

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

**FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E
NATURALI**

Corso di Laurea in SCIENZE AMBIENTALI

**UNA CAMPAGNA OCEANOGRAFICA
NEL SUD ADRIATICO:
ANALISI DATI E
CONSIDERAZIONI CLIMATOLOGICHE**

Tesi di Laurea in METEOROLOGIA E OCEANOGRAFIA

RELATORE:

Prof.ssa Nadia Pinardi

CO-RELATORE:

Dr. Paolo Oddo

PRESENTATA DA:

Marco Pastore

(III sessione)

Anno Accademico 2005 / 2006

SOMMARIO

1	Introduzione	5
1.1	Oggetto della tesi	5
2	Il Mare Adriatico	6
2.1	Geomorfologia	6
2.1.1	Inquadramento Geografico	6
2.1.2	Morfologia del bacino	7
2.1.3	I Fiumi.....	9
2.1.4	Suddivisione in bacini.....	10
2.2	Climatologia.....	11
2.2.1	Il regime dei venti	11
2.2.2	Distribuzione di temperatura e salinità	12
2.2.3	Bilancio Idrico e di Calore	14
2.2.4	Masse d’acqua.....	15
2.2.5	Formazione di acque dense	16
2.2.6	Le acque levantine intermedie	20
2.2.7	La circolazione generale	22
3	Campagna DART06A.....	26
3.1	Scopo della missione.....	26
3.2	Campionamento e strumentazioni.....	27
3.2.1	CTD.....	28
3.2.2	ADCP	30
3.2.3	SEPTR.....	31
3.2.4	Boe Meteorologiche.....	32
3.2.5	Wave Rider	33
4	Analisi Dati	35
4.1	Dati DART06A	35
4.1.1	Trattamento dei dati	35
4.2	La costa a nord del Gargano – Area “WaccN”	40
4.2.1	Profilo medio e masse d’ acqua	40
4.2.2	Strutture rilevate.....	42
4.3	La costa del Gargano – Area “WaccC”	46
4.3.1	Profilo medio e masse d’acqua	46
4.3.2	Strutture rilevate.....	48
4.4	Golfo di Manfredonia – Area “Manfre”	53
4.4.1	Profilo medio e tipi di acque	53
4.4.2	Strutture rilevate.....	55
4.5	Il centro del MaD – L’ Area “Pomo”.....	60
4.5.1	Profilo medio e tipi di acque	60
4.5.2	Strutture rilevate.....	62
4.6	Fra MAd e SAd – L’area “Channel”	65
4.6.1	Tipi di acque e strutture rilevate	65

4.7	Il SAd centrale – L’area “Fossa”	70
4.7.1	Profilo medio e tipi di acque	70
4.7.2	Strutture rilevate	72
4.8	Conclusioni.....	75
4.8.1	Strutture superficiali	75
4.8.2	Strutture profonde	76
4.8.3	La formazione di NAd-MAdDW nell’inverno 2005-2006	80
5	Confronto climatologico	84
5.1	Dati e procedimenti	84
5.2	Aree costiere.....	85
5.3	Aree di mare aperto	88
5.3.1	Area “Pomo”	88
5.3.2	Area Channel.....	89
5.3.3	Area “Fossa”	90
5.4	Conclusioni.....	93
6	Fonti utilizzate	95
6.1	Dati	95
6.2	Illustrazioni.....	95
6.3	Bibliografia.....	96
7	Ringraziamenti	98
7.1	Due parole	98
7.2	Grazie!	99

1 INTRODUZIONE

1.1 OGGETTO DELLA TESI

Questo mio lavoro si prefigge di analizzare una serie di dati idrografici raccolti in Adriatico durante una crociera oceanografica organizzata dal Nato Undersea Research Center (N.U.R.C.) denominata “Dinamics of Adriatic in Real Time 2006A” (DART06A), che si è svolta nel mare Adriatico fra il 28/2/2006 ed il 28/3/2006.

Durante questa “campagna”, è stata campionata una vasta area del medio e sud Adriatico, con la raccolta di un dataset di dati multidisciplinari, al fine di approfondire i processi di piccola scala che occorrono in questa zona, e di migliorare le capacità prognostiche e diagnostiche dei modelli numerici che simulano le condizioni oceanografiche. Il continuo processo di miglioramento di tali modelli, costituisce la vera frontiera della moderna oceanografia.

Questo lavoro si prefigge di analizzare i dati relativi all’intero dataset di profili di temperatura, salinità e densità potenziale, campionato per mezzo dello strumento “Conductivity Temperature Depth recorder” (CTD). Lo scopo è quello di rilevare le strutture idrografiche presenti cercando di riportare una “fotografia” dell’Adriatico per lo specifico del mese di competenza dei dati. Le strutture rilevate sono state confrontate con le descrizioni proposte dalla notevole letteratura scientifica presente, cercando di identificare i fattori “forzanti” che le determinano.

Come ultimo aspetto, mediante un confronto climatologico con i dati idrografici del mese di Marzo provenienti dal progetto MEDATLAS, si è cercato di evidenziare eventuali scostamenti significativi delle proprietà del bacino, rispetto al suo comportamento medio sul lungo periodo. Dello strumento CTD e di altri strumenti presenti a bordo della nave oceanografica è stata riportata una breve scheda nella sezione relativa alla campagna DART06A.

2 IL MARE ADRIATICO

2.1 GEOMORFOLOGIA

2.1.1 Inquadramento Geografico

Il mare Adriatico è un sotto-bacino semi chiuso del mare Mediterraneo, confinato a nord e a ovest dalle coste italiane, ad est da quelle di Slovenia, Croazia ed Albania, che comunica con il resto del Mediterraneo attraverso il canale d'Otranto. Esso presenta una forma allungata in senso latitudinale lungo un asse da SSE a NNW, che si estende fra il 40° ed il 46° parallelo Nord, dal canale d'Otranto fino al golfo di Trieste, per circa 770 Km complessivi. Latitudinalmente è collocato fra i 12° E ed i 20°E. La sua larghezza media oscilla fra 90 e 200 Km, con una media stimata in 160 Km, la superficie ricoperta è pari a 138600 Km² per un volume d'acqua di circa 35000 Km³. Con l'eccezione rappresentata dalla pianura padano-veneta, l'Adriatico è circondato interamente da importanti apparati montuosi: le Alpi Dinariche ad est, le Alpi a nord e gli Appennini ad ovest; nelle sue acque trovano foce numerosi corsi d'acqua.



Figura 1: Il mare Adriatico nel Mediterraneo.

2.1.2 Morfologia del bacino

Il bacino dell'Adriatico presenta peculiari morfologie costiere e batimetriche, le quali sono direttamente connesse ai processi idrografici che vi hanno luogo.

Come già accennato, la costa orientale è caratterizzata dalla presenza di un importante apparato montuoso, le Alpi Dinariche, che hanno avuto un'origine tettonica comune alle Alpi italiane, per l'interazione fra la placca nord-africana e lo scudo europeo, iniziata circa 180 milioni di anni fa e tutt'ora in corso. Tale sistema montuoso origina coste alte e rocciose, disseminate di isole con andamento parallelo rispetto alla linea di costa.

Le coste italiane si presentano invece prevalentemente basse e sabbiose, essendo alimentate principalmente dall'accumulo di sedimenti di origine fluviale trasportati lungo la costa dalle correnti marine prevalenti. Il bacino dell'Adriatico è attualmente sottoposto alla spinta tettonica dell'intero asse appenninico che, ruotando da ovest verso est, costringe la microplacca adriatica alla subduzione. Questo processo rotatorio sta da una parte ampliando sempre più il bacino del mare Tirreno, mentre dall'altra sta lentamente ma inesorabilmente causando la chiusura del bacino dell'Adriatico.

Anche la morfologia batimetrica è estremamente variabile: a nord il bacino è caratterizzato da un fondale poco profondo, tipico di piattaforma continentale. Esso, partendo dai 15 metri riscontrabili lungo la linea costiera fra Venezia e Trieste, degrada dolcemente con pendenze inferiori al grado fino all'isobata dei 120 m posta all'altezza di Pescara; questa linea di livello "attraversa" ortogonalmente il bacino partendo dalla costa Croata, per poi deviare verso sud nei pressi della costa italiana.

Oltre questa profondità si ha una prima "rottura di pendenza" che segna il limite della piattaforma continentale, e che conduce alla "depressione di Pomo", un avallamento costituito da tre depressioni minori collegate fra loro, che raggiungono profondità massime di oltre -270 m.

Procedendo verso sud, il fondale risale a circa -150 m, "valicando" quella che viene chiamata "sella di Pelagosa", uno stretto valico interno ad un canale che connette il medio Adriatico con il sud Adriatico. Superato questo valico il canale si allarga ed il fondale riprende a scendere, dapprima lentamente, poi rapidamente, una volta raggiunta la latitudine del Gargano. Nel giro di poche decine di chilometri vengono raggiunti e superati i -1200 m in corrispondenza della "Fossa del sud Adriatico".

Infine, prima di entrare nello Ionio, il fondale risale nuovamente ai circa 800 metri del canale d'Otranto, per poi sprofondare definitivamente negli abissi del Mediterraneo.

Importanti differenze morfologiche nella batimetria sono riscontrabili fra le fasce costiere orientali ed occidentali: il fondale poco profondo caratteristico del nord Adriatico, trova infatti continuità ad ovest lungo la costa italiana, la quale si caratterizza per una fascia larga fino a 50 Km con pendenza media inferiore a 0.7° . Più a sud del Gargano, lungo la costa pugliese, la piattaforma continentale si allarga a 70-80 Km in corrispondenza del Golfo di Manfredonia, per poi restringersi rapidamente a 20-30 Km fra Bari e Santa Maria di Leuca. Ad ovest, invece, si hanno fondali rapidamente degradanti fin dalla linea di costa, con presenza di numerosi apparati insulari, che danno origine a numerosi "canali".

La peculiare morfologia del fondale trova origine sia nei processi tettonici prima accennati, che in quelli sedimentari. Questi ultimi sono stati in passato controllati dalle grandi oscillazioni eustatiche occorse nel quaternario in corrispondenza delle fasi glaciali ed interglaciali (Trincardi et al., 1996; Trincardi and Correggiari, 2000). Durante i massimi glaciali, il livello del mare scese fino a circa -120 m rispetto all'attuale scoprendo l'intero nord Adriatico, che divenne così un'estesa pianura alluvionale; in essa deponevano tutti i fiumi del nord Italia, in un periodo di intensi processi erosivi nei bacini imbriferi e di grande disponibilità di sedimenti. Lungo le coste italiane a sud del Conero, invece, i locali sistemi fluviali si raccordavano in un alveo parallelo alla linea di costa, che sfociava in un apparato deltizio ancora rilevabile nel golfo di Manfredonia, apportando sedimenti che ancora oggi costituiscono la gran parte della locale piattaforma continentale. I successivi processi trasgressivi-regressivi hanno poi rimodellato il fondale, rendendolo morfologicamente simile a quello odierno.

Attualmente, il mantenimento della piattaforma continentale è controllato dal trasporto sotto costa e dalla deposizione dei sedimenti finì apportati dal Po e dai locali sistemi fluviali. Nei fondali poco profondi, sono inoltre fondamentali gli eventi di tempesta, durante i quali i sedimenti depositati vengono in parte risospesi e trasportati dal moto ondoso (Cushman and Roisin, 2001; Wang and Pinardi, 2002).

2.1.3 I Fiumi

Il principale corso d'acqua dell'intero bacino dell'Adriatico è il fiume Po, che assieme agli altri fiumi presenti fra il delta e il golfo di Trieste (Adige, Brenta, Piave, Livenza, Tagliamento, Isonzo), ha determinato sia la morfologia del fondale del nord Adriatico che la presenza di coste sabbiose lungo tutto il margine ovest.

Il Po presenta alla foce una portata media climatologica di circa $1550 \text{ m}^3/\text{s}$; questo dato, raffrontato con la media relativa alla somma degli apporti di tutti i fiumi presenti nel bacino, stimata in $5700 \text{ m}^3/\text{s}$ (Raicich, 1994; Raicich, 1996), rappresenta da solo il 28% dei contributi totali di acque fluviali. L'apporto di acque dolci e generalmente più fredde dovute al fiume Po condiziona significativamente la salinità e la circolazione dell'Adriatico, almeno alla pari di altri fattori "forzanti", quali il vento o il flusso di calore. Un altro complesso fluviale che determina un significativo apporto di acque dolci stimato tra $923\text{-}1244 \text{ m}^3/\text{s}$ (Raicich, 1994; Raicich, 1996), è quello croato-albanese situato nel sud-est del bacino.

Durante il periodo estivo, gli apporti fluviali di acqua dolce riescono a scorrere superficialmente grazie alla loro bassa densità e alla notevole stratificazione della colonna d'acqua. Questo meccanismo di trasporto è il principale responsabile del decadimento della qualità delle acque costiere durante le stagioni calde, in quanto le acque fluviali trasportano con se notevoli quantità di nutrienti, che possono innescare fenomeni di eutrofizzazione.

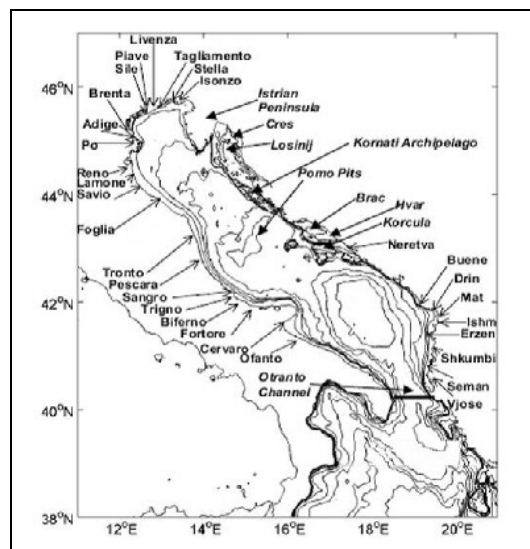


Figura 2: Collocazione delle foci dei principali fiumi
(da Zavatarelli et Pinardi, 2002, modificato).

2.1.4 Suddivisione in bacini

Considerazioni morfologiche, geografiche e idrodinamiche, hanno suggerito la suddivisione dell'intero bacino dell'Adriatico in 3 sotto-sezioni:

- **Nord Adriatico (NAd)**, che si estende dal golfo di Trieste fino alla linea ideale che, dall'isobata dei 100 metri di profondità (la quale presenta andamento ortogonale all'asse maggiore del bacino), si proietta verso le coste dalmate e verso quelle italiane, intersecandosi con la nostra penisola poco a nord di Pescara.
- **Medio Adriatico (MAd)**, che si estende dalla sopracitata linea ideale fino ad un'altra linea ideale che congiunge la penisola garganica con l'isola di Lastovo. Rientrano in questa sezione la depressione di Pomo, la sella di Pelagosa, e la prosecuzione costiera della piattaforma continentale collegata alla penisola italiana fino al Gargano.
- **Sud Adriatico (SAd)**, che si estende dalla congiungente Gargano-Lastovo fino al confine con il mare Ionio, individuato al parallelo di Otranto. Questa sezione meridionale si caratterizza per la presenza dell'ampia depressione centrale denominata "Depressione del SAd" che supera i 1200 metri di profondità.

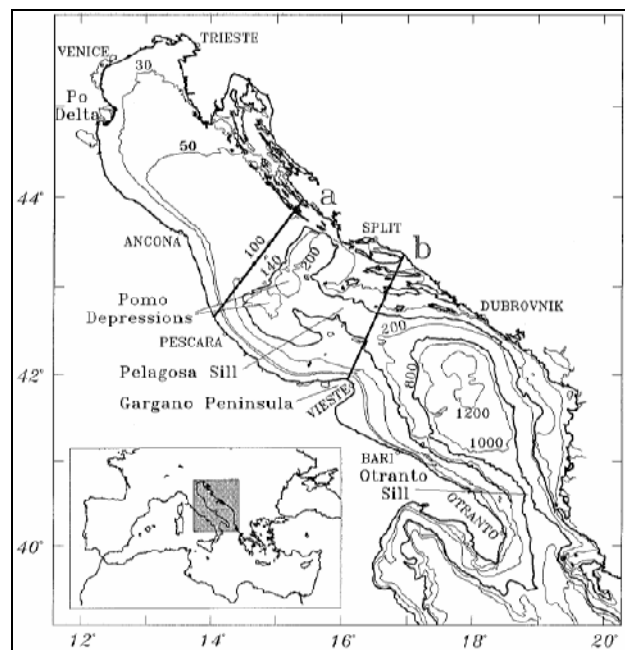


Figura 3: Carta batimetrica dell'Adriatico con la suddivisione in bacini (da Artegiani et. al., 1997a).

2.2 CLIMATOLOGIA

In questa sezione viene riportata una breve descrizione di quelli che sono i regimi atmosferici ed oceanografici “medi” del bacino, al fine di fornire un quadro introduttivo preciso dell’area di studio di questo lavoro. Per regimi “medi” si intendono quei processi di scala spazio-temporale molto ampia, verificati per un lungo periodo (climatologico), che caratterizzano il bacino in assenza di “perturbazioni” a scala più breve.

In questo lavoro si parlerà frequentemente di stagioni, soprattutto in relazione, alla notevole variabilità che le proprietà dell’Adriatico presentano nel corso dell’anno. L’esatta definizione delle varie stagioni, per l’Adriatico, si deve ad Artegiani (Artegiani et al., 1997a,b), come segue:

- **Inverno:** Gennaio-Febbraio-Marzo-Aprile.
- **Primavera:** Maggio-Giugno.
- **Estate:** Luglio-Agosto-Settembre-Ottobre.
- **Autunno:** Novembre-Dicembre.

2.2.1 Il regime dei venti

I venti climatologicamente rilevanti che soffiano sul bacino dell’Adriatico sono la Bora e lo Scirocco.

La Bora è un flusso d’aria tendenzialmente freddo e secco, con direzione prevalente NE–SO, ed è il regime ventoso predominante nel NAd, soprattutto durante la stagione fredda (da novembre a marzo) quando la frequenza di vento con velocità superiore a 15 m/s (vento “forte”) può arrivare fino a 6 giorni/mese con una persistenza media di circa 12h, contro una persistenza media estiva di un giorno/mese (Meteorological Office, 1962). Questo vento interessa generalmente la parte più settentrionale del bacino, ma quando la differenza di pressione che lo produce è particolarmente elevata, può arrivare ad estendersi fino a sud.

La Bora condiziona fortemente la circolazione dell’Adriatico. In estate-autunno, in presenza di forte stratificazione della colonna d’acqua, episodi prolungati di Bora forte non consentono alle acque dolci del fiume Po di disperdersi sull’intero NAd, ma le confinano in prossimità della costa. A causa di questo processo le acque superficiali del NAd risultano meno diluite (con l’eccezione della costa italiana) e di conseguenza

la loro salinità non viene ridotta. Questo risulta essere un fattore di preconditionamento importante nella formazione delle acque dense, oltre a favorire le correnti costiere. In autunno-inverno, gli episodi di bora forte e fredda contribuiscono alla rottura del termoclino, e innescano processi di rimescolamento verticale con riossigenazione della colonna d'acqua. In letteratura sono riferiti singoli episodi di Bora in grado innescare scambi termici mare-atmosfera superiori a 800 W/m^2 , inducendo, nella colonna d'acqua poco profonda (in questa zona la batimetria non supera i -50m) un raffreddamento medio che può arrivare a 2.4°C in novembre e 1.4°C in gennaio/febbraio (Vilibic et al., 2004).

La presenza ad oriente della catena montuosa delle Alpi Dinariche, condiziona i flussi di bora, che, a seconda della direzione di provenienza, vengono incanalati lungo percorsi preferenziali e giungono ora amplificati ora smorzati ad interagire con il mare aperto, determinando una struttura del rotore del vento assai complessa e riproducibile con difficoltà nei modelli oceanografici.

Lo Scirocco è un regime di vento caldo di direzione prevalente SE-NO, quindi la sua direzione prevalente è parallela all'asse maggiore del mare Adriatico. Esso si instaura come conseguenza del passaggio di un minimo depressionario a nord del bacino, presenta intensità medie inferiori rispetto alla Bora (velocità tipica di 10 m/s), ed essendo un vento "di mare" presenta una maggiore omogeneità.

Rispetto alla Bora, lo scirocco non privilegia una stagione particolare, tuttavia episodi di vento "forte" (velocità superiore a 15 m/s) sono riferibili prevalentemente alle stagioni invernali e primaverili. La loro persistenza media oscilla fra 10 e 12 ore, e solo occasionalmente si protrae fino a 36 ore. Lo Scirocco risulta determinante in concomitanza di una marea sigiziale e di un regime di particolare bassa pressione sul NAd, nel determinare fenomeno dell'acqua alta nella laguna di Venezia. Anche questo vento condiziona le strutture circolatorie dell'Adriatico in modo importante, essendo in grado di interrompere ed invertire le correnti marine superficiali che provengono da nord.

2.2.2 Distribuzione di temperatura e salinità

L'Adriatico è caratterizzato da una forte variabilità spazio-temporale nella distribuzione della temperatura. Essendo un bacino stretto, allungato in senso

latitudinale e circondato da continenti, possiede una pronunciata variabilità stagionale. Nelle regioni più settentrionali, l'escursione termica annuale raggiunge i 25°C, mentre a Sud è generalmente stimata attorno ai 18°C. I valori estremi di temperatura superficiale che si possono riscontrare durante l'anno, abbracciano un ampio range, fra +3°C e +29°C. In ogni caso, l'Adriatico è considerato un mare temperato, dal momento che la sua temperatura nei livelli più profondi non scende quasi mai sotto ai +10°C, +12°C nell'area del SAd, lontano dalla costa. Durante l'inverno, la superficie del SAd è mediamente 8-10°C più calda rispetto al MAd e al NAd. Nelle altre stagioni la distribuzione orizzontale della temperatura presenta maggiore uniformità.

Alla superficie, le acque costiere sono generalmente più fredde rispetto a quelle di mare aperto, mentre il minimo di temperatura nelle acque profonde viene registrato nel MAd (depressione di Pomo) e lungo la fascia costiera occidentale. La temperatura decresce con la profondità, se si eccettua il segnale inverso dovuto alle correnti costiere occidentali. Durante la stagione più calda si assiste alla formazione di un termoclino collocato generalmente fra -10 e -30 m.

La variazione annuale di temperatura è generalmente elevata. Lungo le coste si registra un minimo di temperatura nel mese di febbraio, mentre il massimo è rilevato solitamente in agosto; in entrambi i casi circa due mesi dopo il minimo/massimo insolamento solare. Questo appare in contrasto con quanto avviene in mare aperto, dove la differenza fra segnale e risposta si riduce ad un mese. Sono altresì significative le variazioni interannuali di temperatura, che sembrano essere riconducibili ad una ciclicità di circa 3 anni per quanto concerne il dato di superficie. Nel mare aperto le oscillazioni interannuali sono principalmente riconducibili alla variabilità degli scambi d'acqua con l'est del Mediterraneo.

L'Adriatico, pur considerato nel suo complesso un bacino di diluizione per effetto dei numerosi apporti fluviali (si veda a tal proposito il paragrafo 2.2.3), presenta una salinità elevata per effetto del suo collegamento con il mare Mediterraneo, che consente l'avvezione attraverso il canale di Otranto, di acque più salate provenienti dal bacino di Levante; questa è l'area dove si riscontra la maggiore salinità dell'intero Mediterraneo, con picchi superiori a 39.1 psu.

In Adriatico, la maggior parte del volume d'acqua presenta una salinità compresa fra 38.4 e 38.9. Generalmente, la salinità è inferiore o manifesta una maggiore

variabilità nel NAd e nelle zone costiere; il minimo assoluto viene rilevato vicino alle foci del Po, il massimo viene riscontrato nel livello intermedio della depressione del SAd, dove l'avvezione di acque intermedie dal Mediterraneo è maggiore.

Misurazioni di salinità ripetute negli anni, sia in zone costiere che in mare aperto, suggeriscono, per l'Adriatico, un lieve ma costante processo di incremento della salinità media (Zore-Armanda et. al.,1991), confermato anche da studi più recenti.

2.2.3 Bilancio idrico e di calore

Il bilancio idrico complessivo di un bacino è definito tramite la formula:

$$W = E - P - F$$

dove con E sono indicate le perdite per evaporazione, con P gli apporti dovuti alle piogge e con F quelli derivanti dai fiumi. Nel computo complessivo per l'Adriatico, il bilancio di W risulta negativo, ovvero il bacino “guadagna” acqua e si connota pertanto come bacino di diluizione. Questa proprietà non è in linea con quella del bacino del Mediterraneo nel suo complesso, il quale cede invece più acqua di quanta ne riceva dalle precipitazioni e dai fiumi a causa dell'intensa evaporazione, e si configura pertanto come bacino di concentrazione. Poiché la salinità di un bacino tende a rimanere costante nel lungo periodo, un bacino di diluizione presenta sempre un flusso alino proveniente dall'esterno, aspetto che si verifica anche in Adriatico.

Come tutti i mari, anche l'Adriatico scambia energia termica con l'atmosfera all'interfaccia aria-mare; questo flusso superficiale di calore viene usualmente calcolato a partire dalla formula seguente:

$$Q_t = Q_s + Q_b + Q_h + Q_e$$

dove, il calore totale Q_t dipende dalla radiazione solare Q_s , dalla radiazione a onda lunga riemessa dal mare Q_b , dal calore sensibile Q_h e dal calore latente Q_e .

Sono stati condotti numerosi studi scientifici per determinare i valori climatologici del flusso di calore in Adriatico: il risultato complessivo è che il calore totale Q_t , calcolato su base annuale, è mediamente negativo, ovvero il bacino perde più

calore di quanto ne riceve. Le stime dei diversi autori oscillano fra -17W/m^2 e -22W/m^2 (Cushman-Roisin et al., 2001). La perdita di calore superficiale viene compensata dal trasporto di masse d'acqua relativamente calde provenienti dal bacino del Mediterraneo (Artegiani et al., 1997a).

2.2.4 Masse d'acqua

In oceanografia le masse d'acqua vengono generalmente classificate in base alle loro proprietà in termini di temperatura, salinità e densità potenziale. Questi parametri, infatti, tendono a rimanere costanti nel tempo a riscontro di una certa lentezza nei fenomeni di mescolamento fra masse d'acqua diverse in assenza di moti turbolenti.

In Adriatico sono riscontrabili ben 4 tipi di acque differenti, classificabili come “profonde”, di cui 3 formate localmente ed una proveniente dal bacino levantino del Mediterraneo. La loro importanza risiede sia nei processi di mantenimento della salinità del bacino, che in quelli di ossigenazione degli strati più profondi, sia dell'Adriatico, che di altre regioni marine ad esso limitrofe (Artegiani et al. 1997a , Vilibic et Orlic, 2002).

A queste 4 masse d'acqua può essere aggiunto un quinto tipo d'acqua superficiale, rappresentato da quella trasportata lungo la penisola italiana dalla “*Western Adriatic Coastal Current*” (WACC).

Le masse d'acqua profonde ed intermedie descritte in Adriatico sono le seguenti:

- **NAdDW – North Adriatic Deep Water** -, sono acque che si formano localmente con una marcata variabilità interannuale nel nord Adriatico, in un ambiente marino caratterizzato da un fondale di piattaforma continentale molto basso (< 50 m). Esse generano correnti di densità che le trasportano più a sud lungo il fondale.
- **MAdDW – Middle Adriatic Deep Water** -, possono formarsi sia localmente nel MAd (area delle depressioni del Pomo), che risultare dalla rielaborazione delle acque dense del NAd, le quali possono migrare nel MAd mescolandosi con acque locali. Una parte consistente di queste acque tende ad occupare stabilmente gli strati più profondi delle depressioni del Pomo.
- **SAdDW o AdW – (South) Adriatic Deep Water** -, questa massa d'acqua rappresenta il maggior contributo dell'Adriatico alla circolazione dell'intero

Mediterraneo. Essa si forma nel SAd per mescolamento delle acque ad alta salinità provenienti dal bacino levantino con le acque dense provenienti dal nord Adriatico, e per convezione locale da raffreddamento superficiale. Il mescolamento e la discesa nella depressione del SAd è favorito sia da fattori morfologici del fondale (Vilibic et Orlic, 2002), che dalle dinamiche all'interfaccia aria-mare.

- **LIW – Levantine Intermediate Water** -, si originano nel bacino di levante del Mediterraneo, e da lì fluiscono in senso antiorario raggiungendo lo Ionio, dove biforcano il loro percorso, proseguendo da una parte verso il canale di Sicilia e dall'altra in Adriatico attraverso il canale d'Otranto.

Nella tabella 1 sono riassunte le proprietà idrologiche delle acque appena elencate.

Denominazione	Temperatura (°C)	Salinità (psu)	Densità (Sigma-t)
NAdDW	10.60 ± 0.80	38.30 ± 0.28	> 29.3
MAdDW	11.62 ± 0.75	38.47 ± 0.15	> 29.2
ADW (SAdDW)	13.16 ± 0.30	38.61 ± 0.09	> 29.1
LIW	14.00 ± 0.30	38.75 ± 0.15	> 29.05

Tabella 1: Proprietà delle masse d'acqua profonde in Adriatico (adattato da Vilibic et Orlic, 2002).

Risulta più difficile fornire invece una caratterizzazione precisa, in termini di salinità e densità, delle acque costiere italiane che fluiscono verso sud trasportate dalla WACC, a causa della loro forte variabilità. Esse sono generalmente acque a bassa o bassissima densità e salinità, in quanto provenienti direttamente dagli apporti fluviali, in particolare del fiume Po. A causa della loro bassa densità, esse rimangono in superficie (primi 15-20 m) e per effetto della forza di Coriolis sono confinate nei pressi della linea costiera italiana nel loro procedere verso sud. Durante il loro percorso, le acque della WACC perdono gradualmente la propria “identità”, mescolandosi con acque locali e incrementando la propria salinità fino alla fuoriuscita nel mare Ionio.

2.2.5 Formazione di acque dense

Il mare Adriatico è, assieme al bacino di Levante, una delle tre aree del mare Mediterraneo in cui, a seguito di processi di sprofondamento (*downwelling*) innescati

dal raffreddamento superficiale, si formano le cosiddette “acque dense”. Sono questi tipi di acque dalla densità particolarmente elevata, e ricche di ossigeno che trovano origine in superficie, prevalentemente durante la stagione invernale, a seguito della perdita di calore del bacino.

Se il raffreddamento è sufficientemente veloce, la “rottura” del termoclino è seguita da un sempre più marcato incremento di densità delle acque superficiali che rende la colonna d’acqua instabile; questa instabilità innesca a propria volta dei moti convettivi delle masse d’acqua, che sprofondano dalla superficie, garantendo un completo rimescolamento delle acque con apporto di ossigeno alle profondità.

In Adriatico, questa modalità di formazione delle acque dense si può avere in tutte e tre le sottosezioni del bacino, anche se capita più frequentemente nel NAd e nel MAd, sottoposti a maggiori flussi di calore negativi all’interfaccia aria-mare.

Le MAdDW e le SAdDW si possono anche formare per trasformazione di acque dense provenienti dall’esterno della rispettiva sottosezione (ad esempio le NAdDW o le LIW), per mescolamento con acque dense locali prodotte in anni precedenti.

Qualora vi sia una importante formazione di NAdDW per quantità e densità, si viene a generare una corrente di densità diretta verso Sud che segue la pendenza del fondale mantenendosi prevalentemente confinata ad ovest. Giunte nella zona della depressione di Pomo, le NAdDW possono in parte mescolarsi con le MAdDW (se la loro densità è sufficientemente elevata) e in parte proseguire il loro viaggio lambendo la costa italiana a profondità variabili fra i 75 e i 200 m, raggiunge il sud Adriatico, configurando il “*Gargano Plume*” (Wang et al., 2006).

Se sono prodotte ingenti quantità di MAdDW, quelle che traboccano oltre la depressione del Pomo possono anch’esse alimentare la stessa corrente di densità descritta per le NAdDW e dirigersi verso il Gargano.

Nel medio e nord Adriatico, le masse d’acqua prodotte dalla superficie si originano all’interno di strutture circolatorie cicloniche indotte da importanti episodi di Bora, che come già detto, interagiscono con la superficie del mare irregolarmente a causa del controllo orografico operato dalle Alpi Dinariche, che ora impedisce ora favorisce i flussi di vento (struttura del rotore del vento).

Nel NAd, l’area individuata come principale sorgente di acque dense è quella situata immediatamente a sud rispetto alla linea ideale congiungente il delta del Po con

la città di Rovigno in Istria. Tuttavia la dinamica precisa non è ancora stata determinata, e non si esclude che le acque dense si formino anche altrove più a nord, e vengano poi convogliate a sud da locali correnti di densità.

Fino a prima dell'*Eastern Mediterranean Transient*, un cambiamento climatico importante che verrà introdotto nel paragrafo successivo, le acque profonde del NAd erano considerate come le più dense prodotte nell'intero Mediterraneo (Robinson et al., 1992).

La produzione di acque dense nell'Adriatico centro-settentrionale rivela un'importantissima variabilità interannuale, collegata alla presenza o meno di quei fattori che sono considerati precursori o determinanti per la loro generazione.

Sono ritenuti fattori determinanti per la produzione di acque dense (Vilibic et al., 2005; Vilibic et Orlic, 2002):

- Un'elevata salinità nel bacino nei mesi autunnali, che precedono il periodo di massimo raffreddamento superficiale.
- Una forte perdita di calore all'interfaccia aria-mare durante l'autunno e l'inverno, dovuta a basse temperature stagionali, e a ripetuti, duraturi ed intensi episodi di Bora, che, inoltre, determinano una notevole evaporazione contribuendo così all'incremento di densità.

Nel caso particolare del NAd, dove la salinità superficiale è generalmente più bassa, un basso apporto autunnale (in particolare nei 2 mesi che precedono la formazione) di acque fresche da parte del Po, favorisce la concentrazione salina. Anche l'avvezione di LIW porta il proprio contenuto salino fino nel NAd; per il MAd e per il SAd essa risulta invece il principale fattore di controllo della salinità.

Precondizione per la genesi di acque profonde particolarmente dense nel NAd (che possono raggiungere valori di densità potenziale fino a 1029.9 1030.0 Kg/m³), è lo scarso apporto fluviale di acque dolci anche nei mesi estivi.

Il verificarsi di tutti questi fattori può essere completo o parziale, determinando così un'importante variabilità interannuale nei parametri quantitativi e qualitativi delle NAdDW e MAdDW.

Studi numerici (Wang et al., 2006) hanno dimostrato come sia necessaria una perdita di calore media continua di 175 W/m² fra novembre e gennaio per produrre una

quantità di NAdDW sufficiente a pilotare una corrente fino alla penisola del Gargano, che viene raggiunta circa due mesi dopo la sua formazione. La percentuale di acque dense che raggiunge il Gargano può raggiungere, in anni favorevoli alla formazione di acque dense, anche il 18-20% del totale prodotto in NAd (Vilibic and Orlic, 2002). Velocità osservate di questa corrente profonda oscillano, infatti, fra $0.06-0.08 \text{ ms}^{-1}$, consentendo alle NAdDW di raggiungere le depressioni del Pomo già un mese dopo la loro formazione (Vilibic and Orlic, 2002).

Sebbene non vi siano studi, è presumibile che anche nel MAd, una perdita di calore media giornaliera superiore a 175 W/m^2 fra Novembre e Gennaio, possa essere considerata indicativa di una produzione ingente di MAdDW, che come già detto, possono anch'esse generare la stessa corrente di densità.

Quando le acque dense raggiungono e superano la penisola garganica, fluendo sempre in corrispondenza delle isobate più profonde della piattaforma costiera, trovano sul loro percorso un'importante discontinuità nel profilo della piattaforma continentale, proprio sull'orlo della fossa del SAd, denominata "canyon di Bari". Questa "lacuna" favorisce il loro sprofondamento nella depressione del SAd, dove le acque dense si fondono con le locali LIW perdendo la propria "identità" e contribuendo alla formazione delle locali acque profonde (SAdDW). Di seguito, queste vengono in parte immagazzinate nella depressione (se particolarmente dense da sostituire le acque presenti) e in parte fluiscono oltre la sella presente nel canale d'Otranto, ad ossigenare le profondità dello Ionio (Manca et al., 2002).

Il SAd è anche un'area di importante formazione locale di acque profonde grazie all'elevata salinità delle proprie acque e alla persistente circolazione ciclonica centrata sulla depressione del SAd. Questa favorisce i rimescolamenti verticali, consentendo alle acque superficiali di sprofondare se sottoposte ad un'adequata perdita di calore durante la stagione fredda.

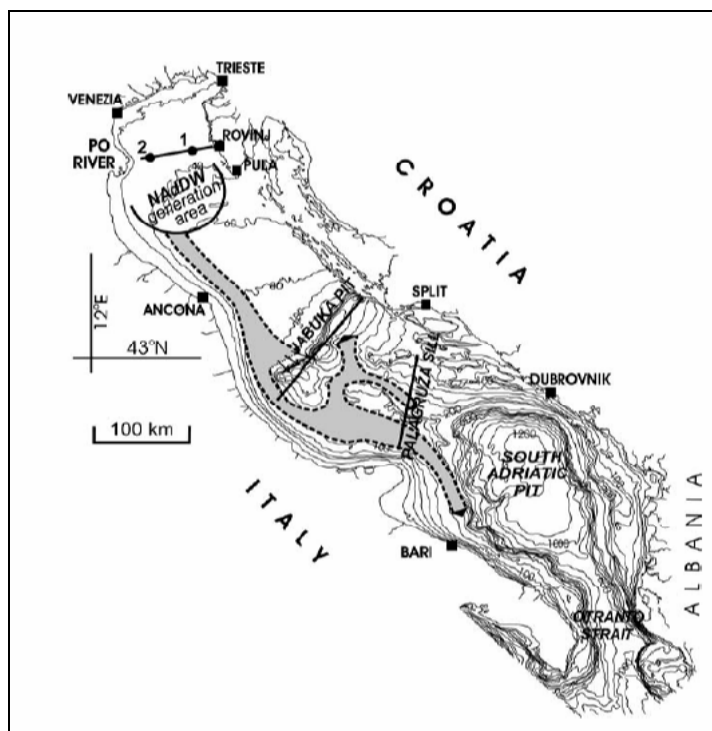


Figura 4: Area di generazione delle NAdDW e direzione del loro flusso verso sud (da Vilibic and Supic, 2005).

2.2.6 Le acque levantine intermedie

Le Acque Levantine Intermedie (di seguito denominate LIW) penetrano nell'Adriatico attraverso il canale d'Otranto ad un livello compreso fra 150 e 400 m di profondità. Come già accennato in precedenza, esse contribuiscono in parte alla formazione delle SAdDW, mescolandosi con le acque dense locali, ed in parte risalgono verso il nord con un flusso che segue la costa orientale, riequilibrando la salinità del bacino e svolgendo un ruolo importante di pre-condizionamento nella formazione delle NAdDW.

Le LIW si formano nel bacino di Levante del Mediterraneo; in quest'area, le locali acque dense (*Eastern Mediterranean Deep Water* – EMDW) sono richiamate alla superficie dalla presenza di una struttura ciclonica nelle vicinanze di Rodi. Durante l'inverno, la presenza di venti freddi e secchi incrementa l'evaporazione superficiale di queste acque, aumentandone la salinità, con un conseguente innesco di processi convettivi. Vista l'elevata temperatura di queste acque, questi movimenti verticali procedono fino ad un livello intermedio (fra 200 e 800 m circa) formando uno strato di

acque che si muovono da ovest verso est: le acque levantine intermedie. Parte delle EMDW si sono formate fino alla fine degli anni '80, per apporto di SAdDW, che fuoriescono dall'Adriatico per sprofondare nello Ionio e dirigersi verso il bacino di levante (Klein B., Roether W. et al., 1998).

Nelle ultime due decadi si è però verificato un improvviso cambiamento nella formazione delle EMDW, denominato *Eastern Mediterranean Transient* (EMT), a seguito del quale le acque del mare Egeo hanno rimpiazzato le ADW come sorgente di acque più dense nell'est Mediterraneo (Klein B., Roether W. et al., 1998; Malanotte-Rizzoli et al., 1999). Questa nuova acqua di fondo risulta essere notevolmente più calda (c.a. + 1°C), più salata (c.a. 0.1 psu) e più densa (c.a. 0.06 kg m⁻³) della “vecchia” acqua di fondo Adriatica (Klein B., Roether W. et al., 1998).

Questo evento è stato interpretato come conseguenza di anomalie meteorologiche importanti occorse nell'est del Mediterraneo, le quali si sono protratte sufficientemente a lungo da determinare un brusco cambiamento nella struttura circolatoria del bacino, che persiste tutt'ora.

In particolare, il transiente è stato spiegato attraverso il concomitante ruolo avuto da venti dalla vorticità anomala nello Ionio, e da una sequenza temporale climatica costituita da un anno molto freddo (1987), seguito da anni con una forte ingressione di acque dal Levante (1989-1991), seguiti ancora da due anni (1992 e 1993) con inverni particolarmente freddi (Malanotte-Rizzoli et al., 1999; Demirov and Pinardi 2002). Questo repentino evento mostra come un sistema apparentemente stabile possa incorrere improvvisamente in un “collasso”.

L'importanza delle LIW sta nel portare calore e salinità all'Adriatico, che su base annuale tenderebbe sia a raffreddarsi che a diluirsi, a causa dei notevoli apporti fluviali di acque dolci e della perdita di calore. L'accadimento dell'EMT causa pertanto nell'Adriatico un aumento importante di salinità, oltre ad un apporto maggiore di calore: per mantenere le stesse caratteristiche di galleggiabilità, le LIW “attuali” presentano, infatti, una temperatura superiore rispetto a quella climatologicamente definita prima dell'EMT (Vilibic et Orlic, 2002). Questo effetto di incremento di salinità nell'Adriatico risulta ben visibile in questo mio lavoro nella sezione dedicata al confronto climatologico.

2.2.7 La circolazione generale

La circolazione generale dell'Adriatico, risente dei forzanti presenti su scala temporale climatologica. Fra questi, quelli che determinano la circolazione sono il vento e il forzante termalino, dovuto alla distribuzione non eguale nel bacino delle proprietà idrografiche quali temperatura, salinità e densità. In particolare:

- Il rilevante apporto fluviale di acque dolci abbassa localmente il livello di salinità delle acque, determinando forti gradienti sia verticali che orizzontali;
- L'Adriatico inoltre, come già accennato, perde mediamente calore: questo implica, per continuità, un necessario apporto di calore dall'esterno verso l'interno del bacino;
- Nel NAd-MAd vi è la formazione di acque dense che provoca un gradiente di densità riequilibrato da correnti profonde dirette verso sud, dove si originano le SAdDW, che in parte fuoriescono poi dal bacino per sprofondare nello Ionio e dirigersi verso il Mediterraneo orientale.

La definizione della circolazione generale in Adriatico è stata proposta da Artegiani (Artegiani et al., 1997a;b) a seguito dell'analisi di una lunghissima serie temporale storica di dati idrografici; essa presenta due componenti, una superficiale ed una profonda.

La circolazione superficiale generale procede in senso antiorario (vedi figure 5 e 6), presenta una struttura ciclonica in ognuno dei tre sottobacini e due correnti costiere principali. Le tre strutture cicloniche prendono rispettivamente il nome di: ciclone del nord Adriatico (*North Adriatic Gyre*); ciclone del medio Adriatico (*Middle Adriatic Gyre*) e ciclone del sud Adriatico (*South Adriatic Gyre*).

Le due correnti costiere principali sono la *Eastern Adriatic (Coastal) Current* (EAC) e la *Western Adriatic Coastal Current* (WACC). La prima convoglia acque calde e salate nell'Adriatico, ed è composta nello strato superficiale da *Ionian Surface Waters* (ISW) e ad un livello più profondo (fra 150-200 m) da LIW.

La WACC è una corrente costiera composta prevalentemente da acque fredde e poco salate provenienti essenzialmente dagli apporti del Po, le quali scorrono in superficie nei primi 20 metri della colonna d'acqua, in un flusso molto ristretto (circa

15 Km) addossato, per un effetto di Coriolis, alla costa italiana. Come evidenziato dalla figura 5, essa viene solitamente suddivisa in tre “bracci” :

- la North Adriatic Current, per il tratto che scorre attorno alla struttura deltizia del Po;
- la Western-Middle Adriatic Current, per il tratto compreso fra il Conero e i laghi di Lesina;
- la Western-South Adriatic Current, dal golfo di Manfredonia fino allo stretto di Otranto.

L’effetto principale della WACC è quello di trasportare le acque del sottobacino nord fin oltre lo stretto di Otranto, lungo la costa italiana. Questo flusso in uscita viene compensato proprio dalle LIW, per mantenere il bilancio di massa del bacino, in una circolazione definita “estuarina” o termoalina positiva.

Le strutture di circolazione superficiali manifestano un’importante variabilità stagionale: durante l’inverno, della WACC risulta sempre rilevabile solamente il braccio nord, mentre l’evidenza di una struttura costiera continua si ha a partire dalla primavera fino all’autunno.

Estate ed autunno sono anche i mesi in cui si ha la maggiore evidenza dei tre cicloni presenti in mare aperto, i quali condizionano positivamente la WACC, rinforzandola. Il ciclone del SAd è quello che tende a rimanere visibile anche nella stagione invernale. In estate la EAC tende a diminuire di intensità, per tornare evidente nella stagione autunnale, dove la maggiore continuità degli episodi di scirocco favorisce l’ingresso di acque dallo Ionio.

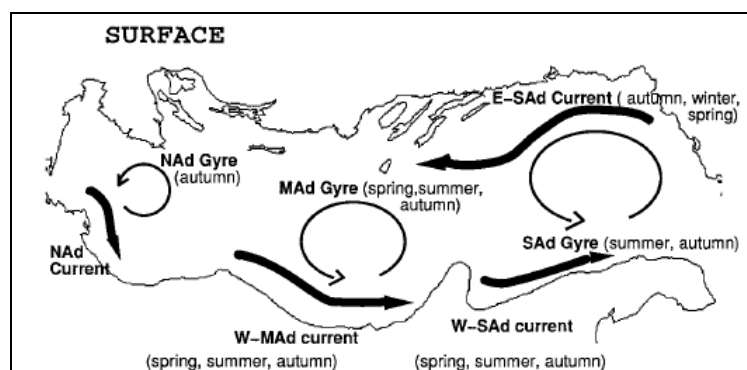


Figura 5: Variabilità stagionale della circolazione superficiale in Adriatico
(da Artegiani et al.; 1997b)

In autunno, questa corrente è favorita anche dal maggior apporto stagionale dei fiumi albanesi.

Alla circolazione termalina superficiale appena descritta, si va ad aggiungere una circolazione termalina profonda, descritta sempre in figura 6. Essa è determinata dal gradiente pressorio dovuto alla formazione nel bacino di acque profonde di densità superiore a quelle che si trovano immediatamente al di fuori dello stesso. Tale gradiente produce una corrente profonda di acque dense denominata “*Deep Water Outflow Current*” (DWOC) che si dirige da Nord verso Sud, rimanendo in prossimità scarpata continentale italiana fino all’altezza di Bari, scende poi nella fossa del SAd per fuoriuscire infine dallo stretto di Otranto, oltre i 400 m di profondità.

La perdita di acque dense da parte del bacino è compensata da un flusso di acque ioniche (ISW) e da LIW, entrambe le quali occupano strati più superficiali rispetto alle DWOC (dalla superficie fino a -400 m).

Questa struttura della circolazione viene definita “antiestuarina”, proprio perché a fuoriuscire sono masse d’acqua dense e poste a livelli profondi, che vengono compensate da masse d’acqua più leggere che fanno il loro ingresso a livelli più superficiali. Le acque levantine intermedie contribuiscono al mantenimento della salinità del bacino e, assieme alle ISW, ne compensano anche la perdita di calore.

Si ha evidenza della circolazione profonda a partire dal tardo inverno, quando, le masse d’acqua dense da poco prodotte nel NAd cominciano a muoversi verso sud. Il processo continua durante primavera ed estate e termina solitamente in autunno.

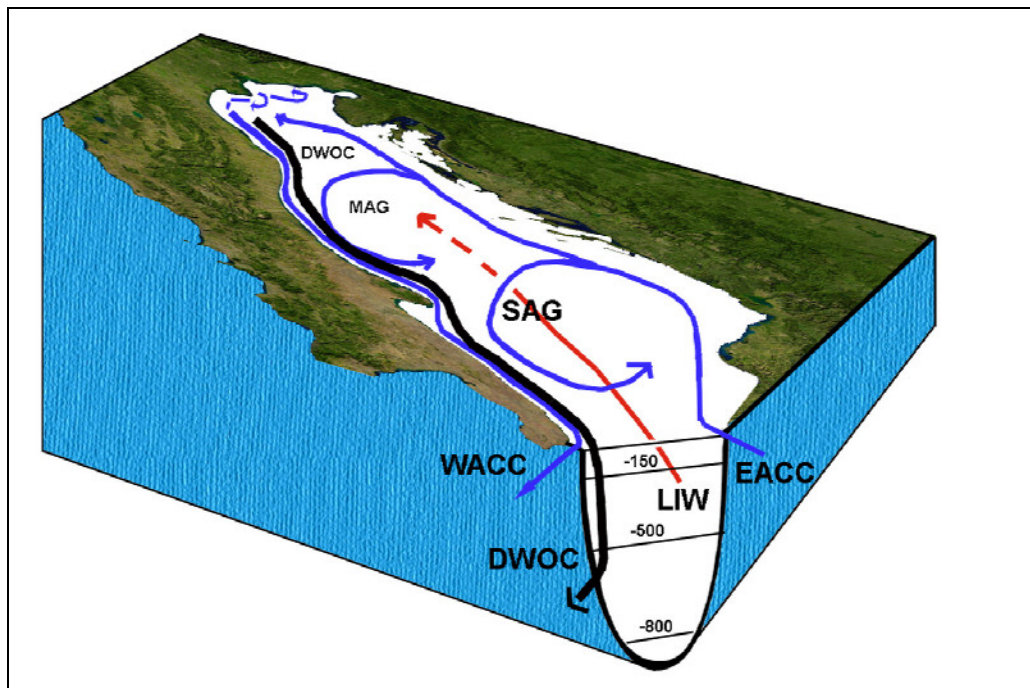
La DWOC è pertanto condizionata dalla produzione di acque dense nel NAd, che presenta forte variabilità interannuale. Come già descritto in precedenza, essa è favorita da inverni rigidi e autunni secchi, mentre viene ridotta o inibita in presenza di condizioni più temperate.

L’ingresso delle acque levantine intermedie è solitamente individuato a partire dalla primavera; risulta poi intensificato durante estate ed autunno, quando il regime ventoso da sud favorisce gli ingressi di acque attraverso il canale di Otranto.

Il vento e la sua variabilità stagionale, possiede anche l’importante capacità di perturbare l’intera circolazione media in Adriatico su scale temporali più piccole. Come descritto in precedenza, i due regimi di vento principali del bacino sono la Bora e lo Scirocco.

Della Bora abbiamo già detto, menzionando la sua capacità di indurre formazione delle NAdDW, delle MAdDW, e di rinforzare la WACC. Dello Scirocco abbiamo accennato circa la sua capacità di rinforzare i flussi di marea nel NAd per effetto della sua spinta verso nord.

Episodi intensi e prolungati di Scirocco sono in grado di invertire il percorso della WACC, e di indurre dei processi oscillatori nel livello del intero bacino. Questi presentano un periodo di circa 22 ore, durante le quali le correnti superficiali invertono alternativamente il loro senso, fino a che l'energia dell'oscillazione non si riduce sufficientemente.



**Figura 6: Schema generale della circolazione media dell'Adriatico
(da Cushman-Roisin, 2001, modificato).**

3 CAMPAGNA DART06A

3.1 SCOPO DELLA MISSIONE

La campagna oceanografica “*Dynamics of Adriatic in Real Time 2006A*” (DART06A) si è svolta nel medio-basso Adriatico, fra il 28 febbraio 2006 ed il 28 marzo 2006, a bordo della nave oceanografica NATO “Alliance”.

Essa è stata organizzata dal NATO *Undersea Research Centre* (NURC, con sede in La Spezia) assieme all’U.S. *Naval Research Laboratory* (NRL), con la partecipazione di numerosi istituti di ricerca italiani e stranieri: INGV, CNR, Arpa Emilia Romagna, Istituti Idrografico, Oceanografico, Meteorologico della Croazia, ISW germanico, università di Zagabria, di Atene, Accademia delle Scienze Albanese, Università del Colorado, di Bari, delle Marche, per citarne alcuni.

La scelta del mese invernale di test è stata motivata dalla contemporanea presenza in Adriatico di altre navi oceanografiche italiane (Dallaporta, Urania) ed internazionali, con le quali è stato possibile uno scambio di dati in tempo reale, coprendo l’intero bacino. Altra importante motivazione per la scelta del contesto stagionale, la limitata presenza di imbarcazioni turistiche.

I dati raccolti durante la crociera sono necessari per migliorare l’accuratezza dei modelli oceanografici ed atmosferici esistenti, per sviluppare nuovi algoritmi che descrivano, in particolare, le interazioni aria-mare e la variabilità a piccola scala spazio-temporale delle dinamiche marine.

I modelli numerici rappresentano, in generale, un importante strumento per lo studio, la comprensione e la gestione di un sistema altamente complesso quale è quello ambientale. Questo giustifica il grande sforzo profuso per il loro miglioramento.

Il mare Adriatico rappresenta, a tal proposito, un eccellente laboratorio naturale di studio per la sorprendente variabilità spazio-temporale che lo caratterizza: batimetria peculiare, i suoi processi costieri, la formazione di acque profonde ed il loro fluire negli strati profondi, gli apporti fluviali, i processi biochimici con le fioriture algali, il suo complesso sistema di correnti.

L’Adriatico è un mare che mette a dura prova i modelli oceanografici, proprio per la contemporanea presenza di processi con variabilità a scale spazio-temporali molto diverse fra loro.

Durante la crociera è stato possibile analizzare contemporaneamente modelli operativi meteorologici, modelli del moto ondoso e modelli oceanografici a differenti risoluzioni. Questi sono stati valutati rispetto ai dati raccolti in tempo reale, provenienti da boe, drifters, correntometri, CTD e vari altri strumenti posizionati a bordo della nave, nonché da misurazioni satellitari. Direttamente a bordo della nave Alliance si sono effettuate comparazioni modello-modello e analisi di correlazione fra di essi, con riguardo alla meteorologia, allo studio dei moti ondosi e all'oceanografia.

I dati messi a disposizione di tutti i partecipanti alla missione, consentiranno analisi dettagliate anche dopo la crociera, con particolare riferimento allo studio della variabilità su piccola scala del campo oceanografico.

3.2 CAMPIONAMENTO E STRUMENTAZIONI

L'area principale di interesse della crociera è quella riassumibile in un “rettangolo” avente per “lati corti” la linea ideale che da Pescara raggiunge la costa dalmata attraversando depressioni di Pomo e la linea ideale che collega Bari con Dubrownik, passando per il centro della depressione del Sud Adriatico, e come “lati lunghi” le due coste, quella italiana e quella dalmata (vedi figura 7). Particolare interesse è stato rivolto alla variabilità su breve scala rappresentata dalle instabilità della WACC attorno all'area del Gargano.

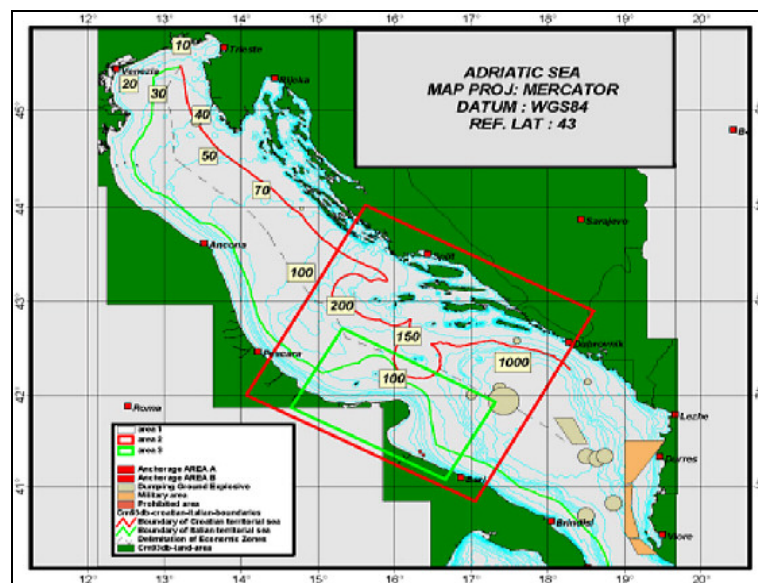


Figura 7: Area d'interesse crociera DART06A

Il progetto DART06A ha previsto:

- il recupero e riposizionamento di 13 ADCP-BARNY e di un SEPTR-BARNY lungo la linea Gargano-Spalato nel MAd. Questi sono poi rimasti “*in situ*” per tutta la primavera e l’estate, e sono stati recuperati da altre missioni.
- Il posizionamento di altri 3 ADCP e 5 SEPTR, di una stazione meteo, di un “*wave-rider*”, e di una strumentazione sperimentale per la misurazione delle correnti ancorata al fondale nel Golfo di Manfredonia, per analizzare il campo di circolazione generato dai modelli e valutarne, in tal modo, le prestazioni.
- La conduzione di una vasta campagna di osservazioni su ampia scala mediante CTD, per inizializzare i modelli idrodinamici di media e larga scala, e procedere al campionamento di acque per l’analisi degli inquinanti presenti.
- L’acquisizione di dati ottenuti tramite CTD e “*Acqua shut*”, mediante ripetute misurazioni a scala fine condotte attorno alla penisola del Gargano e al Golfo di Manfredonia, utilizzati per inizializzare e validare i modelli operativi a scala fine.
- Il rilascio in acqua di 19 “*Drifters*”, per misurare le correnti superficiali durante differenti condizioni meteo-marine. Queste misure sono state utilizzate per verificare le performance degli algoritmi che le descrivono nei modelli lagrangiani.
- La conduzione di una campagna di osservazioni e misurazioni ottiche, biologiche, chimiche e sedimentologiche attorno alla penisola garganica e nel golfo di Manfredonia.

L’importanza delle osservazioni multi-disciplinari condotte durante la missione, risiede nello scopo di produrre modelli combinati fra loro per migliorarne la capacità previsionale. Di seguito riporto una breve descrizione delle principali strumentazioni utilizzate e non soggette ad obbligo di riservatezza, per richiesta del NURC stesso.

3.2.1 CTD

Il CTD (*Conductivity – Temperature – Depth recorder*) è lo strumento a partire dal quale sono stati ottenuti i dati analizzati all’interno di questo lavoro; esso consente

di profilare verticalmente la colonna d'acqua mediante immersione dalla superficie fino alla profondità richiesta.

Esso consiste in una struttura tubolare cilindrica di protezione aperta, all'interno della quale sono alloggiati i sensori, che viene agganciata ad una lunga catena comandata dalla nave tramite un verricello. I CTD con telaio in alluminio possono raggiungere i 6000 m, quelli in titanio addirittura i 10500 m; durante la nostra missione sono utilizzati quelli in alluminio, a fronte di una profondità massima da raggiungere di circa 1000 m. Le misurazioni effettuate tramite CTD richiedono che l'imbarcazione stazioni immobile per il tempo necessario alla misura; quest'ultima dipende dalla profondità raggiunta. Fra i sensori presenti nei CTD utilizzati a bordo si annoverano:

- Sensore di Temperatura.
- Conduttimetro (tramite il quale si ottengono dati di salinità).
- Misuratore di O_2 disciolto in acqua.
- Fluorimetro.
- Misuratore ottico di torbidità.
- Profondimetro.

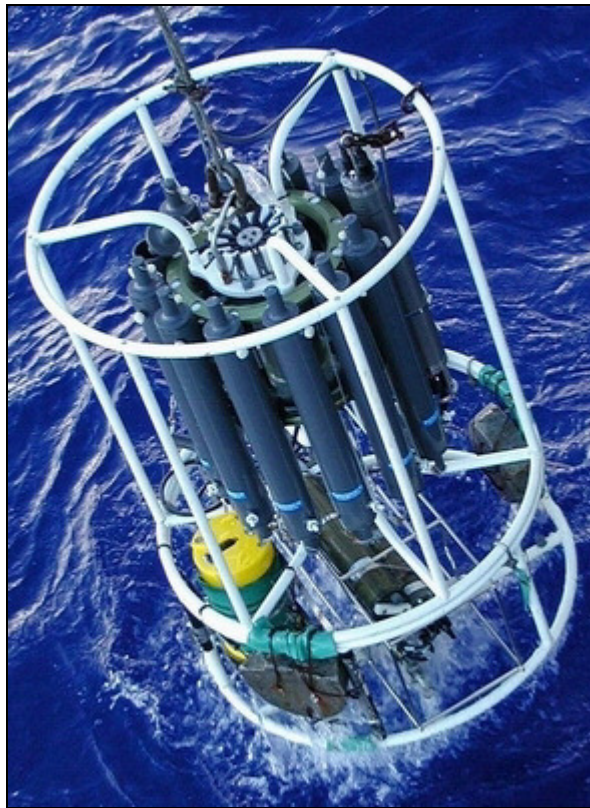


Figura 8: Un CTD in immersione.

Il campionamento dei dati avviene con una frequenza di 24 rilevamenti per secondo. In aggiunta ai sensori, sempre collegati con la nave (era possibile la visualizzazione dei dati in tempo reale), lo strumento è corredato da una serie di 12 contenitori per campionare l'acqua di mare a profondità stabilite. Durante la discesa del CTD, questi contenitori rimangono aperti, consentendo il passaggio dell'acqua, e vengono infine chiusi alla profondità desiderata per il campionamento mediante comando lanciato da bordo.

3.2.2 ADCP

L'ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) è uno strumento in grado di misurare l'effetto Doppler dovuto agli spostamenti delle masse d'acqua presenti, e di fornire quindi una misura indiretta delle correnti. Viene utilizzato posato sul fondale, protetto da una struttura in cemento a forma di “disco volante” chiamata Barny Sentinel, resistente alle reti a strascico. La frequenza di campionamento è di circa 15 minuti, per una durata di circa 60 secondi.

Dopo essere stata posizionata sul fondale, questa strumentazione viene solitamente lasciata in loco per alcuni mesi, al termine dei quali viene recuperata. Quest'ultima operazione è risultata particolarmente affascinante: determinato mediante GPS il punto geografico in cui era stato collocato in precedenza il Barny, viene inviato dalla nave un segnale sonar, ad una frequenza precisa, diretto verso il fondale.

Questo impulso, quando è captato dallo strumento, determina l'espulsione dal Barny di un palloncino pieno d'aria cui è agganciato il cavo per il recupero. Quando il palloncino raggiunge la superficie viene avvicinato dall'imbarcazione e issato a bordo assieme al cavo per il recupero, che poi avviene mediante l'utilizzo di una gru.



Figura 9: Un ADCP Barny.

3.2.3 SEPTR

Il sistema SEPTR (*Shallow-water Environmental Profiler in Trawl-safe Real-time configuration*) è uno strumento dedicato alla misurazione delle correnti e del profilo della colonna d'acqua in aree dal basso fondale (fino a -100 m); è costituito da un profilatore verticale di colonna d'acqua (simile al CTD) associato ad un correntometro doppler (ADCP).

Il profilatore verticale è progettato per effettuare 360 profili durante un periodo di lavoro da 1 a 3 mesi, e può funzionare con correnti massime di 2 nodi a -50 m e di 1 nodo a -100 m. Fra gli strumenti di cui è dotato, si annoverano sensori di pressione, temperatura, salinità, clorofilla e torbidità.

Il correntometro Doppler è in grado di misurare nelle masse d'acqua:

- Velocità di ± 5000 cm/s, con una risoluzione di 0.1 cm/s ed un'accuratezza di $\pm 0.5\%$;
- Direzione dello spostamento da 0° a 360° con un'accuratezza di $\pm 2^\circ$.

La figura 10 esemplifica il funzionamento di un SEPTR.

Lo strumento viene posizionato accuratamente sul fondale dalla nave oceanografica, dopodiché esso comincia a funzionare registrando, con frequenza programmata, sia il movimento delle masse d'acqua che i dati idrografici del profilo verticale. Questa seconda operazione avviene quando il profilatore viene lasciato uscire dal Barny e fatto giungere fino in superficie. A questo punto lo strumento può inviare i dati ai centri di ricerca direttamente via satellite, grazie all'antenna rice-trasmittente presente sulla sommità del profilatore. È possibile anche una riprogrammazione a distanza del suo funzionamento.

Il sistema è utilizzato soprattutto in aree dove è alto il rischio di perdita dovuto alla pesca con reti a strascico. Per la necessaria autonomia, lo strumento è provvisto di batterie ricaricabili in situ mediante un sistema di “*inductive power transfer*” (IPT). Anche in questo caso, come per gli ADCP Barny, il recupero avviene mediante comunicazione acustica e rilascio da parte dello strumento di una boa di segnalazione.

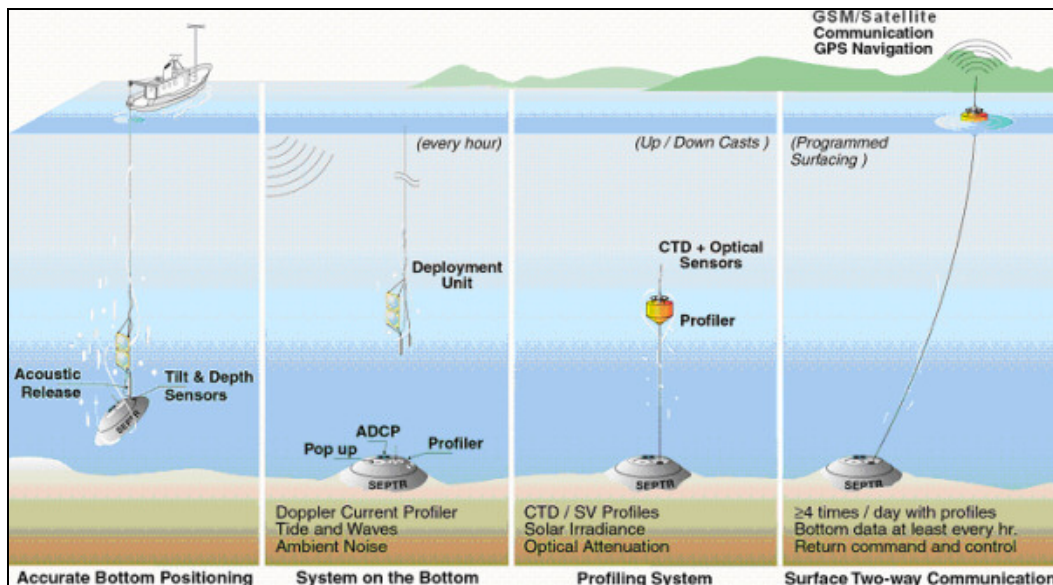


Figura 10: Funzionamento di un SEPTR



Figura 11: Recupero di un SEPTR durante la crociera DART06A

3.2.4 Boe Meteorologiche

Le boe sono un sistema costituito da una parte galleggiante che supporta un palo sporgente a cui sono connessi tutti i sistemi di misurazione e la radio trasmittente. Esse vengono assicurate al fondale in modo che rimangano in una posizione geografica stabile. L'energia elettrica necessaria è fornita loro da un pannello solare.

Il sistema misura i parametri atmosferici ad intervalli prefissati da un sistema di schedulazione interno. Tutti i dati vengono salvati in due files separati con file-data differenti, in modo da assicurarne l'integrità.

Questi i parametri atmosferici che vengono rilevati:

- Data ed Ora del rilevamento.
- Velocità e direzione del vento.
- Temperatura dell'aria.
- Pressione atmosferica.
- Umidità relativa.
- Altezza dell'onda.

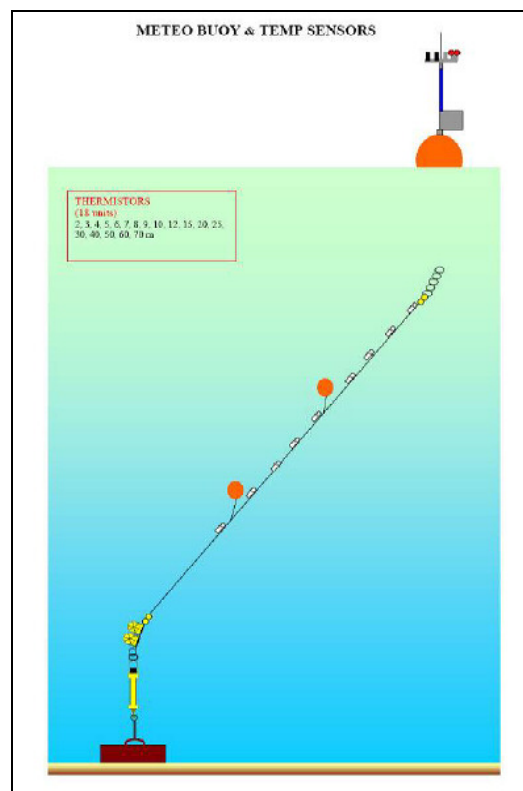


Figura 12: Schema di una boa meteorologica (Cortesia NATO).

3.2.5 Wave Rider

Il Wave Rider è uno strumento sferico di poco meno di un metro di diametro ed è deputato principalmente alla misurazione dell'altezza dell'onda e della direzione di propagazione della stessa. L'altezza dell'onda viene calcolata a partire dall'accelerazione verticale che la boa subisce in seguito al moto ondoso: questa è

misurata tramite un accelerometro, montato su una piccola piattaforma stabilizzata gravitazionalmente e sospesa in un fluido all'interno di una piccola sfera, montata sulla parte bassa della boa.

Una bussola e due accelerometri orizzontali misurano invece le componenti orizzontali della variazione di velocità che occorre alla boa durante il passaggio dell'onda. A partire da queste misure è possibile risalire alla direzione dell'onda rispetto alle coordinate geografiche.

La boa viene ancorata al fondo del mare, e, nella sua configurazione standard, è provvista di un sensore per la misurazione della temperatura marina superficiale.

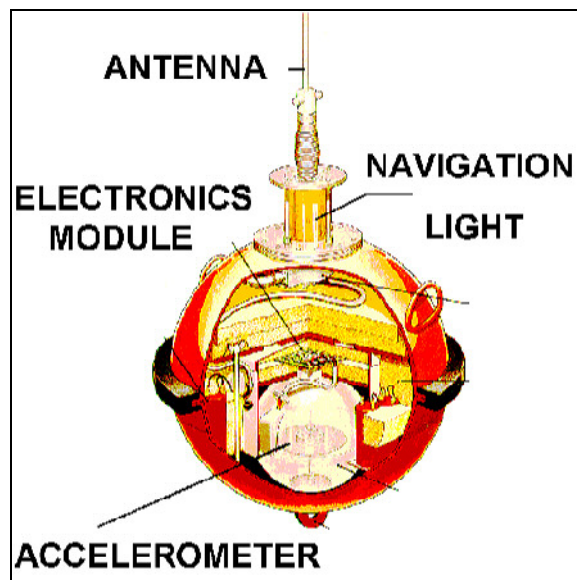


Figura 13: Schema di una boa “Wave-rider” (Cortesia NATO).

4 ANALISI DATI

4.1 DATI DART06A

4.1.1 Trattamento dei dati

Il Dataset qui indagato è costituito da 160 profili verticali della colonna d'acqua con i dati di temperatura, salinità, densità potenziale rilevati da strumentazioni tipo CTD raccolti fra il 2 e il 22 Marzo 2006. Dopo un primo controllo visivo di qualità dei dati, condotto utilizzando un programma scientifico quale Matlab, due profili CTD sono stati esclusi dalla nostra analisi, in quanto presentavano evidenti anomalie nella struttura della colonna d'acqua, imputabili ad errori strumentali.

I 158 dati ritenuti validi, sono stati poi ulteriormente suddivisi per aree omogenee, seguendo i seguenti criteri:

1. Collocazione geografica contigua;
2. Caratteristiche della colonna d'acqua (omogeneità dell'andamento dei profili);

A partire da tale analisi, sono state definite le seguenti aree, riportate nella figura 14:

- Area denominata “Pomo”, situata al centro del MAd, comprendente il volume d'acqua in corrispondenza della depressione di Pomo.
- Area denominata “Channel”, che connette l'area del Pomo con il margine della depressione del SAd centrale;
- Area denominata “Fossa”, che comprende la vasta depressione del SAd;
- Area denominata “WaccN”, situata in prossimità della costa italiana a nord dei laghi di Lesina;
- Area denominata “WaccC”, locata attorno alla penisola del Gargano dai laghi di Lesina al golfo di Manfredonia;
- Area denominata “Manfre”, che comprende l'intero Golfo di Manfredonia.

Alcuni CTD non sono risultati attribuibili ad alcuna delle aree testé individuate, essendo stati campionati in zone intermedie. Buona parte di questi sono comunque

stati utilizzati per realizzare delle sezioni verticali, utili per individuare la collocazione delle strutture rilevate.

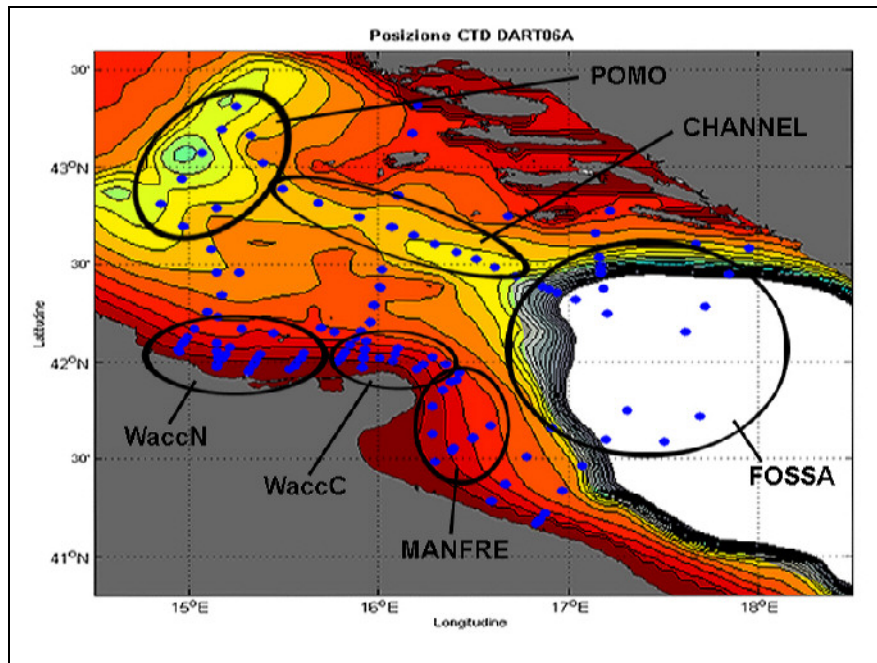


Figura 14: Posizione dei CTD acquisiti durante la crociera DART06A.

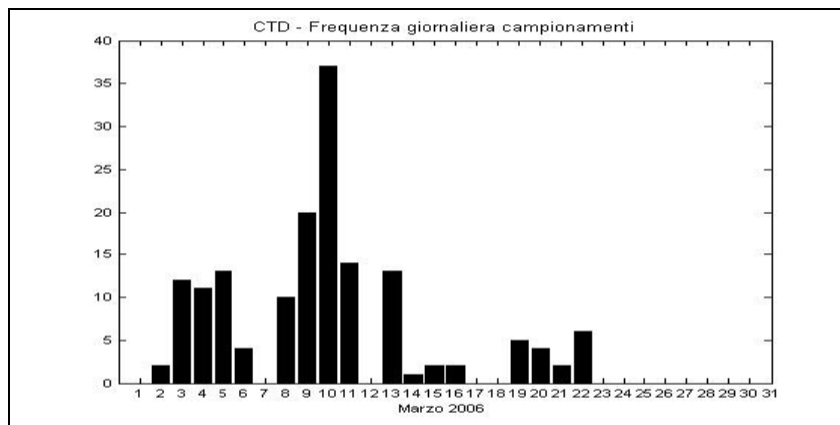


Figura 15: Distribuzione temporale rilevamenti DART06A.

I dati sono stati analizzati tramite:

➤ Diagrammi T/S.

Il diagramma T/S sintetizza le tre proprietà della massa d'acqua (temperatura, salinità e densità) in un unico punto del grafico. Esso possiede l'utilità di rendere immediatamente visibili i tipi di acque presenti tramite la loro collocazione nel diagramma: in alto a destra sono presenti le acque più dense,

calde e salate, in basso a destra quelle più fredde, meno dense e salate. Nei diagrammi T/S qui riportati sono stati sovrainpressi dei riquadri, la cui area ricade nell'intervallo di variabilità di T, S, Sigma-t proposto in tabella 1 per la classificazione delle diverse masse d'acqua. A questi è stato aggiunto anche quello relativo all'intervallo di variabilità dei parametri della WACC stimato nel paragrafo 4.2.2.

➤ Il grafico cumulativo dei profili.

Questo grafico riassume in un'unica figura composta da tre diagrammi, tutti i profili di temperatura, salinità e densità presenti. Esso è utile per poter valutare la variabilità dei vari profili e per poterla relazionare con la differente profondità della colonna d'acqua raggiunta. In questo lavoro è stato utilizzato solo per le aree costiere “WaccN”-“WaccC”.

➤ Il profilo medio per area.

In questo grafico vengono riportati i tre profili medi di temperatura, salinità e densità potenziale, relativi all'area studiata; in essi è riportata anche la variabilità del dato in termini di deviazione standard. Grazie all'analisi dei profili medi è possibile individuare le principali caratteristiche presenti nell'area.

➤ Transetti verticali.

Sono il risultato dell'interpolazione orizzontale di profili verticali campionati lungo un percorso rettilineo, ad un passo di griglia determinato volta per volta in base al numero e alla distanza media fra i rilevamenti. Per ciascuna sezione è stato sempre costruito un transetto per ognuna delle tre proprietà idrologiche considerate (T, S, Sigma-t).

Al fine di poter confrontare fra loro i diversi campionamenti, tutti i profili sono stati riportati su profondità prestabilite, tramite interpolazione lineare.

La colonna d'acqua, che in Adriatico supera i 1000 metri di profondità in corrispondenza della depressione del SAd, è stata suddivisa in 20 differenti livelli, come riportato dalla tabella 2.

Livello	Profondità (m)	Livello	Profondità (m)	Livello	Profondità (m)	Livello	Profondità (m)
1	-5	6	-50	11	-175	16	-400
2	-10	7	-75	12	-200	17	-500
3	-20	8	-100	13	-225	18	-600
4	-30	9	-125	14	-250	19	-800
5	-40	10	-150	15	-300	20	-1000

Tabella 2: Suddivisione in livelli batimetrici discreti della colonna d'acqua.

La distribuzione non omogenea fra i vari livelli, che risultano maggiormente concentrati in corrispondenza della superficie, è stata decisa per garantire un'adeguata rappresentazione delle dinamiche superficiali, caratterizzate da maggiore variabilità. Tale suddivisione non pregiudica la rappresentazione delle informazioni relative alle profondità maggiori, in quanto i parametri considerati in questo studio presentano una minore variabilità in profondità.

Il livello 1 non corrisponde alla superficie del mare a causa dell'assenza nei rilievi CTD del valore superficiale di T, S, dovuto all'elevato errore di misura che si verifica con questo strumento nei primissimi metri. Ciascun profilo, caratterizzato da una fitta successione continua di valori, è stato "normalizzato" rispetto ai livelli stabiliti in tabella 1: per ogni livello si è ottenuta l'interpolazione lineare del dato a partire dai due rilevamenti contigui alla profondità stabilita.

Per i valori di temperatura e salinità, le figure riportanti i profili medi proposte nei paragrafi successivi contengono la percentuale di dati disponibili per ciascun livello. Questa statistica si rende necessaria a causa della non omogeneità della batimetria, che condiziona il numero di CTD che raggiungono la stessa profondità.

Essa viene indicata da valori numerici, evidenziati con colori differenti, presenti sul bordo destro della griglia relativa al grafico di densità. Il sistema colorato è del tipo "a semaforo": ove la percentuale dei dati disponibili sia superiore al 75%, il valore è evidenziato in verde, ove questa si attesti fra il 40% ed il 74%, in giallo, per valori di percentuale più bassi, in rosso. Un rombo di pari colore, è inoltre posizionato in corrispondenza del dato numerico cui la percentuale fa riferimento. Nei profili medi, alla significatività del dato esposto viene aggiunto anche il numero di CTD totali

utilizzati per la realizzazione del grafico, riportato in alto a destra nella figura contenente la posizione geografica dei rilevamenti.

Durante la trattazione ci si riferirà spesso al valore di densità dell'acqua espresso in termini di densità potenziale o "Sigma-t". Essa non rappresenta la densità assoluta di una massa d'acqua, ma quella che la massa d'acqua possiederebbe se venisse trasportata adiabaticamente alla superficie. In particolare, per comodità, il valore proposto sarà quello relativo all'anomalia di densità rispetto al valore standard per l'acqua di 1000.00 Kg/m³: una densità di 1029.5 sarà quindi indicata come 29.5 Kg/m³.

4.2 LA COSTA A NORD DEL GARGANO – AREA “WACCN”

4.2.1 Profilo medio e masse d' acqua

Il profilo medio di temperatura, calcolato a partire dai dati raccolti in questa zona, mostra temperature superficiali di circa 10.0°C, ben 1.8°C più basse rispetto a quelle rilevate al di sotto dei -30 m, dove la colonna d'acqua raggiunge un valore che si attesta attorno agli 11.8°C. L'andamento del dato di temperatura mostra, con l'aumento della profondità, un profilo “sigmoide”, con un incremento più rapido nei primi 10 m di profondità, ed un lieve decremento fra i -40 m e i -50 m.

I valori misurati mostrano una variabilità, espressa in termini di deviazione standard, che decresce dai $\pm 0.9^\circ\text{C}$ presente nei primi 10 m d'acqua fino al valore costante di $\pm 0.3^\circ\text{C}$ raggiunto fra i -40 m ed i -50 m.

Il profilo di salinità medio di questa regione, mostra lo stesso andamento sigmoidale della temperatura, con un valore superficiale di 37.1 psu, che cresce fino a 38.5 psu, raggiunto attorno alla profondità di -30 m; quest'ultimo valore può essere considerato un valore medio caratteristico per l'Adriatico.

La variabilità del dato di salinità decresce dal valore superficiale di ± 0.6 psu fino a circa ± 0.2 psu, raggiunto ai -30m, che rimane costante a profondità superiori.

Il profilo di medio di densità potenziale dell'acqua, è caratterizzato da un basso valore superficiale di 28.6 Kg/m³ e presenta anch'esso una forma sigmoidale, maggiormente pronunciata rispetto ai dati di temperatura e salinità; il valore di densità cresce rapidamente nei primi 20 m di acqua, poi con maggiore gradualità, fino a raggiungere il valore di 29.38 Kg/m³ al di sotto dei -40 m.

Questo profilo di densità, in cui le acque più dense e pesanti sono sul fondo mentre quelle più leggere occupano gli strati superficiali, è stabile, poichè non attiva rimescolamenti verticali causati da squilibri di densità fra gli strati. A garantire il gradiente verticale di densità, una maggiore salinità compensa la maggiore temperatura registrata nei livelli inferiori.

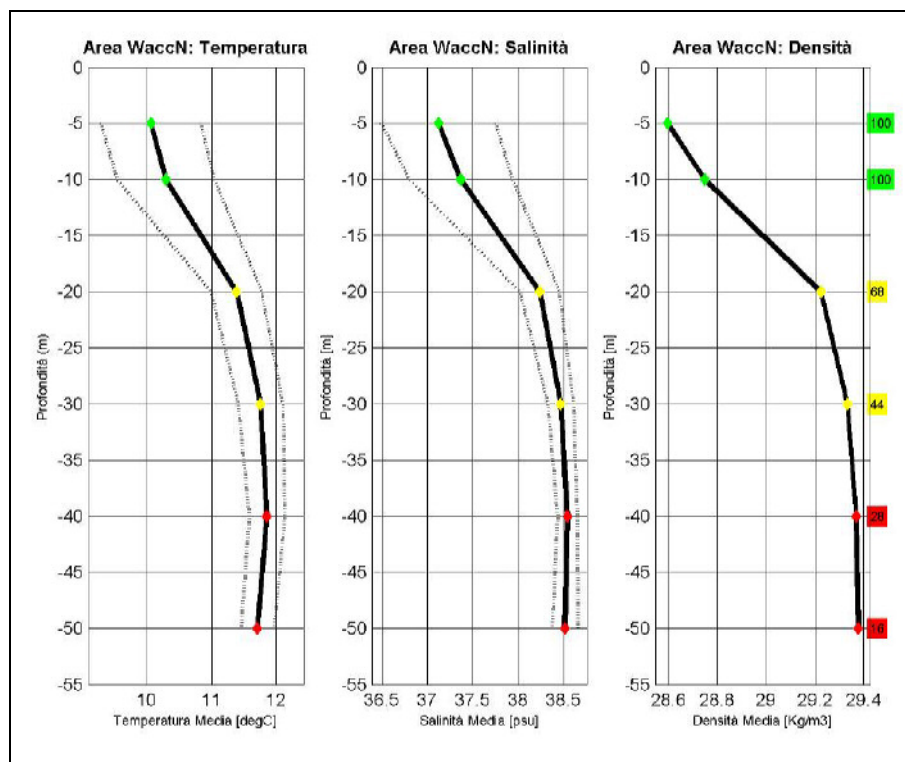


Figura 16: Area WaccN, profilo medio per (T,S,Sig-t) della colonna d'acqua

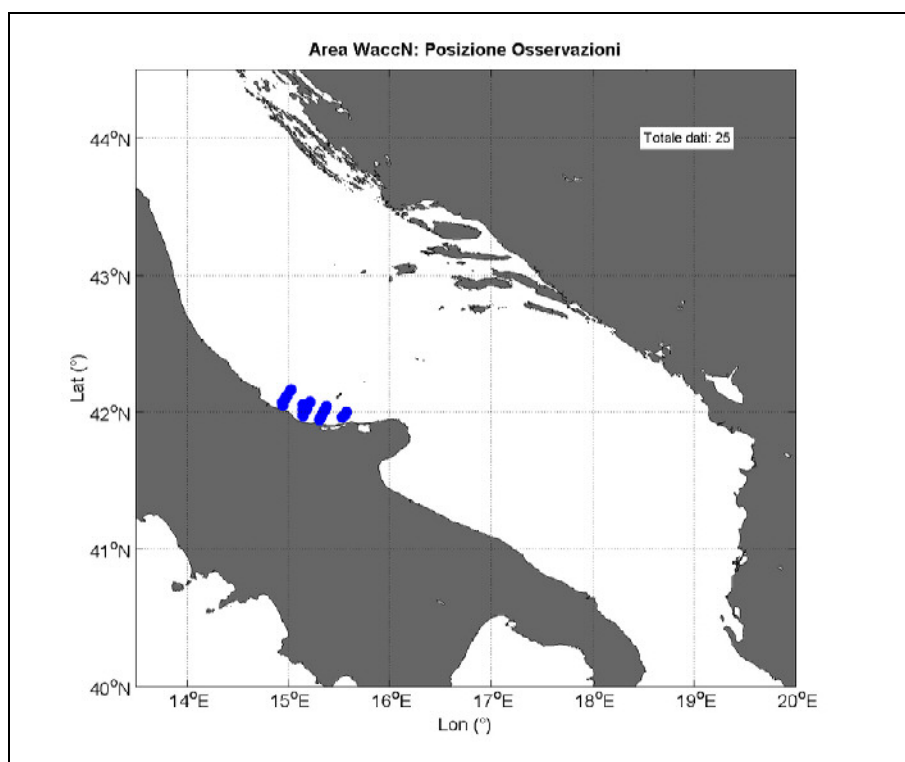


Figura 17: Area WaccN, posizione geografica dei rilevamenti

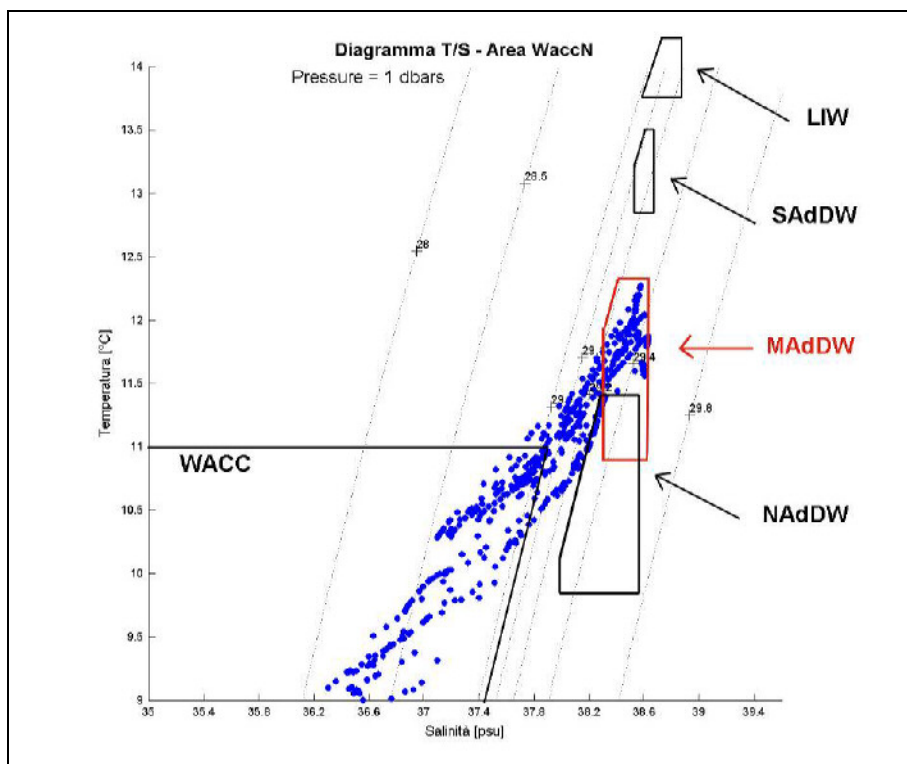


Figura 18: Area WaccN, tipi di acque presenti.

La figura 18 riporta il diagramma T/S per l'area in esame. Dall'analisi si possono individuare 2 principali masse d'acqua: nella parte destra del diagramma, per densità superiori a 29.2 Kg/m^3 e temperature fra 11.4°C a 12.4°C , sono rilevate le MAdDW.

Nella parte in basso a sinistra viene rilevato il secondo tipo d'acqua, dalle proprietà estremamente variabili, come evidenziato dalla distribuzione dei punti nel grafico. Esse sono in primo luogo caratterizzate da un basso contenuto salino, ben inferiore alla media del bacino, da bassa temperatura e da bassi valori di densità potenziale, tipiche della WACC.

4.2.2 Strutture rilevate

La collocazione geografica dei campionamenti ci porta a poter esaminare in modo accurato la WACC.

Questa struttura é rilevata già solo osservando i profili medi relativi all'area: l'andamento sigmoidale dei valori di T, S, Sigma-t evidenzia la presenza di una importante stratificazione nei primi 25-30 m, con i valori più bassi presenti alla superficie, confermando la presenza di acque superficiali provenienti dal nord, dove gli apporti fluviali sono consistenti.

Quello che invece risulta in qualche misura sorprendente è la presenza di masse d'acqua con densità potenziale media pari o superiore a 29.2 Kg/m^3 già a partire dai -20 m, nonché di quasi 29.4 Kg/m^3 presenti a -50 m.

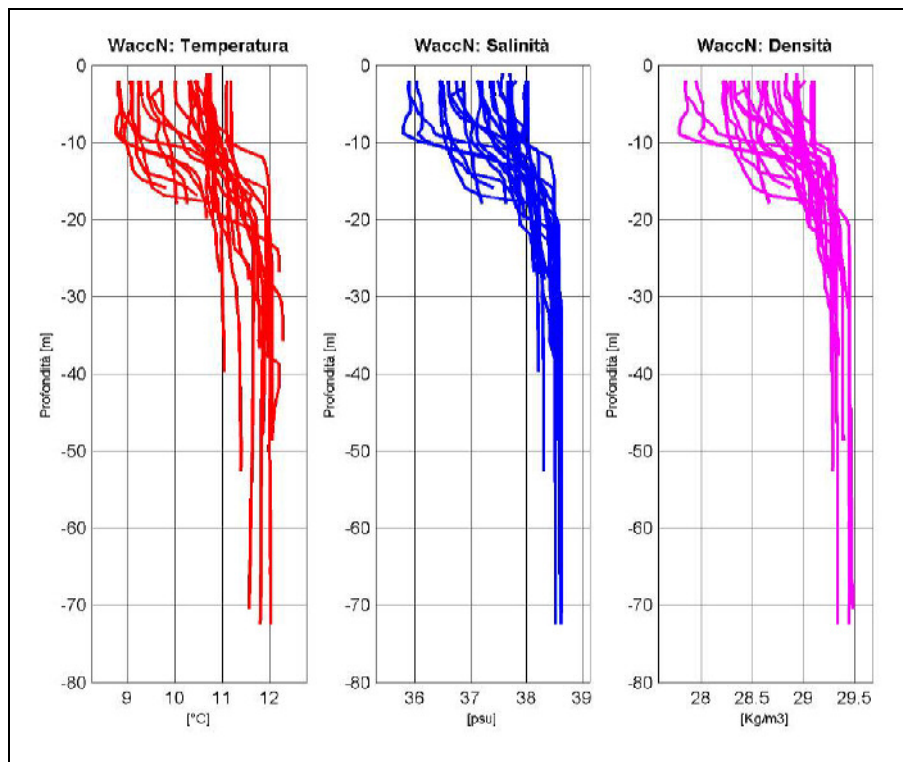


Figura 19: Area WaccN, profili cumulativi di T, S, Sigma-t.

Anche il grafico cumulativo di T, S, Sigma-t, (figura 19) conferma la presenza di stratificazione verticale nei primi 20 m della colonna d'acqua.

Inoltre, man mano che si procede verso il largo ed i profili raggiungono profondità maggiori, la stratificazione verticale diminuisce anche nei primi 30 metri, e oltre a questa tende ad annullarsi, a significare che le acque della WACC sono ben confinate lungo la costa.

In figura 19 appare ancora più importante il segnale delle acque dense: i CTD con profondità superiore a 50 m segnalano valori di densità potenziale che raggiungono anche i 29.5 Kg/m^3 . Va sottolineato che tutti i profili riportati sono relativi a campionamenti effettuati entro 20 Km dalla linea di costa.

Per indagare meglio la presenza di acque dense, si è quindi proceduto alla realizzazione di una sezione verticale, utilizzando alcuni CTD temporalmente sinottici,

disposti lungo una linea ortogonale alla costa. Questo tipo di analisi permette di stimare l'ampiezza locale della WACC e di localizzare le altre strutture presenti.

Il risultato è riportato in figura 20, così come anche la posizione delle osservazioni. In tale transetto, che presenta a sinistra la costa italiana e il mare aperto sulla destra, risulta subito evidenziata con falsi colori più freddi la massa d'acqua relativa alla WACC, ove l'andamento delle isolinee presenta una notevole stratificazione obliqua in tutte le proprietà considerate. Possiamo pertanto stimare in circa 12 Km l'ampiezza di questo flusso costiero, identificandone il limite orientale con la cessazione del gradiente di densità orizzontale, là dove le isopiche divengono quasi orizzontali.

Le caratteristiche idrologiche locali dell'acqua trasportata dalla WACC sono riassumibili con: $T < 11^{\circ}\text{C}$, $S < 37.9$ psu, $\text{Sigma-t} < 29.05$ Kg/m^3 . Questa identificazione ci verrà utile durante l'analisi delle prossime aree costiere studiate, permettendoci di individuare rapidamente questo segnale nei diagrammi T/S, e per poter stimare la variabilità latitudinale delle proprietà della WACC.

Le acque dense, sono facilmente identificabili dalla isopiche di 29.4 Kg/m^3 presente in basso a destra. Essa presenta una forma tale da suggerire la sezione semiellittica di una lingua di acque dense, che sembra essere stata intercettata dal campionamento solo nella sua parte più occidentale. Sopra a questa struttura, si osserva una stratificazione guidata per lo più dalla salinità, che in prossimità del fondale raggiunge e supera il notevole valore di 38.6 psu.

Anche il dato di temperatura, compreso tra 11.7°C e 11.9°C , conferma l'identificazione di una massa di MAdDW già a 30-40 m di profondità e a 15 Km dalla linea di costa.

Una prima ipotesi che può essere fatta, è che questa massa faccia parte della corrente di densità (DWOC) che dal bacino centro-settentrionale raggiunge il SAd lambendo le coste italiane, trasportando, in questo caso, MAdDW.

La quota stimata in letteratura per questa corrente sarebbe però ben inferiore rispetto a quella rilevata in questo studio, ovvero attorno ai -100 m, pur con una variabilità interannuale collegata alla quantità di acque dense prodotta; si può pertanto ipotizzare un'ingente produzione di MAdDW durante l'inverno 2005-2006.

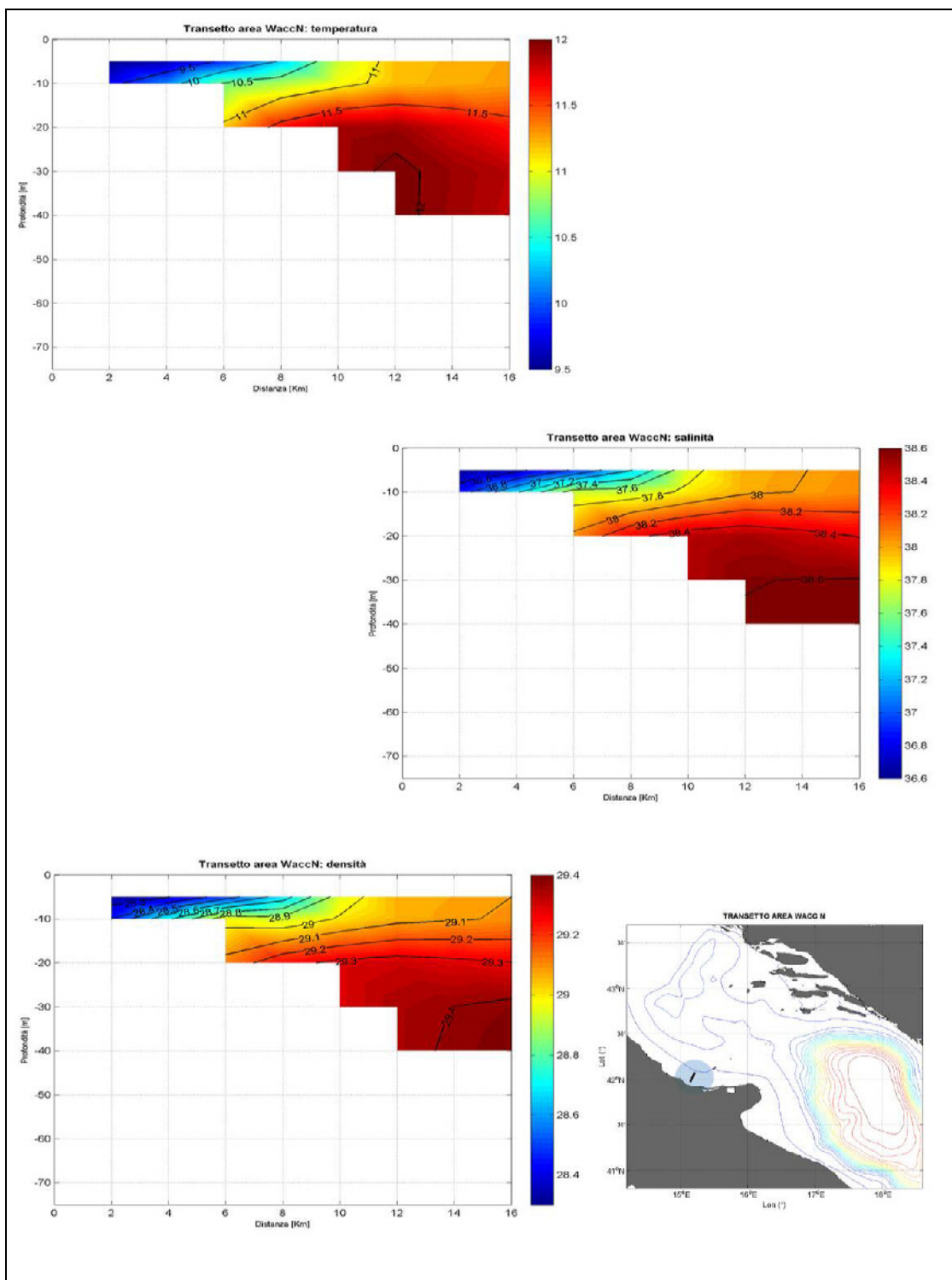


Figura 20 a,b,c: Area WaccN, distribuzione verticale di T, S, Sigma-t.

4.3 LA COSTA DEL GARGANO – AREA “WACCC”

4.3.1 Profilo medio e masse d’acqua

Il profilo medio in questa zona è caratterizzato da valori superficiali di temperatura (-5 m) di 10.5°C, con una variabilità del dato di $\pm 0.7^\circ\text{C}$. Anche in questo caso, come già verificato nell’area “WaccN” descritta in precedenza, la temperatura cresce all’aumentare della profondità, con un incremento più marcato fra i -10 m ed i -20 m. Il valore massimo di circa $11.6 \pm 0.15^\circ\text{C}$, viene raggiunto attorno ai -50m.

Per la significatività del dato di variabilità va comunque considerato il basso numero di dati disponibile a questa profondità (19%, ovvero 3 dati su 16).

Oltre i -50 m, il profilo medio indica un lieve calo di temperatura con il valore relativo ai -75 m che si attesta attorno agli 11.35°C; la variabilità cresce invece portandosi a $\pm 0.45^\circ\text{C}$, ma i dati disponibili si riducono a 2/16 (13%), con ovvie conseguenze sulla significatività di questa statistica.

Per quanto riguarda il dato di salinità, l’acqua presenta alla superficie un valore medio di circa 37.65 psu, il quale cresce con la profondità fino ai -50 m dove si raggiungono i 38.6 psu (con andamento simile alla temperatura), per poi tornare a ridursi lievemente a 38.55 psu raggiunti a -75m. La forbice di variabilità della salinità, decresce anch’essa con la profondità, passando dai ± 0.6 psu superficiali, a meno di ± 0.1 psu ai -50m, per poi tornare a crescere a ± 0.15 psu a -75 m.

La curva di densità che ne consegue denota anche in questa occasione stabilità (il profilo presenta andamento monotono crescente), che viene garantita, ai livelli più profondi, dall’incremento della salinità. La densità media ha valori superficiali di 28.7 Kg/m³, che aumentano rapidamente nei primi 20 metri, profondità in corrispondenza della quale viene già raggiunto il valore di 29.2 Kg/m³.

A profondità maggiori la densità continua a crescere, seppur con tasso minore, raggiungendo 29.40 Kg/m³ ai -50m, ed i 29.45 Kg/m³, ai -75 metri di profondità.

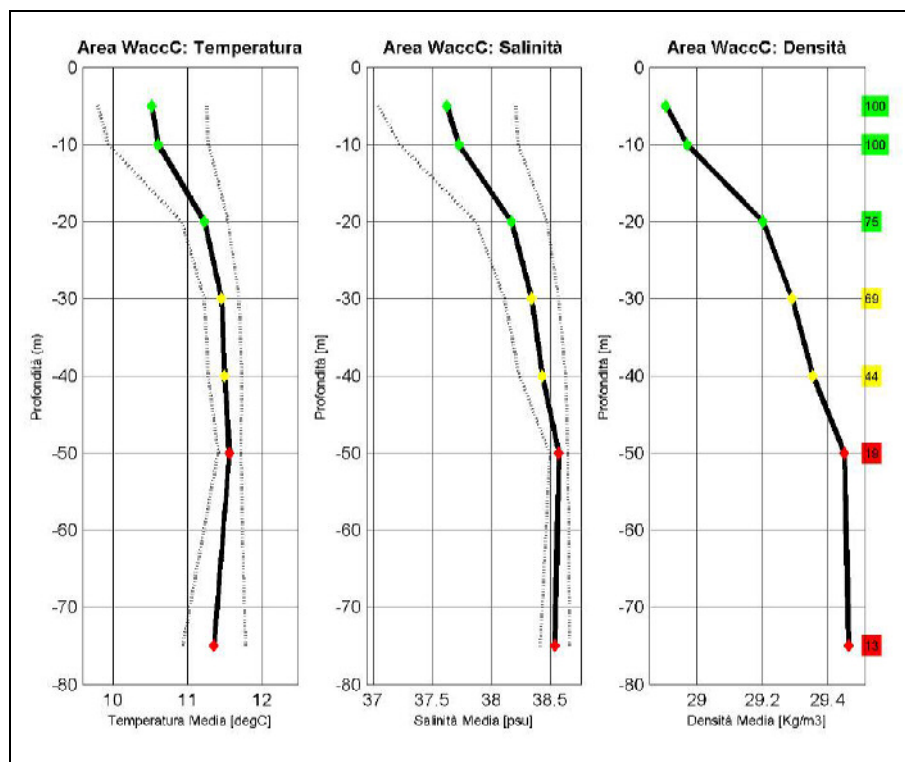


Figura 21: Area WaccC, profilo medio per (T, S, Sig-t) della colonna d'acqua.

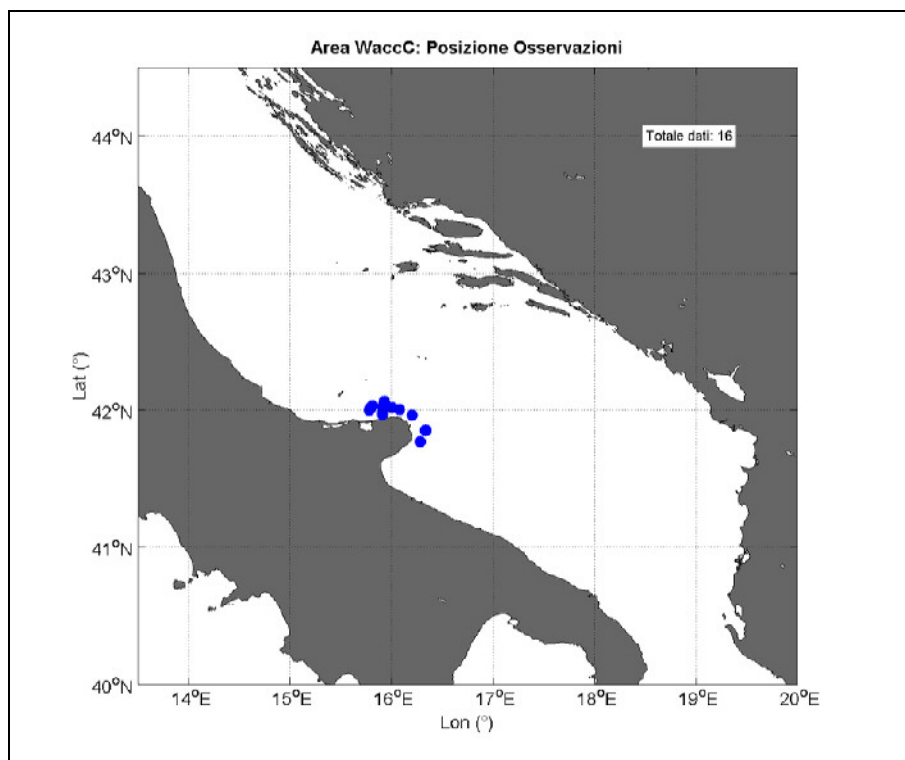


Figura 22: Area WaccC, posizione geografica dei rilevamenti.

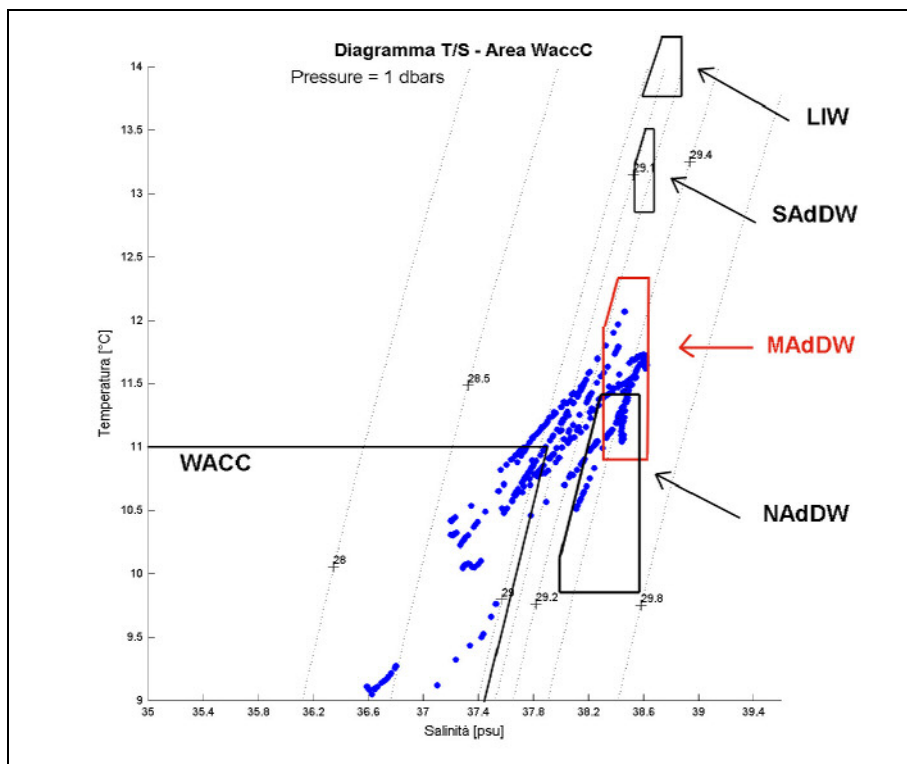


Figura 23: Area WaccC, tipi di acque presenti.

Il diagramma di T/S per quest'area conferma la presenza delle masse d'acqua presenti anche nella precedente area di studio (MAdDW e WACC), con l'aggiunta del segnale relativo alle NAdDW (figura 23).

Per quanto riguarda le acque dense, l'isopigna dei 29.2 è superata da un notevole numero di rilevamenti che presentano un intervallo di temperatura fra 10.6°C e 12.1°C; esso è mediamente inferiore a quello rilevato nel diagramma T/S dell'area precedente.

Per quanto riguarda le acque riferibili alla WACC, secondo i parametri precedentemente fissati, pare subito evidente dalla distribuzione dei punti, di come le loro caratteristiche siano mutate, divenendo più simili a quelle di acque "medie".

4.3.2 Strutture rilevate

L'andamento medio del profilo della colonna d'acqua conferma, sia in termini di temperatura che di salinità che di densità, la presenza della WACC anche in quest'area, pur se indebolita. Questo aspetto risulta evidente nella minore accentuazione del profilo sigmoidale e nella differenza fra i valori superficiali e quelli prossimi al

fondale, dove si registrano temperature più basse e valori di densità medi più elevati, che raggiungono i 29.45 Kg/m^3 oltre i -50 m.

Un confronto fra i valori estremi rilevati in queste due aree costiere è riassunto in tabella 3.

	Area “WaccN”		Area “WaccC”	
	Min	Max	Min	Max
Temperatura [°C]	10.0 $\pm$ 0.9 (-5m)	11.8 $\pm$ 0.3 (-40m)	10.5 $\pm$ 0.7 (-5m)	11.6 $\pm$ 0.15 (-50m)
Salinità [psu]	37.1 $\pm$ 0.6 (-5m)	38.5 $\pm$ 0.2 (-40m)	37.65 $\pm$ 0.5 (-5m)	38.6 $\pm$ 0.1 (-50m)
Densità [Kg/m^3]	28.6 (-5m)	29.38 (-50m)	28.7 (-5m)	29.45 (-75m)

Tabella 3: Valori idrografici minimi e massimi per le due aree interessate alla WACC.

I valori minimi delle due aree costiere limitrofe, riscontrati in entrambi i casi in prossimità della superficie, appaiono diversi, con una differenza di salinità e temperatura che indicano un gradiente medio positivo da nord verso sud di 0.5°C per la temperatura e 0.55 psu per la salinità, in soli 60 Km.

Il dato di temperatura superficiale potrebbe essere in parte condizionato dall’ora del rilevamento, mentre quello di salinità presenta maggiore significatività.

La variabilità superficiale dei dati rimane considerevole in entrambe le aree, anche se tende a diminuire procedendo verso sud, denotando, forse, un minore contrasto nei valori.

Questo conferma come la WACC, procedendo verso sud, perda gradualmente le proprie caratteristiche per effetto dei processi di rimescolamento diffusivi e turbolenti.

I dati massimi di salinità e densità, registrati in entrambe le aree nei CTD più lontani dalla costa e a profondità di 40-50 m, risultano sostanzialmente simili, tenendo conto della loro variabilità e dei normali gradienti verticali di densità e salinità, visto che nella seconda area studiata si raggiungono profondità maggiori. L’analisi dei profili cumulati presenta gradienti verticali più “smussati” rispetto a quelli dell’area precedente. Anche questi profili mantengono comunque la stessa tendenza ad una maggiore stratificazione nei campionamenti effettuati in acque meno profonde e ad una minore in quelli di mare più aperto. Questi ultimi risultano sorprendentemente densi già a partire dalla superficie, dove si arrivano a sfiorare i 29.4 Kg/m^3 .

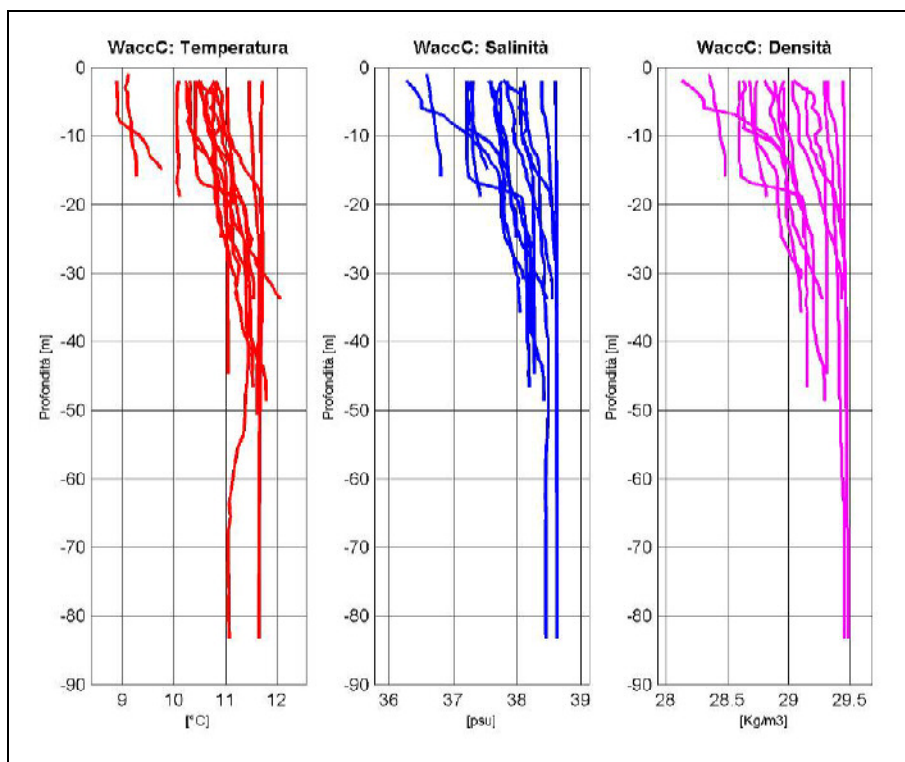


Figura 24: Area WaccC, profili cumulativi di T, S, Sigma-t.

Gli alti valori di densità superficiale (del tutto anomali) potrebbero avere due spiegazioni:

- essere conseguenza di intensi processi di rimescolamento verticale derivanti da forti flussi di calore all'interfaccia aria-mare, con possibile formazione locale di acque dense;
- essendo acque classificabili come MAdDW, potrebbero far parte della DWOC più superficiale, presente per iper-produzione di acque dense nel MAd. La parte traboccante rispetto alla depressione del Pomo, superiore a -150 m, potrebbe infatti essersi diretta verso Sud.

I campioni esaminati nel diagramma cumulativo sono stati raccolti solamente entro 15 Km dalla costa attorno alla penisola del Gargano. Per questo motivo, per studiare meglio le acque dense qui rinvenute, è stato realizzato un transetto comprendente anche alcuni CTD, che per la loro posizione di mare più aperto non erano stati incorporati fra quelli studiati in quest'area.

La sezione considerata parte dal Gargano ed arriva fino alla sella di Pelagosa, ed è visualizzata in figura 25 con l'ovest a sinistra.

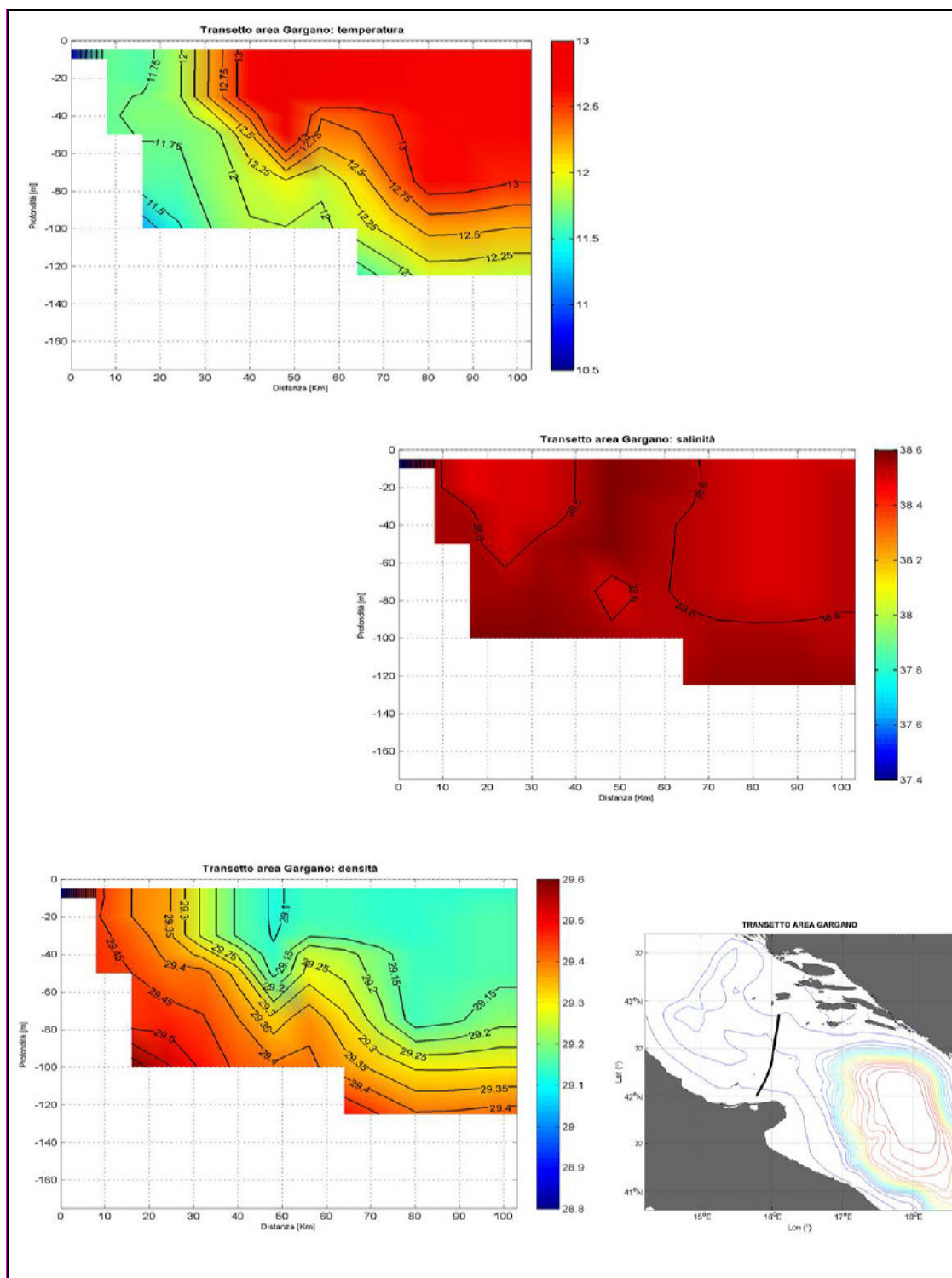


Figura 25: Area WaccC, distribuzione verticale di T,S,Sigma-t

La temperatura presenta un fronte verticale nelle vicinanze della costa, che denota la presenza della WACC. Il primo rilevamento del transetto risulta essere stato

prelevato a circa 5 Km dalla costa, e in questo caso ciò impedisce una corretta risoluzione sua della struttura. Oltre ai 10 Km dal primo rilevamento si osserva un gradiente positivo di temperatura dalla costa verso il largo.

Un minimo di temperatura inferiore agli 11.25°C è presente a circa 20 Km dalla costa e 100 m di profondità. Una lingua d'acqua fredda a forma di “menisco” circonda ad est, negli strati più profondi, e ad ovest, una massa d'acqua più calda, destratificata, presente nel mezzo del bacino a partire dai 30-35 Km dalla costa. In corrispondenza della sella di Pelagosa, la stratificazione termica è presente solo oltre i -80 m.

Il profilo di salinità evidenzia un forte gradiente orizzontale solo in corrispondenza della WACC, e presenta in seguito due minimi locali, uno fra la superficie e i -60 m localizzato fra 15 e 45 Km dalla costa, il secondo oltre i 65 Km dalla costa, a circondare una massa d'acqua spessa fino a 100 m nel centro del bacino. In prossimità del fondale la salinità appare generalmente la più elevata.

La struttura delle isopiche ricalca sorprendentemente quella delle isoterme, ad indicare un forte controllo sulla densità dovuto alla temperatura. Le acque dense sono facilmente identificabili nei livelli più profondi fra la costa e il centro del bacino, con un massimo di densità superiore a 29.6 Kg/m³ presente a ridosso della costa italiana a circa -100 m.

Il minimo di temperatura corrisponde a questo massimo di densità; supponendo, come da letteratura, che le NAdDW presentino generalmente un segnale di temperatura più basso, e data la presenza nel locale diagramma T/S anche di queste acque, possiamo supporre di stare osservando un'ingente massa di MAdDW che circonda un “cuore” di NAdDW, le quali scorrono assieme verso sud trasportate dalla DWOC. La presenza di acque estremamente dense alla superficie, fra i 15 e i 35 Km dalla costa, a conferma dei dati dei profili cumulativi esposti in precedenza, è in ogni caso sorprendente: in questa configurazione, un forte raffreddamento superficiale può produrre localmente acque dense.

Quanto evidenziato in questo transetto conferma l'ipotesi di un'ingente produzione di acque dense soprattutto nel MAd, nei due mesi antecedenti il campionamento.

4.4 GOLFO DI MANFREDONIA – AREA “MANFRE”

4.4.1 Profilo medio e tipi di acque

Per l'attribuzione dei profili al golfo di Manfredonia, è stata considerata appartenere al golfo l'area geografica compresa fra 15.8° - 16.8° E e 41.25° - 41.40° N, in cui il fondale non giacesse a profondità superiore ai 75 m. Queste condizioni hanno portato alla selezione dei 19 profili verticali qui utilizzati.

L'andamento verticale del dato di temperatura denota un valore superficiale di circa 12.0°C , con una variabilità di $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$, la più elevata fin qui riscontrata. Nei primi 10 metri la temperatura dell'acqua rimane sostanzialmente costante (è lo strato ben rimescolato), cresce poi fino ai -30 m, maggiormente fra i -10 e i -20 m, in modo quasi impercettibile dai -20 ai -30 m, dove viene raggiunto il valore massimo di 12.35°C , con una variabilità che si riduce a $\pm 0.65^{\circ}\text{C}$. Sotto i -30 m la temperatura media torna a scendere lievemente, in modo più marcato fino ai -40 m, poi più lieve fino ai -75 m. La variabilità del dato decresce anch'essa fino ai circa $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ raggiunti sul fondale.

Il profilo medio di salinità presenta anch'esso il dato minimo in prossimità della superficie dove si riscontra un valore medio di 38.15 psu, caratterizzato anch'esso, come per la temperatura, da una notevole variabilità, pari a circa ± 0.6 psu. I valori di salinità, come quello di temperatura, crescono verso il fondo, presentando il gradiente massimo fra i -10 m e i -30 m.

Come si evince dai numeri appena citati, anche in questo caso il dato di variabilità decresce con l'aumentare della profondità, e presenta i valori maggiori nei primi 30 m della colonna d'acqua. Il profilo di densità potenziale medio che risulta è stabile e presenta in prossimità della superficie il valore minimo di 29.05 Kg/m^3 . Con l'aumentare della profondità, il valore continua a crescere, dapprima più rapidamente, fino ai 20 m, ove si registrano 29.18 Kg/m^3 , poi sempre meno, fino a raggiungere il notevole valore di 29.38 Kg/m^3 ai 75 metri di profondità.

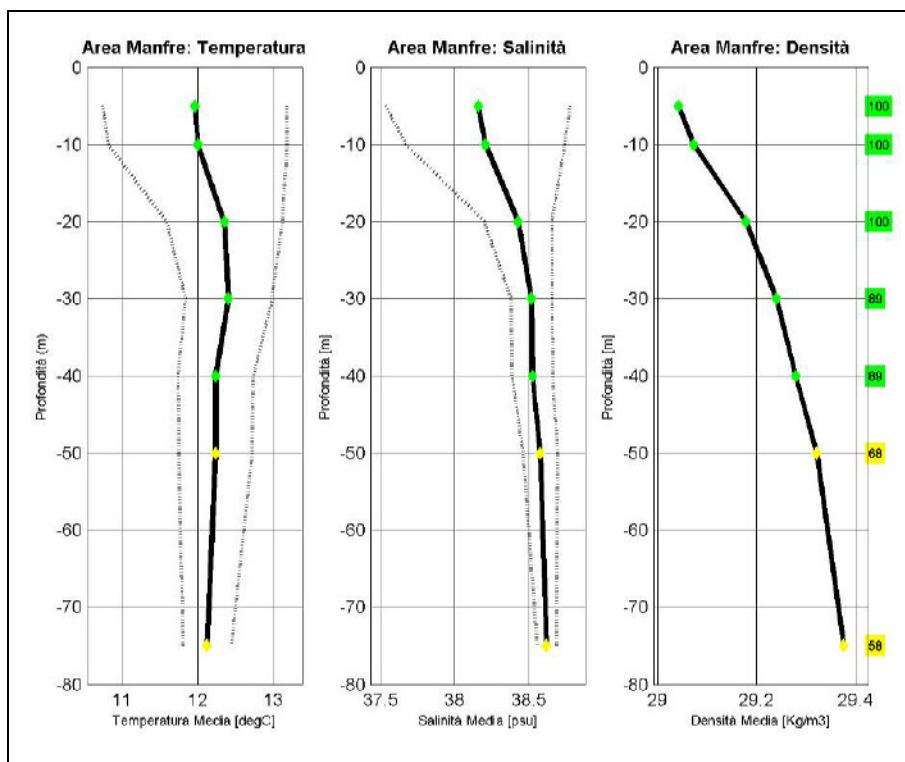


Figura 26: Area Manfre, profilo medio per (T, S, Sig-t) della colonna d'acqua.

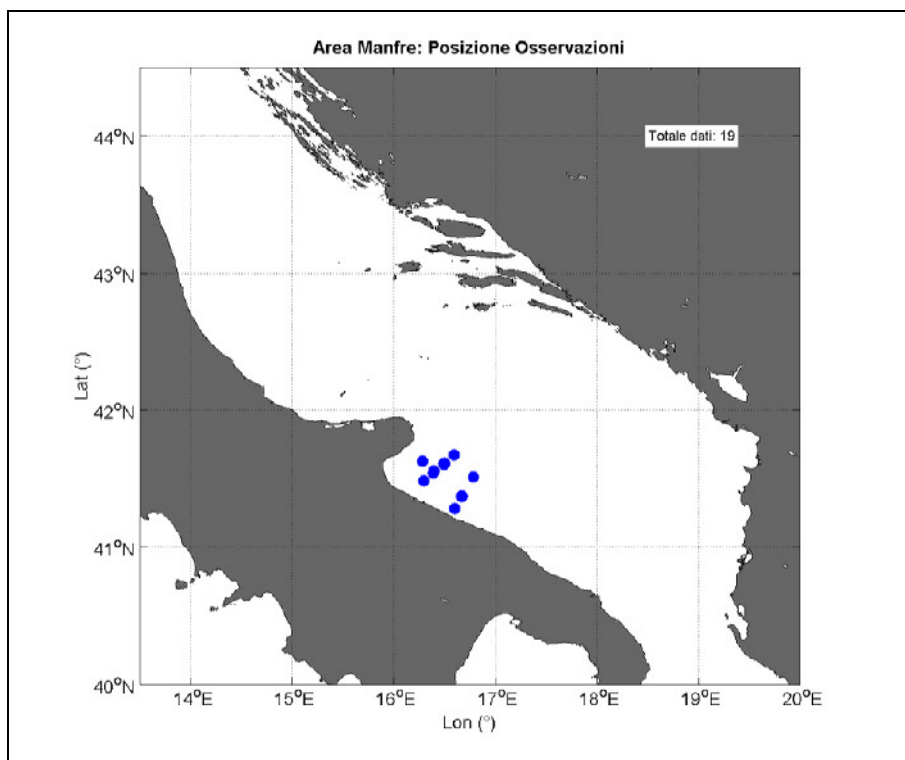


Figura 27: Area Manfre, posizione geografica dei rilevamenti.

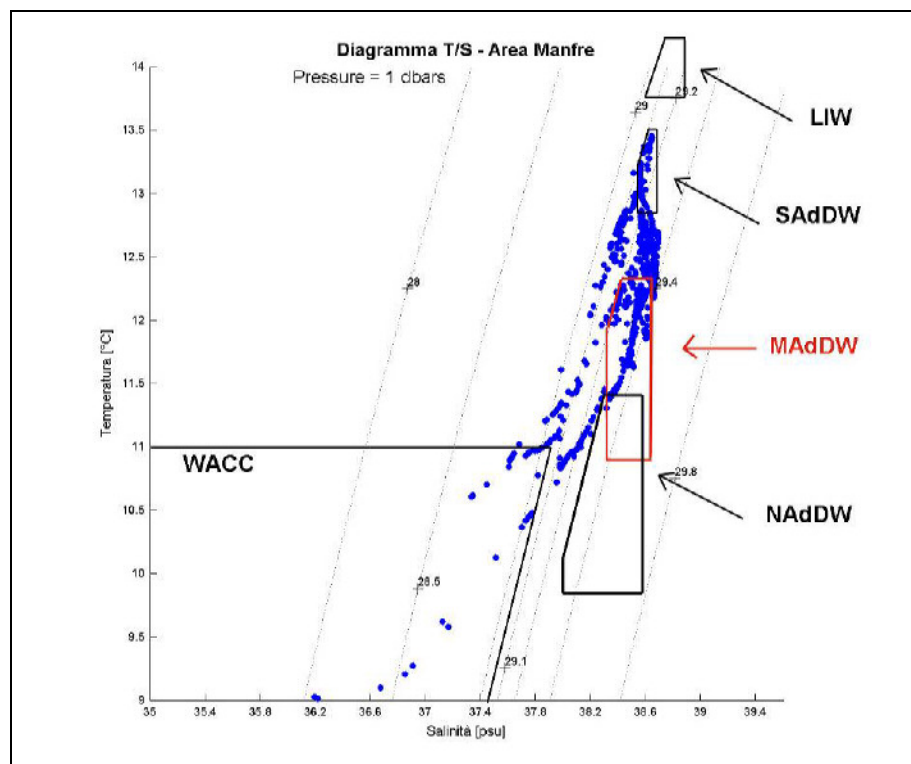


Figura 28: Area Manfre, tipi di acque presenti.

Il diagramma T/S (figura 28) permette di identificare in questa zona 3 masse d'acqua differenti. In basso a sinistra del diagramma permane una debole traccia delle acque superficiali fredde e dolci riferibili alla WACC.

Oltre l'isopigna dei 29.2 Kg/m^3 , con temperature comprese fra 11.4°C e 12.4°C sono riscontrabili le MAdDW, mentre nella parte alta del grafico, oltre i 12.9°C , con una salinità attorno ai 38.5 psu ed una densità potenziale $> 29.1 \text{ Kg/m}^3$ sono visibili anche le SAdDW.

4.4.2 Strutture rilevate

Un debole segnale della WACC risulta ancora rilevabile dai profili medi di T, S, Sigma-t, nei quali si riconosce un minimo superficiale e un debole andamento sigmoide con incremento dei valori fino ai -30 m. L'enorme variabilità dei dati di temperatura e salinità compresi fra la superficie e questa profondità, rivela una notevole eterogeneità nelle acque superficiali del golfo, dovute probabilmente a strutture di mesoscala (caratteristiche in questa zona), in una zona dove la WACC si mescola con acque locali.

Il golfo di Manfredonia è caratterizzato, infatti, dalla presenza di piccole strutture prevalentemente anticicloniche e di altre a forma di “pennacchio”, entrambe dovute a processi di instabilità che trasformano l’energia potenziale in cinetica. Osservando l’andamento dei profili tratteggiati che rappresentano la deviazione standard dalla media, si comprende come il campionamento abbia intercettato sia dei processi costieri riferibili alla WACC, che delle strutture tipiche del mare aperto, con il profilo massimo che decresce nei suoi valori dalla superficie verso il fondo.

Il profilo medio tende, con la profondità, a divenire leggermente più freddo e più salato, con la densità che supera i 29.2 Kg/m^3 già a -20 m; questo sembra confermare la presenza di acque dense provenienti dal bacino centro-settentrionale. Va inoltre verificata la presenza nel diagramma T/S delle SAdDW, che potrebbe suggerire la possibile presenza in quest’area di processi di mescolamento fra le acque dense trasportate dalla DWOC e le acque del SAd.

Per approfondire l’analisi delle acque dense sono stati realizzati due transetti, denominati rispettivamente “Bari-1” e “Bari-2”, utilizzando dei rilevamenti ortogonali alla linea di costa che non sono stati compresi fra quelli del golfo, per le considerazioni geografiche esposte ad inizio paragrafo. Ciascun transetto è costituito da campioni raccolti nella stessa giornata, ma il transetto Bari-1 è stato campionato il 3 marzo mentre il Bari-2 il 13 marzo.

Il transetto Bari-1 (figura 29) presenta una leggera stratificazione in prossimità della costa italiana. Allontanandosi dalla costa, la stratificazione nei primi 100 m sparisce e forti gradienti di T e S sono registrati a circa -100 m. Questa massa d’acqua destratificata è caratterizzata da acque più calde, relativamente meno salate e meno dense, e può essere interpretata come la parte più occidentale del bordo del ciclone del SAd.

Le acque dense trasportate dalla DWOC sono visibili fra i 15 ed i 40 Km ad una profondità fra -75 m e -100 m. Da notare l’elevata salinità di queste acque, simile a quella riscontrata nel transetto del Gargano, mentre la densità è più bassa. Quest’ultimo potrebbe essere un segnale di processi di rimescolamento locale in parte già avvenuti, come pure indicare che le masse d’acqua visualizzate nei due transetti possiedono intrinsecamente caratteristiche molto diverse fra loro e che siano state prodotte in tempi differenti.

Non si rileva il segnale delle LIW, mentre, nella depressione del SAd, oltre ai -150 m sono visibili le SAdDW. La loro profondità è relativamente minima in quanto siamo in prossimità della loro zona di formazione per mescolamento con le acque dense provenienti da Nord.

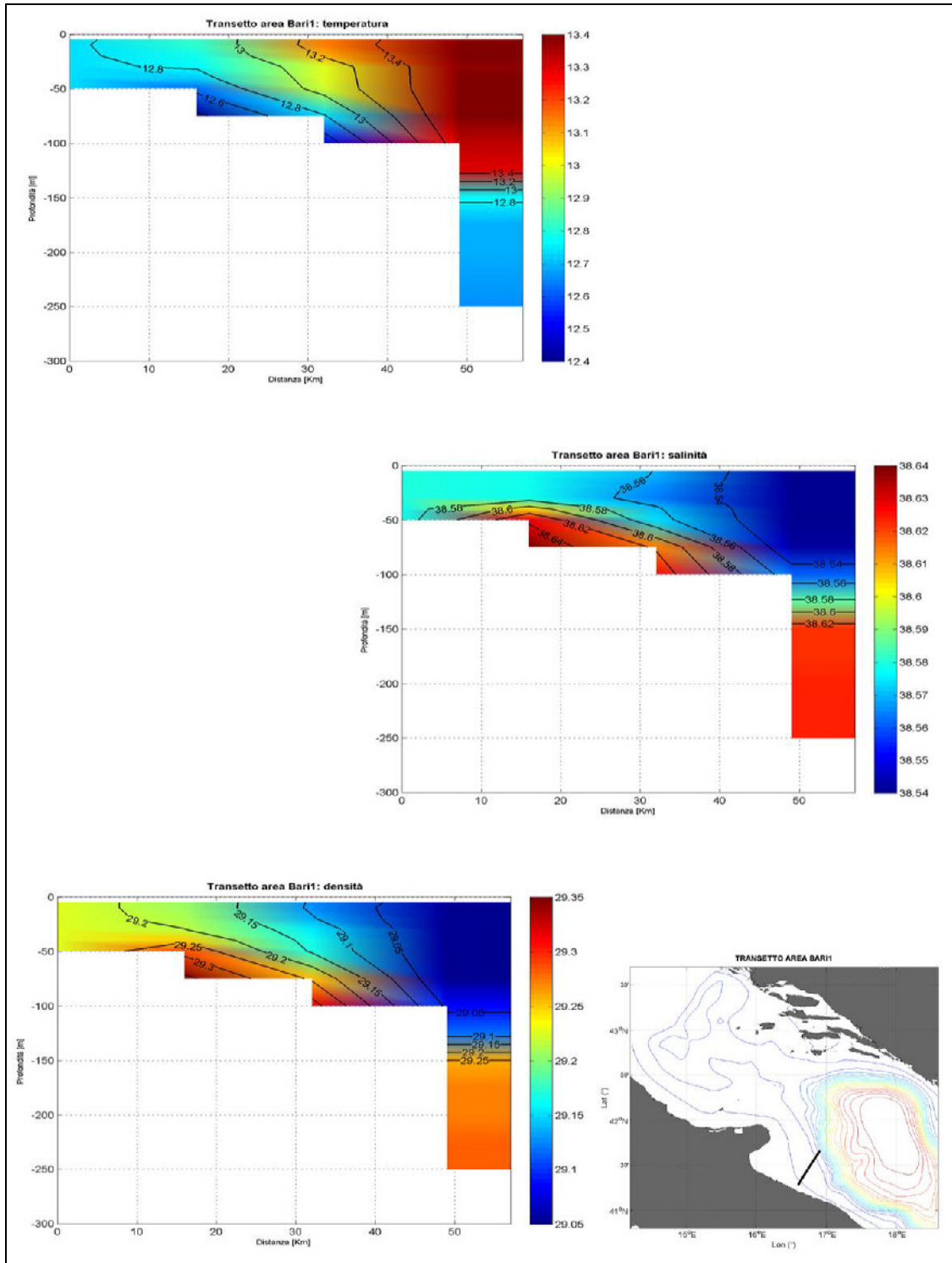


Figura 29 a,b,c,d: Transecto Bari 1, sezioni verticali di T, S, Sigma-t e posizione dei rilevamenti.

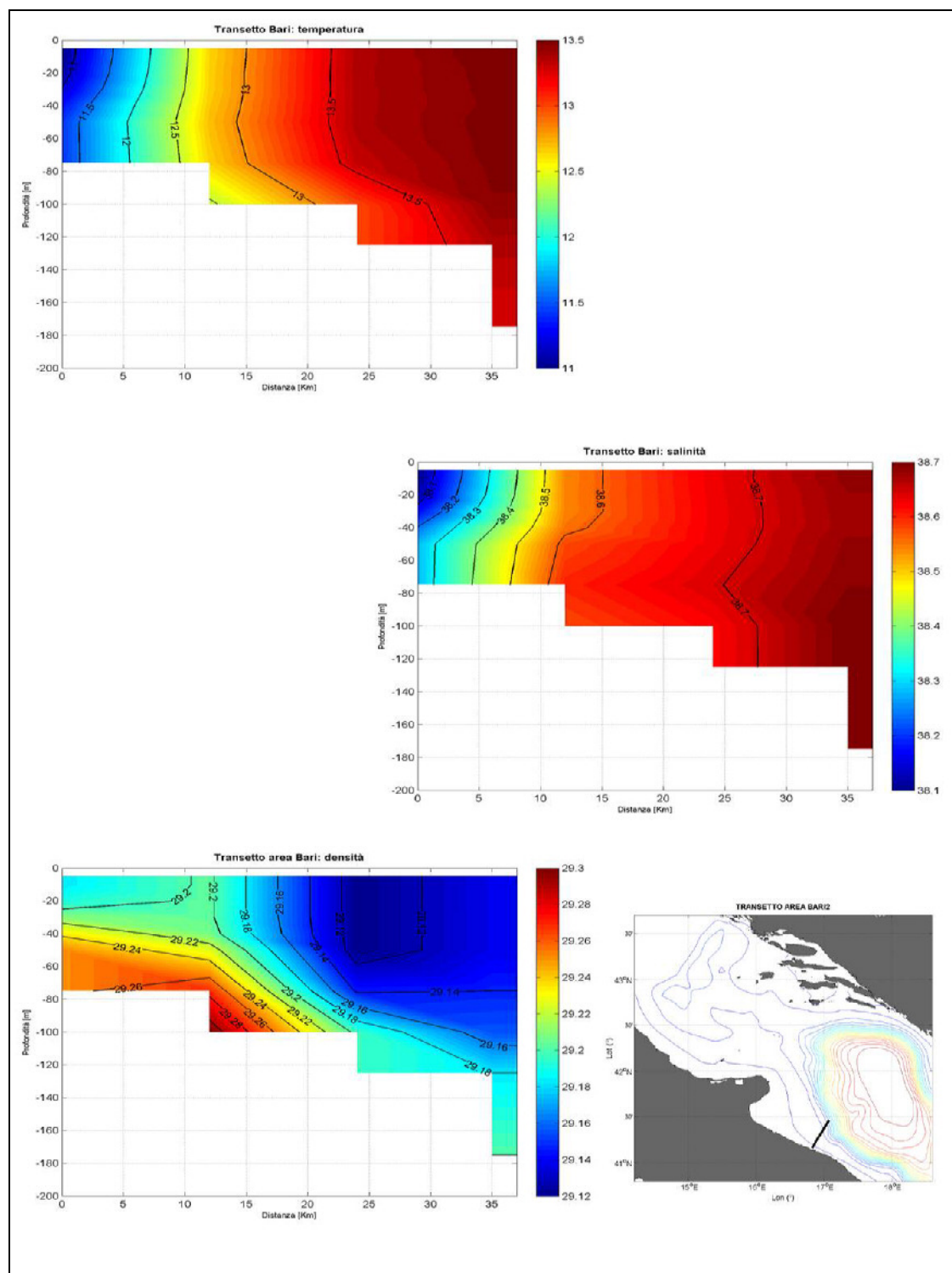


Figura 30 a,b,c,d: Transecto Bari 2, sezioni verticali di T, S, Sigma-t e posizione dei rilevamenti.

L'analisi del transetto Bari-2 (figura 30), campionato circa 30 Km più a sud conferma la presenza delle acque trasportate dalla DWOC fra i 5 e i 20 Km dal primo rilevamento (10 - 25 Km dalla costa circa), ad un livello batimetrico compreso fra 70 e 100 m. In questa sezione, le acque dense sono più vicine alla linea di costa, coerentemente con il restringimento della piattaforma continentale che occorre a Sud del golfo di Manfredonia. Questo transetto non evidenzia invece le SAdDW, rimanendo più distante dalla fossa del SAd; presenta invece un segnale superficiale costiero di bassa temperatura e salinità riferibile agli apporti fluviali locali, e, forse, ad una debolissima WACC. Tuttavia le isoterme e le isoaline presentano un andamento più verticale rispetto al precedente transetto, con un forte gradiente diretto verso il largo nei primi 35 Km.

La struttura del campo di densità è complessa, anche se l'intervallo di variabilità è piuttosto limitato. Vicino alla costa (primi 10 Km) si osserva un minimo di densità superficiale che conferma la presenza di acque leggere. Sul fondo è invece presente una massa d'acqua a densità elevata, probabilmente proveniente dal NAd. Un minimo di densità è localizzato fra 22 e 27 Km, fra la superficie e i -40 m, e configura, probabilmente, il bordo esterno della circolazione ciclonica del SAd.

In conclusione, entrambi i transetti evidenziano le acque dense provenienti dall'Adriatico centro-settentrionale, che formano inequivocabilmente una vena che si muove verso Sud trasportata dalla DWOC.

4.5 IL CENTRO DEL MAD – L'AREA “POMO”

4.5.1 Profilo medio e tipi di acque

Il profilo medio di temperatura che rappresenta la colonna d'acqua nell'area “Pomo” si caratterizza per il valore costante di 12.4°C, e per una variabilità che non raggiunge i $\pm 0.1^\circ\text{C}$ fino alla profondità di -100 m. Al di sotto di tale livello, si registra una riduzione della temperatura dell'acqua, dapprima molto lieve, fino ai -125 m, poi molto marcata, che prosegue fino al fondale dove la temperatura scende al di sotto degli 11.0°C.

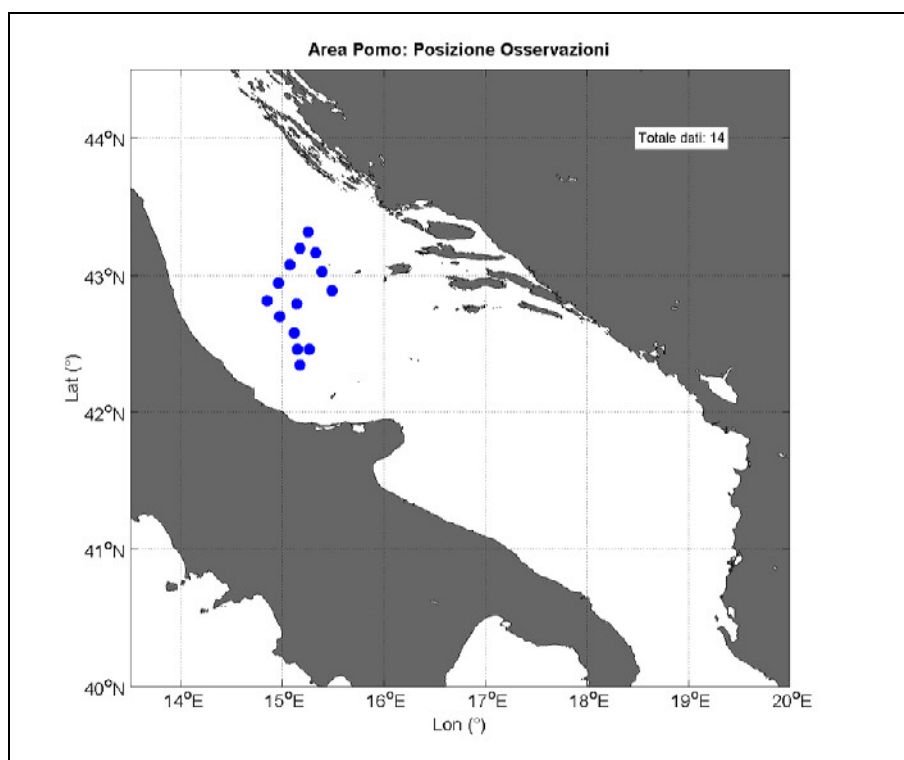
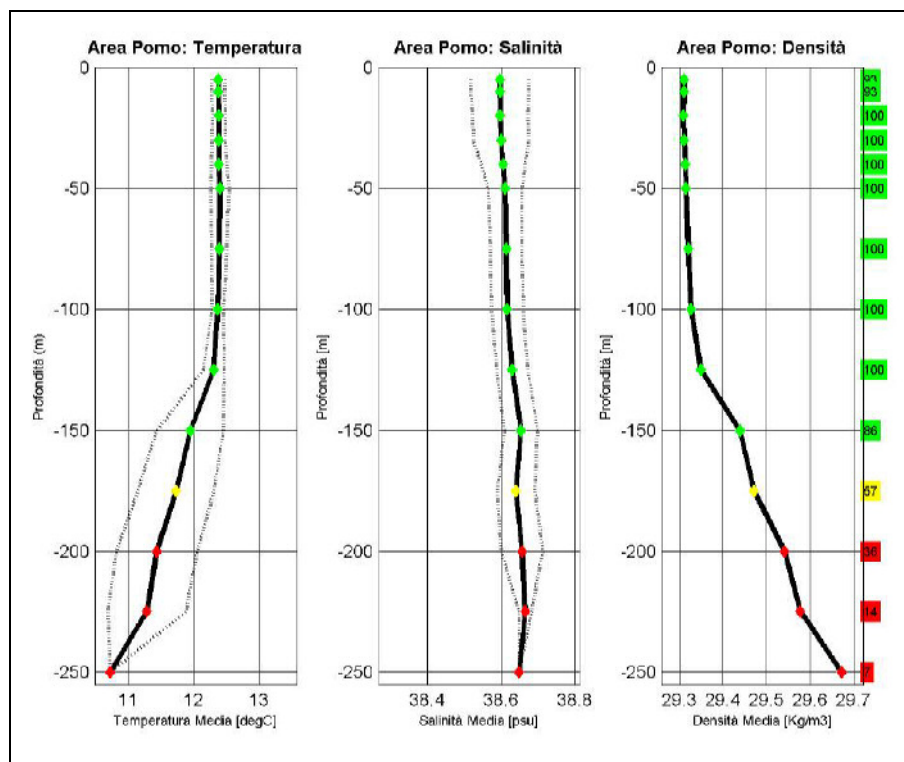
A parte il valore più profondo, che corrisponde ad un unico rilevamento, tutti i dati di temperatura sotto ai -100 m presentano anche una maggiore variabilità, che ai -200 m raggiunge il valore massimo di $\pm 0.6^\circ\text{C}$.

In questa regione la salinità è caratterizzata da una debolissima variabilità verticale, dai 38.6 psu superficiali ai 38.65 psu del fondale. La deviazione standard associata rimane costantemente sotto al valore di ± 0.1 psu, presenta il picco massimo in superficie, per poi, sostanzialmente, assestarsi ad un valore attorno a ± 0.05 psu a partire dai -50 m.

Il valore di densità, che risulta determinato sostanzialmente dalla temperatura, presenta un valore costante nei primi 100 m attorno a 29.3-29.35 Kg/m³, mentre al di sotto cresce fino a superare i 29.5 Kg/m³ a -200 m e i 29.6 Kg/m³ in prossimità del fondale.

L'analisi del diagramma T/S (figura 33) sorprende subito evidenziando acque dense che si collocano sul bordo ed oltre il bordo destro dei riquadri relativi alle MAdDW e alle NAdDW, ad indicare una salinità più alta di quanto indicata in letteratura per la caratterizzazione di queste acque. Alla luce di questo dobbiamo supporre che la formazione di acque dense avvenga, attualmente, in presenza di salinità inconsuete.

E' massiccia soprattutto la presenza di MAdDW, con temperature comprese fra 10.9°C e 12.4°C ed un intervallo di salinità compreso fra 38.55 e 38.75 psu, con qualche traccia riconducibile alle NAdDW, coerente in un'area in cui esse si fondono con le locali acque generando le MAdDW.



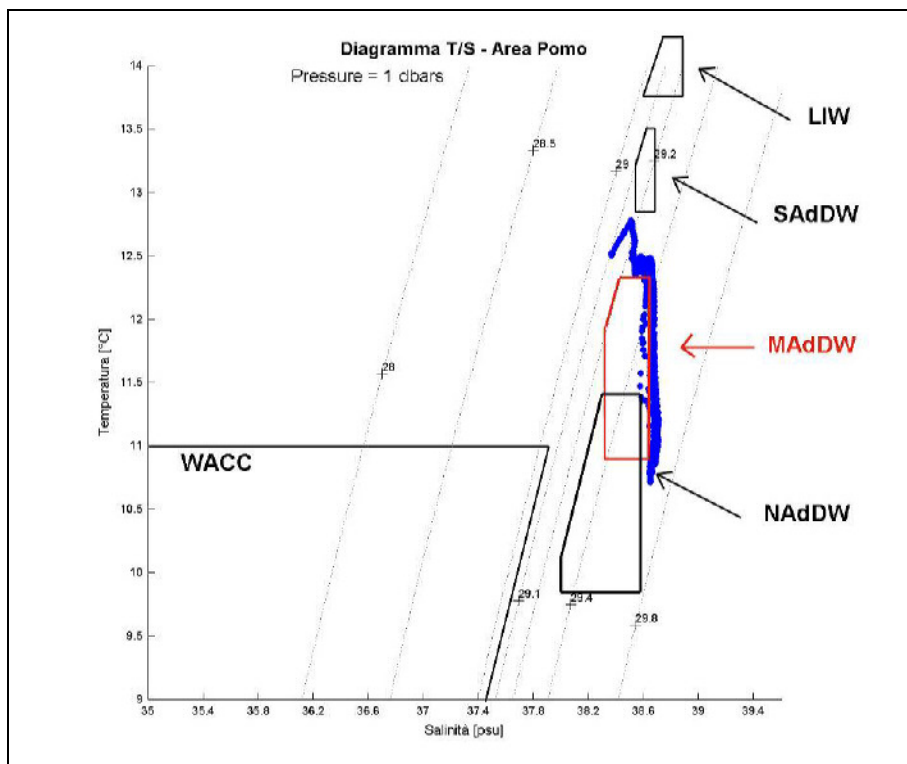


Figura 33: Area Pomo, tipi di acque presenti.

4.5.2 Strutture rilevate

La lettura dei profili medi di T, S, Sigma-t, evidenzia una notevole uniformità della colonna d'acqua fino a -125 m, con costanza dei valori di temperatura, debole incremento in quelli di salinità e minima variabilità, assente nel profilo di temperatura.

Oltre ai -125 m il segnale cambia radicalmente, con il profilo di densità che cresce notevolmente come conseguenza della rapida diminuzione della temperatura. Questa è la traccia che rivela la presenza massiccia di MAdDW a partire dalla profondità di 125 m. Le acque qui immagazzinate raggiungono sul fondale la notevole densità media di quasi 29.7 Kg/m^3 , ma, sorprendentemente, anche le acque presenti fra la superficie e i -125 m presentano le caratteristiche per poter essere classificate come MAdDW. Questo è il segnale inequivocabile di un notevole raffreddamento superficiale occorso durante l'inverno, che ha prodotto acque davvero fredde e dense. A colpire l'attenzione è però soprattutto il dato medio superficiale di salinità, che supera i 38.6 psu e condiziona la densità delle acque superficiali.

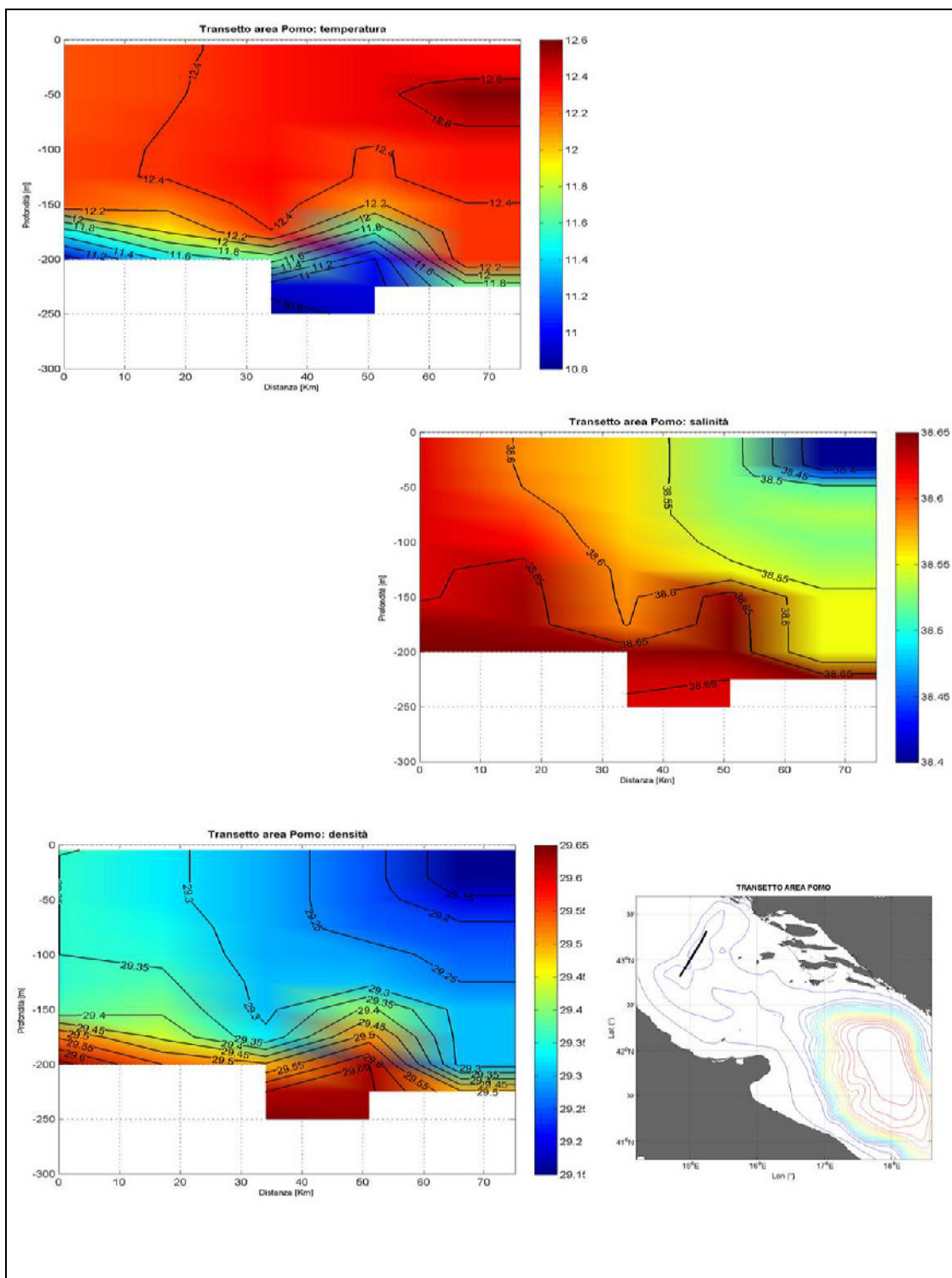


Figura 34 a,b,c,d: Transetto area “Pomo”, sezioni verticali di T, S, Sigma-t e posizione dei rilevamenti.

Anche per quest'area erano disponibili dei rilievi CTD allineati, proprio in corrispondenza della depressione del Pomo; si è quindi prodotto un transetto, visibile in figura 34, che consente di individuare la disposizione delle masse d'acqua.

La temperatura evidenzia una sostanziale assenza di stratificazione fino a -150 m, dove si registra un forte gradiente che conduce a temperature inferiori a 10.8°C sul fondo.

Le acque dense sono visualizzabili in particolare oltre l'isopigna dei 29.4 Kg/m³, che individua una forte stratificazione nei 50 m che precedono il fondale. Queste acque ricoprono il fondale della depressione del Pomo, colmando in particolare la depressione centrale e spandendosi prevalentemente in direzione ovest.

Ad est, la presenza di un minimo superficiale di salinità e densità suggerisce la presenza della EAC, che convoglia verso nord i contributi fluviali del complesso croato-albanese in uno strato confinato nei primi 50 metri. Sempre ad est, negli strati immediatamente inferiori rispetto a questi, una “cella” corrispondente ad un massimo locale di temperatura, potrebbe far pensare ad una debole traccia delle LIW, che segue il percorso della EAC ma ad un livello più profondo, apportando calore e salinità dal Mediterraneo fino al MAd.

4.6 FRA MAD E SAD – L'AREA "CHANNEL"

4.6.1 Tipi di acque e strutture rilevate

Procedendo alla determinazione dei profili medi come per le altre "aree" individuate, si è ottenuto per quest'area un profilo medio verticale di densità che diviene instabile a partire dai -150 m di profondità circa.

Questo risultato va attribuito alla notevole variabilità spaziale delle caratteristiche fisiche delle acque locali, accompagnata da importanti differenze batimetriche.

L'impossibilità di rappresentare le caratteristiche fisiche dell'area, ha portato alla decisione di procedere solo con l'individuazione dei tipi di acqua, mediante diagramma T/S, e di produrre un transetto con i dati allineati lungo l'asse del canale che collega il MAd al SAd. In questo caso, la risoluzione dei dati è particolarmente buona, dal momento che coprono circa 120 Km con una distanza media fra i campionamenti di circa 15 Km.

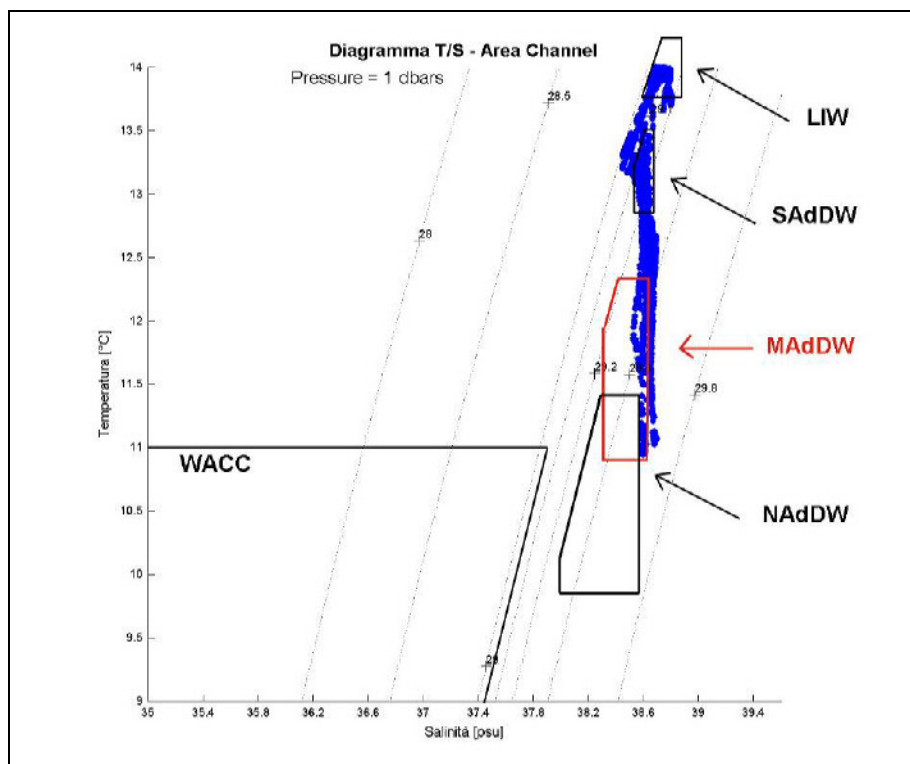


Figura 35: Area Channel, tipi di acque presenti.

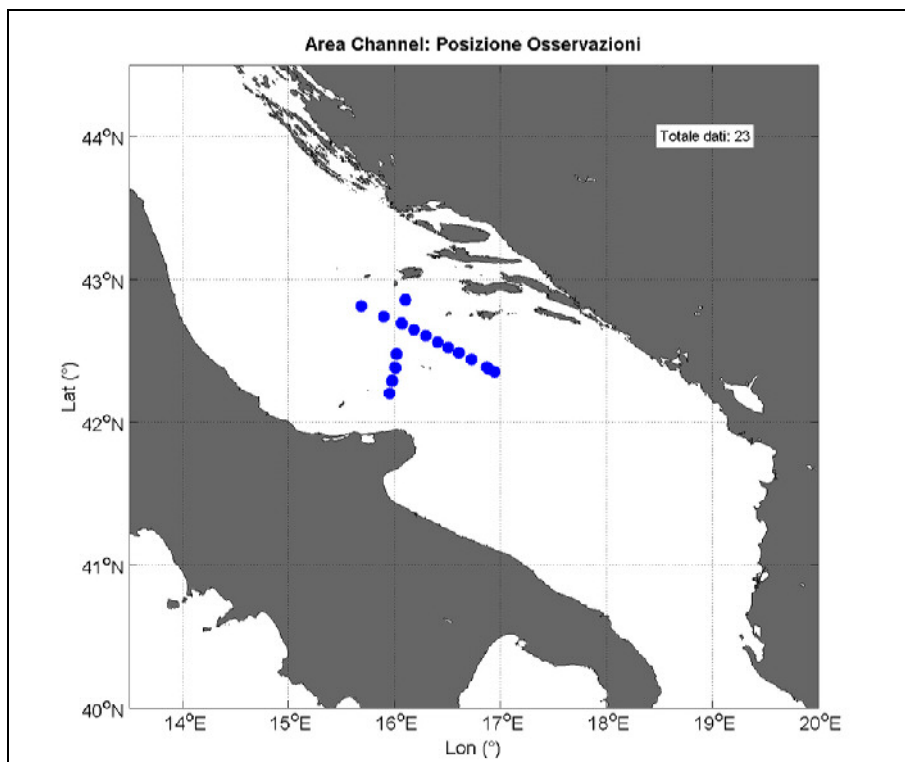


Figura 36: Area Channel posizione geografica dei rilevamenti.

L'analisi del diagramma T/S (figura 35) rivela in primo luogo una bassissima variabilità intermini di salinità, e contemporaneamente la presenza MAdDW, comprese in un intervallo di temperatura fra 11.0°C e 12.4°C, per una salinità media di 38.6 psu, parzialmente superiore a quella “attesa”. La densità massima misurata è di circa 29.7 Kg/m³, in linea con quanto rilevato nell'area “Pomo” situata immediatamente più a nord di questa.

Nella parte più alta del diagramma, a temperature vicine ai 14°C e salinità di circa 38.7 psu, si riscontra il segnale delle LIW.

Il transetto di quest'area (figura 37) presenta un orientamento NNO-SSE, da sinistra verso destra. Nei primi 20 Km del transetto, il profilo verticale appare destratificato, con temperatura costante di circa 13.2°C dalla superficie fino ai -100 m. A partire da questa profondità si rileva un forte gradiente verticale, identificabile dalla stratificazione orizzontale delle isoterme. La temperatura minima è raggiunta sul fondale con circa 12°C. Le isolinee di salinità riferite alla stessa sotto-sezione presentano un andamento simile, con destratificazione dalla superficie ai -100 m in cui

livello di salinità risulta lievemente inferiore ai 38.55 psu. Dai -100 m al fondale si ha un incremento di 0.1 psu.

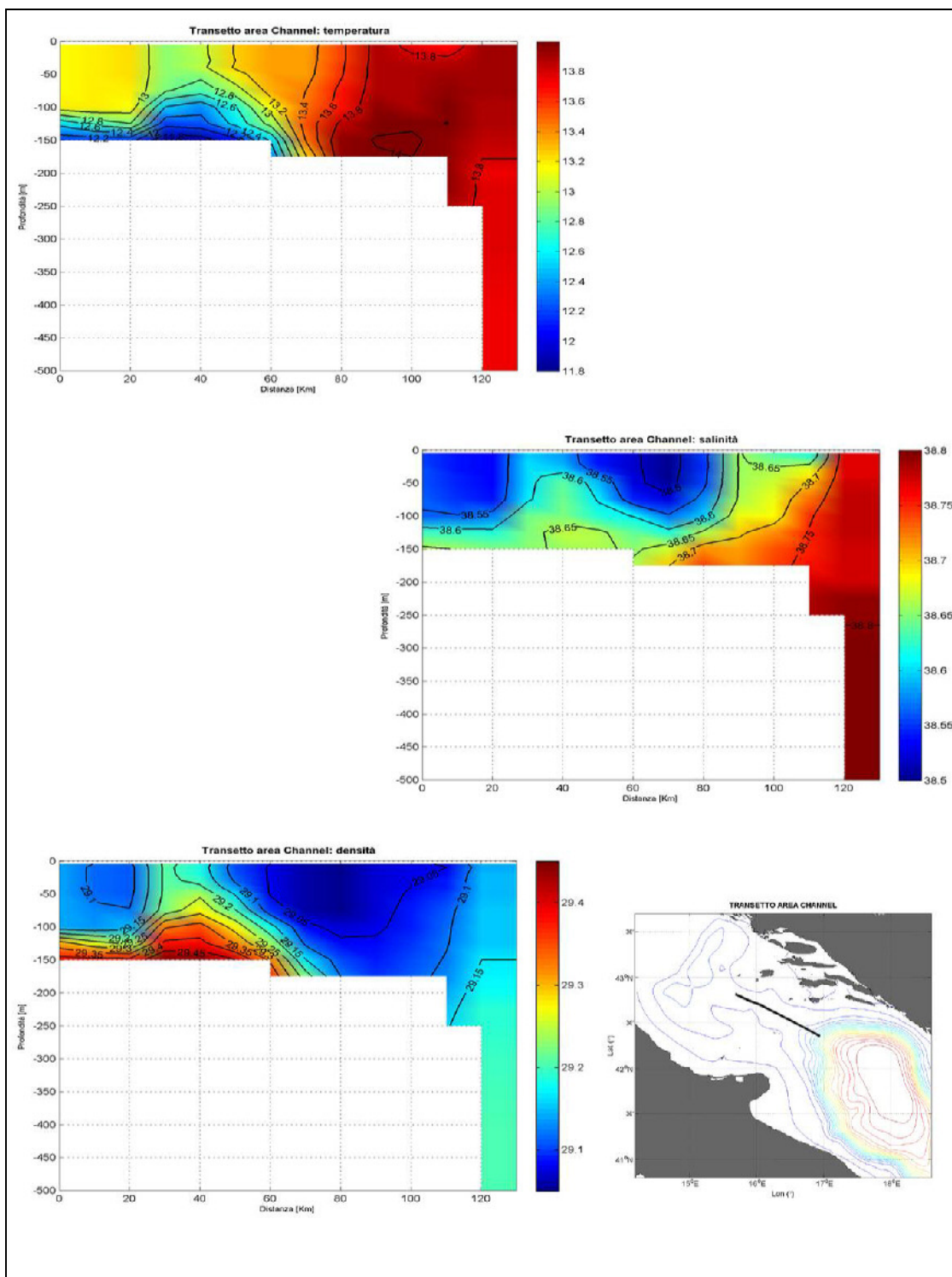


Figura 37 a,b,c,d: Transetto area “Channel”, sezioni verticali di T, S, Sigma-t e posizione dei rilevamenti.

Anche la densità presenta un andamento delle isolinee del tutto simile alle isoterme, con stratificazione oltre i 100 m e raggiungimento di un massimo appena superiore ai 29.4 Kg/m^3 , in prossimità del fondale. La densità configura fra i 10 e i 20 Km, una cella superficiale di minimo, con valori inferiori ai 29.1 Kg/m^3 .

La sotto sezione compresa fra 25 e 70 Km presenta la temperatura media più bassa, sia alla superficie, dove non si raggiungono i 13°C , che sul fondale, dove si rilevano meno di 11.8°C . La forma delle isoterme è di tipo cuspidale. Anche le isoaline presentano lo stesso andamento, seppure a gradiente invertito, e configurano la presenza di un massimo locale di salinità sia alla superficie (quasi 38.6 psu), che sul fondale (oltre 38.65 psu). Le isopicne confermano la stessa struttura, che si può interpretare come una risalita di acque dal fondo. In superficie sono superati i 29.2 Kg/m^3 , mentre sul fondale si registrano densità maggiori di 29.45 Kg/m^3 .

Oltre i 60 Km le isoterme tendono ad assumere un andamento verticale, configurando un gradiente latitudinale di temperatura: a circa 80 Km si avverte la presenza delle acque più calde del SAd, dove la stratificazione si annulla. A circa 90-100 Km si registra la presenza di una cella di acqua con temperatura superiore ai 14°C . Oltre i 120 Km il fondale scende rapidamente verso la depressione del SAd, e l'ultima isoterma configura l'inizio di una stratificazione orizzontale di temperatura, con tendenza alla diminuzione dei valori con l'incremento della profondità.

Le isoaline evidenziano, oltre i 50 Km un andamento concavo, opposto a quello convesso registrato nella sotto-sezione precedente. A circa 70 Km si presenta una cella di minimo superficiale, profonda circa 50 m per una larghezza di circa 10 Km in cui la salinità scende sotto ai 38.5 psu. Oltre gli 80 Km si assiste ad una conformazione obliqua delle isoaline con evidenza di un gradiente diretto verso sud, che prelude all'ingresso nella depressione del SAd, dove si registra una salinità omogenea fino ai -200 m, con valori superiori a 38.75 psu.

Il profilo di densità oltre la struttura cuspidale precedentemente descritta, presenta dapprima un fronte obliquo rispetto al fondale fra i 50 e gli 80 Km che prelude ad un'ampia cella di minimo fra la superficie e i -100 m, lunga fino a 40-50 Km, nella quale la densità registrata è inferiore a 29.05 Kg/m^3 . L'ingresso nella depressione del SAd è delimitato dall'isopicna verticale di 29.1 Kg/m^3 ; oltre il bordo della depressione si ha assenza superficiale di stratificazione, almeno fino ai -200 m.

Dalla descrizione appena fatta si rileva la presenza di MAdDW in una fascia sottile prossima al fondale, fino alla struttura cuspidale presente in corrispondenza della Sella di Pelagosa. Esse sono probabilmente traboccate dalla depressione del Pomo e hanno seguito il canale che collega MAd e SAd fino alla sella. In corrispondenza di questa si registra il massimo locale di densità, sempre al fondo, e si configura una struttura di risalita di acque, spiegabile con la presenza di una circolazione superficiale ciclonica evidenziata anche dai minimi superficiali di densità e salinità presenti a 15 e a 80 Km.

Dalle dimensioni potrebbe trattarsi di una struttura circolatoria di mesoscala, al centro della quale sono favoriti i movimenti di rimescolamento verticale delle acque. È altresì possibile, che in corrispondenza di questa struttura si stia osservando una locale formazione di acque dense.

4.7 IL SAD CENTRALE – L’AREA “FOSSA”

4.7.1 Profilo medio e tipi di acque

La colonna d’acqua “media” calcolata si caratterizza per dei valori di temperatura e salinità decisamente superiori rispetto alle altre aree. Il valore superficiale di temperatura è di circa 13.65°C, con una scarsa variabilità (appena $\pm 0.1^\circ\text{C}$). Scendendo più in profondità, la temperatura aumenta quasi impercettibilmente fra i 200 ed i 500 metri di profondità di circa 0.05°C. Oltre i -500 m si assiste invece ad un costante calo nei valori di temperatura con una variabilità del dato che aumenta a circa 0.2°C.

Il profilo medio di salinità presenta lo stesso tipo di andamento, con valori superficiali di 38.79 ± 0.01 psu che tendono ad aumentare a partire dai -75 m fino al valore di 38.8 psu (dato che non presenta variabilità apprezzabile). Questo valore viene mantenuto fino a circa -500 m, oltre i quali prende a decrescere leggermente ed in modo lineare fino al valore di fondo pari a 38.76 psu.

La deviazione standard registrata a -1000 m é nuovamente di ± 0.01 psu, tuttavia essa non può essere considerata significativa oltre i -800 m a causa del ridotto numero di campioni disponibili.

La densità media superficiale è di 29.18 Kg/m³, cresce debolmente fino al valore di 29.19 raggiunto attorno ai -200 m, per rimanere poi stabile fino ai -500 metri. Sotto a questo livello si verifica un aumento più marcato della densità che si porta gradualmente al valore di fondale pari a 29.25 Kg/m³.

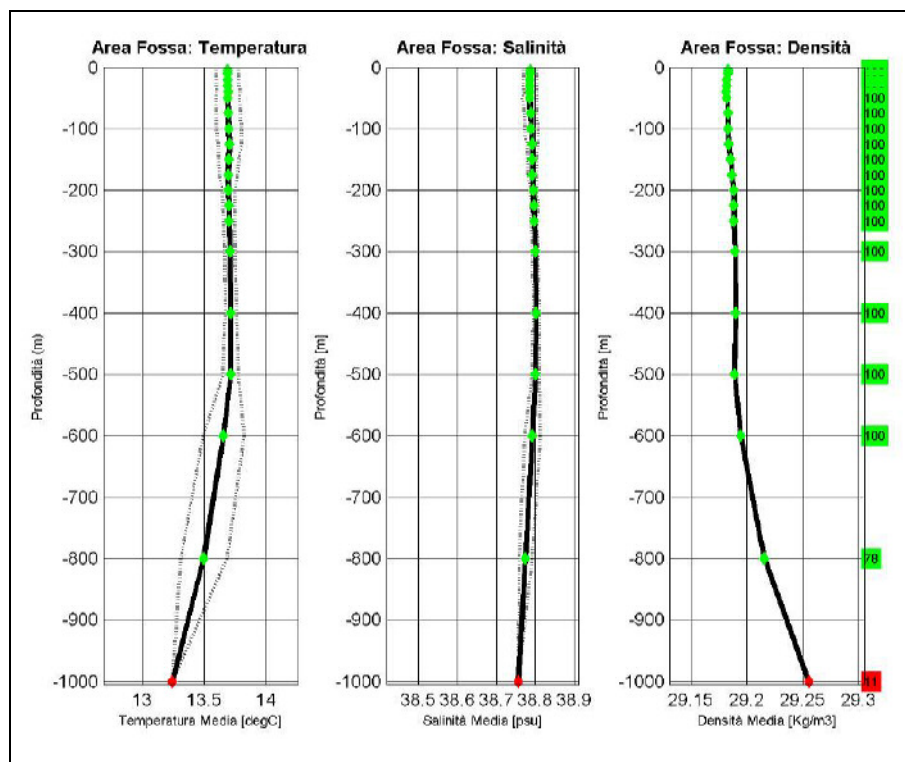


Figura 38: Area Fossa, profilo medio per (T, S, Sig-t) della colonna d'acqua.

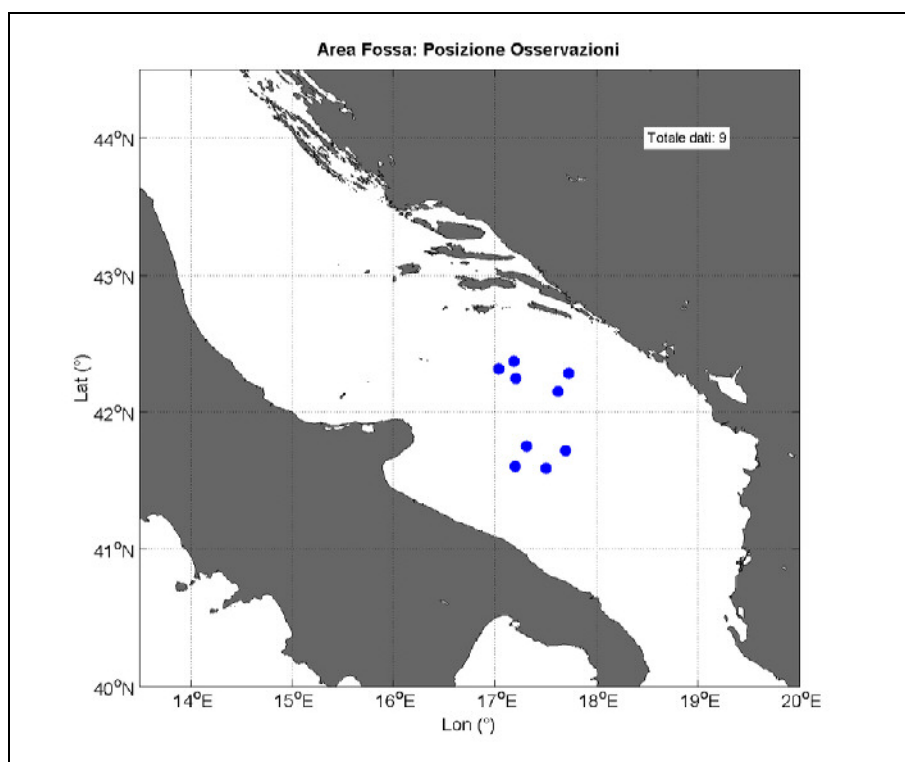


Figura 39: Area Fossa, posizione geografica dei rilevamenti.

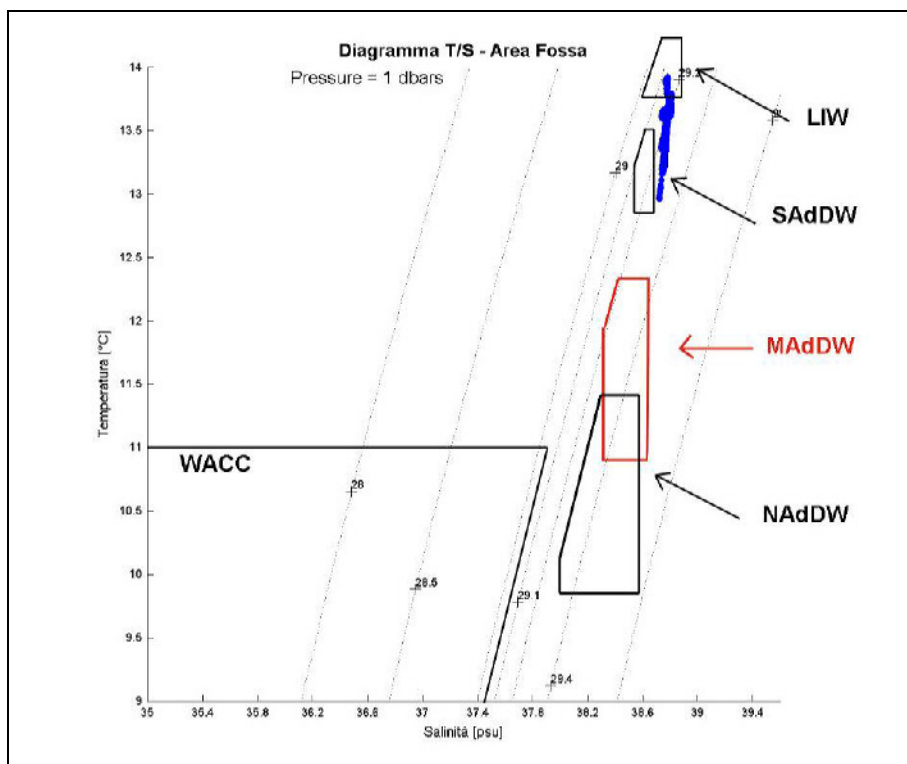


Figura 40: Area Fossa, tipi di acque presenti.

Il diagramma T/S (figura 40) vede tutti i punti addensarsi in un'area molto ristretta posta nella parte alta e destra del diagramma. Per temperatura, le masse d'acqua presenti dovrebbero essere classificate come SAdDW e LIW, tuttavia la salinità delle SAdDW appare superiore a quella attesa per queste acque: esse presentano un intervallo di temperatura compreso fra 12.9°C e 13.4°C, ed un grado di salinità che oscilla fra 38.7 e 38.8 psu. La salinità media delle SAdDW qui rilevate, è quasi 0.1 psu superiore rispetto a quanto descritto in letteratura.

Le LIW presentano invece le caratteristiche attese: temperature oltre i 13.7°C, ed un livello di salinità che raggiunge e supera i 38.8 psu.

4.7.2 Strutture rilevate

L'analisi dei profili medi rivela un'eccellente omogeneità verticale della colonna d'acqua, con valori pressoché costanti di temperatura e salinità i quali, uniti al dato di variabilità nullo, denotano assenza di stratificazione fino ai -500 m. Questo aspetto è segnale di un completo rimescolamento della colonna, e indizio dell'avvenuta formazione locale di acque profonde.

Nel profilo medio di salinità si intravede forse una lievissima evidenza del segnale delle LIW che potrebbe essere rilevato nella “pancia” presente fra -100 e -500 m, con massimo attorno ai -400 m. Questo debole segnale è presente anche nel profilo di densità. Sotto ai -500 m le acque divengono gradualmente più fredde e leggermente meno salate, configurando il segnale delle SAdDW a partire dai -600 m.

Anche per quest’area erano disponibili dei CTD ideali per la costruzione di un transetto (figura 41), che da Dubrownik (a sinistra) giunge fino in prossimità di Bari (destra). Rispetto ai transetti precedenti la visualizzazione è pertanto rovesciata, con l’est posto alla sinistra del prospetto.

L’andamento della temperatura mostra un forte gradiente orizzontale solo in prossimità della costa italiana, mentre in tutta la depressione del SAd non si ha alcun segnale di stratificazione se non nel suo punto più profondo, dove le isolinee rappresentano un gradiente obliquo con acque più fredde sul fondale. In corrispondenza di questo gradiente profondo, anche la densità è la massima rilevata, pertanto è possibile concludere che al di sotto dell’isoterma di 13.5°C siano visualizzate le SAdDW. Esse appaiono addossate alla scarpata continentale italiana poichè è proprio questa la zona in cui si ritiene che avvenga la formazione delle SAdDW per sprofondamento delle acque dense trasportate dalla DWOC e mescolamento con le acque locali. Il punto esatto sarebbe posto in corrispondenza del canyon di Bari, rispetto al quale la sezione passa leggermente più a nord.

Il prospetto della salinità presenta due fronti costieri, dove si rilevano i valori minori. Quello posto a sinistra della figura è ben evidenziato anche nel profilo di densità e rappresenta con ogni probabilità il segnale della EAC, la quale risente, in questa zona, degli apporti del complesso fluviale albanese. A destra della figura, le isolinee di densità rivelano la presenza delle acque dense della DWOC, ancora confinate in prossimità della costa italiana, e la presenza di un interessante minimo di densità nei livelli superficiali, a circa 30-40 Km dalla costa italiana. Questo minimo potrebbe essere rivelatore del bordo esterno del ciclone che ruota attorno alla depressione del SAd, portando acque dalla costa orientale verso quella occidentale.

Nel grafico relativo alla densità risulta interessante la “lingua” verticale presente fra la superficie e i -600 m, a circa 40 Km dalla costa croata, in cui la salinità supera i 38.8 psu. La mancanza di un dato di temperatura evidente permette solo di supporre

che si possa trattare di acque levantine intermedie entrate da Otranto. Solitamente il flusso in ingresso delle LIW comincia a diventare più consistente verso il mese di aprile; questo potrebbe spiegare la debolezza del segnale delle LIW nei dati osservati.

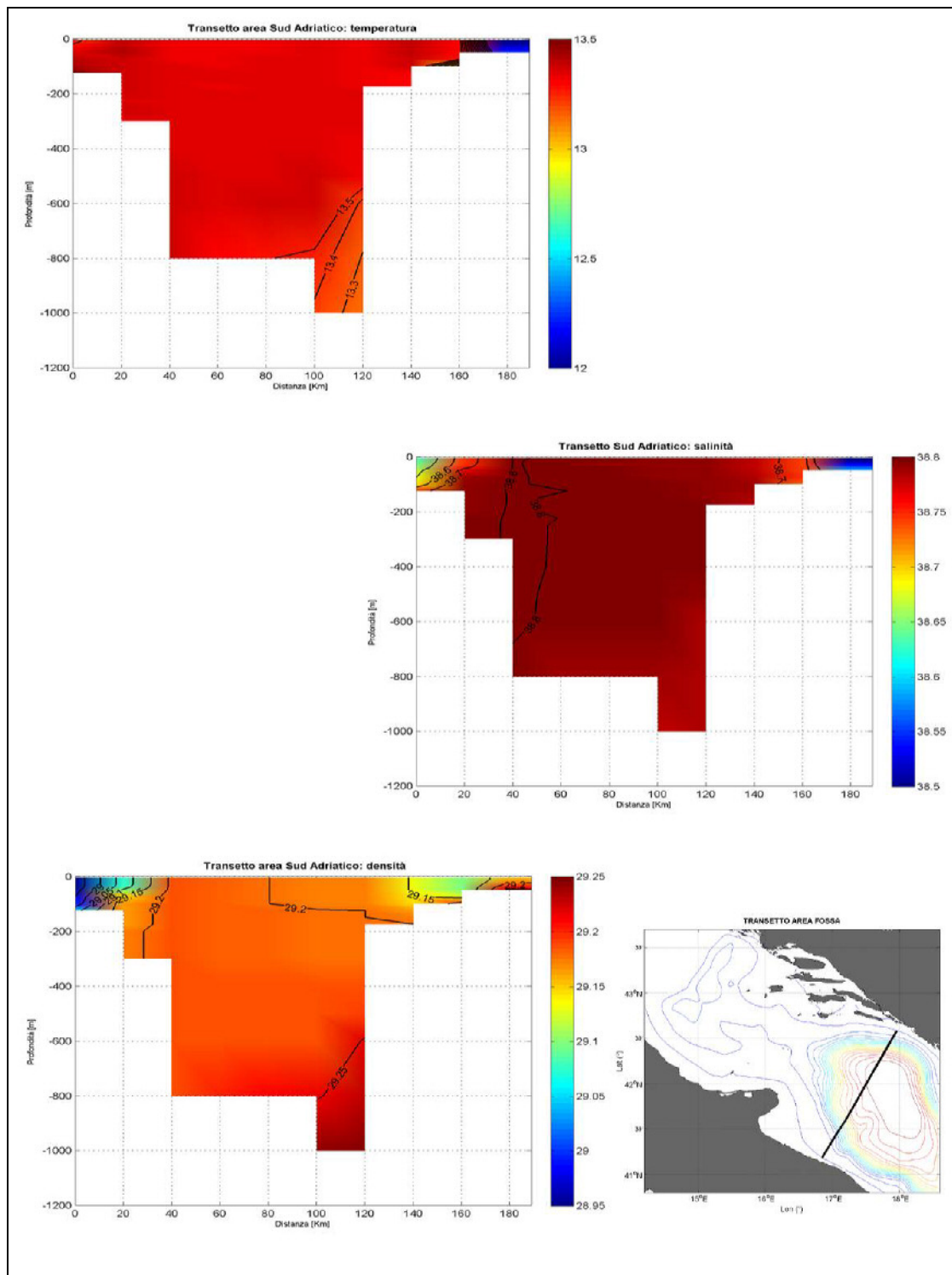


Figura 41 a,b,c,d: Transetto area “Fossa”, sezioni verticali di T, S, Sigma-t e posizione dei rilevamenti.

4.8 CONCLUSIONI

L'analisi dei dati appena condotta ha portato all'identificazione di strutture idrografiche superficiali e profonde, riassunte graficamente nelle figure 42 e 43.

4.8.1 Strutture superficiali

Fra le strutture superficiali (figura 42), un segnale evidente della WACC è rilevato in tutte le tre aree costiere: essa presenta, in corrispondenza dell'area WaccN, un'ampiezza stimabile in circa 10-12 Km per uno spessore che varia fra 10 a 15 m a partire dalla superficie. Le temperature, il livello di salinità e di densità minori sono rilevati al nord, fatto che evidenzia il mutare delle caratteristiche idrologiche delle acque, dovuto ai gradual processi di rimescolamento con acque locali. La sezione trasversale della WACC tende a restringersi durante il suo percorso attorno al Gargano dove viene costretta verso la costa da acque superficiali molto dense presenti immediatamente più al largo.

Il segnale della corrente diviene mano a mano più debole, con il profilo medio che, pur mantenendo la stessa forma, presenta gradienti verticali ridotti nell'area WaccC. La temperatura media superficiale cresce di circa 0.5°C e la salinità di 0.55 psu in circa 60 Km. Con l'ingresso nel golfo di Manfredonia, la WACC devia il proprio percorso verso la costa pugliese, seguendo il bordo di un vortice anticiclonico centrato nel golfo di Manfredonia; questo fa sì che parte delle acque della WACC si mescoli con quelle interne al golfo. L'altra massa d'acqua prosegue verso Sud raggiungendo la costa poco più a nord di Bari, per poi lambirla fino al canale d'Otranto, rimanendo confinata in una fascia sottilissima e ormai quasi indistinguibile dalle acque locali.

Sono stati individuati i segnali di due strutture cicloniche. La prima, probabilmente dovuta a processi di mesoscala, ha il suo centro in prossimità della sella di Pelagosa, dove si riscontra un profilo di risalita di acque profonde (*upwelling*) con attorno dei minimi di densità. La seconda rappresenta invece il bordo esterno della circolazione ciclonica presente attorno alla depressione del SAd, il cui segnale viene riscontrato nei transetti Bari-1, Bari-2 e in quello del SAd.

Nel transetto relativo alla depressione di Pomo, viene riscontrato un minimo superficiale di salinità riferibile alla EACC in corrispondenza del bordo orientale di questa sezione, non distante dalla costa croata.

4.8.2 Strutture profonde

La figura 43 riporta il probabile percorso delle acque dense della DWOC nella loro migrazione profonda verso sud, come rivelato dall'analisi fin qui condotta. In bianco sono state evidenziate le posizioni dei transetti analizzati.

Le MAdDW sono state rilevate in tutte le aree studiate tranne in quella relativa alla depressione del SAd (area "Fossa"), in quanto qui sono rimescolate con le acque locali e perdono le loro caratteristiche. Esse colmano la depressione di Pomo e rimangono confinate attorno ad essa in prossimità del fondale, in uno strato spesso fino a 50 m.

Osservando il transetto dell'area "Channel", si comprende come queste acque trabocchino dal Pomo verso la Sella di Pelagosa, dove rimangono sempre confinate in prossimità del fondale, senza riuscire a valicarla; in corrispondenza della sella vengono infatti intrappolate da una piccola struttura circolatoria ciclonica, già descritta, che le spinge verso la superficie.

Studiando alcuni transetti ("WaccN", "Gargano", "Bari-1 e 2") prossimi alla costa italiana e ad essa ortogonali, è stato possibile confermare la presenza della *Dense Water Ocean Current* (DWOC) e seguirne il percorso. Il primo segnale di questa corrente, relativo al suo bordo più occidentale, è individuato nel transetto "WaccN" a soli 16 Km dalla costa e ad appena 40 m di profondità, dove sono state rinvenute acque con densità potenziale superiore a 29.4 Kg/m^3 .

Al Gargano, la fascia di acque dense è addossata alla scarpata continentale, presenta una sezione trapezoidale con una base maggiore di circa 40 Km localizzata sul fondale, ed una minore di circa 20 Km, in superficie. Il massimo di densità è presente a circa -100 m, a ridosso della scarpata continentale dove l'acqua presenta una densità potenziale di 29.6 Kg/m^3 .

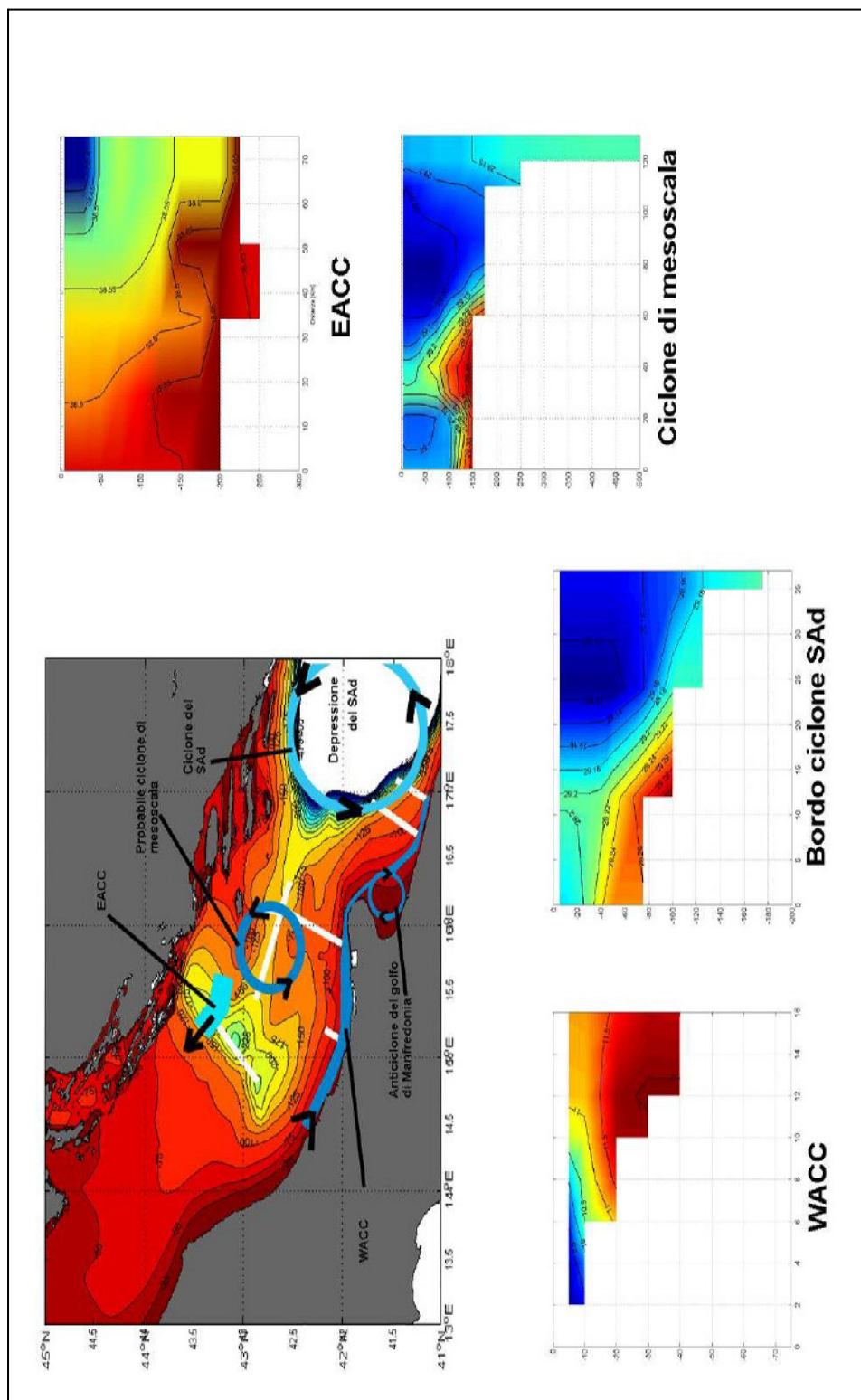


Figura 42: Riassunto delle strutture idrografiche superficiali identificate.

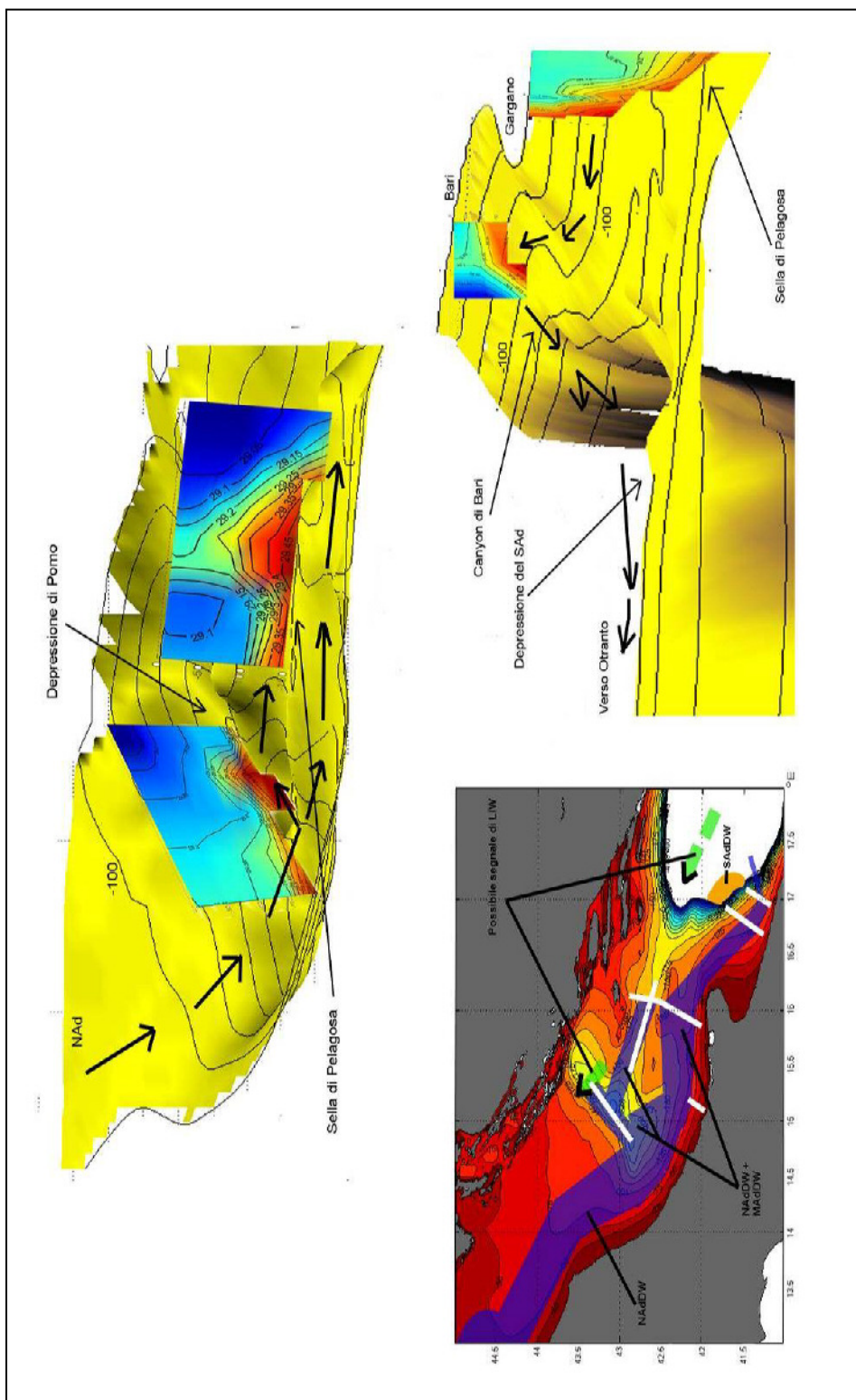


Figura 43: Riassunto delle strutture idrografiche profonde identificate.

Circa 100 Km più a sud, in corrispondenza del transetto “Bari-1”, questa vena di acque dense appare di sezione semi-ellittica, con asse maggiore di circa 30 Km ed uno spessore medio attorno ai 20-25 m. Essa appare fluire ad un livello variabile fra -40 e -100 m. La densità massima qui riscontrata è di circa 29.35 Kg/m^3 , decisamente più bassa della precedente.

Al transetto “Bari-2”, molto vicini al punto in cui si ritiene che le acque dense precipitino nella depressione del SAd, la sezione della vena diviene semicircolare, con un diametro di circa 20 Km ed uno spessore medio attorno ai 30 m. Il flusso pare restringersi fra il transetto “Bari-1” e “Bari-2”, allo stesso modo di come si restringe la piattaforma continentale su cui esso scorre. La presenza di una portata di acque simile fra i due transetti spiega il maggiore spessore della sezione nel secondo transetto.

Dai dati qui elaborati, la parte DWOC situata a nord del golfo di Manfredonia pare essere costituita principalmente da una grande quantità di MAdDW, con l’evidenza, al transetto del Gargano, di una possibile vena più profonda di NAdDW. Anche più a Sud questa corrente è evidente, ma la sua sezione è decisamente inferiore così come la densità delle sue acque, inducendo a pensare a due masse d’acqua dense prodotte in periodi differenti. Quella registrata al Gargano è imponente, e dalle velocità stimate in letteratura per la DWOC, potrebbe essere stata prodotta circa 20 giorni dopo quella rilevata in prossimità di Bari

Analizzando il transetto del SAd si sono riscontrate le SAdDW, presenti sul fondo della depressione in prossimità della scarpata continentale italiana, e la presenza di un debole segnale di LIW, a circa due terzi della distanza Bari-Dubrownik, fra -600 m e la superficie.

Mancando un’evidenza di temperature vicine ai 14°C , non si riesce ad avere la certezza dell’attribuzione di tale massa d’acqua alle LIW, nonostante la presenza del segnale di queste acque nel diagramma T/S dell’area “Fossa”. Anche in corrispondenza del transetto del Pomo, risulta visibile un debole segnale di alta temperatura e salinità proprio nei livelli immediatamente sottostanti a quello identificato come EACC, che potrebbe essere interpretato come passaggio di una vena di LIW, in risalita verso il MAd.

4.8.3 La formazione di NAd-MAdDW nell'inverno 2005-2006

Le analisi condotte mostrano un'evidente presenza di MAdDW, sia al nord, nella depressione del Pomo, che lungo tutto il percorso della corrente di densità che raggiunge il SAd, lungo la quale appaiono anche tracce di NAdDW. Sono soprattutto i valori di densità potenziale e di salinità ad essere elevatissimi. Il processo di formazione delle acque dense presenta in Adriatico una notevole variabilità interannuale, legata al verificarsi di “fattori” determinanti e precursori, elencati nel paragrafo 2.2.5, che abbiamo ritenuto opportuno di verificare.

Salinità.

La figura 44 riporta la distribuzione percentuale della salinità media di dicembre 2005 (oltre i 36 psu) per la superficie del NAd (in alto) e del MAd (in basso).

La distribuzione di salinità è stata calcolata a partire dai dati del modello AREG (Adriatic REGional model, sviluppato all'interno del progetto ministeriale “Adricosm”), per cortesia dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – INGV. Il MAd appare decisamente più salato del NAd, come descritto in letteratura, con gran parte del bacino (>75%) che presenta una salinità superficiale molto elevata, compresa fra 38.3 e 38.4 psu. Nel NAd, una banda verticale presente in corrispondenza del valore di 36 psu, indica che quasi il 23% del bacino considerato presenta una salinità inferiore a questa. Ciò è compatibile con la “cuspidè” di acque dolci normalmente presente in corrispondenza del delta del Po, e, in generale, lungo le coste italiane. Un buon 35% del bacino presenta in ogni caso una salinità superficiale piuttosto elevata, compresa fra 38 e 38.2 psu.

Si può pertanto concludere che in entrambi i sottobacini sono presenti ampie aree superficiali con salinità sufficientemente elevata.

Flusso di calore.

La figura 45 riporta i flussi di calore all'interfaccia aria mare per il NAd (in alto) e per il MAd (al centro) fra Novembre 2005 e Febbraio 2006, mentre l'istogramma in basso riporta la portata media giornaliera del Po calcolata su base stagionale per il 2005 e l'inizio del 2006.

Anche i dati relativi al flusso di calore sono stati ottenuti dal modello oceanografico operativo AREG, “forzato” alla superficie dai dati meteorologici dell'*European Centre for Medium Weather Forecast* (ECMWF).

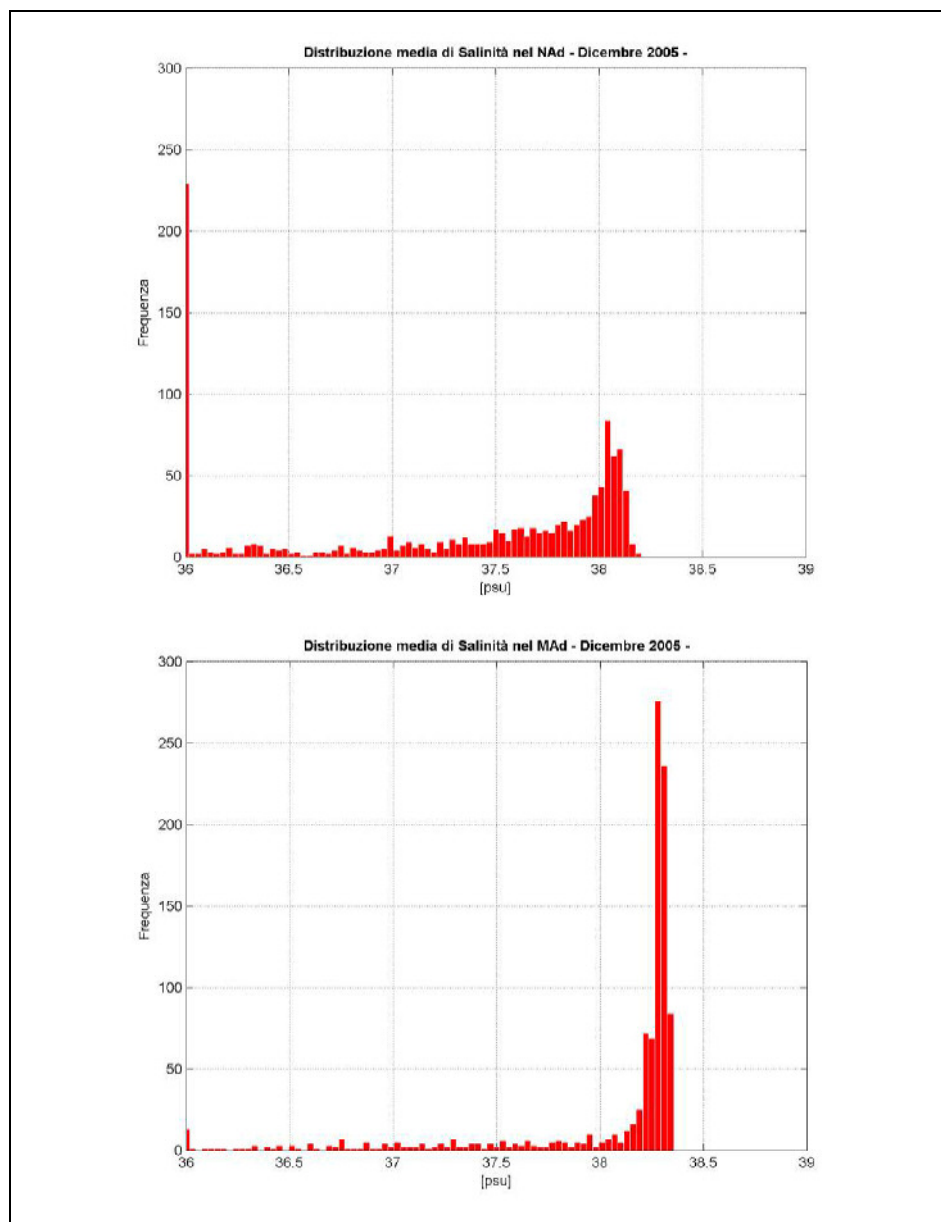


Figura 44: Dicembre 2005, distribuzione della salinità media nel NAd-MAd (elaborazione da dati del modello AREG, cortesia INGV).

L'analisi qui effettuata è stata quella di calcolare il flusso di calore medio giornaliero all'interfaccia aria-mare per l'area di formazione delle acque dense nel NAd (oltre il 44° parallelo N e ad ovest del 14° meridiano E) e nel MAd (fra i paralleli 42.5N e 43.5N ed i meridiani 14E e 16E).

I riquadri riportano i dati medi giornalieri (in blu quelli negativi in rosso quelli positivi), con l'evidenza della media cumulata dal 1 Novembre 2005 al 28 Febbraio 2006. In entrambi i sottobacini risulta evidente come il bilancio giornaliero di calore

sia sempre negativo fino ad oltre metà Febbraio 2006, quando si verificano le prime giornate in cui si registra un guadagno di calore.

Fra Novembre e fine Febbraio, il Nord Adriatico ha perso mediamente quasi 200 W/m^2 , con degli episodi di raffreddamento intensissimi occorsi in Novembre (1), Dicembre (2), Gennaio (1) e Febbraio (1), in cui l'intero bacino considerato ha perduto giornalmente più di 300 W/m^2 . La perdita di calore maggiore si è avuta in corrispondenza del regime di Bora instauratosi nella settimana dal 17 al 24 novembre 2005, durante la quale, per 8 giorni consecutivi, l'intero bacino del NAd ha perduto più di 340 W/m^2 al giorno. Un picco negativo di ben -800 W/m^2 persi in una sola giornata è stato registrato in data 22 novembre, in corrispondenza di un violentissimo episodio di Bora.

Nello stesso periodo di tempo, anche il Medio Adriatico ha perso praticamente la stessa potenza per unità di superficie. Alcuni picchi negativi sono riferibili agli stessi eventi di Bora che hanno interessato il NAd, mentre altri sono peculiari del solo MAd. Complessivamente, sono registrati 6 eventi con flusso negativo giornaliero superiore a 300 W/m^2 , con tre picchi ripartiti fra Novembre (1), Dicembre (2), Gennaio (2) e Febbraio (1).

In entrambi i sottobacini sono pertanto verificate le condizioni per il flusso di calore indicate da Wang (Wang et al., 2006), che stimano in 175 W/m^2 il flusso di calore medio giornaliero che deve essere perduto dal NAd fra Novembre e Gennaio, affinché si possa produrre una massa d'acqua in grado, per quantità e densità potenziale, di pilotare una corrente di densità che possa raggiungere ed oltrepassare il Gargano.

Apporti fluviali.

Per quanto riguarda l'apporto di acque dolci del Po nel NAd, in tutte le stagioni si può verificare una portata quasi dimezzata rispetto ai 1550 m^3/s , indicato in letteratura come valore di portata media per il fiume. Dunque, per tutto il 2005 il fiume Po ha scaricato in mare una quantità relativamente bassa di acque dolci, verificando un fattore predisponente per la generazione di acque particolarmente dense nel NAd (secondo Vilibic et al., 2005; Vilibic et Orlic, 2002).

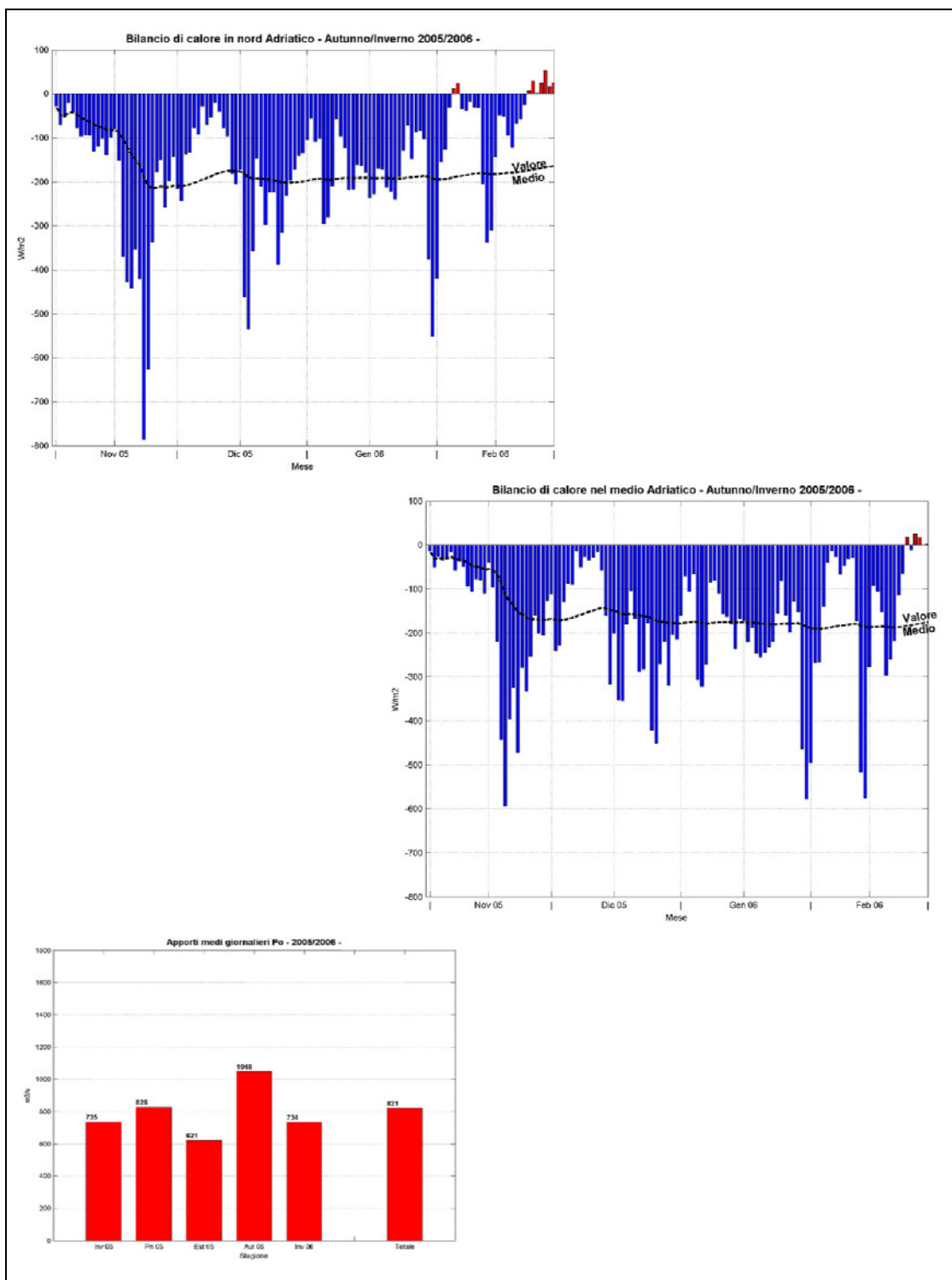


Figura 45: Flusso di calore nel MAD e NAd, apporti fluviali del Po (elaborazione da dati del modello AREG, cortesia INGV).

5 CONFRONTO CLIMATOLOGICO

5.1 DATI E PROCEDIMENTI

I dati utilizzati per il confronto climatologico provengono dal dataset del progetto MEDAR-MEDATLAS 2002. Di questi sono stati utilizzati unicamente quelli di temperatura e salinità relativi all'Adriatico e al mese di Marzo.

Essi presentano una risoluzione spaziale in latitudine e longitudine di 0.2° , corrispondenti, per la latitudine media di 42°N , ad un rettangolo di 16.2×22.2 Km.

Per il confronto è stata mantenuta la stessa classificazione geografica utilizzata per analizzare i profili CTD. Questi ultimi stati interpolati ai livelli di profondità presenti nel file climatologico. Questi livelli, essendo stati concepiti per coprire l'intero intervallo di profondità del Mediterraneo, risultano leggermente meno fitti rispetto a quelli utilizzati in questo lavoro nell'analisi dei DART06A.

Partendo dalla posizione geografica delle osservazioni reali, è stato prelevato dal file climatologico il profilo medio della colonna d'acqua, le cui coordinate medie fossero le più vicine a quelle del dato campionato durante la crociera. In seguito, per ogni profilo di T, S sia dei dati DART che climatologici, è stato calcolato il profilo di densità potenziale mediante applicazione dell'equazione di stato (Unesco,1980). Infine, si è provveduto a calcolare la media per area dei profili di T, S, Sigma-t, tenendo conto di eventuali dati mancanti: nel caso di rilevamenti molto vicini alla costa, la climatologia è risultata infatti, in qualche caso, priva di dati, a causa della risoluzione relativamente bassa.

Le figure prodotte riportano per ogni area i tre grafici di T, S, Sigma-t: i profili medi riferiti ai dati DART, con la relativa deviazione standard, sono stati riportati in colore nero; in rosso i profili medi climatologici senza dato di variabilità, a causa della loro bassa risoluzione.

Le immagini sono state raggruppate in aree costiere ("WaccN", "WaccC", "Manfre") e aree di mare aperto ("Pomo", "Channel", "Fossa").

5.2 AREE COSTIERE

L'osservazione dei profili medi climatologici per le aree costiere ha subito posto il problema della significatività del confronto per i profili relativi alle aree WaccN e WaccC: essi, infatti, non rivelano alcun segnale di stratificazione superficiale riconducibile alla WACC. Il motivo risiede nella scarsità di rilevamenti costieri presente, e nelle tecniche di mappatura utilizzate nella redazione dei datasets climatologici, che inevitabilmente smussano strutture dal segnale poco ampio.

La figura 46 evidenzia un ulteriore problema connesso alla risoluzione dei dati climatologici in queste due aree: vista la risoluzione orizzontale alla quale sono forniti, spesso le zone costiere non sono rappresentate.

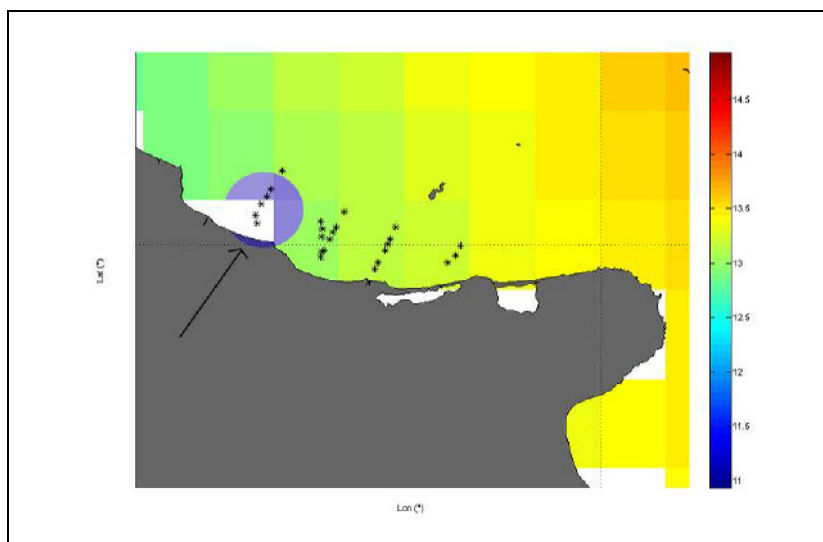


Figura 46: Area WaccN, posizioni CTD non comprese nei dati Medatlas.

Per questo motivo si è deciso di condurre una valutazione climatologica sulla sola area relativa al golfo di Manfredonia. In questa zona notiamo subito che il profilo climatologico medio di temperatura risulta sempre esterno all'intervallo di variabilità del profilo medio osservato durante la campagna DART. In particolare, i dati analizzati in questo lavoro risultano essere notevolmente più freddi (da 3°C in superficie ad 1°C a -50 m) rispetto ai valori climatologici.

La stratificazione della colonna d'acqua è presente solo nei dati DART, mentre essa non è rilevata nei dati climatologici: il segnale della WACC è pertanto rilevato nel Marzo 2006 ma non nei dati climatologici. Questi ultimi sono in accordo con quanto

descritto nel capitolo 2.2.7, dove si accenna alla normale rilevabilità stagionale del “braccio” più meridionale della WACC solo a partire dalla primavera.

Al livello più profondo, dove si intercetta il segnale delle acque dense, la salinità media dei dati DART è di circa 0.1 psu maggiore rispetto a quelli climatologici. Questa evidenza può essere un indizio di come le acque dense provenienti dal NAd-MAd siano più salate rispetto alla media sul lungo periodo.

Il profilo medio di densità potenziale osservato per il golfo di Manfredonia, rivela invece una grossa differenza con il dato climatologico, minima in superficie ($+0.05 \text{ Kg/m}^3$), massima a -75 m con $+0.25 \text{ Kg/m}^3$. La temperatura media molto più bassa dei profili osservati spiega in gran parte il divario, che si accentua ai livelli più profondi, ad evidenziare una volta di più la presenza sul fondale di acque ad alta densità, probabilmente formate da un inverno particolarmente rigido.

AREE COSTIERE

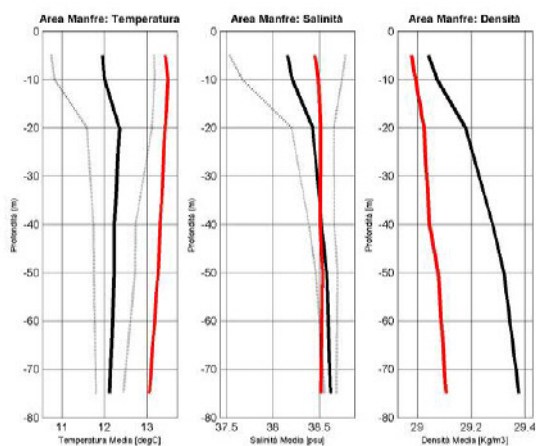
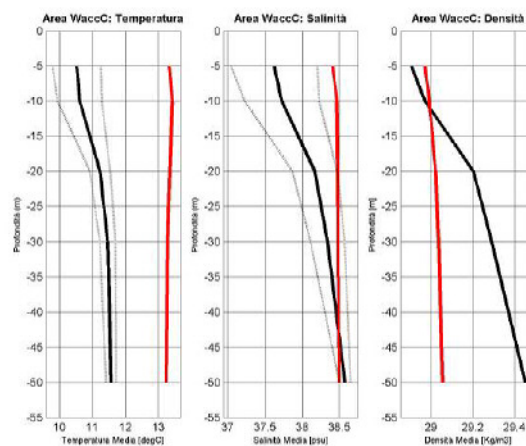
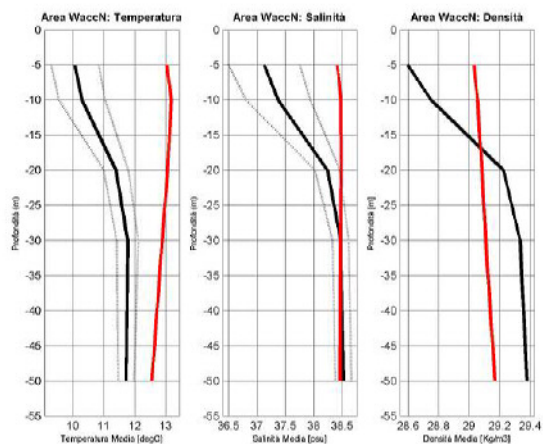


Figura 47: Confronto climatologico dei profili medi di T, S, Sigma-t relativi alle aree costiere (rosso: climatologia; nero: dati DART).

5.3 AREE DI MARE APERTO

I profili relativi alle tre aree di mare aperto (“Pomo”, “Channel”, “Fossa”) sono riportati in figura 48.

5.3.1 Area “Pomo”

Il profilo climatologico di temperatura risulta sempre più caldo rispetto a quello osservato. Negli strati superficiali esso presenta un debole segnale dovuto a processi di riscaldamento stagionale, che non viene riscontrato nei dati osservativi, i quali si mantengono pressoché costanti fino ai -120 m, a segnalare che in quest’area e nel periodo campionato, il riscaldamento primaverile non è ancora iniziato.

Oltre questa profondità, ove si registra la presenza delle MAdDW, si riscontrano le maggiori differenze; in particolare, il profilo climatologico presenta un picco di temperatura a -150 m. L’osservazione del relativo profilo di densità denota però una lieve diminuzione del valore proprio in corrispondenza di questo livello, fatto che rende il profilo moderatamente instabile. E’ pertanto ragionevole considerare questo dato non significativo.

Ad ogni modo, la differenza di temperatura nel volume d’acqua comprendente le MAdDW è significativa (circa 0.7°C) e riferibile principalmente alla variabilità interannuale nel raffreddamento del MAd e alla produzione di acque dense.

La differenza fra i due profili di salinità è invece estremamente importante: dalla superficie ai livelli più profondi, la differenza oscilla fra 0.2 e 0.17 psu. I due profili presentano la medesima forma, se si eccettua in quello climatologico la presenza di un minimo più marcato nei primi 20 metri d’acqua.

L’aspetto più significativo è la differenza di salinità media oltre i -125 m, nelle masse d’acqua più profonde riferibili alle MAdDW, che si acuisce procedendo verso il fondo, ed è indizio di maggiore salinità, rispetto alla climatologia, nelle zone di “produzione” delle acque dense. Questo può essere spiegato in due modi:

- una formazione locale nel MAd di acque dense che presentano una salinità più elevata rispetto a quelle climatologiche, dovuta ad ingresso di LIW di salinità anomala per l’effetto remoto dell’EMT;
- una formazione di NAdDW molto dense e a salinità più alta, che hanno riempito la depressione di Pomo.

La salinità di queste ultime potrebbe essere spiegata in parte con i bassissimi apporti di acque dolci da parte del Po in tutto l'anno precedente al campionamento.

La differenza nei profili di densità riflette le differenze riscontrate in quelli di temperatura e salinità. Tutto il profilo osservato risulta da 0.15 a 0.25 Kg/m³ più denso, con due massimi riscontrati rispettivamente alla superficie e sul fondo, ed un valore medio segnalato a circa metà del profilo.

I due massimi sono certamente dovuti in gran parte al marcato raffreddamento superficiale occorso in NAd e MAd durante l'inverno 2005-2006, che si è protratto fino al periodo di campionamento: i dati relativi al flusso di calore per il NAd ed il MAd riportati nell'analisi dei dati osservativi confermano questa ipotesi.

5.3.2 Area Channel

Per il confronto climatologico sono stati utilizzati unicamente i CTD relativi al transetto "Channel", limitatamente alla profondità di -150 metri, che era la massima disponibile nei dati MEDATLAS.

L'analisi dei profili medi di temperatura rivela un'ottima sovrapposizione fra i dati osservativi e quelli climatologici nei primi 120 m della colonna d'acqua, indizio che nella zona i processi di raffreddamento superficiali sono stati simili a quelli "medi". Oltre questo livello la differenza in temperatura cresce velocemente, e porta a concludere che il dato rilevato in crociera relativo alle acque dense è mediamente più freddo di 0.4°C. Questo è in linea con quanto verificato nell'area della depressione di Pomo trattata in precedenza, e riferibile agli stessi processi.

Il profilo medio di salinità campionato rivela anche per questa zona una notevole differenza rispetto ai dati climatologici: esso risulta 0.22 psu più salato alla superficie e 0.12 psu sul fondale. Come per l'area "Pomo", le acque dense più salate si spiegano con gli scarsi apporti fluviali, mentre le acque intermedie e superficiali sono indizi di un evidente aumento della salinità media del bacino.

La differenza nei profili di densità è controllata essenzialmente dalla differenza di salinità fino a -120 m, mentre il volume d'acqua delle MAdDW, risente della bassa temperatura alla quale si sono formate. Quest'ultima differenza relativa alle acque profonde, trova anche in questo caso una spiegazione nella normale variabilità interannuale di produzione delle acque dense.

5.3.3 Area “Fossa”

Tutto il profilo medio di temperatura osservato appare più caldo rispetto alla climatologia. Dalla superficie fino ai -250 m le differenze non sono particolarmente significative, con il dato climatologico che ricade entro la “forbice” di variabilità di quello osservato, pur denotando deboli stratificazioni superficiali, dovuti probabilmente al riscaldamento primaverile dei primi strati. Un massimo locale di temperatura a -200 m è invece riferibile, probabilmente, al segnale delle LIW. Entrambe queste “strutture” non sono rilevate dai dati DART, che presentano solo un lievissimo e lineare incremento di temperatura, con massimo attorno ai -500 m.

Sotto ai -200 m, invece, la differenza media fra i due profili cresce, con quello climatologico che presenta valori medi più freddi di quello osservato. A partire dai -500 m, la differenza di temperatura si assesta attorno ad un valore costante, con i dati osservativi più caldi di quelli climatologici di mediamente 0.2°C . Questa differenza in temperatura coinvolge masse d’acqua profonde; ciò può essere pertanto considerato un valido indizio di un processo di riscaldamento in corso nel SAd da un periodo sufficientemente lungo da avere interessato le acque profonde.

Come già osservato nelle altre due aree di mare aperto, l’intero profilo medio di salinità osservato risulta marcatamente più salato di quello climatologico. La differenza più evidente occorre nei primi 200 m: qui il profilo climatologico presenta un dato superficiale di 38.5 psu contro quasi 38.8 psu di quello medio osservato. Ai -200 m, la differenza di salinità media scende a 0.13 psu per poi crescere ancora fino a circa 0.17 psu raggiunti a -1000 m.

Il segnale delle LIW è abbastanza evidente nella “pancia” del profilo climatologico che registra un massimo attorno ai -200, -300 m. Nel profilo medio osservato tale segnale non è ben evidente: si potrebbe intuire un massimo di salinità e temperatura fra -400 e -500 m riferibile alle LIW. Se verificato, questo porterebbe a concludere che le LIW in ingresso siano mediamente più salate e più dense rispetto a quelle attese, conclusioni compatibili con le variazioni avvenute a seguito del EMT nelle proprietà delle masse d’acqua intermedie del bacino levantino. Si potrebbe anche supporre che il continuo ingresso di quantità elevate di LIW, più calde e salate della climatologia, abbia portato, durante gli ultimi anni, ad un “riempimento” del bacino,

rendendo pertanto più difficile l'individuazione di queste masse d'acqua, visto il grado di omogeneità raggiunta.

Come per il dato medio di temperatura, anche quello di salinità riporta differenze marcate in tutta la colonna d'acqua, indizio di processi di salificazione in atto da parecchi anni nell'intero bacino.

La differenza fra i profili medi di densità è controllata principalmente dall'incremento di salinità, che compensa anche una maggiore temperatura osservata nelle acque più profonde. Come risultato, tutto il profilo profondo della colonna d'acqua nella depressione del SAd risulta mediamente più denso di circa 0.07 Kg/m^3 , mentre alla superficie la differenza diviene superiore a 0.2 Kg/m^3 . Quest'ultimo dato racchiude in sé la possibilità che anche nel centro del SAd sia avvenuta la produzione di acque profonde, per processi convettivi innescati dal raffreddamento superficiale invernale.

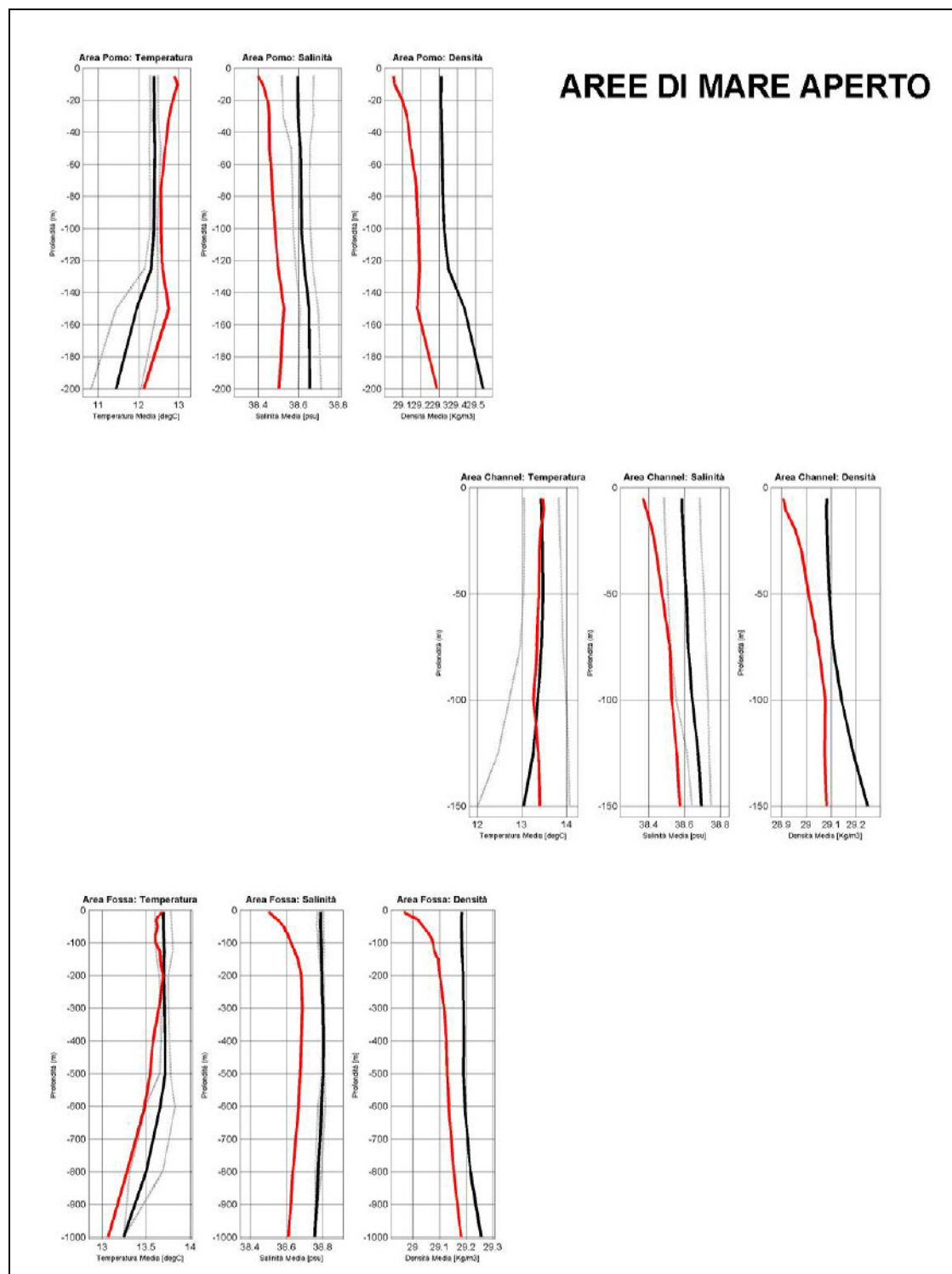


Figura 48: Confronto climatologico dei profili medi di T, S, Sigma-t relativi alle aree di mare aperto (rosso: climatologia; nero: dati DART).

5.4 CONCLUSIONI

Il confronto climatologico per le aree costiere risulta di difficile attuazione a causa della bassa significatività dei dati climatologici, imputabile sia alla difficile reperibilità di campioni in queste fasce marine, che alle tecniche di mappatura utilizzate. Nel nostro caso l'unica area costiera che è stato possibile indagare è risultata essere quella relativa al golfo di Manfredonia. In essa si rilevano unicamente acque superficiali più fredde, riferibili alla normale variabilità di piccola scala della WACC. Nello specifico, si può ritenere che l'evidenza di un inverno particolarmente freddo nel NAd (si veda la figura 45), il cui ultimo episodio importante di perdita di calore alla superficie risale proprio agli ultimi giorni di febbraio 2006, spieghi la bassa temperatura riscontrata.

Estremamente interessante è risultato invece il confronto climatologico per le aree di mare aperto. Anche nella temperatura e nella densità potenziale delle acque dense provenienti dal NAd-MAd e di quelle superficiali nel MAd, è presente il segnale di un inverno particolarmente rigido occorso nella parte centrale e settentrionale del bacino. Per questo motivo è ragionevole pensare che la maggiore densità e la minore temperatura di queste acque possano essere ricondotte ai normali cicli interannuali.

Non si può dire la stessa cosa dopo aver valutato il dato di salinità delle acque. Esso risulta sempre e comunque superiore alla climatologia, sia nelle acque di superficie che in quelle profonde. Rispetto alla temperatura, che presenta una fluttuazione stagionale importante, la salinità è una proprietà maggiormente invariante, soprattutto nei livelli più profondi, dove l'inerzia delle masse d'acqua a qualsiasi cambiamento è maggiore. Nelle acque più profonde delle tre aree considerate (oltre - 100 m), si registra invece un aumento di salinità medio che oscilla fra 0.12 e 0.17 psu, con una differenza massima presente sia nelle acque dense della depressione di Pomo che nella depressione del SAd, ed una minima in corrispondenza della sella di Pelagosa.

Questo è un vero indizio di cambiamento nella climatologia dell'Adriatico, che alla luce di questo dato andrebbe rivisitata, prendendo a riferimento datasets più recenti.

La letteratura riferisce di tre principali fattori “forzanti” dell’aumento della salinità nell’est del Mediterraneo, bacino da cui provengono le acque levantine intermedie che apportano calore e sale all’Adriatico:

- l’edificazione della diga di Assuan, con canalizzazione delle acque del Nilo, che fin dalla fine degli anni ’60 apporta basse quantità di acque dolci;
- l’avvento dell’EMT, che ha portato alla formazione di acque levantine più salate e più dense;
- il graduale processo di riscaldamento atmosferico globale dell’area del Mediterraneo, a causa del quale il tasso di evaporazione delle sue acque è aumentato.

La nostra indagine suggerisce anche un ulteriore fattore interno all’Adriatico, collegato in ogni caso con l’osservata maggiore persistenza temporale di aree di alta pressione sull’Italia durante gli ultimi anni: il bassissimo apporto di acque dolci da parte del Po, dovuto alla scarsità di precipitazioni nel suo bacino di drenaggio. È inoltre ragionevole pensare di poter estendere questo tipo di comportamento a tutti i sistemi fluviali presenti nel NAd, con la conseguenza di una minore diluizione delle acque del mare.

I dati in nostro possesso (vedi figura 45) si riferiscono solo al periodo Gennaio 2005-Febbraio 2006, tuttavia è esperienza comune che anche nell’ultimo anno il livello di precipitazioni medio nel nord Italia sia stato piuttosto basso. Inoltre è ancora un ricordo recente quello della torrida estate del 2003.

Un ultimo segnale importante di cambiamento climatico nelle acque dell’Adriatico è presente nella temperatura media degli strati profondi di acqua della depressione del SAd, dove il calore è apportato principalmente dall’avvezione di LIW. L’aumento medio di circa 0.2°C qui riscontrato trova spiegazione nel maggior calore fornito dalle LIW rispetto al passato, dovuto all’EMT.

6 FONTI UTILIZZATE

6.1 DATI

I CTD utilizzati per le elaborazioni sono forniti per gentile concessione del NURC-NATO, e sono stati raccolti durante la campagna oceanografica DART06A, dal 28/2/2006 al 28/3/2006.

I dati climatologici utilizzati sono ottenuti dal database MEDATLAS/2002, realizzati dal gruppo MEDAR, 2002. Essi rappresentano la collezione più completa attualmente disponibile per il Mediterraneo ed il Mar Nero per i parametri di Temperatura, Salinità, Ossigeno disciolto, nitrati, nitriti ed altri parametri biochimici. Il database proviene dai CD in possesso del laboratorio Sincem di Ravenna. Per il confronto sono stati utilizzati i dati climatologici del mese di marzo.

Sia i dati idrografici del fiume Po che quelli relativi al flusso di calore e alla salinità media nel NAd e MAd, sono stati gentilmente forniti dal Dr. Paolo Oddo, INGV; i primi si riferiscono ai rilevamenti idrografici effettuati giornalmente dall'Autorità di Bacino del Po a Pontelagoscuro (FE), mentre i secondi sono calcolati all'interno del modello AREG, che si avvale dei dati di ventosità forniti da ECMWF.

6.2 ILLUSTRAZIONI

Ove non altrimenti specificato, i grafici e le immagini utilizzate in questa tesi sono opera dell'autore. Esse possono essere utilizzate in altri lavori se accompagnate da evidente citazione della fonte. I grafici e le simulazioni sono state prodotte mediante scripts Matlab^(R) a partire dai dati menzionati nel paragrafo precedente.

6.3 BIBLIOGRAFIA

- Artegiani A., Bregant D., Paschini E., Pinardi N., Raicich F. and Russo A. (1997a). "The Adriatic Sea general circulation. Part I: air sea interactions and water mass structure." *Journal of Physical Oceanography* 27: 1492-1514.
- Artegiani A., Bregant D., Paschini E., Pinardi N., Raicich F. and Russo A. (1997b). "The Adriatic Sea general circulation. Part II: baroclinic circulation structure." *Journal of Physical Oceanography* 27: 1515-1532.
- Cushman-Roisin B., Gacic M., Poulain P.M. and Artegiani A. (2001). "Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future". Ed. Kluwer Academic Publishers.
- Demirov E., Pinardi N. (2002). "Simulation of the Mediterranean Sea circulation from 1979 to 1993: Part 1 The interannual variability". *Journal of Marine Systems* (2002) 33: 23-50.
- Klein B., Roether W. et. al (1998). "The large deep water transient in the Eastern Mediterranean". *Deep-Sea Research I* 46 (1999) 371-414.
- Malanotte-Rizzoli P. et. al (1999). "The Eastern Mediterranean in the 80s and in the 90s: the big transition in the intermediate and deep circulations". *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 29 (1999) 365-395.
- Manca B.B. et al. (2002). "Dense water formation in the Southern Adriatic Sea and spreading into the Ionian Sea in the period 1997–1999". *Journal of Marine Systems* 33-34 (2002): 133-154.
- Marini M. et al. (2006). "Short-term physical and chemical variations in the bottom water of middle Adriatic depressions". *Climate Research* 31:227-237.
- Meteorological Office (1962). "Weather in the Mediterranean" Vol 1. Air Ministry, British Meteorological Office. HMSO: London.
- Raicich F. (1994). "Note on flow rates of the Adriatic rivers". Istituto Talassografico Sperimentale Trieste, Technical Report, RF02/94, pp. 8, 1994.
- Raicich F. (1996). "On the fresh water balance of the Adriatic Sea". *Journal of Marine Systems* 9, 305–319, 1996.

- Robinson et al. (1991). "The Eastern Mediterranean general circulation: Features, structure and variability". *Dyn. Atmos. Oceans*, 15, 215–240.
- Skirlis N., Laskaratos A. (2004). "Impacts of the Nile River damming on the thermohaline circulation and water mass characteristics of the Mediterranean Sea". *Journal of Marine Systems* 52 (2002) 121-143.
- Theocharis A., Klein B., Nittis K., Roether W. (2001). "Evolution and status of the Eastern Mediterranean Transient (1997-1999)". *Journal of Marine Systems* 33-34(2002) 91-116.
- Trincardi F., Correggiari A., (2000). "Quaternary forced-regression deposits in the Adriatic basin and the record of composite sea-level cycles". In: Hunt, D., Gawthorpe, R. (Eds.), *Depositional Response to Forced Regression*. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 172, 245–269.
- Trincardi F., Asioli, A., Cattaneo, A., Correggiari, A., Langone, L., (1996). "Stratigraphy of the late-Quaternary deposits in the Central Adriatic basin and the record of short-term climatic events". In: Guilizzoni, P., Oldfield, F.L. (Eds.), *Palaeoenvironmental Analysis of Italian Crater Lake and Adriatic Sediments (PALICLAS project)*. *Mem. Istit. It. Idrob.* 55, 39–64.
- Vilibic I., Orlic M. (2002). "Adriatic water masses, their rates of formation and transport through the Otranto Strait". *Deep-Sea Research I* 49 (2002) 1321-1340.
- Vilibic I., Grbec B., Supic N. (2004). "Dense water generation in the north Adriatic in 1999 and its recirculation along the Jabuka Pit". *Deep Sea Research Part 1: Oceanographic Research Papers*. Vol 51, 1457-1474.
- Vilibic I., Supic N. (2005). "Dense Water generation on a shelf: the case of the Adriatic Sea". *Ocean Dynamics* (2005) 55: 403-415.
- Zavatarelli M., Pinardi N. et al. (2002). "Diagnostic and prognostic model studies of the Adriatic Sea general circulation: Seasonal variability". *Journal of Physical Research* Vol. 107, NO C1, 10.1029/2000JC000210, 2002.
- Zavatarelli M. and Pinardi N. (2002). "The Adriatic Sea modelling system: a nested approach". *Annales Geophysicae* (2003) 21: 345–364.
- Zore-Armanda, M. (1991). "Natural characteristics and climatic changes of the Adriatic sea". *Acta Adriatica* 32: 567–586.

7 RINGRAZIAMENTI

7.1 DUE PAROLE

Questa tesi triennale parte da lontano, da un giorno di novembre 2005 in cui, affascinato dagli argomenti di oceanografia trattati a lezione, ho sentito il bisogno di poter “toccare con mano” questa meravigliosa materia e ho “osato” chiedere alla docente se non fosse possibile prendere parte a qualche rilievo oceanografico e vedere “dal vivo” cosa si facesse di concreto per comprendere il mare. Detto e fatto: nel giro di poco tempo la docente mi aveva procurato nientemeno che la possibilità di salire a bordo della nave oceanografica NATO “Alliance”. Dovevo decidere subito e invero ero molto agitato e mi sentivo assai inadeguato rispetto a questa opportunità. Alla fine ho deciso per il sì, e l’esperienza è stata davvero unica per me, che provenendo da Bolzano, poche volte avevo potuto vivere il mare da sopra il mare.

Questo è stato il momento più “alto” di un percorso fortunato iniziato quasi “in sordina” e senza pretese, nell’estate del 2003, quando ho sentito la voglia di tornare sui libri, a 32 anni, e di ricominciare da capo l’avventura universitaria, che più di dieci anni prima non si era potuta compiere.

Nel giro di pochi mesi questa decisione ha completamente cambiato la mia vita, portandomi in un processo in cui ho sempre avvertito una forte motivazione, forse mai sperimentata prima, tale da farmi affrontare e superare numerose difficoltà; prima fra tutte quella della distanza fra Bolzano e Ravenna, poi quella economica derivante dalla decisione di interrompere il lavoro per poter avere il tempo necessario per lo studio, in funzione di una nuova prospettiva lavorativa futura in campo ambientale.

Sono stato fortunato ad avere questa opportunità e a poterla portare avanti, ed è giusto che sfrutti questa opportunità per ringraziare apertamente della fortuna avuta. Fortuna di avere avuto dei genitori che mi hanno sostenuto e approvato, dei docenti, dei compagni di studio e degli amici che mi hanno accolto ed aiutato, di avere ancora le capacità per confrontarmi con lo studio, a distanza di tanti anni.

Ora è arrivato il momento della conclusione di questo percorso, e non nascondo che mi tremano un po’ i polsi: forse proseguirò con la laurea specialistica, anche se adesso ho bisogno di tirare un po’ il fiato e di lavorare; o forse mi fermerò qui, dove ho

sempre voluto porre “mentalmente” il mio obiettivo, perché benché fosse difficile e lontano nel tempo, rimanesse realizzabile.

7.2 GRAZIE!

È davvero difficile mettersi ad un tavolo e fare un elenco di tutte le persone che mi hanno aiutato in questo mio percorso; si rischia sempre di commettere qualche dimenticanza assolutamente non voluta.

Il mio primo ringraziamento va ai miei genitori, che mi sono stati vicino fin dal primo momento in questa mia scelta, e che mi hanno aiutato economicamente in questi miei anni, nonostante non siano economicamente definibili come “abbienti”. Grazie per tutti i loro sacrifici, sono felice di avercela fatta e di aver portato loro un po’ di soddisfazione. Un grande grazie va anche ai miei nonni, a quelli che ancora ci sono e possono gioire con me, ma anche a quelli che invece non ci sono più. Perché so che sono arrivato fino a qui anche grazie a loro. Dedico loro questo mio successo, perché so quanto ci avrebbero tenuto, anzi, so quanto ci tengono.

Grazie a Roberta, che mi ha “sopportato” ed incoraggiato, e so che nessuna delle due cose è facile con me. Grazie anche ai miei amici, a quelli che ci hanno creduto e mi hanno fatto sempre sentire il loro appoggio.

Un grazie speciale va ad Alfredo, per tutto il tempo passato insieme. Ti sono riconoscente.

A Ravenna ho trovato un ambiente che mi ha accolto, e che mi ha permesso di studiare. Ringrazio il prof. Dinelli, per l’incoraggiamento ad iniziare quando mi sono presentato per la prima volta a Ravenna, agli ex-asili, chiedendo se uno studente lavoratore avrebbe avuto una qualche possibilità di farcela.

Grazie ad Alessandro e a Daniela, che mi hanno prestato per ben 9 mesi la loro casa al mare, facendo in modo che io potessi frequentare tutto il terzo anno. Grazie a tutti i miei compagni di corso, che mi hanno fatto sentire uno di loro, nonostante la differenza anagrafica, che mi hanno passato appunti, dato preziosi consigli, e con cui ho potuto sempre confrontarmi e anche sfogarmi, e con cui sono felice di avere un bel rapporto, che spero continui nel tempo.

Questa tesi non avrebbe avuto inizio se non fosse per l’interesse della Prof. Pinardi, che mi ha portato come relatrice alla prova finale e che mi ha permesso di salire su una nave oceanografica NATO, il che, per uno che vive a Bolzano, è un bel

“colpaccio” davvero. Forse avevo osato pensare che fosse possibile solo nei miei sogni più irreali.

Grazie a Paolo Oddo, che mi ha accompagnato sia sulla “Alliance”, che in questa mia tesi, con pazienza, insegnamenti e competenza, in qualità di co-relatore. Ringrazio tutti i ragazzi del laboratorio Sincem di Ravenna, per il grande aiuto e gli stimoli avuti. Spero che i vostri progetti di vita si possano realizzare.

Grazie naturalmente a tutto lo staff NURC che ho incontrato sulla nave “Alliance”, che mi ha accolto anche se ero davvero un “pesce” fuor d’acqua in mezzo a tutti quegli scienziati. Non credo che mai leggerà questo mio lavoro, ma un grazie va a Michel Rixen e a tutto il suo gruppo!

Ero indeciso, ma alla fine perché non togliermi qualche sassolino ringraziando anche coloro che nel mio precedente lavoro da bancario hanno fatto di tutto per ostacolarmi in questa mia scelta e cercato di farmi recedere, portandomi così alla scelta estrema e sofferta del licenziamento, per salvaguardare la mia passione? Grazie. Senza di voi forse non avrei mai avuto il coraggio di fare quello che ho fatto: ricominciare da capo, senza nessuna certezza.

Ravenna, 29 Marzo 2007