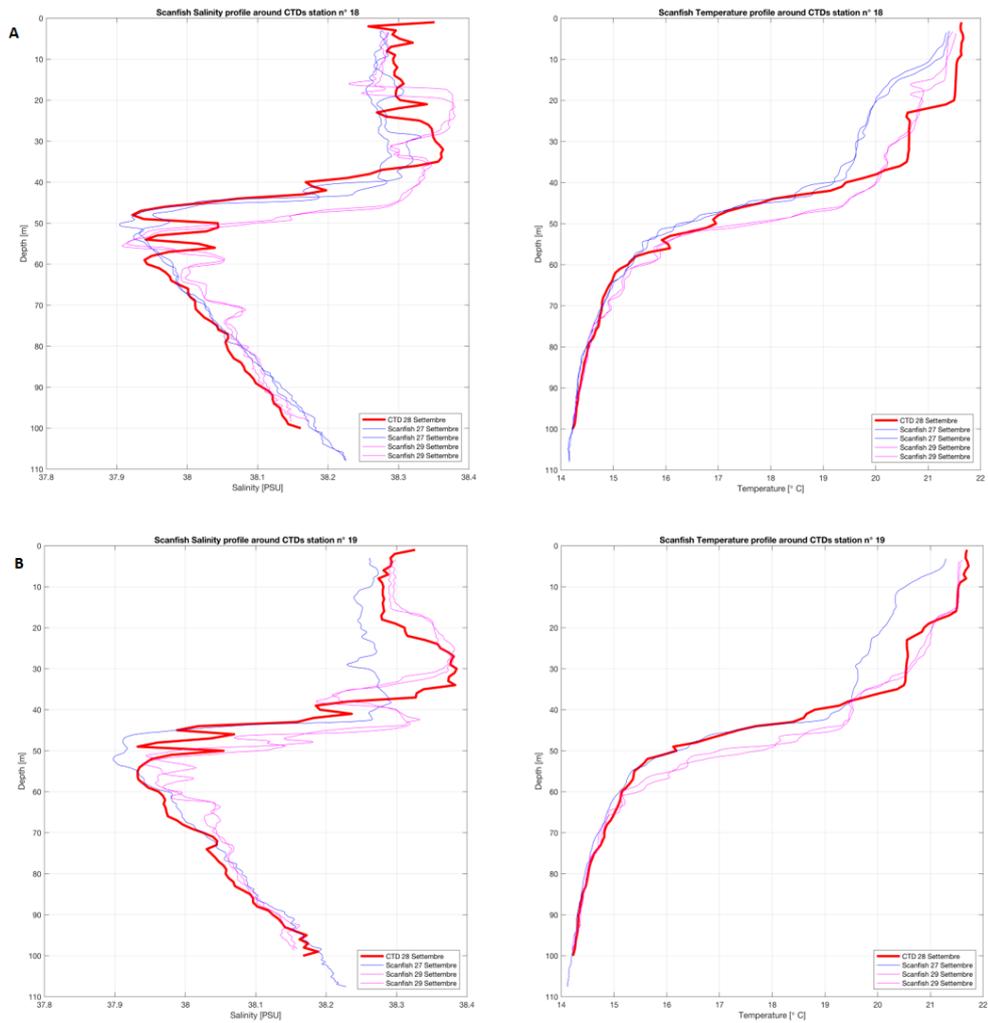


Figura 3.6: Andamento di salinità (sinistra) e temperatura (destra) per quanto riguarda le stazioni CTD 18(a) e 19(b) e le relative stazioni scanfish.

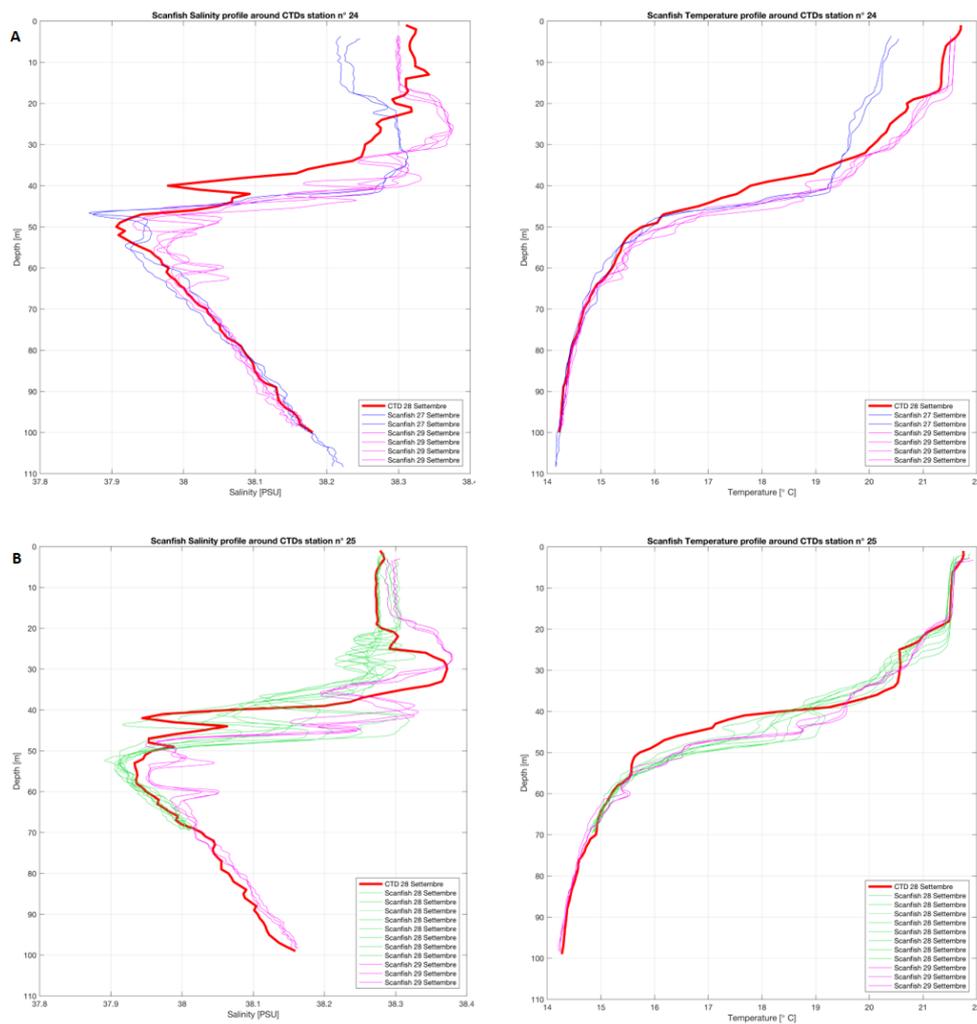


Figura 3.7: Andamento di salinità (sinistra) e temperatura (destra) per quanto riguarda le stazioni CTD 24(a) e 25(b) e le relative stazioni scansfish.

relative al secondo giorno di monitoraggio mentre le poche rimaste al terzo ed ultimo giorno, non presenta infatti alcun riferimento al 27 settembre. Dal momento che in un unico grafico sono stati accorpate dodici profili verticali (considerando anche quello CTD) si ha una notevole confusione ma nonostante ciò si delinea in modo sufficientemente chiaro l'andamento verde (28 settembre) da quello magenta (29 settembre). Procedendo dalla superficie verso profondità maggiori, il profilo di salinità del CTD e quelli dello scansfish sono accumulati dalla chiara presenza dello strato di rimescolamento che giunge fino a circa 25m. A questo punto le curve si biforcano, quella rossa (CTD) e quelle magenta (scansfish 29 settembre) assumono un andamento simile tra loro, crescendo dapprima per poi decrescere e formare l'alocline. Le curve verdi invece (scansfish 28 settembre) descomono subito per poi cambiare pendenza in concomitanza dell'alocline. Al di sotto dei 70m circa di profondità variazioni significative tra gli

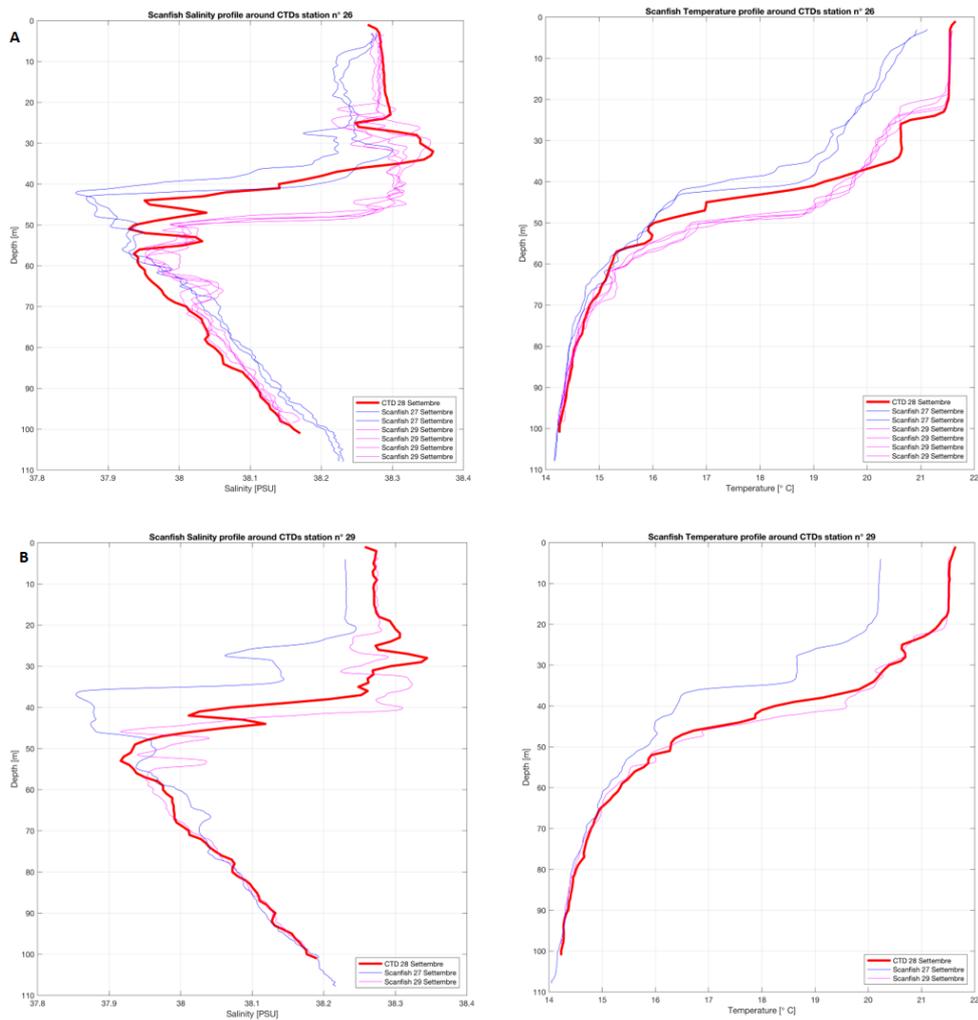


Figura 3.8: Andamento di salinità (sinistra) e temperatura (destra) per quanto riguarda le stazioni CTD 26(a) e 29(b) e le relative stazioni scanfish.

andamenti delle varie curve non si denotano più (vedi fig.3.2). Gli andamenti di temperatura presentano un basso livello di variabilità dal momento che si sovrappongono quasi del tutto. Si nota comunque la presenza del termocline minore tra i 20 e 30m.

Attorno alla stazione CTD 26 sono presenti sei stazioni scanfish di cui due effettuate il 27 settembre e le altre 29 settembre (fig.3.5). Per la salinità (fig.3.8a) il profilo CTD ricade nelle considerazioni precedenti mentre i profili relativi allo scanfish suggeriscono che tra il primo e l'ultimo giorno è presente una discreta variabilità ben visibile dal gap che intercorre tra i due aloclini pari a circa 10m e 0.1PSU. Anche per la temperatura (fig.3.8b) si nota con chiarezza la differenza tra le stazioni scanfish campionate a distanza di un giorno; partendo da 50m di profondità in direzione della superficie i tre andamenti non sono più sovrapposti riportando temperature differenti di circa 1°C. Situazione simile a quella della stazione CTD 26 è quella mostrata il fig.3.8b relativa alla

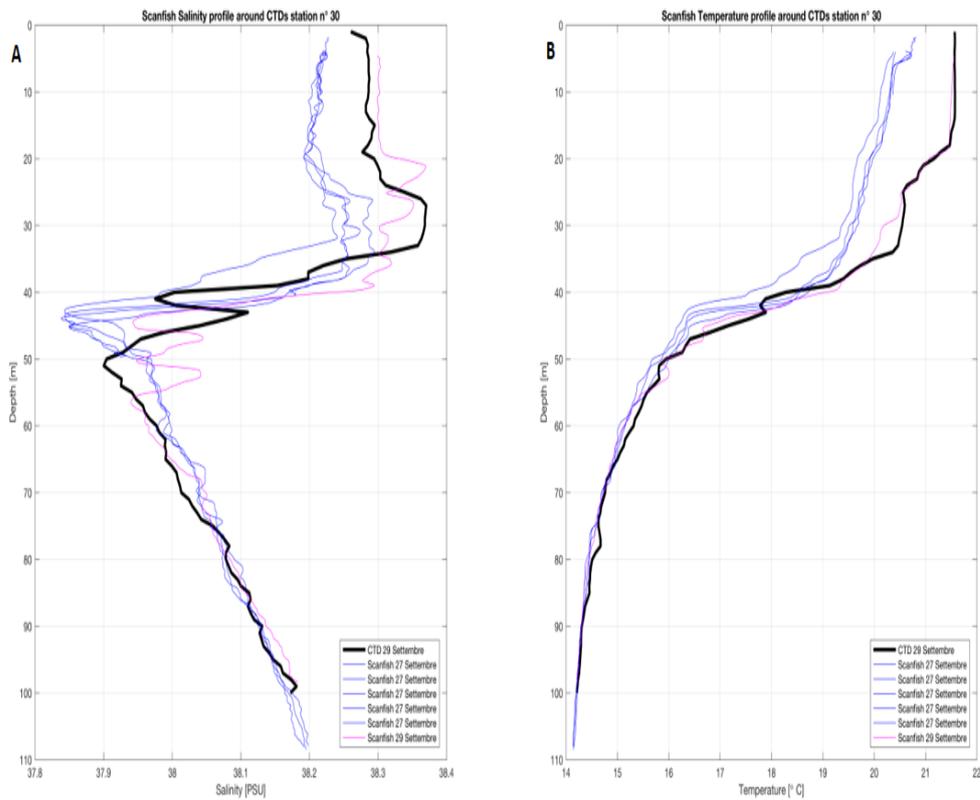


Figura 3.9: *Andamento di salinità (a) e temperatura (b) per quanto riguarda la stazione CTD 30 e le relative stazioni scanfish.*

stazione CTD 29 anche se conta solo di due stazioni. In particolar modo si evidenzia la curva blu (27 settembre) che assume un andamento notevolmente diverso degli altri due sia per quanto riguarda la salinità sia per la temperatura. La fig3.9 presenta la condizione che caratterizza l'ultima delle sette stazioni CTD contigue a quelle scanfish (vedi fig.3.5). A differenza delle precedenti sei questa è l'unica ad essere stata campionata il 29 settembre. Anche in questo caso si nota che la curva blu non si sovrappone con le altre nei primi 40m per entrambe le variabili studiate.

3.3 Ossigeno disciolto e Clorofilla

Nella fig.3.10 sono riportati i profili verticali medi di ossigeno disciolto (a) e della clorofilla (b) per i tre giorni della campagna. La seconda è riferita solamente ai dati collezionati dallo scanfish dato che la sonda CTD non era equipaggiata con la sensoristica adeguata. Per quanto riguarda l'ossigeno disciolto i valori massimi si raggiungono tra i 30 e i 60m (5-5.2 ml/L) e decrescono più velocemente dopo i 70m. Attorno ai

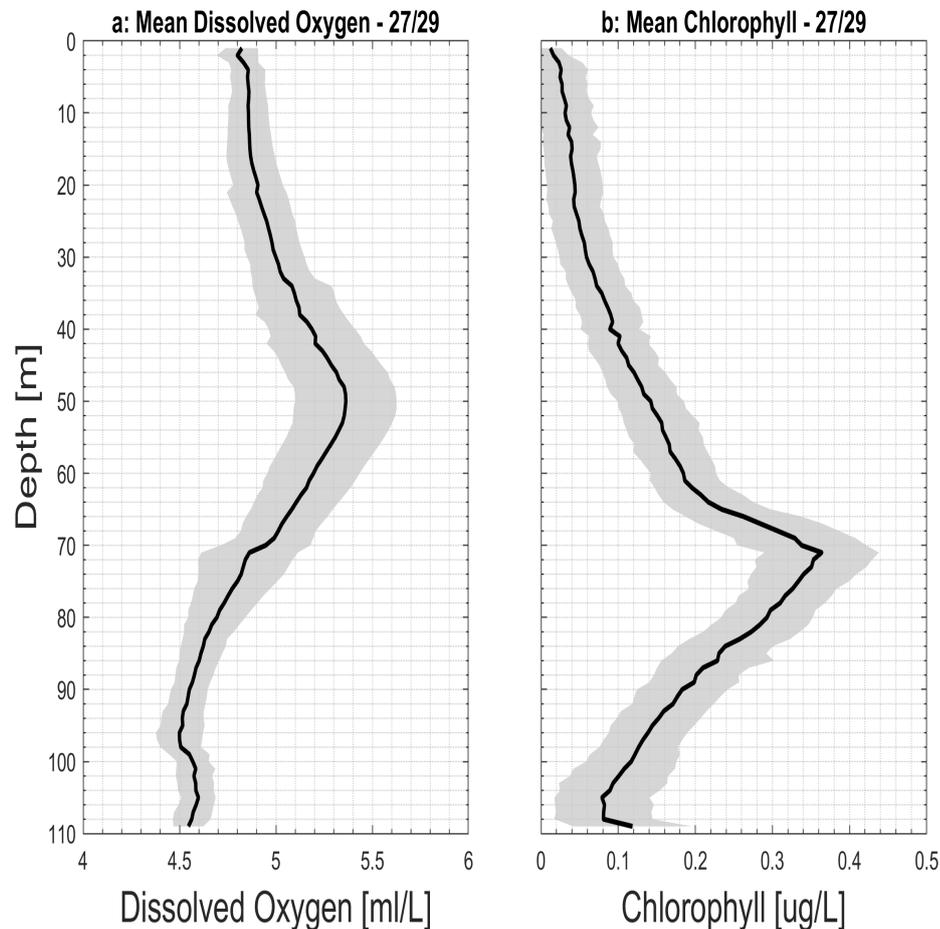


Figura 3.10: *Profilo medio di ossigeno disciolto(sinistra) e clorofilla(destra)*

100m si nota un cambio di pendenza e un incremento dei valori che termina con una concentrazione di circa 4.5 ml/L. Come dice [21] i valori massimi di concentrazione di ossigeno disciolto sono relazionati alla fotosintesi effettuata dal fitoplancton e dalla formazione del termoclino. L'ossigeno generato dalla fotosintesi penetra in profondità per la formazione del termoclino dove raggiunge i valori massimi dal momento che gli scambi verticali sono difficili. La clorofilla presenta il massimo sottosuperficiale alla profondità di 70m circa con un valore pari a 0.36ug/L mentre il minimo (0.09ug/L) si trova a 110m. Man mano che l'estate evolve, i flussi di nutrienti nella zona fotica e la concentrazione di clorofilla superficiale diminuiscono portando alla formazione di picco sottosuperficiale di quest'ultima [10]. Gli stessi autori hanno osservato anche che a causa di una circolazione ciclonica il Mar Ligure è caratterizzato da fenomeni di upwelling, in particolare è stata osservata la presenza di un'area a più alta densità correlata ad elevati valori di nutrienti e quindi di clorofilla.

3.3.1 Variabilità media giornaliera: Ossigeno

Con la fig.3.11 si vuole mostrare la variazione temporale, dal primo all'ultimo giorno di MREA17, per quanto riguarda l'ossigeno disciolto. Non si notano differenze significative nell'andamento tranne che attorno ai 35m circa dove è presente una piccola variazione positiva che si riduce passando dal primo al secondo giorno per poi annullarsi quasi completamente nel terzo. Situazione simile si ha anche dai 70m in poi, la situazione del 29 settembre infatti mostra una diminuzione più rapida rispetto alle prime due giornate di attività, è in questo caso infatti che si raggiunge il minimo di concentrazione di ossigeno (4.5ml/L) per poi risalire leggermente tra 100 e 110m. Per tutti e tre i giorni si ha il massimo sottosuperficiale compreso tra 45 e 50m di profondità.

3.3.2 Variabilità media giornaliera: Clorofilla

Nel caso della clorofilla le differenze sono più visibili. Innanzitutto il profilo del primo giorno presenta un andamento con una variabilità maggiore per i primi 65m. In questa porzione della colonna d'acqua i tre profili sono accumulati da valori di concentrazione inferiori a 0.1ug/L identificabili con picco all'altezza dei 40m. La differenza sostanziale si ha però alla profondità (70m) del massimo sottosuperficiale, ben pronunciato per il terzo giorno (0.36ug/L) e più smussato per i due precedenti (rispettivamente tra 0.30-0.31ug/L e 0.31-0.32ug/L). Per la decina di metri successiva si osserva un andamento pressochè costante per il 27 e il 28 settembre mentre una variazione più repentina per il 29 settembre.

3.4 Irradianza

In fig3.13 sono riportati i profili medi verticali riferiti ai tre giorni di campagna relativi alla radiazione elettromagnetica che penetra nell'oceano. Tale radiazione è stata misurata a quattro lunghezze d'onda differenti, in particolare:

- 412.5nm che corrisponde al viola
- 443.2nm corrispondente al viola-blu
- 490.2nm identificabile con il giallo-verde
- 555.3nm che è la lunghezza d'onda del giallo.

Così facendo è stata coperta quasi tutta la gamma cromatica.

Dai profili emerge che, come già osservato, la variabilità maggiore è collocata nel tratto più superficiale delle curve mentre è pressoché nulla da circa 50m in poi. Dal

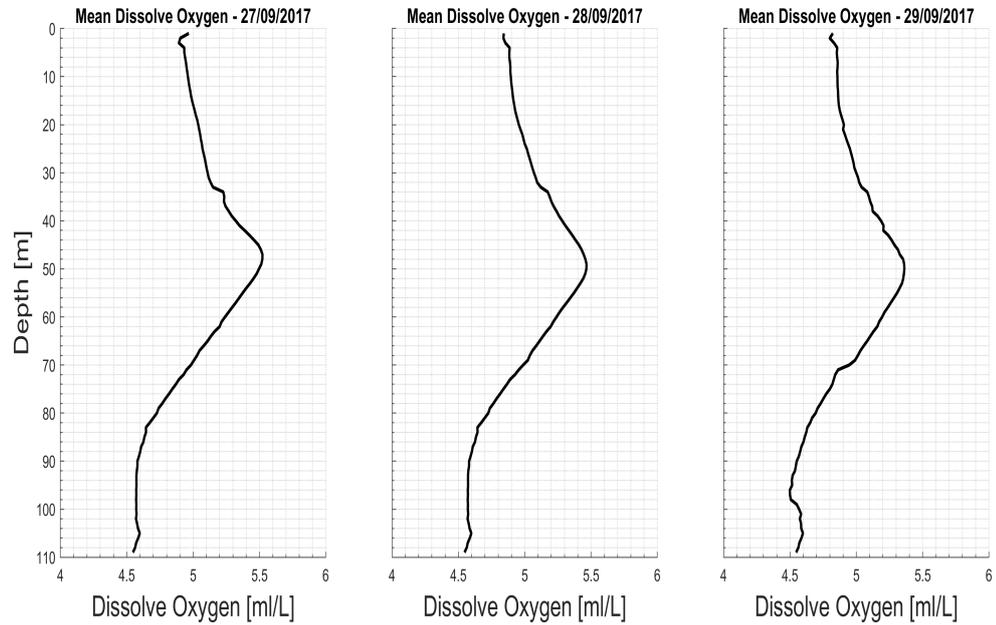


Figura 3.11: *Profili medi verticali di ossigeno disciolto suddivisi in base alla giornata di campionamento.*

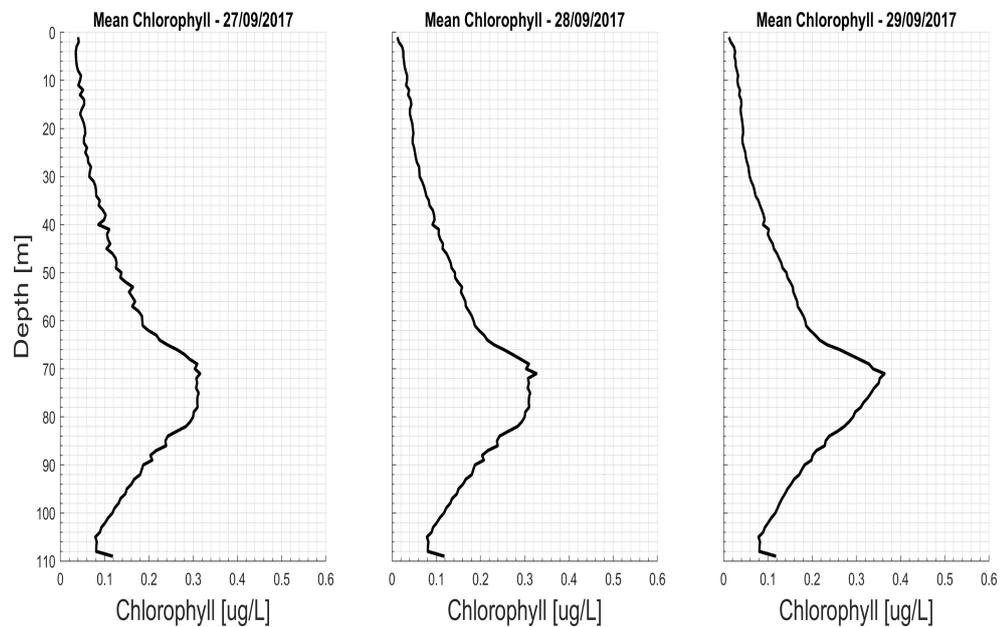


Figura 3.12: *Profili medi verticali di clorofilla suddivisi in base alla giornata di campionamento.*

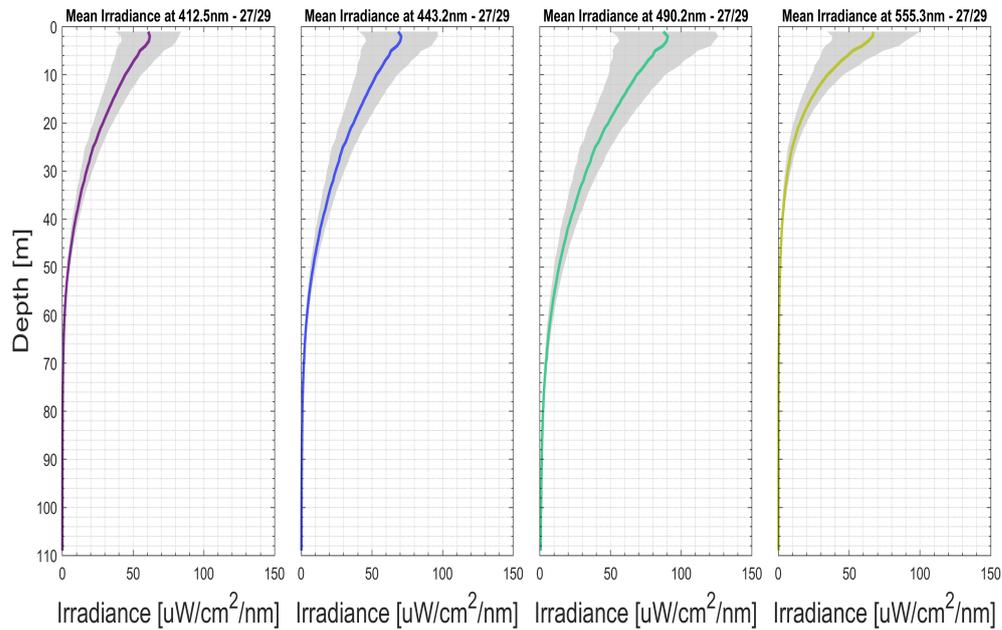


Figura 3.13: *Profili medi verticali della radiazione elettromagnetica che penetra nell'oceano studiata in quattro diverse lunghezze d'onda.*

confronto delle quattro curve si osserva che la lunghezza d'onda che si estingue per prima è quella del giallo, già a 50m si è quasi annullata del tutto. La porzione di radiazione corrispondente ai 490.2nm è invece quella che penetra più in profondità e si estingue dopo i 90m. Il secondo posto si colloca la radiazione viola-blu ed infine la viola. Dal momento che la lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza ci si aspetterebbe che se la radiazione corrispondente al giallo è la prima ad estinguersi quella del viola sia l'ultima. Questo non accade per via del materiale in sospensione e dei processi biologici nella colonna d'acqua.

3.5 Diagramma TS

La fig.3.14 mostra il diagramma TS prodotto dall'unione dei dati provenienti dalla sonda CTD con quelli registrati dallo scanfish. I tre cerchi colorati mettono in risalto le cosiddette water types che mescolandosi formano le water masses caratterizzate da un intervallo di salinità e temperatura più esteso. In base ai valori di salinità e temperatura che le water types assumono è possibile risalire alla loro provenienza. Il cerchio rosso identifica un tipo di acqua che possiamo denominare "superficiale" caratterizzata dai valori più alti di temperatura (circa 21°C) e salinità (circa 38.3PSU). A temperatura decisamente inferiore attorno ai 16°C si posiziona la Modified Atlantic

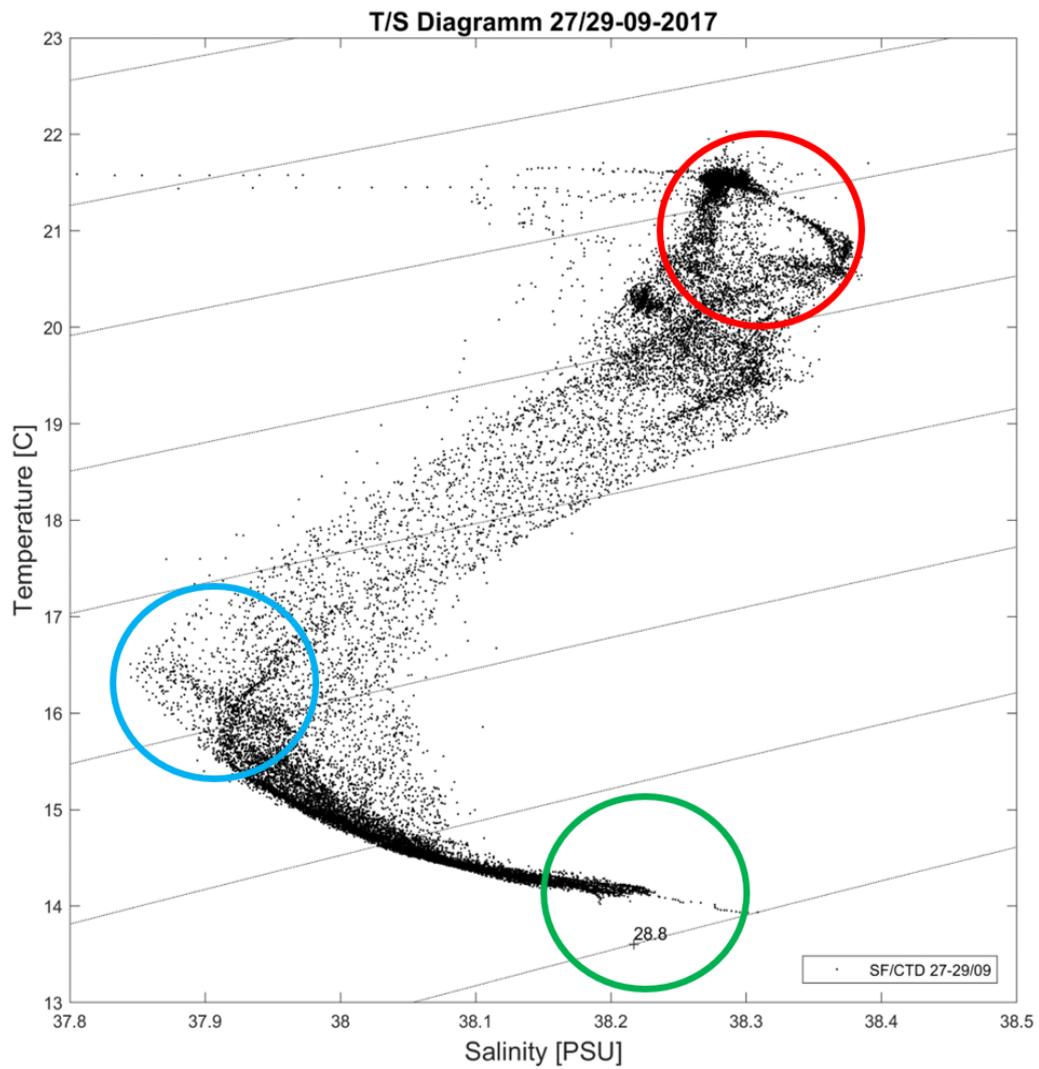


Figura 3.14: Diagramma TS, i tre cerchi colorati individuano tre water types.

Water(MAW) che presenta anche il minimo di salità, circa 37.9 PSU. L'ultima water types (cerchio verde), ancora più fredda (14°C) e salata (38.2 PSU) è assimilabile alla Modified Levantine Intermediate Water (MLIW) che probabilmente è risalita da profondità intermedie, solitamente dai 200m in poi [16], per interazione con il fondale dato che ci si trova sul ciglio della piattaforma continentale come giustifica la batimetria (fig.2.1).

Capitolo 4

MAPPATURA DELLE VARIABILI

Il quarto capitolo presenta i risultati della mappatura su griglia regolare dei dati ottenuti nella campagna MREA17. Le mappe dei campi così ottenute saranno analizzate per evidenziare le strutture di sottomesoscala emergenti.

4.1 Analisi spaziale dei dati oceanografici

L'analisi spaziale è una tecnica statistica che ha dimostrato essere fondamentale nel campo delle previsioni. A tal proposito prima di passare ad una trattazione più analitica verrà spiegato brevemente e sommariamente come tale tecnica permetta di produrre i campi iniziali delle previsioni.

Il problema principale e lo scopo di una previsione è per l'appunto prevedere nel modo più accurato e preciso possibile il comportamento di una variabile in un futuro più o meno prossimo. La buona riuscita di una previsione dipende da due fattori:

1. conoscere lo stato del sistema al tempo iniziale nel modo più accurato possibile.
2. conoscere le leggi prognostiche, ovvero quelle equazioni che permettono di determinare i tassi di cambiamento nel tempo delle quantità interessate.

Il primo fattore è quello direttamente interessato dall'analisi spaziale ed è fondamentale al fine predittivo. Lo stato del sistema viene costruito a partire dalle osservazioni disponibili. Una previsione che si basa su questi due fattori è chiamata deterministica e per realizzarla è necessario risolvere tre problemi in sequenza:

1. *sistema osservativo*: può essere considerata una rete di misura sufficientemente risolutiva per campionare la variabilità dei campi oceanografici di interesse.
2. *componente diagnostica*: è l'analisi spaziale, si basa su algoritmi statistici che interpolano i dati su griglia regolare per la modellistica numerica.

3. *componente prognostica*: è la previsione.

Nella parte del sistema osservativo è fondamentale tenere in considerazione l'errore associato, in particolare si riconosce:

- **ERRORE NATURALE**: è l'errore associato al campionamento, detto anche di rappresentatività. Nel momento in cui si vuole effettuare un campionamento è necessario che questo sia impostato in modo tale da poter risolvere le scale spazio-temporali esistenti. Eliminare l'errore naturale è complicato e si circoscrive adottando delle semplificazioni.
- **ERRORE DI BASE**: è l'errore associato allo strumento, alla sua calibrazione o alla trasmissione dei dati. Per risolvere questo tipo di errore è sufficiente attuare dei controlli di qualità sui dati, come nel caso della correzione del bias di salinità riportata nel capitolo 3.

La strategia di MREA vuole minimizzare l'errore naturale tramite la collezione di dati che risolvano le strutture di variabilità dell'oceano nella maniera più adatta possibile mantenendo una scala di tempo sinottica, ovvero adatta all'inizializzazione della previsione. A questo punto, con le osservazioni collezionate durante MREA17 e' stato possibile è possibile realizzare l'analisi spaziale. Possiamo dire che l'analisi spaziale usa la stima dell'errore naturale per calcolare i valori dei campi su una griglia regolare. L'analisi oggettiva è una tecnica di analisi spaziale che usa il metodo dei minimi quadrati per mappare spazialmente dati non uniformemente distribuiti con una griglia regolare di valori. Il concetto di base della tecnica è il teorema di Gauss-Markov introdotto per la prima volta in meteorologia da Gandin nel 1965[6] e in oceanografia da Bretherton nel 1976. In campo minerario è stata sviluppata un'analisi spaziale simile chiamata *Kriging* che però non deriva da nessun principio di minimizzazione dell'errore ed è quindi meno sofisticato e non oggettivo.

Affinchè l'interpolazione sia ottimale è necessario che le statistiche o funzioni di correlazione soddisfino due assunzioni:

1. **Stazionarietà**: le correlazioni del campo devono rimanere le stesse per il tutto periodo di campionamento.
2. **Omogeneità**: la stessa correlazione è valida per l'intero dominio.

Per semplificare l'analisi viene spesso soddisfatta un'ulteriore assunzione; la funzione di correlazione, deve essere isotropa ovvero deve avere la stessa struttura in ogni direzione [23]. Il problema generale è quello di effettuare la stima di una variabile scalare θ_x al punto griglia $\underline{x}=(x,y)$ a partire da osservazioni φ , soggette ad errore e distribuite in un

numero limitato di punti $x_r = (x_r, y_r)$, $r = 1, 2, \dots, N$. Si assuma inoltre che il campo θ abbia media temporale nulla [12]. Si supponga:

- di conoscere la varianza dell'errore sulle misure:

$$\sigma_\varphi^2 = \langle \epsilon_\varphi^2(x_r) \rangle \quad (4.1)$$

- che gli errori non siano correlati spazialmente.
- che la misura φ possa essere scritta:

$$\varphi = \theta(x_r) + \epsilon_r \quad (4.2)$$

Dal metodo dei minimo quadrati si pone il numero di osservazioni $N = 2$ che mi identifica S_b e S_0 ovvero due possibili stime, la prima è rappresenta il campo climatologico mentre la seconda è descritta dalle osservazioni e quindi da φ_r . A questo punto, riprendendo l'equazione della stima migliore dal metodo di Gauss¹ si attua la sostituzione ottenendo:

$$S_a = S_b + \frac{\sigma_b^2/\sigma_f^2}{\sigma_0^2/\sigma_f^2 + \sigma_b^2/\sigma_f^2}(S_0 - S_b) \quad (4.4)$$

Dove σ_b^2/σ_f^2 mi esprime una percentuale rispetto alla varianza del campo, in questo modo gli errori si possono considerare in percentuale. La 4.4 indica inoltre che gli errori della climatologia sono tra loro correlati da una funzione di correlazione pertanto due misure vicine spazialmente sono molto più correlate rispetto a due misure che distano di più. Date le seguenti uguaglianze:

$$\sigma_b^2/\sigma_f^2 = C(x_s, x_r) \quad \sigma_0^2/\sigma_f^2 = E_0I \quad (4.5)$$

l'equazione risulterà:

$$\theta_x = \tilde{\theta}_x + \frac{C(x_s, x_r)}{E_0I + C(x_s, x_r)}(\varphi_r - \tilde{\theta}_x) \quad (4.6)$$

che tradotta in algoritmo è l'equazione che sviluppò Bretherton:

$$\theta_x = \tilde{\theta}_x + \sum_r C(x, x_r) \sum_s [E_0I + C(x_s, x_r)]^{-1}(\varphi_r - \tilde{\theta}_r) \quad (4.7)$$

1

$$S_a = \frac{\sum_{n=1}^N \sigma_n^{-2} S_n}{\sum_{n=1}^N \sigma_n^{-2}} \quad (4.3)$$

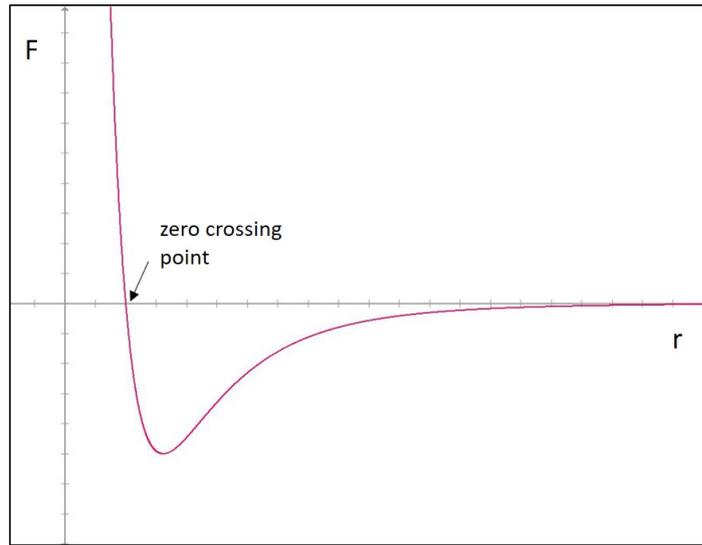


Figura 4.1: Funzione di correlazione in funzione della distanza r .

e permette di calcolare anche la media o bias:

$$\tilde{\theta}_x = \sum_r [E_0 I + C(x, x_r)]^{-1} (\varphi_r) \quad (4.8)$$

Le equazioni 4.7 e 4.8 rappresentano il cuore dell'analisi oggettiva.

A questo punto si presenta il problema principale, specificare la funzione correlazione del campo di errore e che solitamente si impone essere:

$$C(x, x_r) = F(x_r - x_s) \quad (4.9)$$

$$F(x_r - x_s) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) e^{-\left(\frac{r^2}{2b^2}\right)} \quad (4.10)$$

dove r è la distanza che intercorre tra due misure, a è il punto di *zero crossing* ovvero dove la funzione di correlazione si azzera mentre b indica la scala di decadimento come mostrato in fig.4.1. La tecnica di analisi oggettiva fornisce anche la stima dell'errore del campo grigliato.

4.2 Esperimenti di analisi oggettiva

Per poter effettuare un'analisi oggettiva è necessario fornire una serie di parametri che possiamo denominare i *parametri dell'analisi oggettiva* riportati nella tabella 4.1.

Tabella 4.1: Parametri dell'analisi oggettiva.

A	B	E	LIMIT	DIST	IFLAG	RLIM	ITLIM	TIM	NPTINF
---	---	---	-------	------	-------	------	-------	-----	--------

A e B indicano la distanza di zero crossing e quella di decadimento, entrambe sono espresse in chilometri e deve risultare sempre che $A > B$. E rappresenta l'errore iniziale delle osservazioni normalizzato dalla deviazione standard del campo, e quindi viene espresso in percentuale. $LIMIT$ serve per indicare il numero di punti influenzali che si considerano per ogni punto di interpolazione, il cui massimo è dato da $NPTINF$. Questo parametro è importante poiché, ponendolo troppo alto, l'interpolazione considererà un numero maggiore di osservazioni ottenendo così dei campi più omogenei. $LIMIT$ è legato anche al parametro $DIST$ che esprime il raggio influenzale, riportato in chilometri, entro il quale cercare numero di osservazioni. Anche $IFLAG$ e $RLIM$ sono legati, il primo più assumere solo valori logici e se viene posto a 1 le osservazioni entro un raggio $RLIM$ verranno mediate. Infine $ITLIM$ e TIM sono parametri che regolano la media temporale delle osservazioni ma che nel nostro caso non sono stati usati.

A questo punto sono stati ideati una serie di esperimenti di sensitività al fine di trovare la combinazione migliore di parametri affinché i campi generati fossero rappresentativi dei processi che si volevano risolvere, ovvero la sottomesoscala. I quattro esperimenti condotti sono riassunti nelle seguenti tabelle. Nelle colonne, oltre ai parametri dell'analisi oggettiva già descritti compare $SCALA$ che indica la scala spaziale considerata, in altre parole con MS si identifica un esperimento di Multiscaling dove vengono considerati sia i dati CTD che quelli *Scanfish*. Con LS invece ci si riferisce alla larga scala intendendo quindi solo i dati CTD . $E\ mask$ indica la percentuale del campo di errore al di sopra della quale non viene considerato nulla. $PASSO$, che sta per passo griglia, indica la spaziatura in metri della griglia utilizzata per l'interpolazione mentre $DATA$ riporta quali giorni della campagna sono considerati. Può capitare che in alcune prove compaia tra parentesi la dicitura *solo CTD* o CTD , sta ad informare che per il relativo giorno di campionamento sono considerati solo i dati CTD e non quelli *scanfish*.

I quattro esperimenti propongono una sorta di percorso evolutivo dell'analisi spaziale condotta che come ultimo risultato ha portato alla situazione descritta nella tabella 1.5. Passando da un esperimento all'altro sono stati modificati i seguenti parametri:

- maschera di errore ($E\ mask$): inizialmente impostata sul 10% si è ritenuto opportuno stabilirla al 30%.
- $LIMIT$: si è voluto osservarne l'effetto facendolo variare da 10 a 4.
- $DIST$: inizialmente pari a 4 poi decrementato a 3.

Per quanto riguarda ogni singolo esperimento invece si è studiato l'effetto prodotto al variare di:

- A e B : assumono i valori di 8 e 4km, 10 e 6km e 17 e 13km.

- IFLAG: sono state osservate le differenze tra quando assume valore 1 e quando invece è pari a 0.
- PASSO GRIGLIA: normalmente impostato a 90m è stato poi incrementato a 250, 500 e 1000m.
- DATA: si sono osservate le differenze tra i campi generati considerando tutto il periodo della campagna o solo una porzione di questo.

Tabella 4.2: Primo esperimento

SCALA	A (km)	B (km)	E	E mask	LIMIT	DIST (km)	NPTINF	IFLAG	RLIM (km)	PASSO (m)	DATA (Settembre)
MS1	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27-29
MS2	17	13	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27-29
MS3	10	6	0.1	0.1	10	4	10	1	1	90	27-29
MS4	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	250	27-29
MS4bis	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	500	27-29
MS4ter	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	1000	27-29
MS5	8	4	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27-29
MS6	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27
MS6bis	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	28
MS6ter	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	29 (solo CTD)
MS7	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27-28+29(CTD)
LS1	10	6	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27-29
LS2	17	13	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27-29
LS3	8	4	0.1	0.1	10	4	10	0	0	90	27-29

Tabella 4.3: Secondo esperimento

SCALA	A (km)	B (km)	E	E mask	LIMIT	DIST (km)	NPTINF	IFLAG	RLIM (km)	PASSO (m)	DATA (Settembre)
MS1	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27-29
MS2	17	13	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27-29
MS3	10	6	0.1	0.1	4	4	10	1	1	90	27-29
MS4	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	250	27-29
MS4bis	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	500	27-29
MS4ter	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	1000	27-29
MS5	8	4	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27-29
MS6	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27
MS6bis	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	28
MS6ter	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	90	29	29 (solo CTD)
MS7	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27-28+29(CTD)
LS1	10	6	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27-29
LS2	17	13	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27-29
LS3	8	4	0.1	0.1	4	4	10	0	0	90	27-29

Tabella 4.4: Terzo esperimento

SCALA	A (km)	B (km)	E	E mask	LIMIT	DIST (km)	NPTINF	IFLAG	RLIM (km)	PASSO (m)	DATA (Settembre)
MS1	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	27-29
MS2	17	13	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	27-29
MS3	10	6	0.1	0.1	4	3	10	1	1	90	27-29
MS4	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	250	27-29
MS4bis	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	500	27-29
MS4ter	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	1000	27-29
MS5	8	4	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	27-29
MS6	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	27
MS6bis	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	28
MS6ter	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	29 (solo CTD)
MS7	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	2728+29(CTD)
LS1	10	6	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	27-29
LS2	17	13	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	27-29
LS3	8	4	0.1	0.1	4	3	10	0	0	90	27-29

Tabella 4.5: Quarto esperimento

SCALA	A (km)	B (km)	E	E mask	LIMIT	DIST (km)	NPTINF	IFLAG	RLIM (km)	PASSO (m)	DATA (Settembre)
MS1	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-29
MS2	17	13	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-29
MS3	10	6	0.1	0.3	4	3	10	1	1	90	27-29
MS4	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	250	27-29
MS4bis	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	500	27-29
MS4ter	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	1000	27-29
MS5	8	4	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-29
MS6	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27
MS6bis	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	28
MS6ter	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	29 (solo CTD)
MS7	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-28+29(CTD)
MS8	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27(CTD)+28-29
MS9	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	250	27-28+29(CTD)
LS1	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-29
LS2	17	13	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-29
LS3	8	4	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-29
LS4	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	250	27-29

I risultati che verranno presi in considerazione da qui in avanti sono quelli prodotti dai test MS7, MS8 ed LS1 perchè i più significativi del quarto esperimento. I rimanenti sono consultabili nell' Appendice A.

4.2.1 Analisi spaziale di T ed S

Tabella 4.6: Schema riassuntivo dei test più significativi

SCALA	A (km)	B (km)	E	E mask	LIMIT	DIST (km)	NPTINF	IFLAG	RLIM (km)	PASSO (m)	DATA (Settembre)
MS7	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-28+29(CTD)
MS8	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27(CTD)+28-29
LS1	10	6	0.1	0.3	4	3	10	0	0	90	27-29

Nella tabella 4.6 sono riassunti i test più significati. A parte LS1, MS7 e MS8 differiscono solo per il dataset utilizzato; dagli altri esperimenti è scaturito che la presenza di una replica al momento del campionamento produceva, a livello di analisi spaziale, dei campi caratterizzati da molto rumore. In MS7 sono stati considerati i dati di entrambe le piattaforme di campionamento solo per il giorno 27 e 28 settembre mentre per il terzo giorno, in cui è stata effettuata la replica del primo, si sono mantenute solo le osservazioni registrate dalla sonda CTD. In contrapposizione, nel test MS8 è stato adottato il ragionamento inverso, in questo caso sono stati tolti i dati scanfish per la giornata del 27 settembre.

La presentazione dei risultati è strutturata attraverso un confronto tra la situazione descritta solo dalla larga scala con quella mostrata dagli altri due test, ripetuta alle profondità di 15, 40 e 60m le stesse a cui sono state individuate le diverse water type presentate in fig.3.14.

Temperatura, salinità e densità a 15m

La fig.4.2 rappresenta la situazione a 15m per la temperatura per LS1, MS7 e MS8 (vedi tab.4.6). In rapporto alla colonna d'acqua ci si trova a circa metà dello strato di rimescolamento (vedi fig.3.2) dove la temperatura oscilla tra circa 20°C e 21.6°C. Per quanto riguarda LS1 si può notare un gradiente meridionale con zone a temperatura inferiore a nord in opposizione a quelle più calde che si trovano a sud. La situazione così proposta è concorde con quanto osservato dai profili verticali ovvero una condizione abbastanza omogenea data dalla presenza dello strato di rimescolamento. Per MS8 il gradiente meridionale si può dire mantenuto dato che presenta una variabilità laterale molto simile a quella di LS1. La situazione di MS7 invece è alquanto particolare, come visibile dalla figura infatti, le stazioni scanfish appartenenti a SM500 del 27 settembre riportano temperature comprese tra i 20.2°C e i 20.6°C quando le stazioni SM250 e CTD risultano concordi per temperature che si aggirano attorno ai 21°C, segnando quindi una differenza di circa 1°C. D'altro canto, se si vanno a confrontare i profili verticali delle temperature divisi per giorno e i profili di riportati nella fig.3.6 e seguenti, si può notare che il primo giorno non ha uno strato di rimescolamento definito come invece si nota per gli altri due. Pertanto si potrebbe essere portati a credere che quanto appena descritto non sia imputabile ad un errore sistematico ma al verificarsi di un evento non ancora definito che abbia perturbato lo strato di rimescolamento con scale spaziali dell'ordine di $O(1)km$ e $O(1)day$. Una spiegazione possibile potrebbe essere quella avanzata da [4] che imputa i continui tentativi di ristratificazione dello strato di rimescolamento alle instabilità barocliniche di sottomesoscala (MLIs). In fig.4.3 è proposta l'analisi spaziale della salinità a 15m. In generale si può affermare che i gradienti che si vedono passando dalla larga alla piccola scala sono stati mantenuti; si noti la presenza di aree a salinità inferiore nel lato NW dell'area di campionamento. Allo stesso modo della temperatura anche i campi di salinità registrano una situazione concorde tra MS8 ed LS1 ma una piuttosto diversa per MS7. Dove prima si è osservava una differenza di circa 1°C ora ne è presente una di 0.06PSU. Più in particolare, seguendo l'isoalina dei 38.28PSU si può constatare che il passaggio ad una risoluzione maggiore ha evidenziato la formazione di una struttura che risale dalla porzione più meridionale del campo e che ne sta modificando la salinità della zona centrale. In aggiunta, come mostrato da MS8, tale struttura sembra scomparire o per lo meno diminuire di intensità. La distribuzione della densità è riportata in fig.4.4. Da un confronto con le mappe di temperatura e salinità alla stessa profondità è possibile confermare il gradiente meridionale ben visibile alla larga scale. La densità presenta una distribuzione in accordo con la temperatura dove a temperature più basse corrispondono zone a densità maggiore.

Temperatura, salinità e densità a 40m

Le fig.4.5 e 4.3 propongono i campi di temperatura e salinità circa a metà di termocline e aloclino. Le profondità tra 40 e 50m sono quelle che presentano una variabilità maggiore sia di T che di S come giustificato dai relativi profili verticali medi. Come ci si aspettava anche i campi ottenuti con l'analisi oggettiva hanno riportato tale variabilità con intervalli di temperatura che vanno da 16°C a 20°C e range di salità da 37.9PSU a 38.3PSU. Alla scala di risoluzione di LS1 si nota che, nonostante la presenza di un gradiente verticale di temperatura, c'è una distorsione orizzontale del campo come riportano le isoterme di 18.5,19 e 19.5°C. E' solo grazie ad una risoluzione maggiore che è possibile capire che la leggera oscillazione osservata in LS1 è un meandro in direzione SW-NE. Allo stesso modo di quanto si è detto per il livello di profondità precedente, probabilmente si è verificato un evento di sottomesoscala che ha avuto un periodo di evoluzione dell'ordine di giorni e si è sviluppato in scale spaziali tra 100m e 15km non completamente visibile osservando solo la mesoscala.

La salinità mostra in modo molto più marcato la formazione del meandro già visibile a livello di mesoscala che in realtà assume caratteristiche vorticosi (MS7) con senso orario mescolando acque meno salate presenti nella porzione più settentrionale del campo con quelle più salate meridionali. Nel giro di un giorno il piccolo vortice perde di intensità e sembra ritornare verso una situazione più stabile (MS8). Per quanto riguarda la densità al termocline è riportata in fig.4.7. Allo stesso modo del livello precedente anche qui la densità conferma quanto osservabile nelle mappe di temperatura e salinità. Anche in questo caso viene messa in risalto la struttura vorticosi evidenziata dalla sottomesoscala in accordo con le altre distribuzioni indicando densità alte in corrispondenza della parte interna del vortice dove invece la temperatura è quasi al minimo e viceversa.

Temperatura, salinità e densità a 60m

I campi di temperatura e salinità alla base del termocline e aloclino sono quelli mostrati nelle fig.4.8 e 4.9. La profondità di interpolazione è 60m, essendo alla fine di termocline e aloclino i profili verticali riportano una variabilità inferiore rispetto a quella dei 40m ma comunque abbastanza intensa da caratterizzare i campi. Per quanto riguarda la temperatura si nota, indipendentemente dalla scala di risoluzione, la presenza di due picchi, uno di acqua a temperatura maggiore (15.7-15.8°C) che si è formato nella porzione meridionale del campo e l'altro (15°C) che sopraggiunge da nord diretto verso la zona centrale dell'area di campionamento. A favore di ciò MS7 mostra l'estensione del picco proveniente da nord che va raggiunge latitudini comprese tra 43.7750 N e 43.8000 N. Di contro MS8 riporta il sopraggiungere del picco più caldo a discapito

dell'altro che nel frattempo si è quasi dissolto completamente. Dal confronto dei tre campi di fig.4.9 si osserva che le strutture sono piuttosto mantenute nel passare dalla meso- alla sottomesoscala. A favore di ciò, nella zona centrale risulta essere sempre presente l'area racchiusa dall'isoalina dei 37.96PSU. Un situazione simile riguarda l'area sottostante delimitata dall'isolinea di 38PSU è pressochè stabile anche se mostra una leggera espansione verso NW nella distribuzione proposta da MS8. Ancora una volta la distribuzione della densità è in accordo con quella della temperatura mostrando i valori più alti nella porzione settentrionale dell'area di studio in opposizione quelli più bassi diametralmente opposti. Densità e temperature sono accumulate della struttura che si estroflette dalla porzione nord e tangente al lato orientale del percorso di SM500 come visibile in MS7 e MS8.

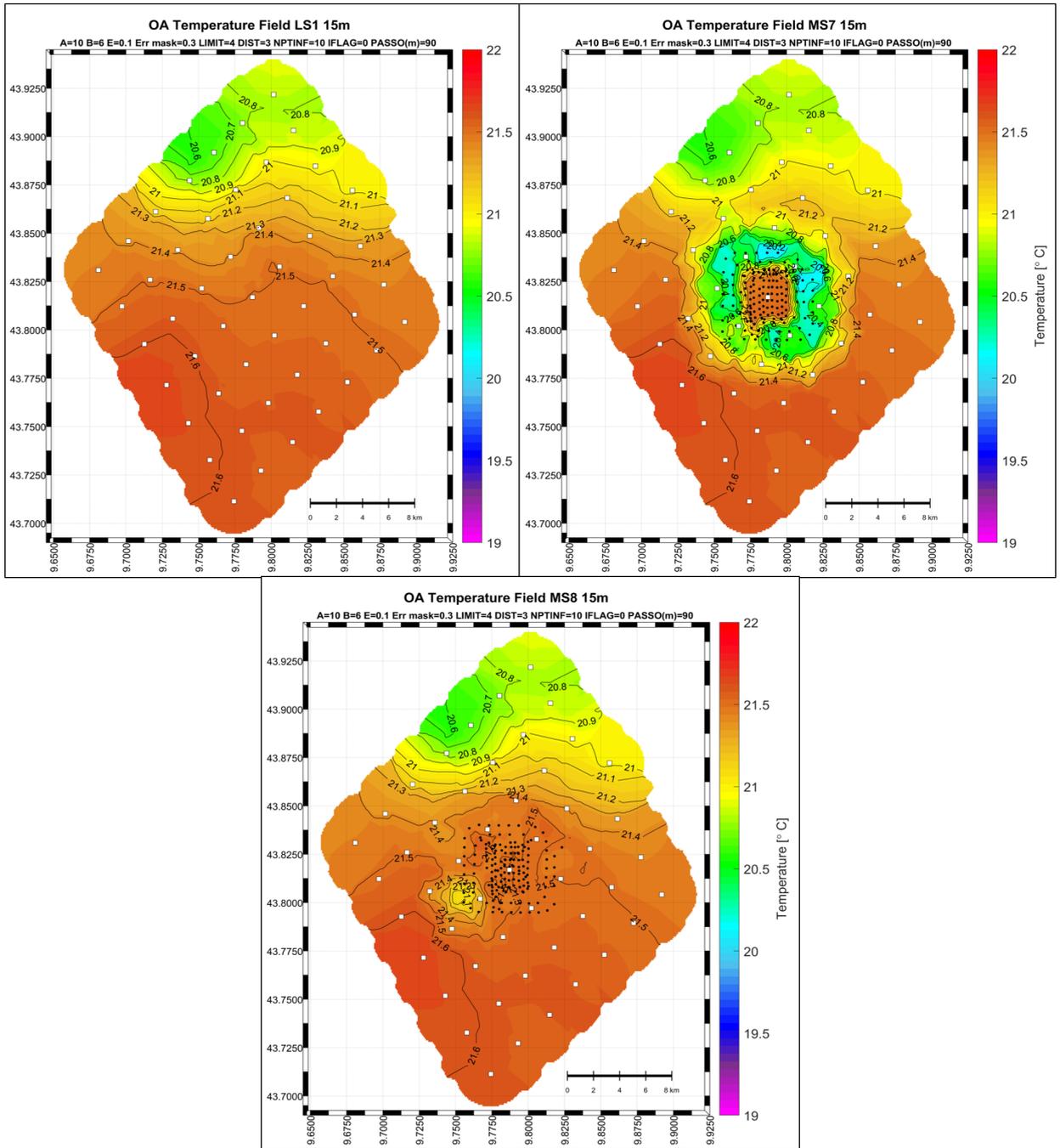


Figura 4.2: Campo di temperatura a 15m.

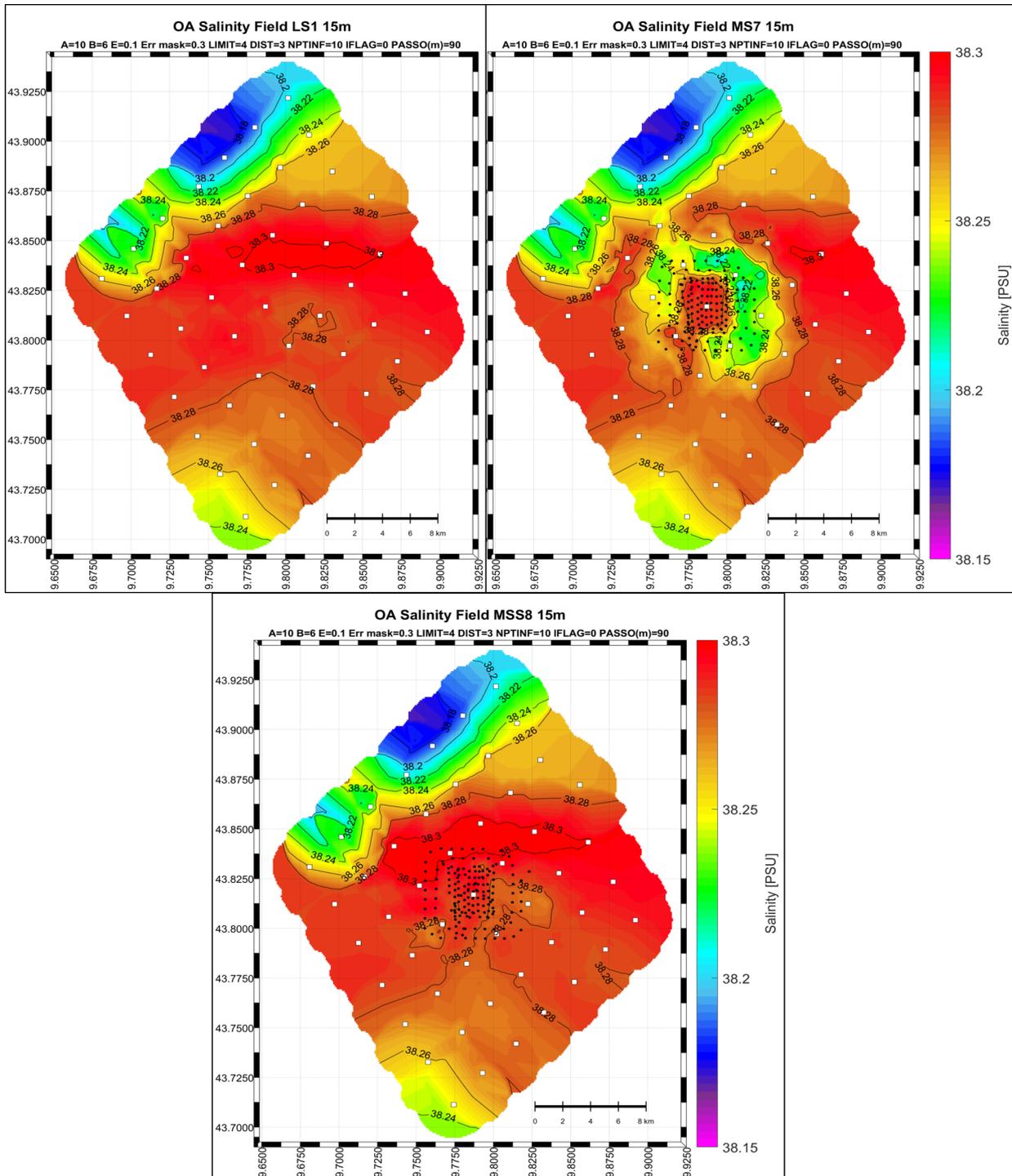


Figura 4.3: Campo di salinità a 15m.

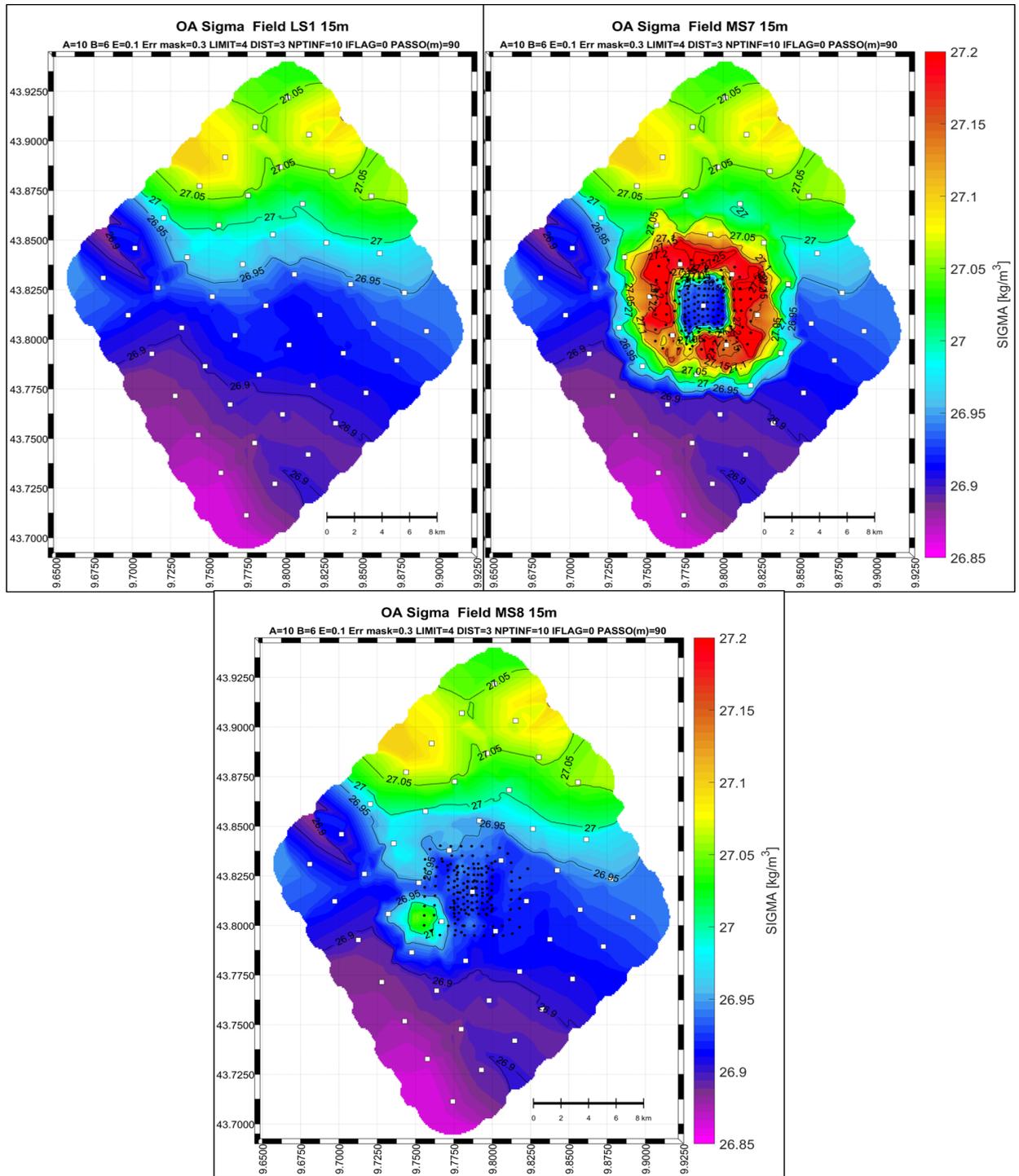


Figura 4.4: Campo di densità a 15m.

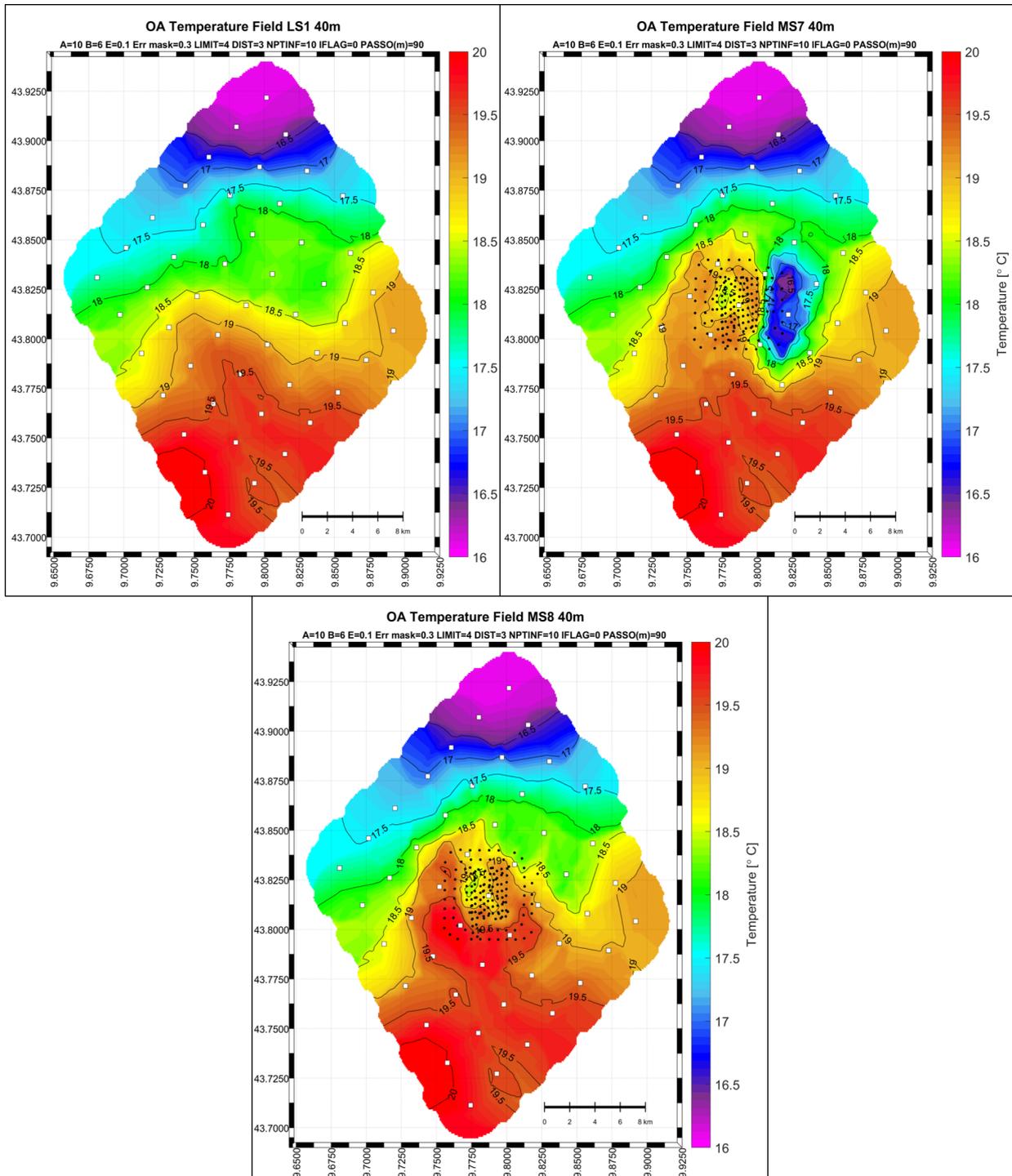


Figura 4.5: Campo di temperatura a 40m.

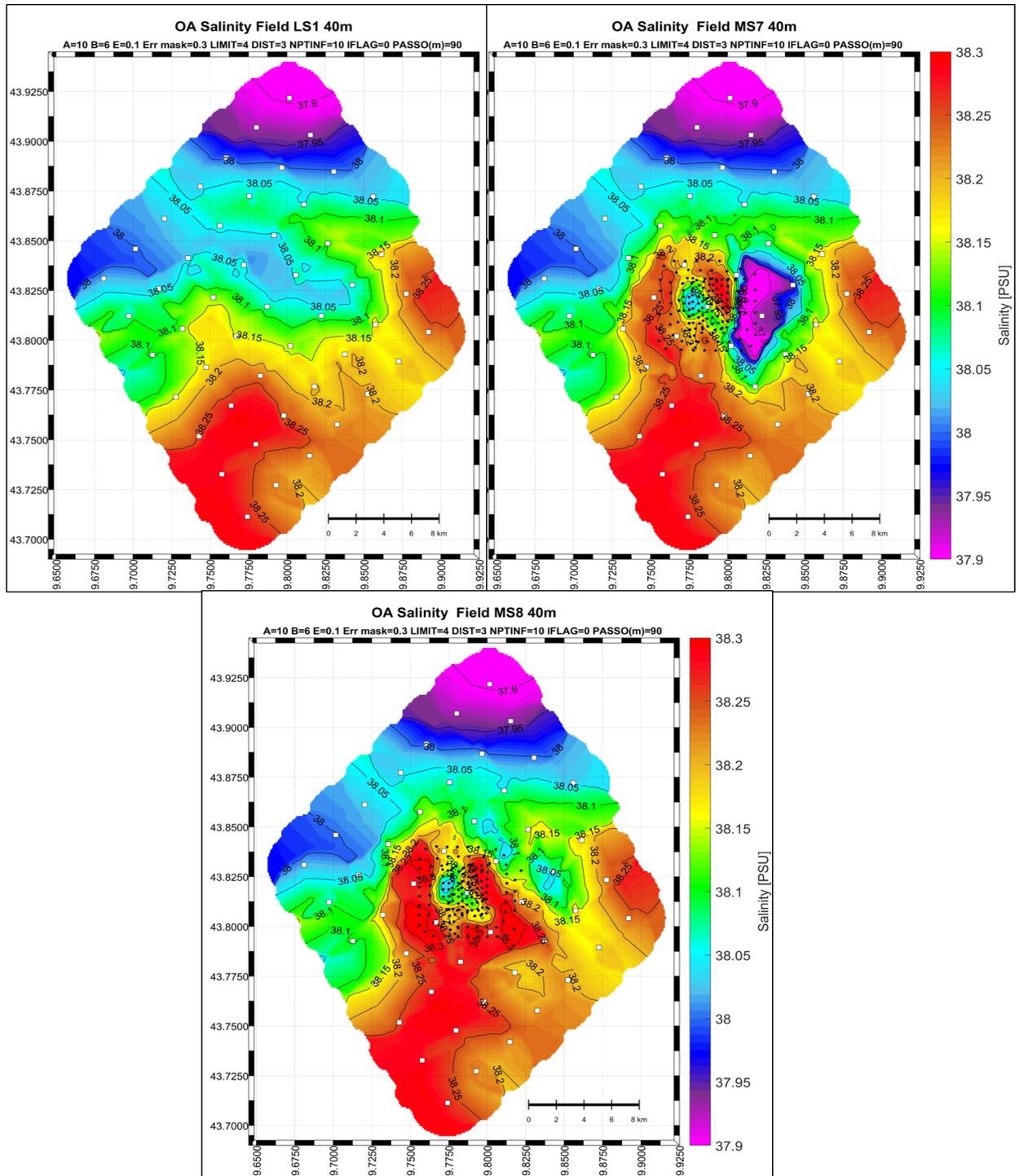


Figura 4.6: Campo di salinità a 40m.

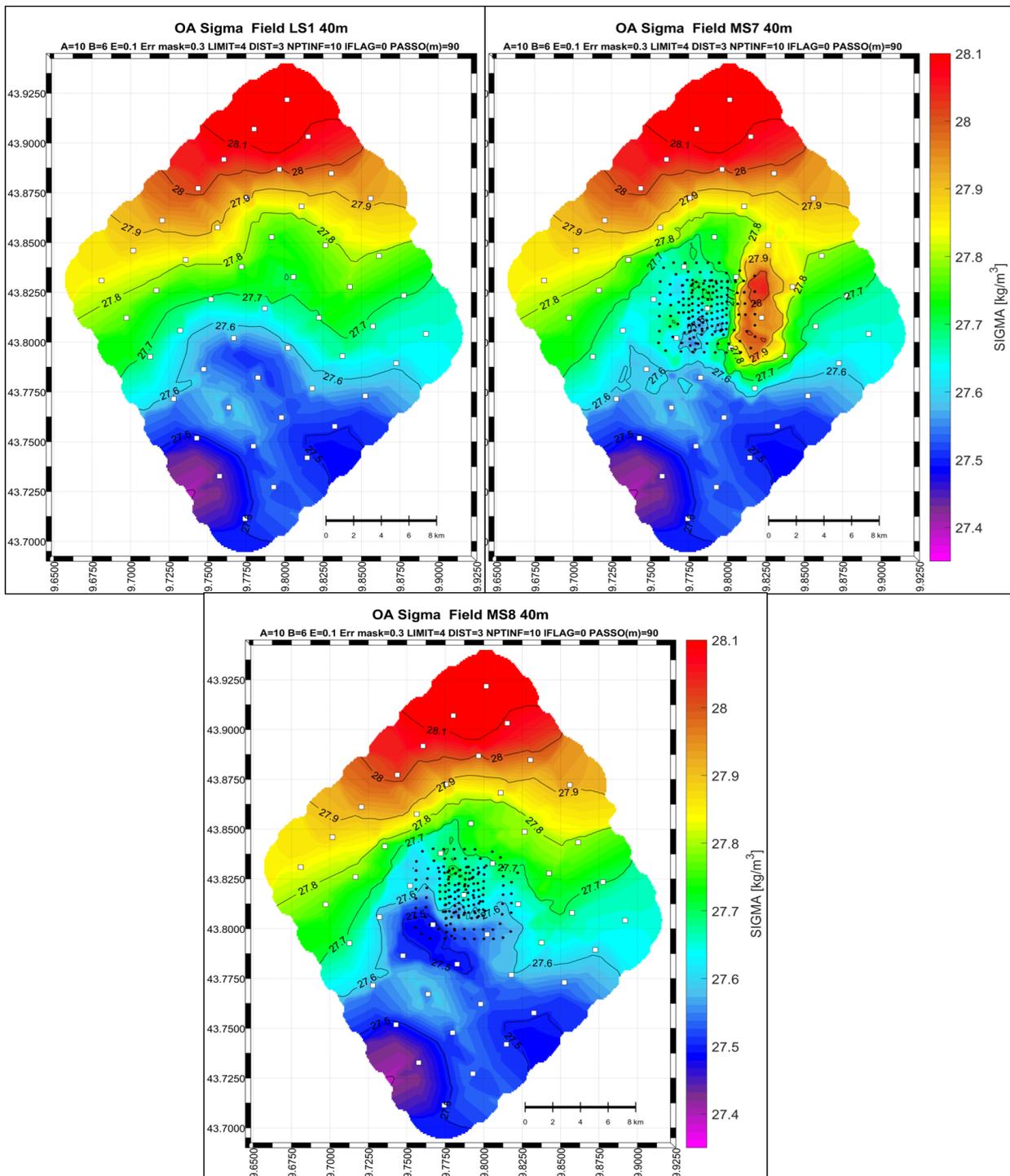


Figura 4.7: Campo di densità a 40m.

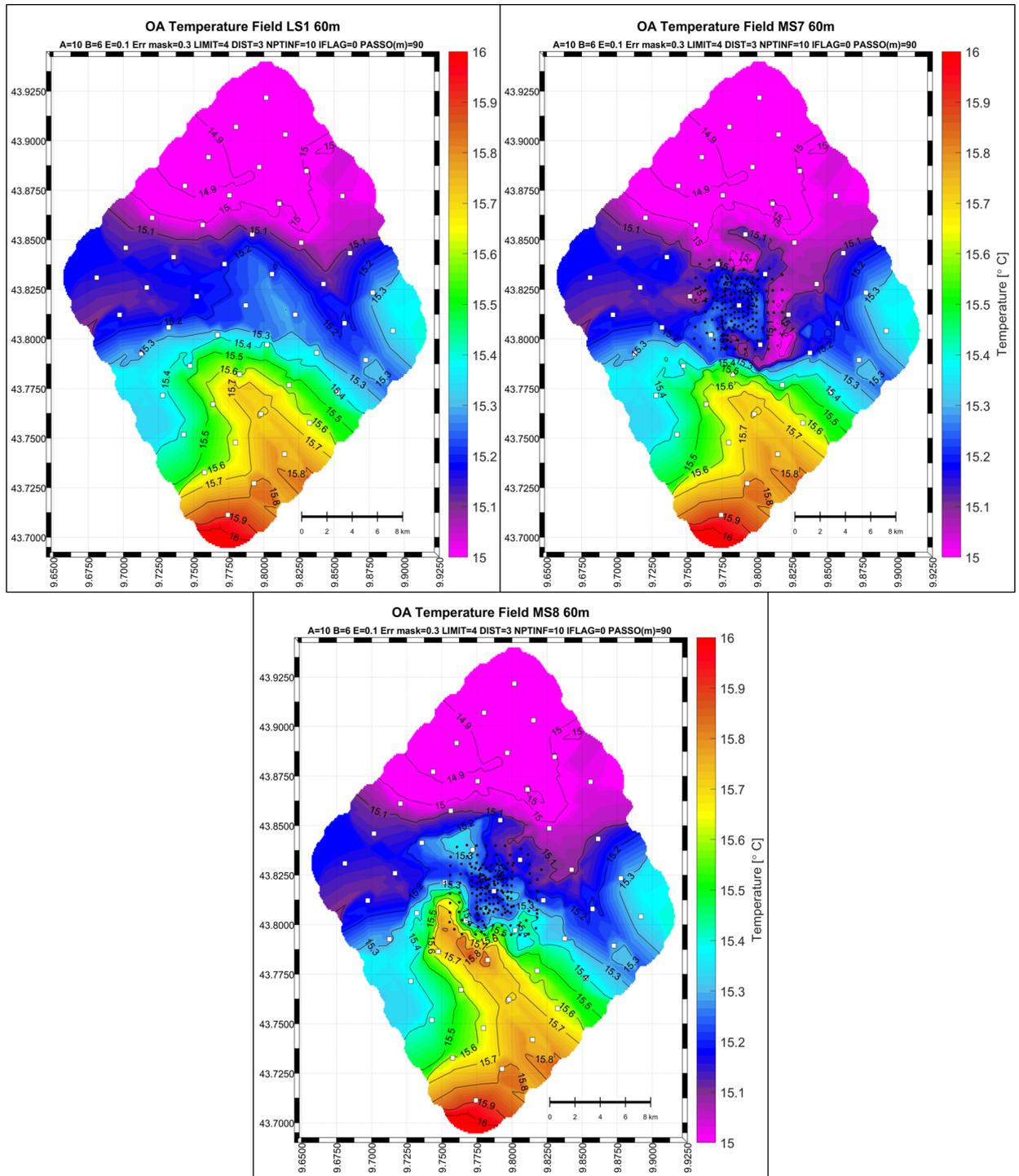


Figura 4.8: Campo di temperatura a 60m.

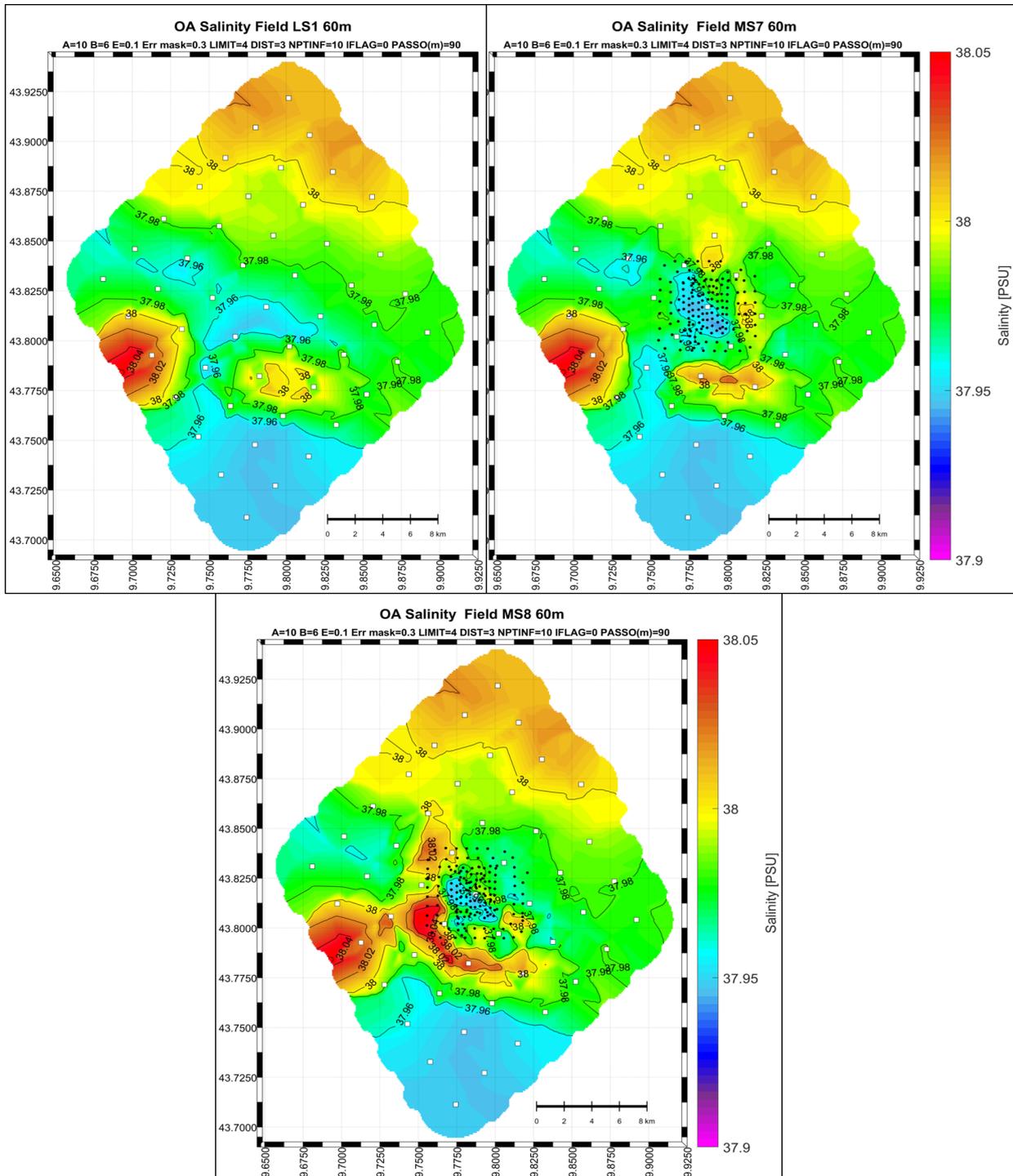


Figura 4.9: Campo di salinità a 60m.

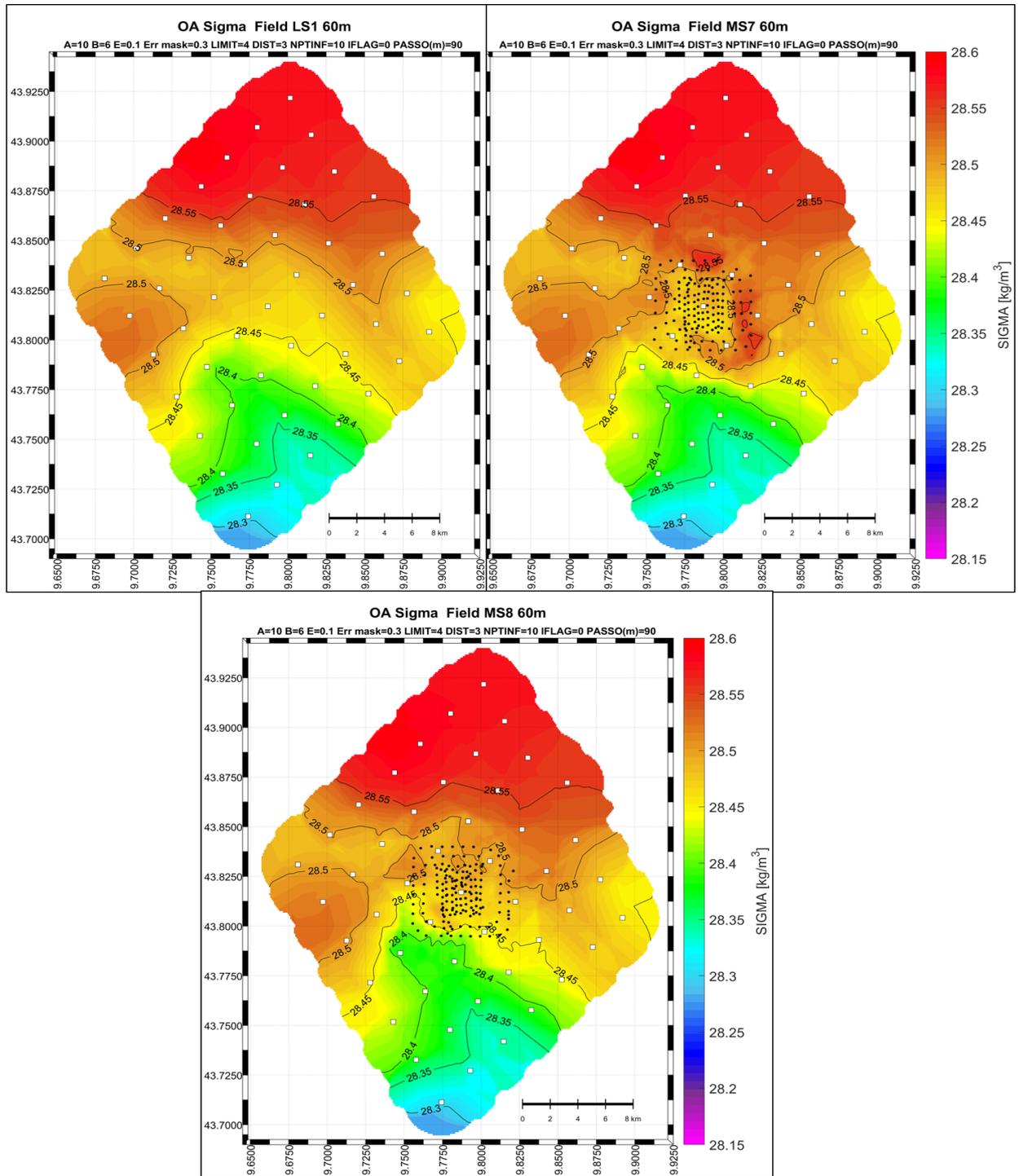


Figura 4.10: Campo di densità a 60m.

Capitolo 5

CONCLUSIONI

MREA17 è stata la sesta edizione delle campagne MREA che basano la loro politica sul concetto di Rapid Environmental Assessment propriamente detta REA. Dal punto di vista operativo è necessario rispettare una serie di premesse per applicare il concetto di REA:

1. la conoscenza dell'ambiente è una condizione che sta alla base delle scelte tattiche e dei sistemi di combattimento.
2. non sempre i parametri ambientali costanti sono noti con un sufficiente livello di dettaglio.
3. a differenza delle previsioni meteo non è possibile costruire una rete di osservazione permanente nell'oceano.
4. nuovi strumenti scientifici riducono il tempo di acquisizione dei dati [20].

Una valutazione di questo tipo è definibile come:

- strumento per fornire nowcast e forecast al fine di supportare le attività operative in svariate aree costiere anche con poco preavviso [18].
- metodologia con lo scopo di colmare le lacune di conoscenza e di fornire informazioni ambientali utili in una piccola finestra temporale.

Nonostante sia stata adattata all' ambito militare, nel corso degli anni ci si è resi conto dell'elevate potenzialità in ambito civile come la gestione delle Zone Economiche Esclusive (EEZ) e delle zone costiere ma anche la pianificazione di operazioni come dragaggi e la gestione di emergenze sia ambientali che non come oil spill o incidenti vari.

MREA17 ha avuto luogo nel Mar Ligure orientale, nella zona antistante la città di La Spezia, la scelta è ricaduta in questa area per via delle precedenti esperienze,

nel 2008 infatti è stata teatro della seconda edizione di MREA (MREA08). Come riportato nella sezione 2.1 il Mar Ligure è una zona dinamicamente attiva interessata da una variabilità stagionale non indifferente oltre che importante dal punto di vista del traffico marittimo.

Nel lavoro di tesi proposto si è voluto riportare la metodologia di acquisizione dati applicata ovvero praticare un campionamento annidato a scala risolutiva sempre maggiore, metodo d'indagine mai adoperato prima. In secondo luogo, utilizzando i dati raccolti è stata esplorata l'area di mare prescelta al fine di ricercare la presenza di strutture appartenenti a mesoscala e sottomesoscala cercando di dimostrare come il campionamento ad alta risoluzione impiegato, sia fondamentale per studiare le scale spaziali comprese tra 100m e 1km, già valutate in oceanografia per la loro importanza nei processi e fenomeni che caratterizzano l'oceano. A tal fine è stata applicata la tecnica di analisi oggettiva con l'ausilio del software Matlab che ha permesso la generazione di mappe descrittive della distribuzione delle grandezze termodinamiche come temperatura e salinità ma anche della densità.

Per quanto riguarda il campionamento è stato effettuato con l'ausilio di due imbarcazioni, il CRV Leonardo e la RV Aretusa rispettivamente gestite da centro NATO CMRE di La Spezia e dall'Istituto Idrografico della Marina. Nell'arco dei tre giorni che hanno costituito la campagna MREA17, la nave Aretusa si è occupata della scala spaziale a risoluzione più bassa (2500m), rinominata Large Scale (LS) che è stata monitorata grazie all'ausilio di una sonda CTD. Il veicolo da ricerca costiero Leonardo ha invece campionato le scale a risoluzione maggiori, collezionando due rilevamenti con stazioni distanti 500m l'una dell'altra ed uno che prevedeva una distanza di 250m, il tutto utilizzando la piattaforma di campionamento denominata scanfish.

Da un'analisi preliminare dei dati è emersa la presenza di un bias per la salinità (fig.3.1) registrata dalla sonda CTD, la spiegazione più plausibile è quella di un'errata calibrazione dello strumento e una mancata intercalibrazione con le altre piattaforme di campionamento.

A seguito della correzione del bias sono stati prodotti profili verticali medi riguardando temperatura e salinità, ossigeno e clorofilla e quelli relativi alla radiazione penetrante. Inoltre sono stati generati anche i profili verticali medi giornalieri delle stesse variabili e il diagramma TS. Dalle fig.3.2, 3.3 e 3.4 è emerso un andamento tipico che caratterizza il passaggio dall'estate all'autunno in cui si inizia a formare lo strato di rimescolamento, che interessa i primi 30-35m della colonna d'acqua con conseguente spostamento del termo-alo clino più in profondità; in questo caso interessava profondità comprese tra i 40m e i 55m circa. Dai profili medi giornalieri si è notato che nel primo giorno di campionamento lo strato di rimescolamento è meno definito rispetto ai giorni successivi. In generale, guardando anche la deviazione standard associata è

stata riscontrata una variabilità maggiore per i primi 35m circa.

Al fine di ottenere una stima migliore della variabilità è stato svolto confronto tra i profili delle stazioni scanfish e quelli delle stazioni CTD più vicine. L'aspetto che accumuna le due piattaforme di campionamento è la presenza di uno strato più o meno rimescolato che interessa i primi 20-25m. Ciò che risalta è l'andamento della curva relativa al primo giorno della campagna per quanto riguarda lo scanfish. Nei profili di temperatura si nota infatti che l'andamento relativo al primo giorno, procedendo dalle profondità tra 40 e 50m verso la superficie, si discosta sia da quello delle altre stazioni scanfish sia da quello del CTD.

Per quanto riguarda i profili di ossigeno disciolto e clorofilla, anch'essi testimoniano una situazione caratteristica della stagione, con la formazione del massimo sottosuperficiale come descritto in [10].

Il diagramma TS ottenuto suggerisce che l'area di studio potrebbe essere caratterizzata da tre water types. La prima, quella più superficiale assume valori di temperatura attorno ai 21°C e di salinità di circa 38.3PSU mentre la seconda è identificabile come MAW che giungendo dall'Oceano Atlantico ha per natura una salinità inferiore. In fine, la terza water type si pensa che possa essere la LIW dato che presenta i valori di salinità e temperatura minimi e che possa aver subito una leggera risalita interagendo con la batimetria del ciglio della piattaforma continentale.

Con la tecnica di analisi oggettiva si è svolta un'analisi spaziale rispettivamente alle profondità di 15, 40 e 60m in modo da avere una visione dell'intera colonna d'acqua guardando a metà dello strato di rimescolamento, circa a metà del termo-alocline e immediatamente dopo. Per ogni profondità e per ogni variabile di interesse (temperatura, salinità e densità) sono state generate tre immagini, una relativa solamente alla larga scala, una relativa a tutte le scale di risoluzione senza considerare i dati scanfish dell'ultimo giorno e infine una replica di questa non considerando i dati scanfish del primo giorno.

Per quanto riguarda la distribuzione di temperatura, salinità e densità a 15m si può notare un gradiente meridionale comune a tutte. La situazione evidenziata da MS7 è alquanto particolare, si ipotizza che si sia verificato un evento non ancora definito che abbia perturbato lo strato di rimescolamento con scale spaziali dell'ordine di $O(1)$ km e $O(1)$ day. Una spiegazione possibile potrebbe essere trovata in [4] che suggerisce una ristratificazione dello strato di rimescolamento grazie alle instabilità barocliniche di sottomesoscala (MLIs).

Alla profondità del termocline i campi generati mostrano la formazione di un'oscillazione orizzontale che, passando alle scale risolutive maggiori sembra essere una struttura vorticoso con rotazione in senso orario ma che si modifica passando dal primo al terzo giorno come mostrato dal sottocampionamento di MS7 ed MS8. L'interpolazione

condotta a 60m mostra ancora la presenza della variabilità laterale osservata a 40m ma con intensità ridotta.

Da un confronto preliminare con i dati di corrente elaborati da uno dei partners di MREA17 è emerso che l'area di studio è interessata da una circolazione anticiclonica che caratterizza sicuramente i primi 30m circa dando credito alle considerazioni fatte in merito. Bisogna tenere in conto che i dati delle correnti per profondità superiori sono ancora in fase di elaborazione pertanto questo confronto dovrà essere ripreso in futuro. D'altro canto non si può essere sicuri di questi risultati data la notevole differenza tra MS7 ed MS8. In altre la collezione di dati a 500 metri di risoluzione del 27 settembre potrebbe aver risentito di errori sistematici perchè risulta piuttosto diversa dalla replica effettuata il 29 settembre. I dati a 250 metri invece sono verosimilmente più congrui con quanto illustrato dalla larga scala. Queste considerazioni testimoniano innanzitutto l'estrema difficoltà del campionamento in mare che, nonostante una meticolosa pianificazione a priori, presenta sempre una moltitudine di potenziali situazioni che obbligano a modificare la strategia scelta. In secondo luogo indicano la strada da intraprendere per le nuove campagne MREA affinché si possa minimizzare il più possibile gli errori.

In ogni caso si può affermare che è stata dimostrata l'importanza di un campionamento ad alta risoluzione con il quale è stato possibile misurare sia la mesoscala che la sottomeoscale e che ha mostrato come alcune strutture risultino altrimenti invisibili.

Appendices

APPENDICE A

Lo scopo di questa appendice è quello di mostrare i risultati degli esperimenti di sensibilità riportati nelle tabelle 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Per semplicità verrà presa in considerazione solo la larga scala (LS) alla profondità di 40m in riferimento alla temperatura. Nella

Tabella 1: Parametri che influenzano l'analisi oggettiva.

A	B	E	LIMIT	DIST	IFLAG	RLIM	ITLIM	TIM	NPTINF	PASSO GRIGLIA
---	---	---	-------	------	-------	------	-------	-----	--------	---------------

tabella 1 sono stati riportati i parametri che influenzano l'analisi oggettiva. L'ordine delle figure seguirà quello della tabella da sinistra verso destra anche se non verranno considerati IFLAG, RLIM, ITLIM, TIM, NPTINF perchè costanti o non utilizzati.

A e B La fig.1 propone il confronto tra le coppie dei parametri A e B utilizzate nell'esperimento 4, in particolare, nella prima assumono valori di 10 e 6km, nella seconda 17 e 13km ed infine 8 e 4km nell'ultima. Si nota come modificando il punto di zero crossing e la scala di decadimento il campo assuma dimensioni diverse, più largo per la coppia di valori maggiori (17 e 13km) e più piccola per quella minore (8 e 4km). In aggiunta si osserva un effetto di smoothing procedendo verso i valori più piccoli.

Errore Modificando la maschera di errore si ottiene un campo più o meno esteso lasciando inalterata la distribuzione della variabile di interesse come mostrato dalla fig.2.

LIMIT e DIST Nel caso della fig.3 sono stati presi in considerazione i parametri LIMIT e DIST. La prima immagine sulla sinistra è relativa all'esperimento 4 dove la coppia di parametri assume valori di 4 e 3 mentre le altre due immagini si riferiscono all'esperimento 1 e 2 in cui sono stati utilizzati valori pari a 10 e 4 e 4 e 4. Dal confronto emerge che variando il numero di punti influenzati che si considerano per ogni punto di interpolazione e il raggio entro il quale cercare suddetti punti si produce un effetto di smoothing oltre che una diversa dimensione del campo.

PASSO GRIGLIA L'ultimo esperimento di sensitività riguarda il passo della griglia di interpolazione come mostrato dalla fig.4. Al di là delle dimensioni del campo se ne evidenzia il bordo esterno, più frastagliato nell'immagine a destra dove ogni punto griglia dista 250m dall'altro, rispetto quella a sinistra in cui è stata imposta una griglia di 90m di passo. Anche in questo caso si ha un effetto di smoothing utilizzando la griglia a passo maggiore perchè così facendo si cambia la risoluzione spaziale.

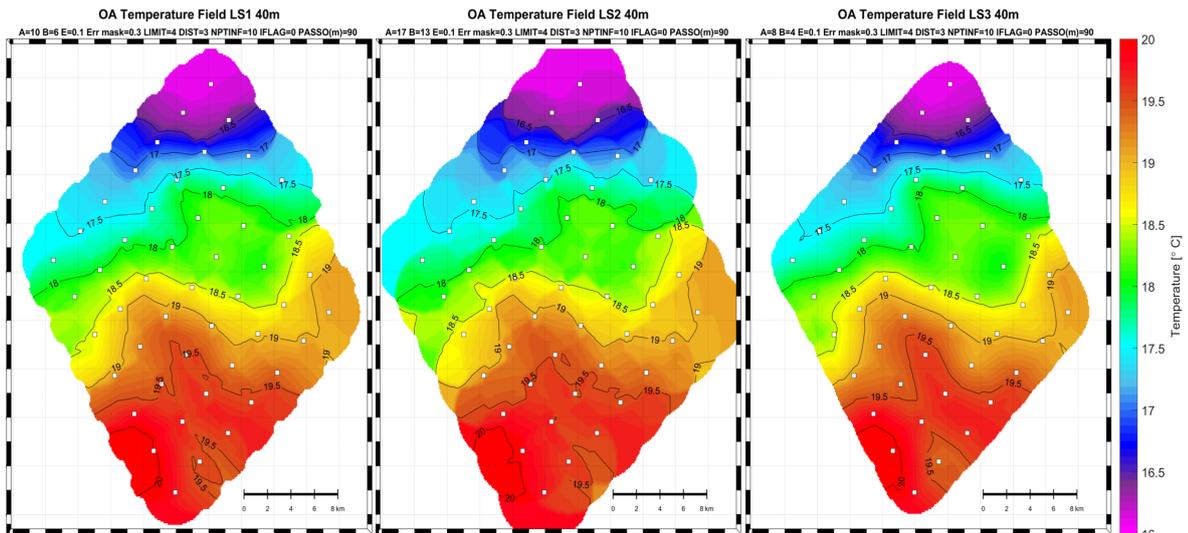


Figura 1: Campo di temperatura a 40m prodotto con tre differenti coppie di parametri A e B; 17 e 13km, 10 e 6km ed 8 e 4km.

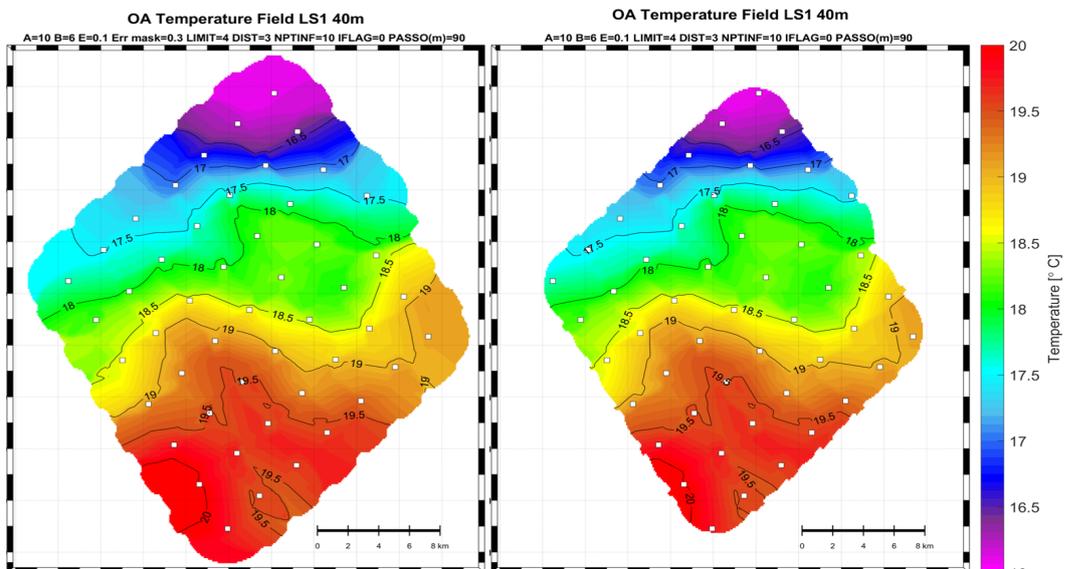


Figura 2: Campo di temperatura a 40m prodotto considerando una maschera di errore del 30% e del 10%.

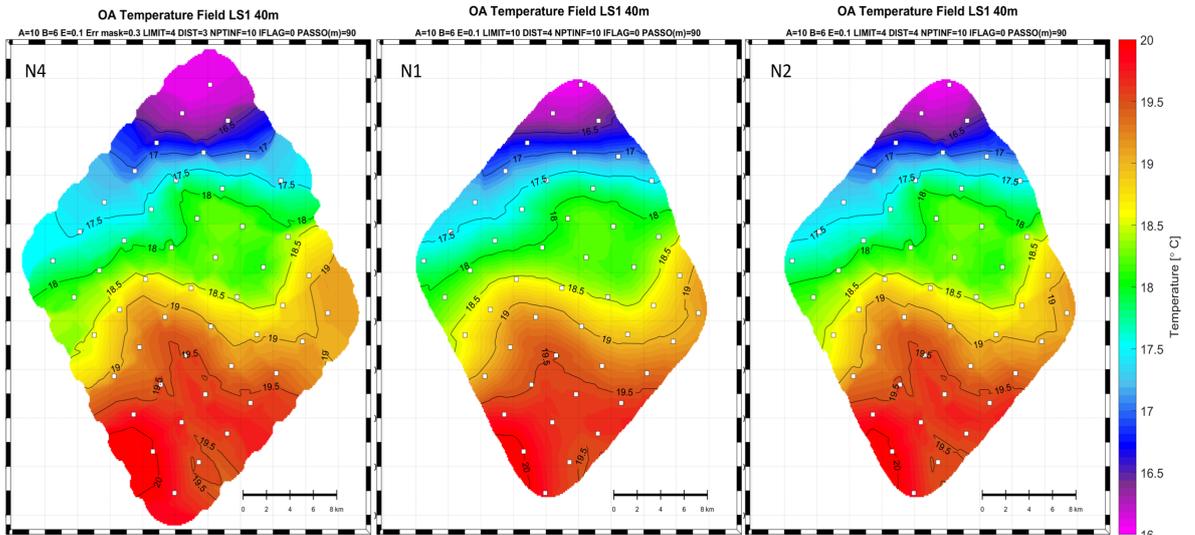


Figura 3: Campo di temperatura a 40m ottenuto con diversi valori dei parametri LIMIT e DIST.

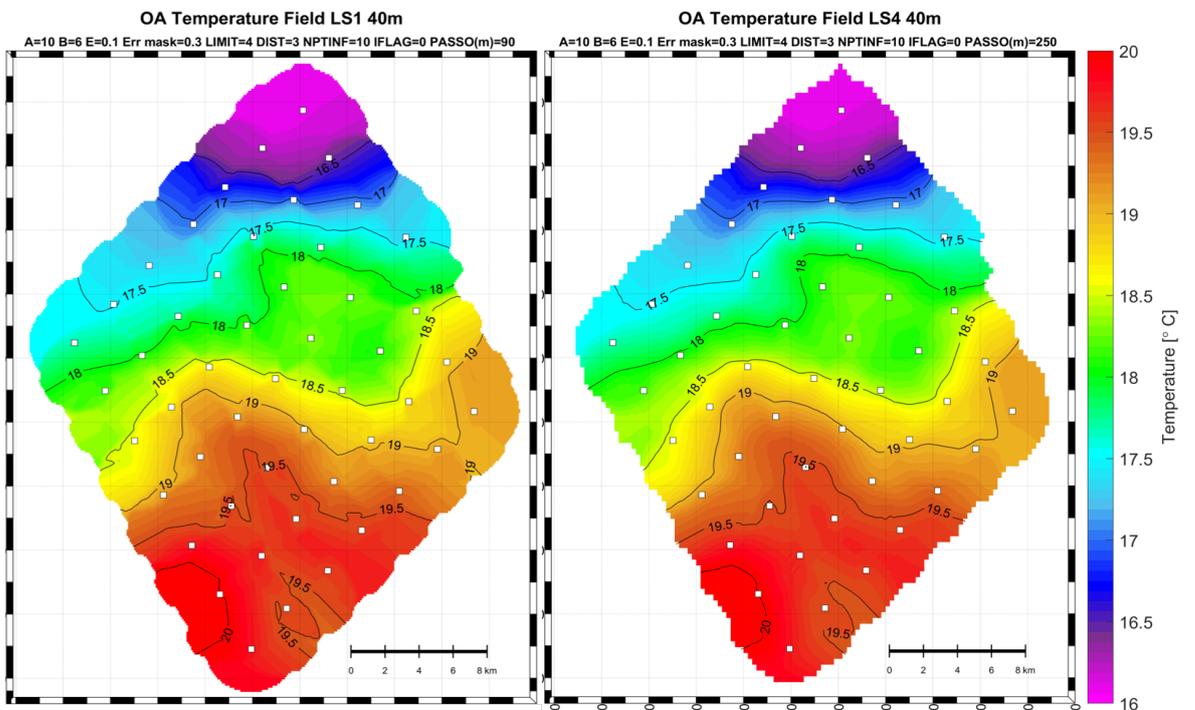


Figura 4: Campo di temperatura a 40m ottenuto variando il passo griglia da 90m a 250m

Bibliografia

- [1] Tuncay Akal. «DEVELOPING RAPID ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AT NURC». In: *Oceanography* 21.2 (2008), pp. 44–51.
- [2] M Astraldi e GP Gasparini. «The seasonal characteristics of the circulation in the North Mediterranean Basin and their relationship with the atmospheric-climatic conditions». In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 97.C6 (1992), pp. 9531–9540.
- [3] Mario Astraldi et al. «Climatic fluctuations, current variability and marine species distribution-a case-study in the Ligurian sea (north-west Mediterranean)». In: *Oceanologica acta* 18.2 (1995), pp. 139–149.
- [4] Giulio Boccaletti, Raffaele Ferrari e Baylor Fox-Kemper. «Mixed layer instabilities and restratification». In: *Journal of Physical Oceanography* 37.9 (2007), pp. 2228–2250.
- [5] Liam Brannigan et al. «Submesoscale instabilities in mesoscale eddies». In: *Journal of Physical Oceanography* 47.12 (2017), pp. 3061–3085.
- [6] Francis P Bretherton, Russ E Davis e CB Fandry. «A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73». In: *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Vol. 23. 7. Elsevier. 1976, pp. 559–582.
- [7] Maurizio C.C. Demarte et al. «Esperimenti di Rapid Environmental Assessment».
- [8] N. Fabbroni, N. Pinardi e P. Oddo. «ESPERIMENTI DI MREA07 - MREA08 NEL MARE LIGURE».
- [9] I. Federico et al. «Multiscale and multidisciplinary Marine Rapid Environmental Assessment data collection methods for process studies: the case of the Taranto Gulf». In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. Vol. 19. EGU General Assembly Conference Abstracts. Apr. 2017, p. 19188.

- [10] Duncan E McGehee, David A Demer e Joseph D Warren. «Zooplankton in the Ligurian Sea: Part I. Characterization of their dispersion, relative abundance and environment during summer 1999». In: *Journal of Plankton Research* 26.12 (2004), pp. 1409–1418.
- [11] *MESOSCALE PROCESSES*. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/applications/ocean/mesoscale-circulation/mesoscale-processes/what-are-mesoscale-processes.html>.
- [12] G. Montanari et al. *Data analysis methods in physical oceanography*. Arpa, 2006.
- [13] *MREA*. URL: <http://mrea.sincem.unibo.it/index.php>.
- [14] *Ocean Turbulence*. URL: <http://ferrari.mit.edu/research/ocean-dynamics/ocean-turbulence/>.
- [15] Nadia Pinardi et al. «Marine Rapid Environmental Assessment in the Gulf of Taranto: a multiscale approach». In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16.12 (2016), p. 2623.
- [16] Nadia Pinardi et al. «Mediterranean Sea large-scale low-frequency ocean variability and water mass formation rates from 1987 to 2007: a retrospective analysis». In: *Progress in Oceanography* 132 (2015), pp. 318–332.
- [17] Eric Pouliquen, Albert D Kirwan e Robert Thomas Pearson. *Rapid environmental assessment*. Vol. 44. NATO SACLANT Undersea Research Centre, 1997.
- [18] Allan R Robinson e Jurgen Sellschopp. «Rapid assessment of the coastal ocean environment». In: *Ocean Forecasting*. Springer, 2002, pp. 199–229.
- [19] *SCANFISH INTELLIGENT UNDULATING REMOTELY OPERATED TOWED VEHICLES*.
- [20] Jürgen Sellschopp. *Rapid environmental assessment for naval operations*. Rapp. tecn. SACLANT UNDERSEA RESEARCH CENTRE LA SPEZIA (ITALY), 2000.
- [21] Xiuwu Sun et al. «Distribution of dissolved oxygen and causes of maximum concentration in the Bering Sea in July 2010». In: *Acta Oceanologica Sinica* 33.6 (2014), pp. 20–27.
- [22] Leif N Thomas, Amit Tandon e Amala Mahadevan. «Submesoscale processes and dynamics». In: *Ocean modeling in an Eddyding Regime* 177 (2008), pp. 17–38.
- [23] Richard E Thomson e William J Emery. *Data analysis methods in physical oceanography*. Newnes, 2014.

- [24] *Valutazione Ambientale Strategica*. URL: <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/autorizzazioni-e-valutazioni-ambientali/valutazione-ambientale-strategica-vas>.
- [25] *Valutazione Impatti Ambientale*. URL: <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/autorizzazioni-e-valutazioni-ambientali/valutazione-di-impatto-ambientale-via>.
- [26] G. Brian Whitehouse et al. «Rapid environmental assessment within NATO». In: *Sea Technology* ().