ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di laurea in SCIENZE AMBIENTALI

ANALISI DELLA VARIABILITA' DELLA CIRCOLAZIONE DEL MAR MEDITERRANEO

Tesi di laurea in OCEANOGRAFIA E METEOROLOGIA

Relatore
Prof. Nadia Pinardi

Presentata da
Mario Laghi

(III sessione)

Anno Accademico 2002 - 2003

1. Introduzione

Lo studio della circolazione marina, così come quello delle discipline che studiano fenomeni naturali, ha subito un forte impulso negli ultimi 20 anni. Lo sviluppo di computer con capacità di calcolo sempre maggiori, ha permesso la creazione di modelli numerici che fossero in grado di riprodurre, il più fedelmente possibile, i processi che avvengono in natura. L'oceanografia ha beneficiato di tali tecnologie fino a produrre modelli fisici capaci di acquisire dati reali, elaborarli e restituirli sotto forma di una fotografia globale del bacino in esame molto vicina alla realtà.

L' utilizzo di tali strumenti, assieme allo sviluppo di tutti i sistemi d'acquisizione di dati oceanografici (dati satellitari, sonde "lagrangiane", ecc.), ha permesso di acquisire, in certi casi approfondire ed in altri correggere le nostre conoscenze riguardo alla struttura della circolazione.

Il Mar Mediterraneo, in particolare, è stato oggetto di numerosi studi d'osservazione e modellistica negli ultimi 15 anni; tali studi permettono di avere oggi una moderna ricostruzione della circolazione climatologica del bacino.

1.1 Oceanografia fisica del Mediterraneo

Il Mar Mediterraneo può essere considerato un sistema oceanico parzialmente isolato (Robinson, 2001), in esso sono infatti individuabili processi identici o analoghi a quelli che avvengono in Oceano. Inoltre l'influenza mediterranea sul Nord Atlantico, in termini di scambio d'acqua, sale e calore sembra influire sulla circolazione termoalina globale del pianeta.

La circolazione termoalina generale del mediterraneo è solitamente rappresentata come l'intrecciarsi di tre correnti circolari, una zonale e due meridionali (Fig.1).

La circolazione zonale è superficiale (0-500 m) e associata all'ingresso, attraverso lo Stretto di Gibilterra delle masse d'acqua atlantiche (AW), che dopo aver attraversato, in direzione ovest-est, l'intero bacino, vengono trasformate nelle Acque Levantine Intermedie (LIW) nella zona orientale del Mediterraneo. Le LIW rappresentano il maggior contributo al flusso d'acqua uscente da Gibilterra (il resto è dovuto alle masse d'acqua profonda del Mediterraneo occidentale).

Le due circolazioni meridionali sono celle simili a quella meridionale caratteristica del Nord Atlantico, guidate dai processi di formazione d'acque profonde che avvengono nel Golfo del Leone e nel basso Adriatico.

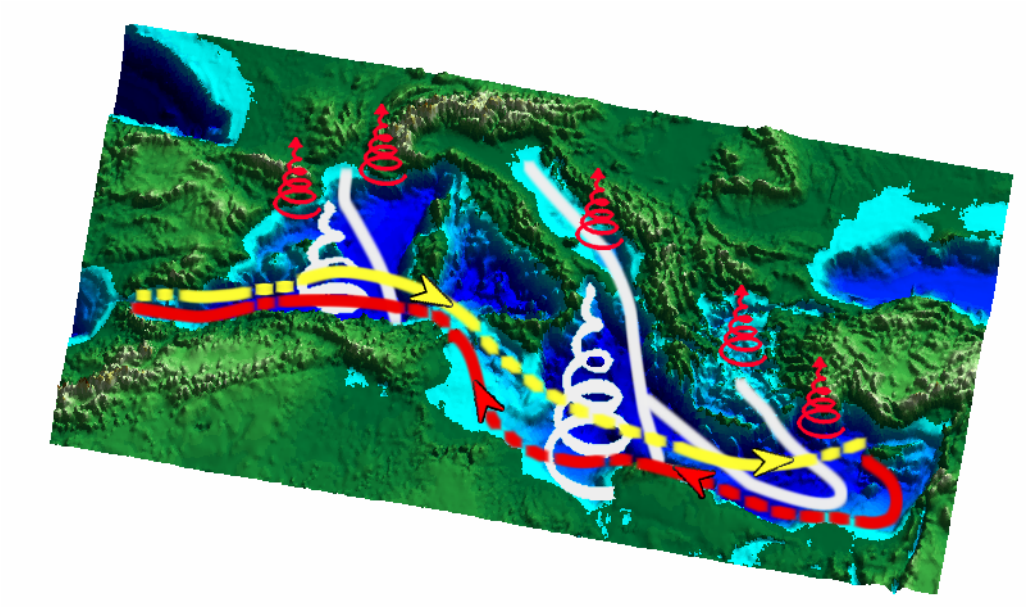


Fig.1 – Schema della circolazione termoalina

Le tre celle sono in comunicazione e la presenza delle LIW sembra essere un fattore fondamentale per i processi di

formazione d'acque profonde (Wu e Haines, 1998) che mettono in moto le circolazioni meridionali, contribuendo al bilancio salino delle nuove masse d'acqua prodotte.

Differenti sono le scale temporali che interessano queste celle. Per la circolazione zonale si tratta di una scala decadale mentre le due circolazioni meridionali impiegano circa 50-80 anni per compiere un giro completo.

La circolazione orizzontale superficiale è caratterizzata dalla presenza di giri ciclonici permanenti di grande scala nella parte settentrionale d'entrambi i sottobacini, da una corrente a getto nella parte meridionale del bacino occidentale e nel centro del bacino orientale e da giri anticiclonici di grande scala nella parte meridionale del bacino orientale (Fig.2). La componente di profondità intermedia (le LIW di ritorno verso Gibilterra), generata presso il Giro di Rodi, si disperde verso ovest diramando il suo corso in bracci diretti verso Adriatico e Golfo del Leone, luoghi di formazione d'acque profonde.

1a Liguro-Provencal-Catalan current (LPC)
1b Gulf of Lyon Gyre
2 Northward Tyrrhenian current and gyres:
2a Northward current and Southern Tyrrhenian Gyres
2b Northern Tyrrhenian Gyre
3 Gibraltar-Atlantic current system
3a Alboran basin Gyres and meanders
3b Algerian current gyres, eddies and meanders
3c Tyrrhenian bifurcation/current
3d Atlantic-Ionian Stream
3e Tunisian shelf current
3f Mid-Mediterranean Jet
3g Southern Levantine current
4 Rhodes Gyres
5 Western Cretan cyclone
6 Western Ionian cyclonic Gyre
7 Syrte Gyre
8 Anticyclonic system of the South-eastern Levantine basin
8a Mersa-Matruh Gyre system
8b Shikmona Gyre system
9 Asia Minor current
10 Iera-Petra Gyre
11 Pelops Gyre
12 Southern Adriatic cyclonic Gyre
13 Western Adriatic Coastal Current
14 Western Ionian anticyclonic Gyre

Fig.2 – Schema della circolazione orizzontale superficiale

Questo schema di una circolazione termoalina che può definirsi all'incirca costante, va completato riducendo la scala spaziale di riferimento. Passando dunque ad un'analisi di sotto bacino o ad una analisi di mesoscala, emergono numerose strutture la cui scala temporale d'azione si riduce e la cui presenza o assenza è fortemente legata al forzante atmosferico.

La forte variabilità stagionale riscontrata in Mediterraneo, che comporta variazione nei processi di formazione d'acque profonde (Hecht et al., 1998), inversione stagionale di numerosi 'vortici a scala di sottobacino o giri' in diverse zone del bacino (Tziperman e Malanotte-Rizzoli, 1991), indebolimento o intensificazione dei flussi di mesoscala (Ayoub et al., 1998), è dimostrato essere in stretta relazione con le oscillazioni stagionali dei campi climatici, in termini di venti dominanti e bilanci termici alla superficie aria-mare (Pinardi e Navarra, 1993; Pinardi et al., 1997).

1.2 Modello e dati in esame

I dati su cui si è basato lo studio sono quelli prodotti e collezionati nell'ambito del programma MFS (Mediterranean Forecasting System) condotto in Italia presso Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Il sistema, basato su un modello numerico oceanografico denominato MOM (Modular Oceanic Model), acquisisce un data-set composto di dati satellitari di temperatura superficiale (SST), anomalia del livello della superficie (SLA), dati di temperatura misurati tramite boe fisse, XBT, profilanti sottosuperficiali e dati climatici (ECMWF) e li interpola attraverso un elevato numero di equazioni fondamentali

ricavando i parametri necessari per la descrizione dei processi fisici delle masse d'acqua.

In seguito ad una serie di precise elaborazioni statistiche il modello è capace di produrre, a partire dai dati immessi, una matrice di variabili di stato del sistema rappresentante lo stato idrodinamico del Mediterraneo e una sua evoluzione per i 10 giorni successivi (Fig.3).

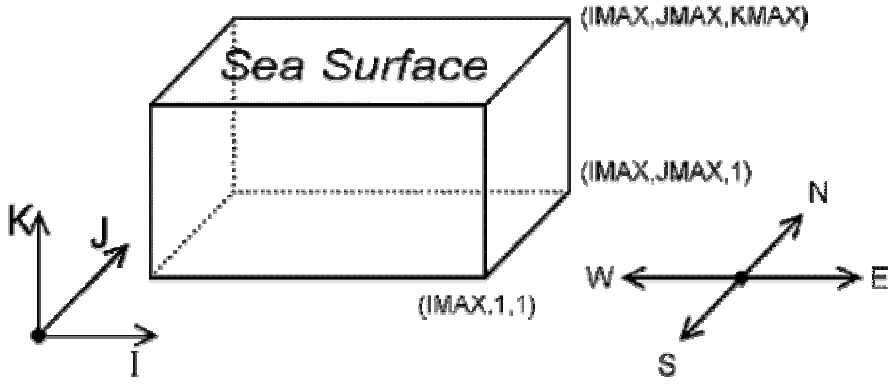


Fig.3 – Rappresentazione del formato dei dati in uscita

La matrice in esame divide il bacino in 113 punti di latitudine, 363 di longitudine e 31 di profondità. L'elaborazione realizza una previsione dell'andamento dei parametri (temperatura, salinità, velocità) nei 10 giorni successivi. Ogni ciclo di routine del modello genera un file di previsione (i 10 giorni successivi) e uno di storia (i 7 giorni precedenti) ovvero la previsione precedente corretta e implementata dalla successiva assimilazione dei dati (Fig. 4). Ciascuno dei file contiene per ciascun punto griglia l' evoluzione temporale di tutti i parametri esaminati.

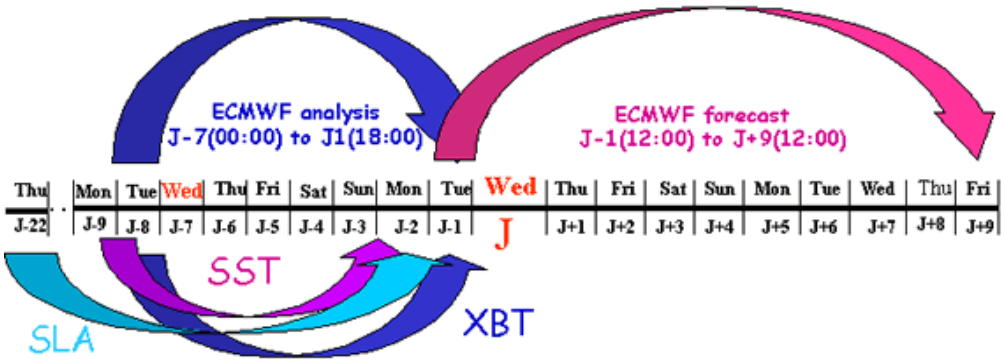


Fig.4 – Schema del processo d'assimilazione dati

In particolare il mio lavoro si è concentrato sui dati di hindcast collezionati nel periodo 1/1/2000 – 31/12/2003 analizzandone i parametri di temperatura e velocità totale.

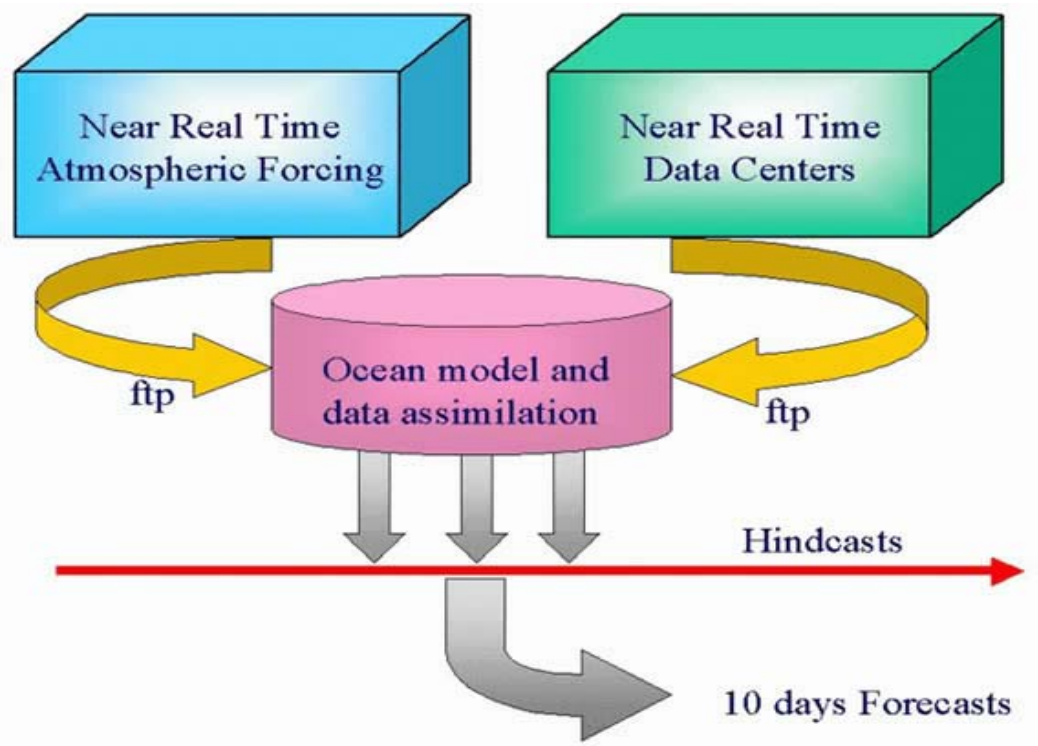


Fig.5 – Diagramma del funzionamento del modello SOFA-MOM

2. Campi climatologici

La prima fase del lavoro è consistita nel ricavare una climatologia relativa al periodo studiato (2000-2003), attraverso la quale creare mappe di temperatura e velocità mediate sul periodo di un

mese. Queste rappresentazioni delle medie di ciascuno dei dodici mesi mi hanno permesso di individuare le principali strutture di circolazione e allo stesso tempo di avere una raffigurazione della loro variabilità temporale, quella che viene definita variabilità stagionale. Allo stesso modo, la notevole risoluzione del modello (1/8 di grado) permette di notare la forte instabilità delle circolazioni di mesoscala, con continue scomparse, apparizioni e traslazioni.

L'attenzione è stata puntata sui mesi di febbraio e agosto, considerati ottimi rivelatori delle principali caratteristiche del bacino nei periodi invernale ed estivo rispettivamente.

Si è scelto, inoltre, di considerare solo lo strato più alto della colonna d'acqua (0–200m) essendo quello più fortemente influenzato dal forzante atmosferico e dunque maggiormente in grado di amplificare elementi di variabilità stagionale e inter-annuale.

Dal grafico dell'evoluzione temporale della temperatura media sull'area del bacino si deduce che l'andamento è fedele a quello previsto (Fig.6), con un massimo nel mese d'agosto e un minimo fra febbraio e marzo, per la zona superficiale.

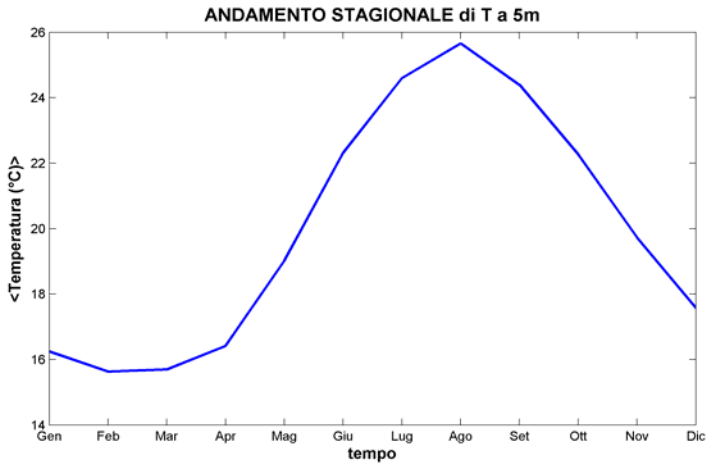


Fig.6 – Evoluzione temporale della temperatura a 5 m

Il profilo a 200m (Fig.7) mostra come, al contrario, la temperatura sia più alta nei mesi invernali, fenomeno dovuto al lento raffreddamento della massa d'acqua a queste profondità. Nel periodo estivo la colonna è stabile e il termoclino non viene rimescolato.

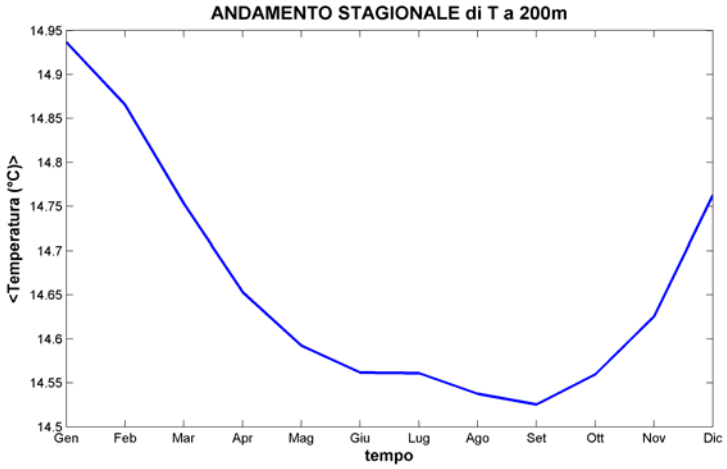


Fig.7 – Evoluzione temporale della temperatura a 200m

Come detto in precedenza, le mappe sono state analizzate al fine di individuare le strutture conosciute (Fig.8 e 9). In accordo con le previsioni (Alhammoud et al., 2002), da esse risulta evidente la tendenza all'accentuarsi, nel periodo estivo, delle strutture di mesoscala, vortici e meandri molto dinamici ed energetici. Il periodo invernale è al contrario caratterizzato da un'apparente uniformità legata alla maggior forza delle correnti a getto .

Sono comunque riconoscibili, in entrambi i periodi, alcuni dei sistemi di circolazioni più studiati.

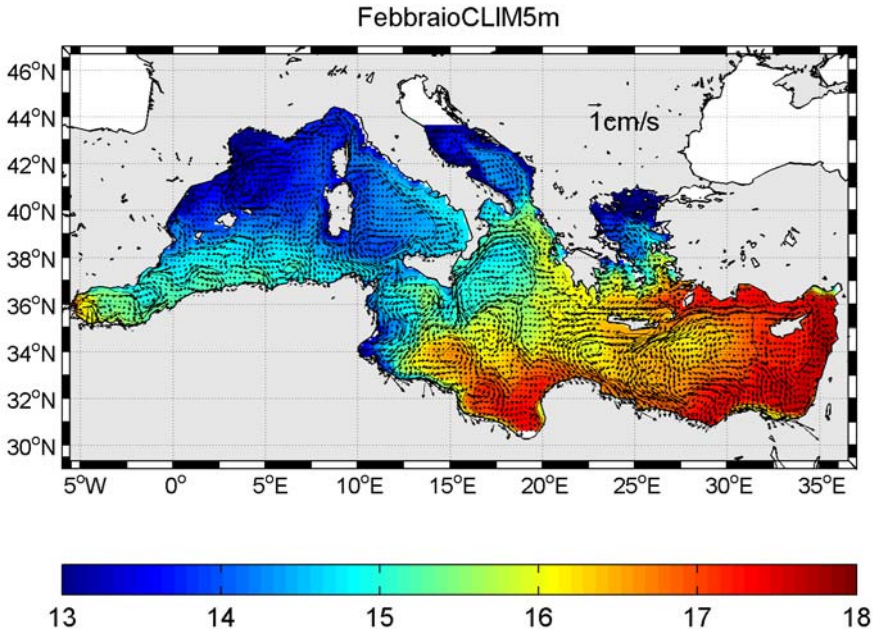


Fig.8 – Mappa di Febbraio climatologico. Profondità 5m.

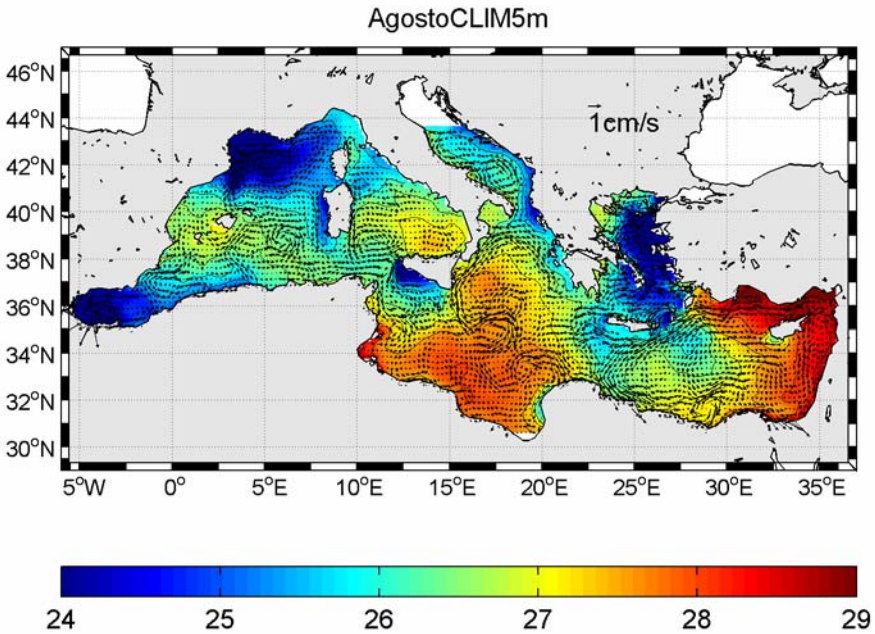


Fig. 9 - Mappa d'Agosto climatologico. Profondità 5m.

Percorrendo il bacino in direzione ovest-est s'identificano i meandri e i vortici del Mare d'Alboran e della corrente Algerina. In prossimità della Sicilia parte della corrente proveniente da Gibilterra viene deviata verso nord originando la corrente tirrenica. Al largo delle coste francesi è riconoscibile il vortice ciclonico del

Golfo del Leone; fra la penisola italiana e le coste della Sardegna è presente un sistema di giri, anch'essi ciclonici, del Tirreno.
In prossimità dello Stretto di Sicilia si nota la biforcazione del flusso atlantico, con un ramo diretto in direzione sud, parallelo alla costa tunisina e l'altro a proseguire il suo tragitto verso ovest nel centro dello Stretto. Qui si nota la formazione dei due vortici dello Ionio occidentale, uno ciclonico subito sopra la traccia della corrente a getto e uno anticiclonico subito sotto. Perfettamente riconoscibile è anche la presenza della circolazione ciclonica dell'Adriatico meridionale. Nell' estremo sud è evidente il grande giro del Golfo della Sirte.
La parte levantina del bacino è caratterizzata dalla presenza del ramo di corrente zonale che prosegue la sua corsa parallelo alle coste mediorientali, per poi risalire verso nord, successivamente ad una biforcazione in prossimità dell'isola di Cipro. Caratteristica di questo sottobacino, chiaramente individuabile nelle mappe, è la presenza dei sistemi di giri anti-ciclonici denominati Mersa-Matruh e Shikmona nella parte sud e quella delle circolazioni cicloniche di Rodi (punto di formazione delle LIW) e di Creta (ad ovest dell'isola).
Chiare tracce di variabilità stagionale sono riscontrabili nello spostamento verso nord, nel periodo estivo, del vortice di mesoscala riconosciuto come l'Anticiclone del Peloponneso e del sistema di circolazioni dello Ionio occidentale. Evidente è anche la comparsa di una zona anticiclonica nel basso Tirreno.
Interessanti sono anche le evidenze, nelle mappe d'agosto, delle lingue d'acqua fredda lungo le coste sud-occidentali di Sicilia e Isola di Cipro, originate entrambe da upwelling di acque profonde. Se nel primo caso, la causa del fenomeno è da imputarsi alla batimetria del fondale della zona, nel secondo caso sembra

trattarsi dell'azione dei venti occidentali (Alhammoud et al., 2002).

3. Anomalie

Il secondo passo è stato calcolare le anomalie di Febbraio e Agosto di ciascuno dei 4 anni rispetto alla climatologia creata. Le mappe d'anomalia risultanti sono dunque una raffigurazione di quanto i dati di temperatura di ciascun mese, siano differenti dai dati di temperatura del mese climatologico in esame.

Osservandole, si può notare come i valori assoluti d'anomalia siano quasi sempre inferiori ad 1 grado; questo significa che, in genere nei 4 anni esaminati la temperatura media dei mesi esaminati, ha subito variazioni fra esse confrontabili.

Un'importante osservazione è invece riferita al periodo estivo dell'anno 2003.

Guardando la mappa d'anomalia d'Agosto 2003 (Fig. 10), concentrandosi sulla parte più superficiale della colonna d'acqua (5m), colpisce come i dati assumono valori che vanno da –1 a +2, con una netta distinzione fra valori positivi nella parte occidentale del bacino e negativi in quella orientale.

Il risultato non è inaspettato, essendo stato il 2003 un anno particolare dal punto di vista climatico, soprattutto nel suo periodo estivo.

Sorprende piuttosto che i valori siano così elevati, considerando che, anch' essi, hanno contribuito al calcolo del valore medio attribuito al campo climatologico.

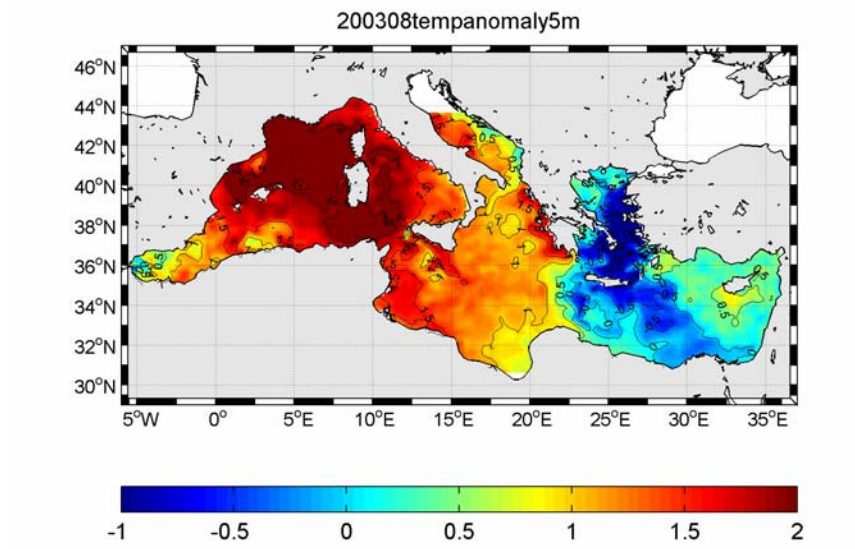


Fig.10 – Mappa dell'anomalia di temperatura di Agosto 2003. Profondità 5m.

Per visualizzare meglio questa manifesta singolarità del 2003 rispetto agli altri 3 anni esaminati, è stato creato un plot dell'evoluzione temporale dell'anomalia, in funzione del tempo, per ciascuno di essi (Fig. 11).

Si è scelto di calcolare il valore medio dell'anomalia al quadrato perché l'interesse era puntato sull'ampiezza dell'anomalia, non tanto sul suo segno.

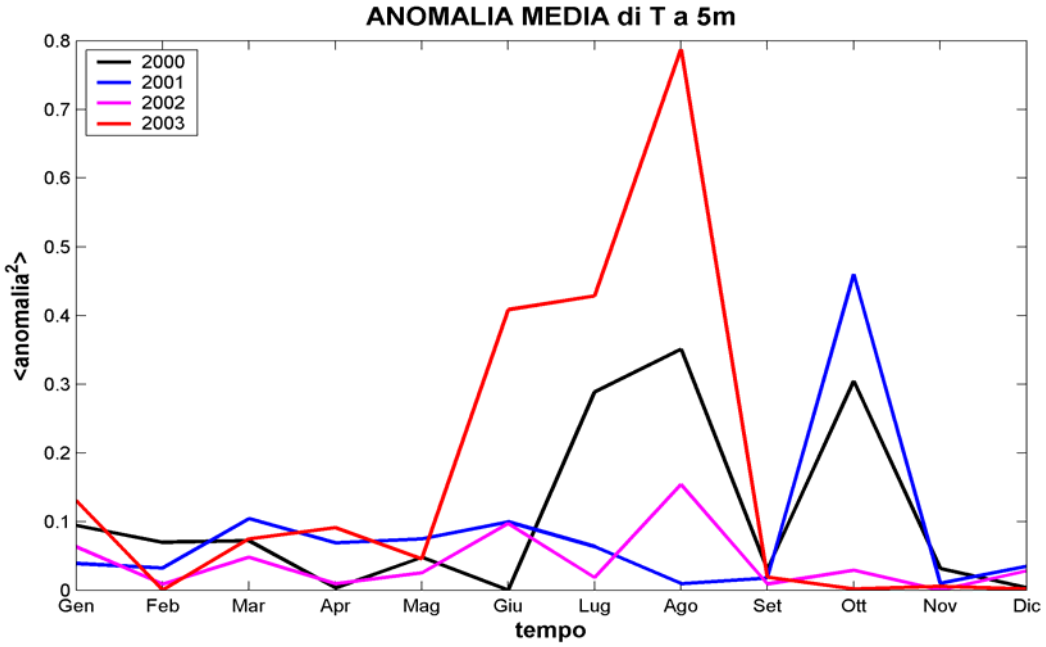


Fig. 11 – Grafico dell'evoluzione temporale dell' anomalia media del bacino

I plot a profondità maggiori (200m) dimostrano, ancora una volta, come i processi di rimescolamento invernali, portino le masse d'acqua superficiali in profondità.

4. Anno 2003

Alla luce delle considerazioni precedenti è sembrato interessante focalizzare l'attenzione sull'anno 2003. L'intento è stato quello di individuarne affinità e differenze rispetto alla climatologia creata e, successivamente, raffrontarlo ad una più lunga quale quella creata e collezionata nell'ambito del progetto MEDATLAS. Questa climatologia, annualmente aggiornata, colleziona dati oceanografici per il Mediterraneo e il Mar Nero e rappresenta il più ampio data-base disponibile.

4.1 Confronto con la climatologia 2000-2003

La prima fase ha permesso di individuare segnali di variabilità inter-annuale, manifestati da cambiamenti di posizione, intensità e a volte scomparse e riapparizioni delle strutture precedentemente citate.

Un'analisi delle mappe relative allo stesso anno permette inoltre di valutare la variabilità stagionale.

Focalizzando l'attenzione, ancora una volta, sui mesi di febbraio (Fig. 12) e agosto (Fig. 13) si nota come, nel mese invernale il campo di temperatura non presenti differenze significative rispetto alla climatologia. Il campo delle velocità, al contrario, risulta variare.

L'intensificazione invernale delle correnti a getto risulta molo più evidente rispetto al riferimento. Molte delle strutture sembrano essere più energetiche.

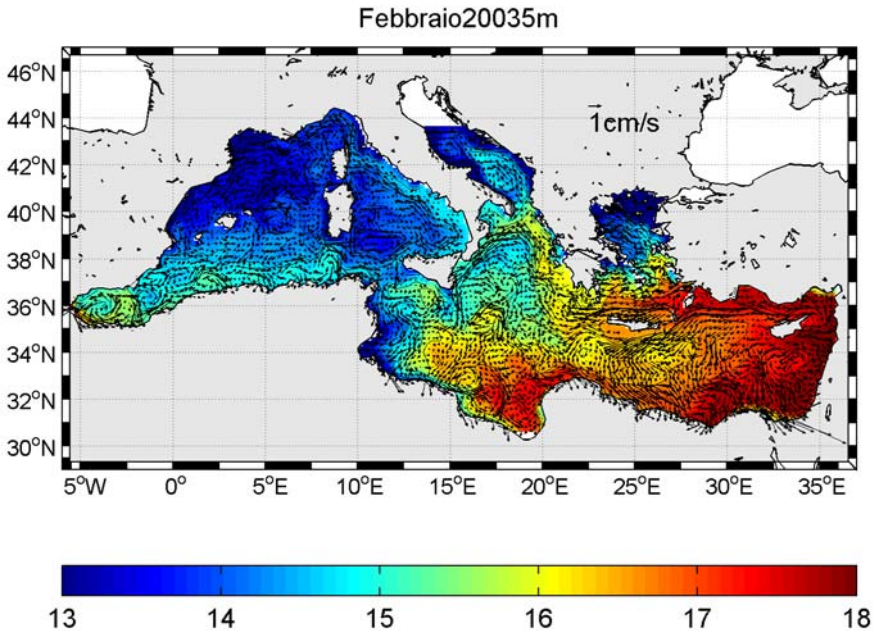


Fig. 12 – Mappa di Febbraio 2003. Profondità 5m.

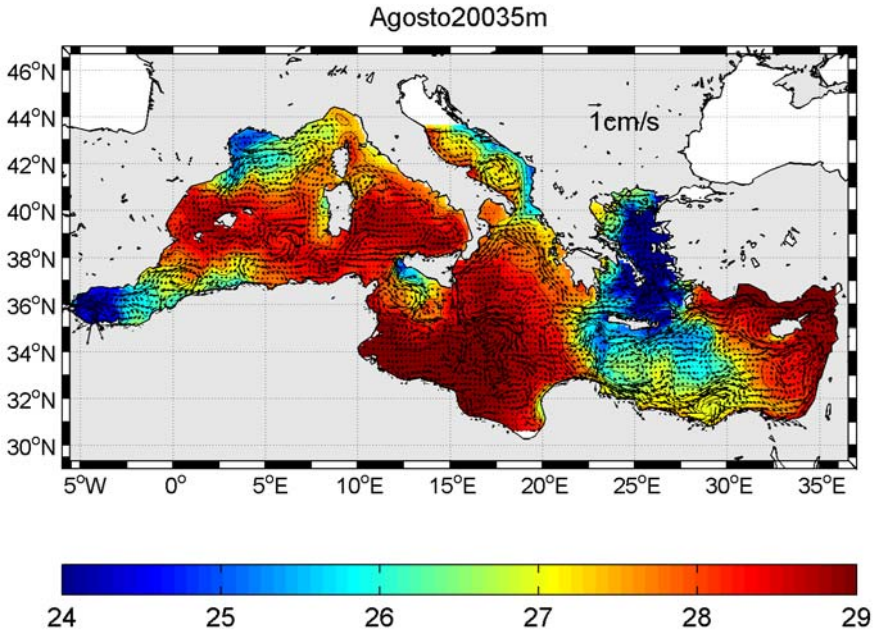


Fig. 13 – Mappa di Agosto 2003. Profondità 5m.

Una visione sequenziale dell'intero 2003 permette di apprezzare come il sistema sia estremamente dinamico.
Nei sistemi di giri e meandri in corrispondenza dell'estremo sud del bacino occidentale, così come nella parte sud orientale del bacino levantino, è concentrata la maggior parte della variabilità stagionale (vedi figure in appendice).
Questi sistemi di circolazione a scala spaziale compresa fra quella di sottobacino e quella di mesoscala, sono quelli che più velocemente rispondono alle sollecitazioni del forzante esterno.
Si può notare come nel mese di marzo, ad esempio, risultino ben definiti i vortici anticiclonici del Mare d'Alboran e della corrente algerina nel bacino occidentale e quelli del golfo delle Sirte e di Mersa Matruh nel bacino levantino. Evidente è anche la presenza di meandri e vortici nello ionio occidentale.
Questi ultimi sembrano scomparire nelle mappe relative al mese di aprile per poi riapparire ben definiti a partire da agosto.
Focalizzando l'attenzione sul vortice anticiclonico denominato 'Shikmona Gyre' si vede come esso sia particolarmente instabile: lo si nota ben definito a sud-est dell'isola di Cipro in gennaio, lo si osserva scomparire in febbraio e riapparire debole, più a sud, in marzo. In giugno è di nuovo presente, in agosto di nuovo assente. Nel mese d'ottobre risulta spostato di qualche grado in direzione est.

4.2. Confronto con la climatologia MEDATLAS

L' ultima fase del lavoro è consistita nel confronto fra il 2003 e la climatologia MEDAR-MEDATLAS in termini d'anomalia.
Dalla mappe alla profondità di 5m, analoghe a quella create per il confronto con la climatologia 2000-2003, emerge quanto i valori siano amplificati e assumano sempre valori positivi, eccetto che

per i mesi di febbraio, marzo e aprile per i quali la forbice di valori è compresa fra –1 e +1 gradi centigradi.

Questa è indubbiamente una dimostrazione di come, nell'anno 2003, la temperatura superficiale del Mediterraneo sia stata più alta della norma per quasi tutto il periodo e come questa sia, comunque una tendenza rintracciabile anche nell'intero periodo esaminato. In particolare la mappa di agosto (Fig. 14) dimostra che nella parte occidentale del bacino la temperatura sia stata fino a 5 gradi centigradi più alta della media sui passati cinquant'anni (nel Golfo del Leone), evento piuttosto eccezionale.

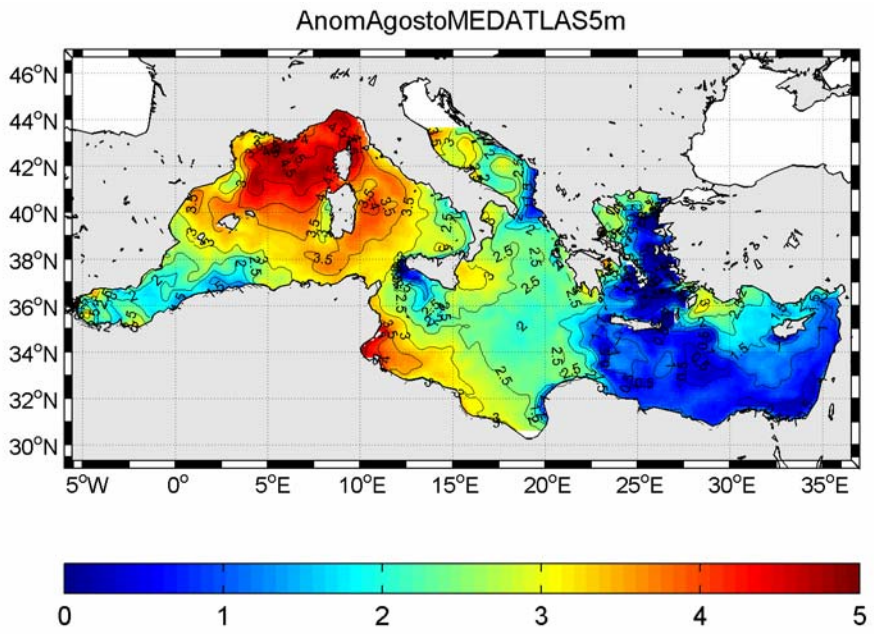


Fig. 14 – Anomalia di temperatura di Agosto 2003 rispetto ad una climatologia di 50 anni.

Spiegazione di tale riscaldamento può essere individuata, in prima approssimazione, nel lungo periodo d'alta pressione che ha interessato l'intero bacino mediterraneo durante il periodo estivo. L' assenza di venti consistenti ha, di fatto, permesso un forte riscaldamento degli strati superficiali della colonna d'acqua.

5. Conclusioni

Il lavoro compiuto ha permesso di esplicitare la variabilità della circolazione del Mar Mediterraneo, sia nella sua componente spaziale che temporale per il periodo 2000-2003; ha ribadito come il Mediterraneo è un sistema estremamente dinamico caratterizzato da alcuni processi costanti e da altri fortemente influenzati dai forzanti esterni.

Può comunque essere considerato un primo passo: l'analisi di una più lunga serie temporale e di un più ampio insieme di variabili fisiche permetterebbe di apprezzare le variazioni sul periodo medio-lungo, fornirebbe le basi su cui costruire un'analisi quantitativa e i presupposti per analizzare le dinamiche della circolazione.

Questo studio particolare non può essere utile a tale scopo, proprio per la brevità e la contemporanea singolarità del periodo esaminato.

Può dirsi invece dimostrata, l' efficacia di tale metodologia di lavoro al fine di ottenere valide rappresentazioni dello stato attuale della circolazione del bacino.

6. Bibliografia

- N. Pinardi, E. Masetti. 'Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling: a review'. *Palaeogeography, Palaeoclimaology, Palaeoecology* (2000).
- A. R. Robinson, W. G. Leslie, A. Theocharis, A. Lascaratos. 'Mediterranean Sea Circulation'. *Encyclopedia of Oceanic Sciences* (2001).
- J. M. Brankart, P. Brasseur. 'The general circulation in the Mediterranean Sea: a climatological approach'. *Journal of Marine Systems (1998).*
- V. Artale, M. Astraldi, G. Buffoni, G. P. Gasparini. 'Seasonal variabilità of the gyre-scale circulation in the northern Tyrrenian Sea' . *Journal of Geophysical Research* (1994).
- E. Tziperman, P. Malanotte-Rizzoli. 'The climatological seasonal circulation of the mediterranean sea'. *Journal of Marine Research* (1991).

Ringraziamenti

Da dove cominciare…. da una promessa: un grazie a Edda, vera anima sorridente del Corso di Laurea.

Il grazie più grande alla mia famiglia, tutta, nipoti compresi che mi ha guidato per 24 anni e mi ha condotto per mano fino a qua.

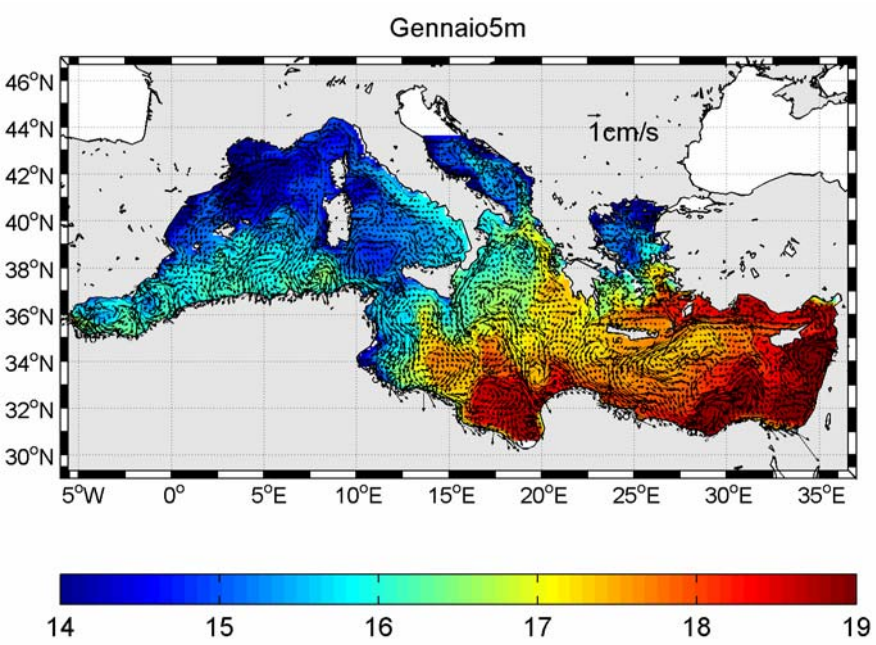
Grazie a Enrica per aver reso la mia vita una gioia negli ultimi 3 anni, a David per essersi sempre dimostrato un vero amico. Grazie a Michele, Giorgio e Giamma… è colpa loro se sono quello che sono oggi. Grazie a Tete, Daniele, Marco, Filo e Susi che sono stati anche compagni di vita. Grazie a Teo (il mio datore di lavoro). Grazie ad Alessia e Nico, le prime amiche. Grazie a Roby, Cami, Chiarina, Marika, Ele, Cate, Susi, Giorgia, Chiarona, Pelle, Verde, Ale Barni, Gara, Sarina, Metius, Isa, Fra Piccini, Ale Bonazzi, Nico, Giorgia Gara, i bradipi, claudia e Davidino di rimini…. Insomma: tutti quelli che hanno iniziato con me questa avventura!

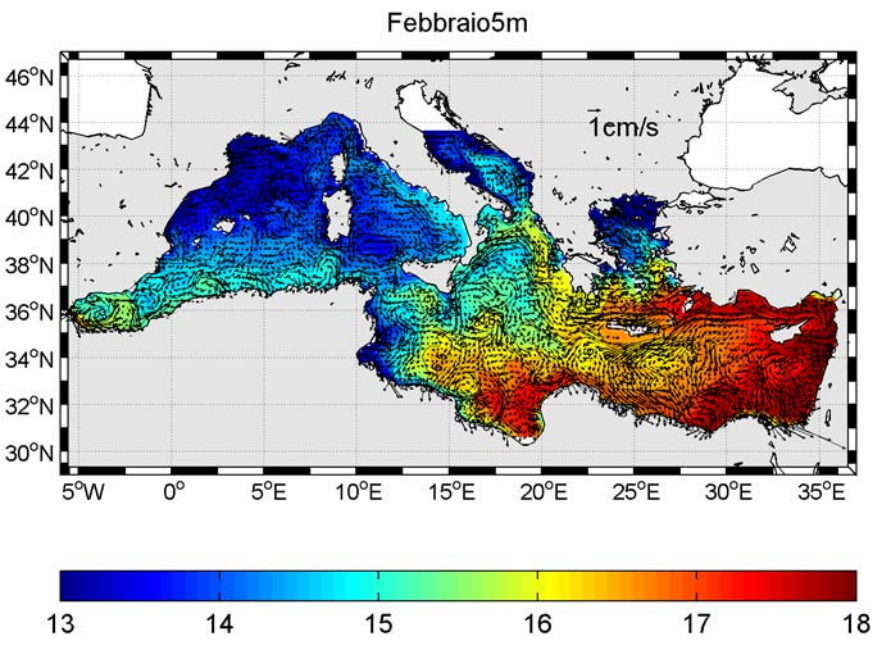
Un grazie particolare al Dott. Luca Giacomelli (il mio padrùne) e tutti i ragazzi del Sincem senza i quali questa tesi non sarebbe mai esistita.

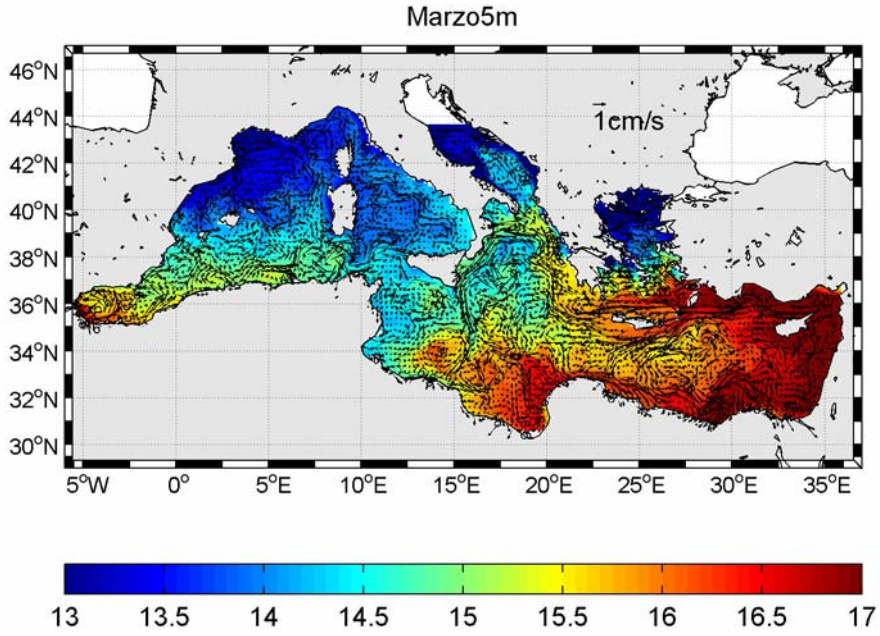
Perdonatemi se ho dimenticato qualcuno…. Sarà per la prossima volta!

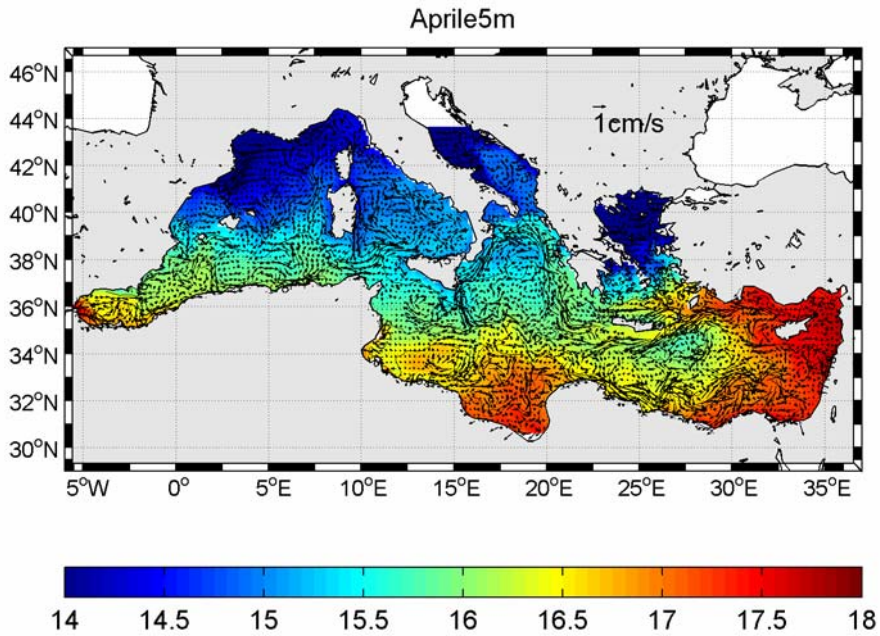
Appendice

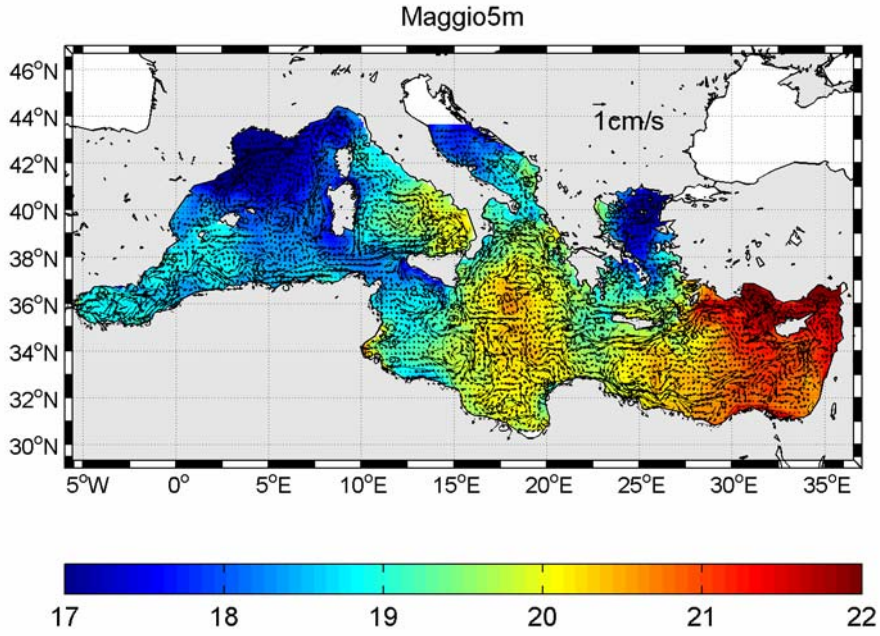
- Anno 2003, temperatura e velocità totali, profondità 5m.

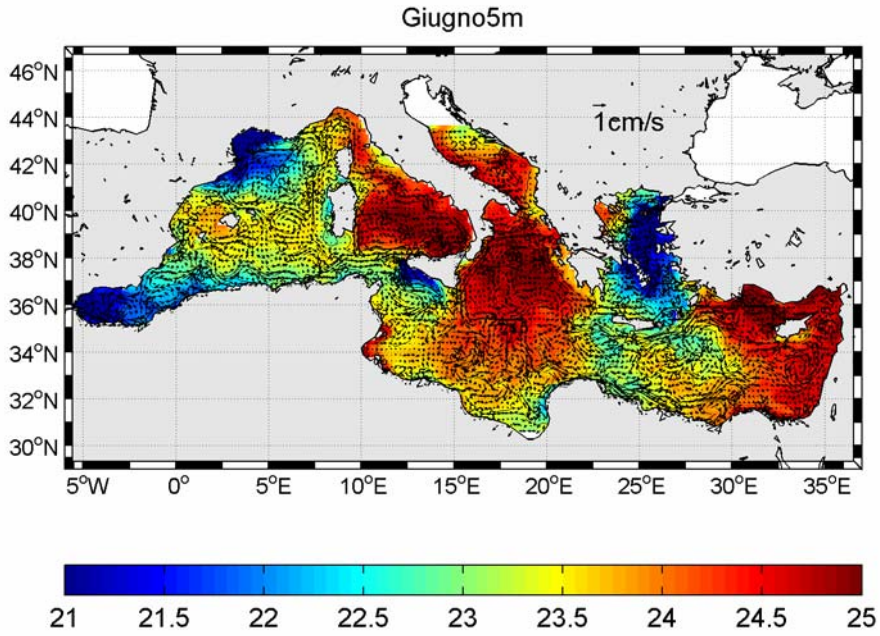


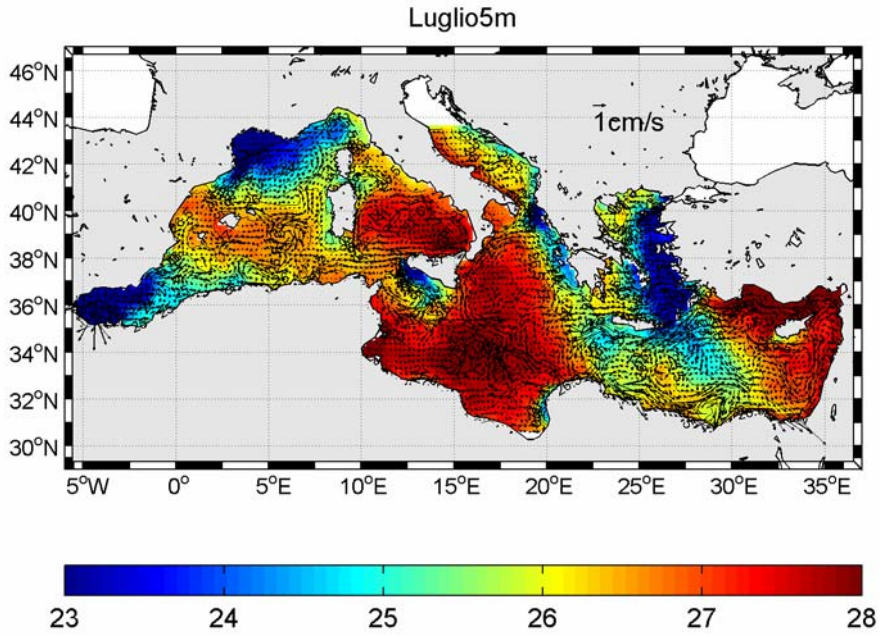


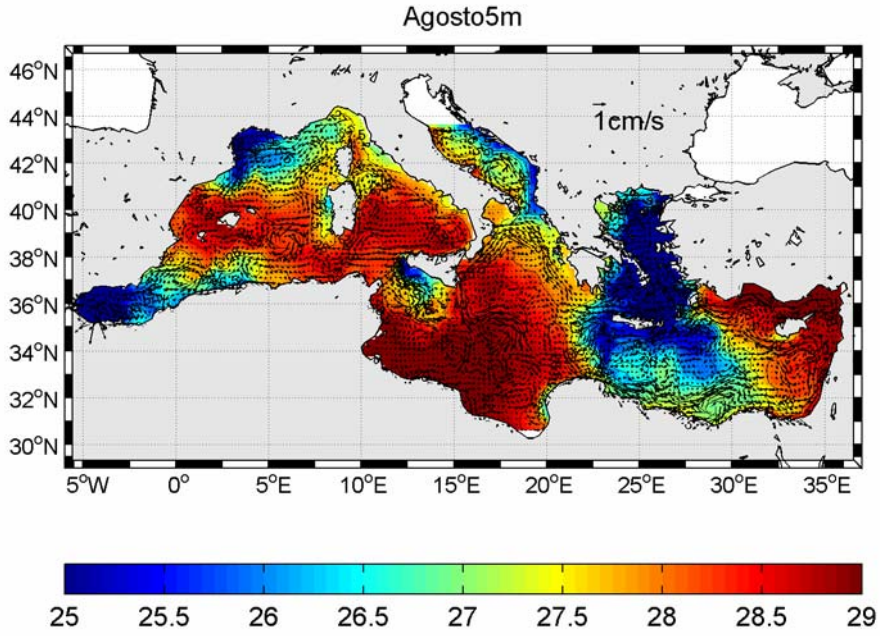

Marzo5m
1cm/s
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
13
13.5
14
14.5
15
15.5
16
16.5
17

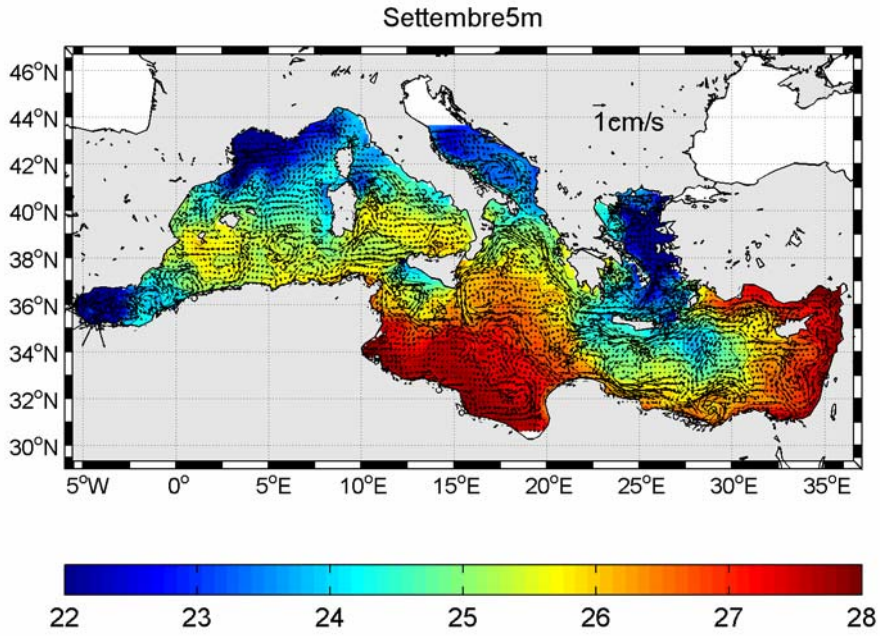

Aprile5m
1cm/s
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
14
14.5
15
15.5
16
16.5
17
17.5
18

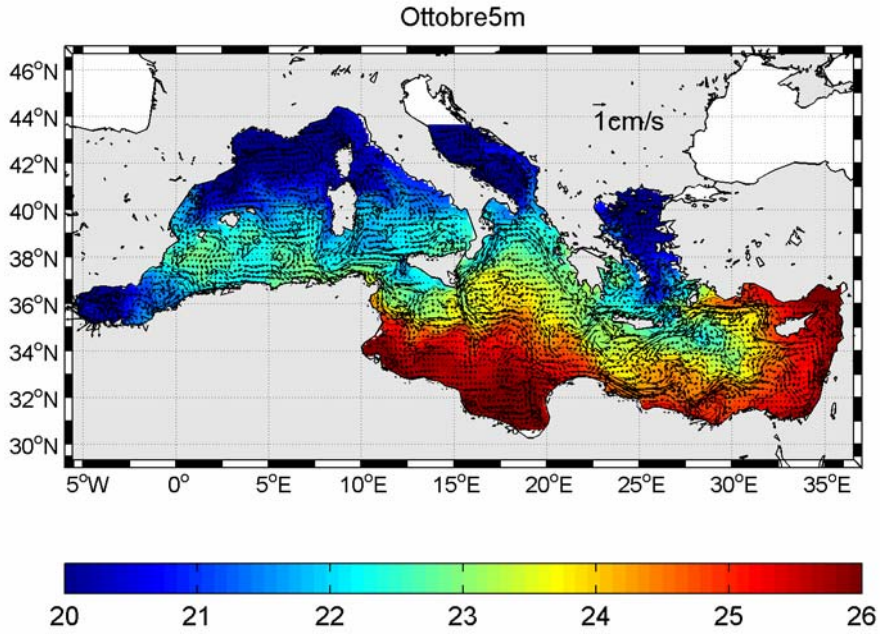

Maggio5m
1cm/s
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
17
18
19
20
21
22

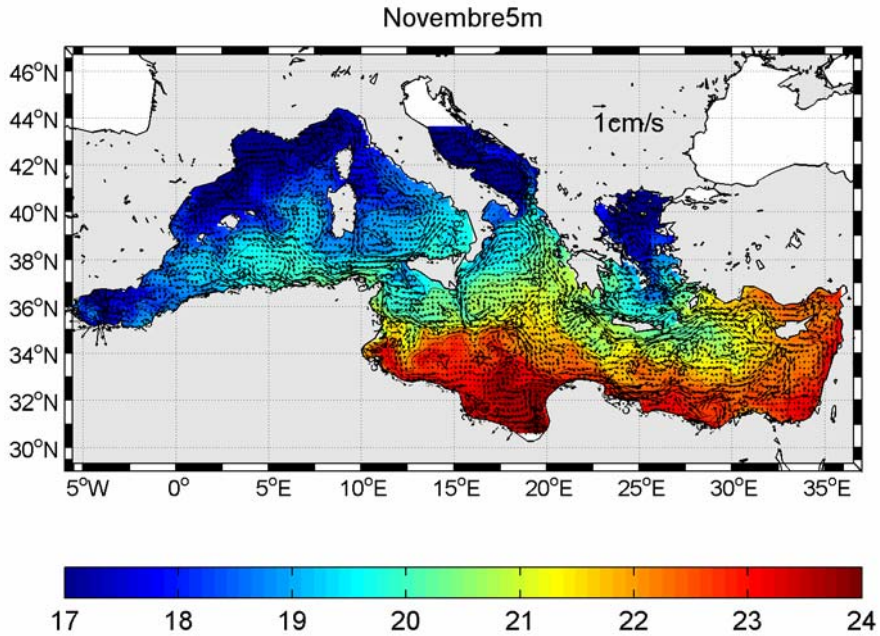

Giugno5m
1cm/s
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
21
21.5
22
22.5
23
23.5
24
24.5
25

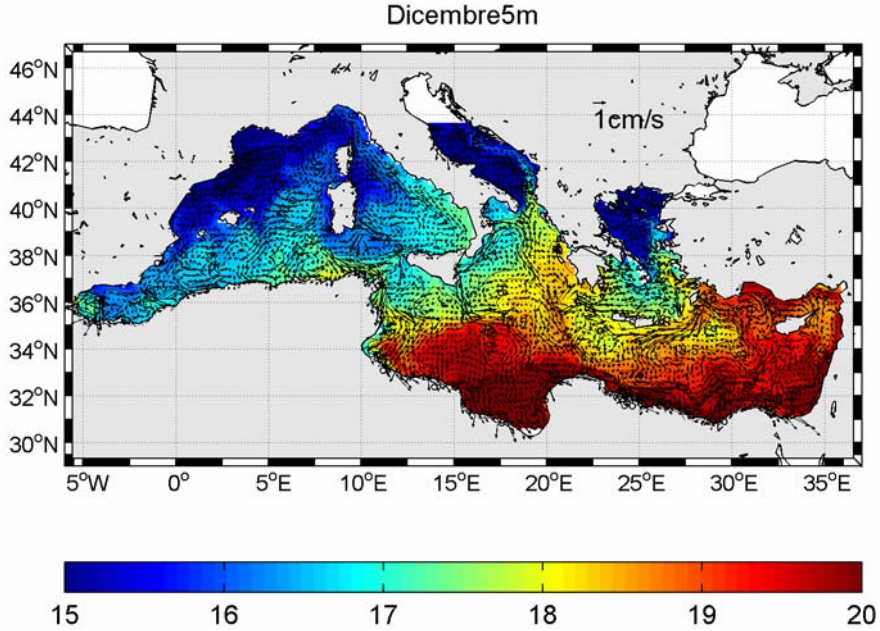

Luglio5m
1cm/s
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
23
24
25
26
27
28


Agosto5m
1cm/s
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
25
25.5
26
26.5
27
27.5
28
28.5
29


Settembre5m
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
1cm/s
22
23
24
25
26
27
28


Ottobre5m
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
1cm/s
20
21
22
23
24
25
26


Novembre5m
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
1cm/s
17
18
19
20
21
22
23
24


Dicembre5m
46°N
44°N
42°N
40°N
38°N
36°N
34°N
32°N
30°N
5°W
0°
5°E
10°E
15°E
20°E
25°E
30°E
35°E
1cm/s
15
16
17
18
19
20