



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



STUDIO DEL TRASPORTO DI INQUINANTI NEL MAR TIRRENO MEDIANTE
MODELLI DI CIRCOLAZIONE MARINA

Dr.ssa Valentina Lombardi

Tutor: Dr.Roberto Inghilesi
Co tutor: Dr.ssa Sara Morucci

Data	Firma Stagista	Firma Tutor	Firma responsabile servizio

Abstract

L'obiettivo del lavoro è la simulazione di episodi di oil spill nel Mar Tirreno attraverso l'implementazione di un sistema accoppiato di modelli numerici costituito da un modello di circolazione marina (*POM, Princeton Ocean Model, A.F. Blumberg e G.L. Mellor, 1987*) e un modello lagrangiano di trasporto di inquinanti (*LAWAM, LAgrangian WAter Model, G. Leuzzi e P. Monti, 2007*). E' stato scelto il Mar Tirreno come area di studio poichè rappresenta una delle zone maggiormente soggette al verificarsi di sversamenti di petrolio dovuti a collisioni, esplosioni, e scarichi in corrispondenza dei numerosi oil-terminal presenti lungo le coste. In questo studio il sistema di modelli è stato usato allo scopo di riprodurre la circolazione generale del bacino durante i mesi invernali e descrivere alcuni scenari di sversamento di petrolio in diverse condizioni ambientali associate a realistiche possibilità di incidente.

Prefazione

Il grande valore del lavoro qui descritto è di aver creato la metodologia e gli strumenti per determinare il rischio di inquinamento da oil spill e da sostanze tossiche sversate in tutto il bacino del Mar Tirreno.

Il problema di determinare il rischio di contaminazione delle aree marine e costiere associato allo sversamento di sostanze oleose o tossiche in mare è legato alla possibilità di determinare scenari realistici per le condizioni meteo marine sulla scala di bacino e in tale contesto simulare il trasporto degli inquinanti. L'ISPRA, svolgendo da più di 15 anni il compito di monitorare lo stato del mare mediante reti di misura dei principali parametri meteo-marini, è l'Istituto di ricerca italiano che ha maggiormente contribuito alla conoscenza del clima ondoso e delle condizioni climatiche in generale lungo le coste italiane. Le attività di simulazione del trasporto di inquinanti in mare si inserisce oltretutto naturalmente nelle attività ordinarie di simulazione numerica dell'Istituto, che vertono sulla previsione e ricostruzione di episodi di storm-surge o mareggiate aventi significativo impatto sulle coste italiane. In particolare, lo studio della dispersione a costa degli inquinanti marini ha la duplice valenza di costituire sia un valido supporto alle condizioni operative di bonifica, sia di permettere attraverso gli scenari, di determinare le condizioni di rischio in funzione della posizione, della stagione, delle condizioni di sversamento e naturalmente del tipo di sostanza emessa nelle varie circostanze possibili. Per affrontare il primo tipo di problema è necessario simulare con la maggiore accuratezza possibile un singolo episodio, e quindi si impiegano modelli numerici ad altissima risoluzione e si ricorre a macchine multiprocessore e codici paralleli; per il secondo tipo di problema è necessario invece considerare un grande numero di simulazioni diverse che rendano la variabilità delle possibili condizioni ambientali. In quest'ultimo caso si opera con modelli a risoluzione meno alta e codici seriali. La difficoltà di operare in questo contesto è che è necessario mantenere dei risultati in grado di riprodurre le caratteristiche generali dei fenomeni fisici lavorando con modelli numerici in cascata che simulano le diverse situazioni in un tempo dell'ordine del giorno. Per ottenere questi risultati si deve lavorare a lungo sulla implementazione dei codici verificando attentamente che il sistema numerico di simulazione sia effettivamente in grado di descrivere lo stato reale del bacino nelle diverse situazioni, confrontando risultati numerici con le caratteristiche attese e

controllando l'attendibilità delle condizioni di scenario imposte. Il lavoro qui esposto rappresenta una approfondita sperimentazione delle metodologie di simulazione della circolazione del Mar Tirreno durante i mesi invernali e delle caratteristiche del trasporto di inquinanti in diverse condizioni ambientali associate a realistiche possibilità di incidente.

INDICE

Introduzione.....	7
1. IL TRASPORTO DI INQUINANTI.....	9
1.1 Il trasporto di inquinanti nel Mediterraneo.....	9
1.2 L' Oil spill.....	12
2. LA CIRCOLAZIONE.....	16
Introduzione.....	16
2.1 La circolazione nel Mar Tirreno.....	16
2.2 Variabilità stagionale.....	20
3. I MODELLI NUMERICI.....	21
Introduzione.....	21
3.1 Il POM.....	21
3.2 Il LAWAM.....	25
4. I DATI SATELLITARI.....	28
Introduzione.....	28
4.1 La temperatura superficiale	29
4.2 La temperatura superficiale: dati satellitari.....	30
4.3 La temperatura superficiale: osservazioni in situ.....	36
4.4 Confronto tra i dati.....	39
5. APPLICAZIONI.....	48
Introduzione.....	48
5.1 L'implementazione del POM.....	49
5.1.1 Il dominio del modello, la batimetria e le condizioni iniziali.....	49
5.1.2 Le condizioni al contorno	53
5.2 L'implementazione del LAWAM.....	61
5.2.1 I Dati di input.....	61
5.2.2 Le caratteristiche degli incidenti simulati.....	63
6. ANALISI DEI DATI.....	65
6.1 Run di spin-up.....	66
6.2 Run non stazionario.....	69
6.3 Simulazioni di oil spill.....	70
7. CONCLUSIONI.....	79
Bibliografia.....	81

Introduzione

In questo lavoro è stato affrontato lo studio della dispersione di prodotti oleosi nel Mar Tirreno mediante l'uso di un sistema di modelli numerici accoppiato, costituito da un modello di circolazione marina (*POM, Princeton Ocean Model, A.F. Blumberg e G.L. Mellor, 1987*) e da un modello di dispersione lagrangiano (*LAWAM, LAgrangian WAter Model, G. Leuzzi e P. Monti, 2007*). E' stato scelto il bacino del Tirreno come area di studio in quanto rappresenta una delle zone maggiormente soggette al verificarsi di sversamenti di petrolio (*oil spill*) dovuti a collisioni, esplosioni, e soprattutto scarichi in corrispondenza dei numerosi oil-terminal presenti lungo le coste tirreniche, con conseguente impatto sull'ambiente marino e costiero. Tale studio costituisce una fase preliminare di simulazioni, nelle quali il sistema di modelli è stato utilizzato in una configurazione non operativa, allo scopo di riprodurre la circolazione generale del bacino e descrivere alcuni scenari di rischio in zone ritenute vulnerabili. Il sistema in configurazione operativa potrebbe essere utilizzato “in tempo reale” in condizioni di emergenza per indirizzare gli interventi di bonifica e di mitigazione dei danni in seguito ad un incidente.

Nel primo capitolo verrà trattata la caratterizzazione del problema del trasporto di inquinanti e dell'*oil spill* nel Mar Mediterraneo ed in particolar modo nel Tirreno. Verranno riportati i dati più recenti a disposizione (*REMPEC, 2008; Relazione APAT-Lasinio; Tkalic et al.2003*) riguardanti le rotte petrolifere, gli incidenti avvenuti e le tonnellate di petrolio sversato nel Mar Mediterraneo.

Nel secondo capitolo sarà descritta la circolazione generale e nel bacino del Tirreno sulla base delle osservazioni presenti in letteratura (*Millot e Taupier, 2004; Millot, 2007; Serraval e Cristofalo, 1999*) e la variabilità stagionale che la contraddistingue allo scopo di caratterizzare i tratti principali della circolazione dell'area in studio che il modello numerico POM deve essere in grado di riprodurre.

Nel terzo capitolo verranno descritti i modelli numerici che costituiscono il sistema usato per le simulazioni sulla base della letteratura presente (*Mellor et al., Leuzzi e Monti*). Il modello di circolazione ed il modello di dispersione lagrangiano sono utilizzati “a catena” poiché il campo idrodinamico generato in uscita dal POM serve come dato di ingresso del LAWAM.

Nel quarto capitolo verrà descritta un'indagine preliminare che è stata effettuata sulle osservazioni satellitari di SST (*Sea Surface Temperature*) per verificare se tali dati ricostruiscono con sufficiente dettaglio la variabilità mensile della temperatura superficiale del mare nel Tirreno, se si accordano con i dati di temperatura rilevati con metodi di misura diretti e in che misura i dati satellitari di SST risultano idonei come forzante del modello di circolazione.

Nel quinto capitolo verrà descritta l'implementazione del sistema di modelli numerici; verrà mostrato il dominio delle simulazioni, i dati di input utilizzati, la *sensitivity analysis* effettuata per scegliere le condizioni al contorno sulla velocità dei flussi nel modello di circolazione e le caratteristiche principali degli incidenti simulati.

Nel sesto capitolo verranno descritte le simulazioni effettuate; verranno prima riportati i risultati del modello di circolazione POM. In particolar modo verranno descritti i risultati della simulazione, effettuata nella fase di spin-up del modello e rappresentativa delle caratteristiche stagionali medie del bacino, e di una simulazione non stazionaria rappresentativa del periodo di riferimento a cui appartengono i campi di vento utilizzati per forzare il modello, e non più mediati, ma relativi ad un preciso istante temporale. Verranno poi illustrati i risultati delle tre simulazioni di *oil spill* che sono state effettuate con il modello di dispersione LAWAM usando come input il campo idrodinamico generato dal POM relativa agli ultimi 15 giorni di gennaio 2007.

Nell'ultimo capitolo verranno infine esposte le conclusioni cui si è giunti in seguito all'analisi dei risultati.

1. IL TRASPORTO DI INQUINANTI

1.1 Il trasporto di inquinanti nel Mediterraneo

L'intenso trasporto marittimo di petrolio greggio e dei prodotti della raffinazione rappresenta uno dei principali e più preoccupanti rischi per il Mar Mediterraneo, sia per l'elevato rischio di incidente, che per inquinamenti derivati dall'attività operativa delle navi, come lo scarico in mare di acqua di sentina e il lavaggio delle cisterne delle petroliere con conseguente sversamento di prodotti oleosi in mare (*“oil spill”*).

Il Mediterraneo infatti, pur rappresentando meno dell'1% dell'area mondiale coperta dagli oceani, è caratterizzato da un intenso traffico di imbarcazioni. Nel 2000 erano 1.715 milioni le tonnellate di petrolio trasportato in mare e nel 1999 sono state stimate 360-370 milioni di tonnellate trasportate nel solo Mar Mediterraneo. Infatti circa il 30% degli scambi commerciali è diretto o proviene dal Mediterraneo e il 20-25% del trasporto mondiale di petrolio interessa il Mediterraneo. Inoltre nel 1995 nel Mediterraneo esistevano circa 305 porti, di cui circa la metà in Italia, Spagna e Grecia e nel 2004 esistevano 82 principali porti petroliferi ed altrettante raffinerie che lavoravano 8.780.326 barili di greggio al giorno, oltre il 10% della raffinazione mondiale (REMPEC).

Nel Mar Mediterraneo inoltre si trovano le principali rotte per il trasporto di petrolio greggio dai pozzi del Nord Africa, del Mar Nero e del Mediterraneo orientale verso i consumatori dell'Europa e del Nord America (Fig.1-2). La linea di traffico più importante, che comprende il 90% di traffico di petrolio totale, connette Suez e il terminal Sidi Kerir in Egitto con Gibilterra passando tra la Sicilia e Malta e prosegue lungo le coste della Tunisia, Algeria e Marocco. La seconda rotta più importante parte dai terminal di carico del Mediterraneo orientale (Siria e Golfo di Iskenderun in Turchia) e dopo aver superato Cipro segue le principali rotte. La terza rotta connette i terminal del Mar Nero con i principali assi del Mediterraneo occidentale passando attraverso lo Stretto di Istanbul, il Mare di Marmara, lo Stretto di Çannakkale e il Mar Egeo (REMPEC).

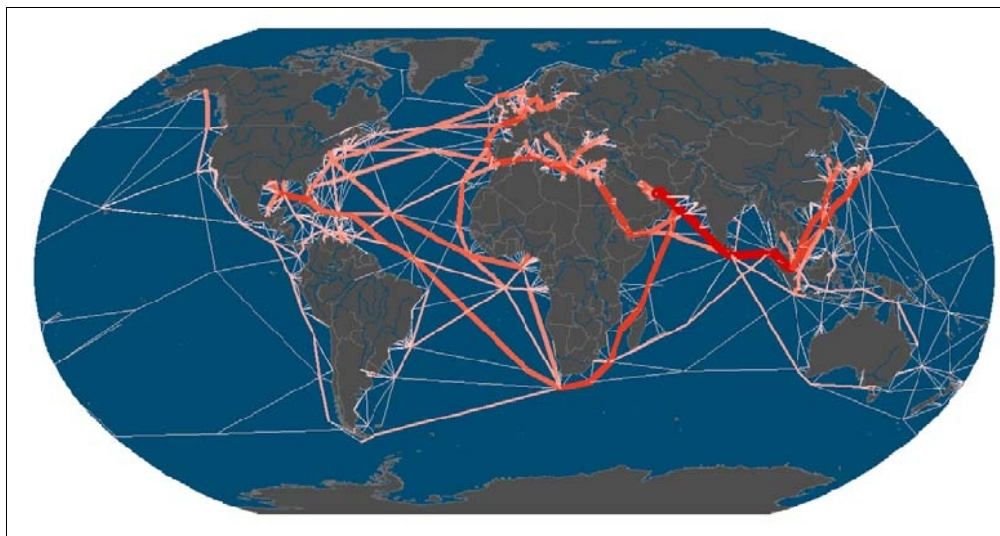


Figura 1: Rete globale delle rotte di trasporto e quantità di petrolio trasportato in mare nel 2001.

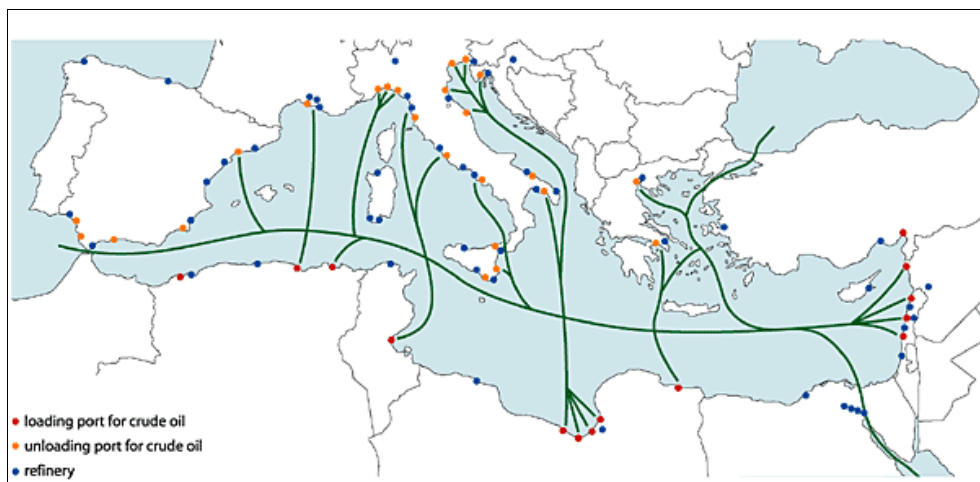


Figura 2: Principali rotte del trasporto di petrolio e porti di carico e scarico di petrolio greggio e raffinerie nel Mar Mediterraneo (MAP e REMPEC 1996b).

Nella tabella 1 (*Fonte dati: EUROSTAT*) sono riportate le informazioni più recenti a disposizione, relative all'anno 2005, sulle quantità di materiale trasportato per i porti italiani, per tipo di materiale (carbone, petrolio grezzo, gas liquido, petrolio raffinato) e per direzione (in entrata o in uscita). E' possibile evidenziare come siano coinvolti in tali traffici numerosi porti ubicati sulle coste tirreniche ed in particolare come i porti che presentano una elevata quantità di petrolio grezzo in entrata e di petrolio raffinato in uscita siano localizzati nelle vicinanze di una raffineria (Es. Milazzo, Livorno, Porto Foxi).

1	cargo: coal				cargo: gas_liq			
2		inw	direct			inw	direct	
3			outw	tot			outw	tot
4	Augusta	18	4	22	Augusta	0	301	301
5	Genova	814	14	829	Genova	41	1	42
6	Gioia Tauro				Gioia Tauro			
7	La Spezia	456		456	La Spezia	1362	241	1603
8	Livorno	30		30	Livorno	300	6	306
9	Milazzo				Milazzo	9	64	73
10	Napoli				Napoli	596		596
11	Porto Foxi				Porto Foxi	15	103	118
12	Ravenna	179		179	Ravenna	217	22	238
13	Santa Panagia				Santa Panagia	5	27	32
14	Savona - Vado	1419	26	1445	Savona - Vado			
15	Taranto	3440	7	3447	Taranto	178		178
16	Trieste	381	15	396	Trieste			
17	Venezia	1777		1777	Venezia	86		86
18	Totale Risultato	8514	66	8581	Totale Risultato	2809	765	3573
19	cargo: coil				cargo: roil			
20		inw	direct			inw	direct	
21			outw	tot			outw	tot
22	Augusta	5483	166	5649	Augusta	2017	5028	7043
23	Genova	6001		6001	Genova	1522	519	2042
24	Gioia Tauro				Gioia Tauro		1	1
25	La Spezia	6		6	La Spezia	347	6	353
26	Livorno	1921	8	1929	Livorno	843	727	1571
27	Milazzo	4243	119	4362	Milazzo	464	3285	3750
28	Napoli	7		7	Napoli	1475		1475
29	Porto Foxi	4370		4370	Porto Foxi	522	2854	3376
30	Ravenna	3		3	Ravenna	988	95	1083
31	Santa Panagia	3565	187	3752	Santa Panagia	2634	4631	7265
32	Savona - Vado	3029		3029	Savona - Vado	403	85	489
33	Taranto	985	675	1659	Taranto	599	751	1350
34	Trieste	15744		15744	Trieste	550		550
35	Venezia	2575	106	2681	Venezia	2414	180	2593
36	Totale Risultato	47932	1261	49192	Totale Risultato	14778	18162	32941

Tabella 1: Trasporto merci pericolose per l'Italia, anno 2005.

1.2 L' Oil spill

Con il termine “oil spill” si intende lo sversamento in mare di idrocarburi liquidi dovuto ad attività antropiche di diverso tipo. Gli sversamenti in mare possono essere ascrivibili alle seguenti cause :

- Inquinamenti operazionali: sono la causa dello scarico a mare della maggior parte di idrocarburi sversati e sono determinate dalle normali operazioni di routine, come lo zavorramento, il lavaggio delle cisterne, lo scarico delle acque di sentina e dei lubrificanti dei macchinari.
- Inquinamenti accidentali: possono essere causati da collisioni, affondamento, esplosioni, cedimenti meccanici e da avverse condizioni meteomarine.
- Inquinamenti volontari: attività illegali.

In figura 5 è mostrata l'immagine satellitare delle tracce di inquinante scaricato dalle navi nelle normali operazioni di routine durante il 1999.

Secondo il *REMPEC (Regional Marine Pollution Emergency response Centre for the Mediterranean Sea, 2008)*, nel Mar Mediterraneo tra il 1977 e il 2007 sono avvenuti 463 incidenti marittimi con conseguente sversamento in mare di 321.300 tonnellate totali di petrolio (Fig.3). Le zone maggiormente soggette a tali incidenti sono quelle in cui si riscontra un intenso traffico marittimo, come lo Stretto di Gibilterra e lo Stretto di Messina, il Canale di Sicilia e lo Stretto di Çannakkale. Anche numerosi porti sono coinvolti in frequenti incidenti, come Alessandria, Beirut, Limassol/Larnaka, Pireo, Trieste, Venezia ed importanti porti del bacino del Mar Tirreno, tra cui Genova , Livorno e Civitavecchia.

Inoltre ogni anno continuano ad essere scaricate nel Mar Mediterraneo tra le 100.000 e le 150.000 tonnellate di idrocarburi. Tali quantità sono confermate dalla densità di catrame pelagico riscontrata nel Mediterraneo che detiene il primato mondiale di 38 milligrammi per metro cubo (Tab.2, *Legambiente, 2007*).

Mare	Catrame in media milligrammo per metro cubo
Mediterraneo	38,00
Mar dei Sargassi	10,00
Sistema giapponese	3,80
Corrente del golfo	2,20
Atlantico nord-occidentale	1,00
Golfo del Messico	0,80
Carabi	0,60
Pacifico nord orientale	0,40
Pacifico sud occidentale	0,01

Tabella 2: Catrame pelagico riscontrato nei mari del mondo.

Il Mar Tirreno, a causa dell'intenso traffico marittimo, risulta una delle aree maggiormente soggette al verificarsi dei sversamenti, in particolar modo dovuti a collisioni, esplosioni e soprattutto a scarichi in corrispondenza dei principali oil terminal. Infatti nel Tirreno le zone che presentano una maggior frequenza di incidenti sono quelle ubicate presso le raffinerie di Fiumicino (Roma), Milazzo (costa settentrionale della Sicilia) e Sarroch (costa meridionale della Sardegna).

Un rischio così elevato suggerisce la necessità di organizzare un sistema di valutazione del rischio, in grado di determinare le aree soggette ad un rischio più elevato e di prevedere, in caso di incidente, il percorso del petrolio sversato per indirizzare le operazioni di bonifica in mare e lungo le coste.

A tale scopo è importante considerare che i prodotti oleosi sulla superficie del mare sono soggetti a numerosi processi, noti globalmente con il nome di “*weathering*” (Fig.4): l'evaporazione della frazione chimica più volatile e quindi meno densa, la dissoluzione a causa del moto ondoso, la fotolisi e la formazione di emulsioni “*oil-in-water*” e “*water-in-oil*”. I processi di *weathering* determinano lo spostamento della macchia di petrolio non solo in due dimensioni sull'orizzontale, ma provocano successivi affondamenti (“*sinking*”) e riaffioramenti (“*arising*”) che comportano la necessità di prevedere il comportamento dell'inquinante su tutta la colonna d'acqua e di considerare la diversa densità del prodotto oleoso e la velocità di sedimentazione ad essa relazionata.

In questo studio si è deciso di focalizzare l'attenzione sulla dispersione di inquinanti nel bacino del Tirreno, caratterizzato da un intenso traffico marittimo e quindi da un elevato rischio di

inquinamento operativo ed accidentale con conseguente impatto sull'ambiente marino e costiero. Sono stati riprodotti alcuni scenari di *oil spill* (sversamento di prodotti oleosi), che verranno approfonditamente discussi nei capitoli 5-6, utilizzando un sistema di modelli numerici. Il sistema è costituito da un modello di circolazione marina (*POM, Princeton ocean model*) che fornisce il campo idrodinamico necessario come input per il modello di dispersione lagrangiana (*LAWAM, Lagrangian Water Model*).

Nel prossimo capitolo verrà descritta la circolazione marina nel Mar Tirreno e la sua variabilità stagionale, sulla base dei dati e delle osservazioni presenti in letteratura, come strumento per decidere quale climatologia stagionale si vuole riprodurre e per poter confrontare poi le osservazioni in letteratura con il campo idrodinamico generato dal POM.

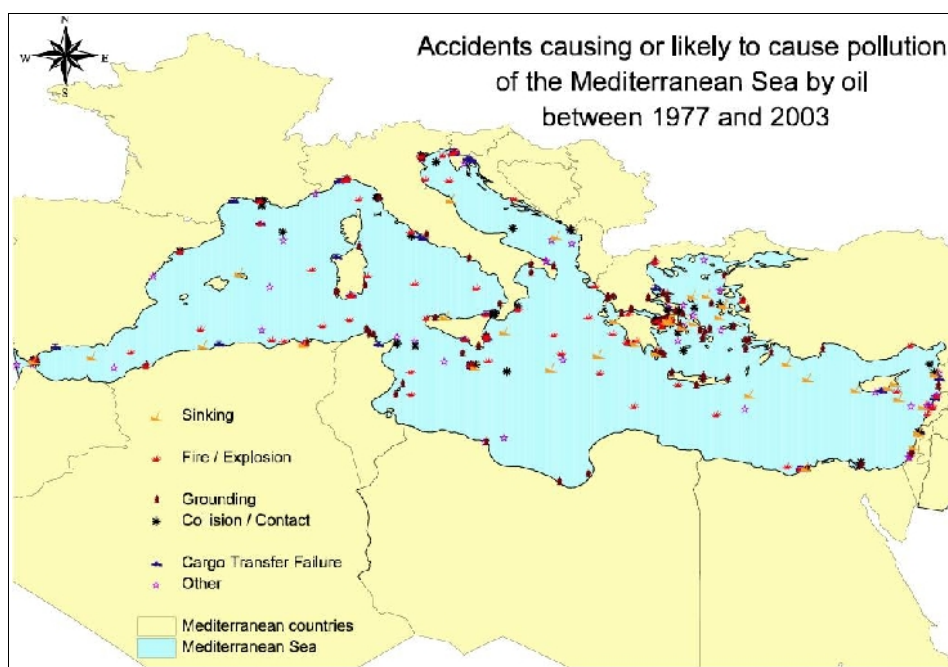


Figura 3: Mappa degli incidenti che hanno causato sversamenti di prodotti oleosi nel Mediterraneo dal 1977 al 2003.

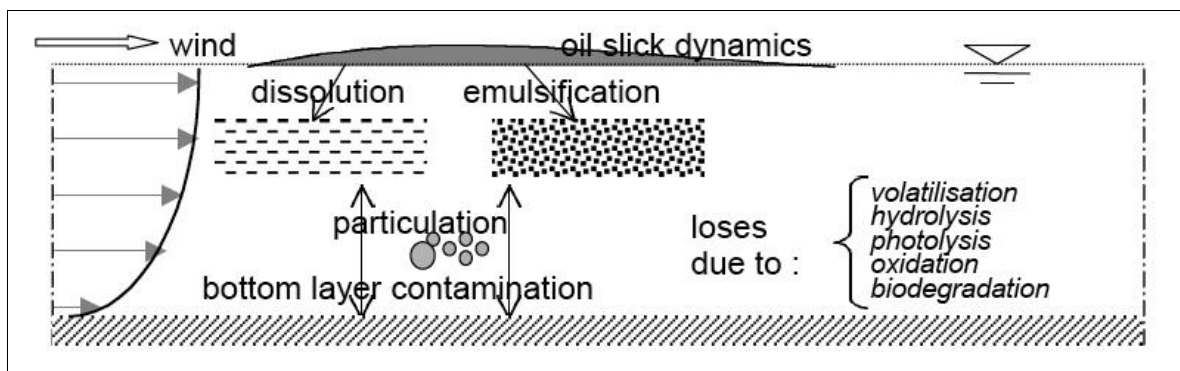


Figura 4: Processi di “weathering” a cui e' soggetto il petrolio a mare.

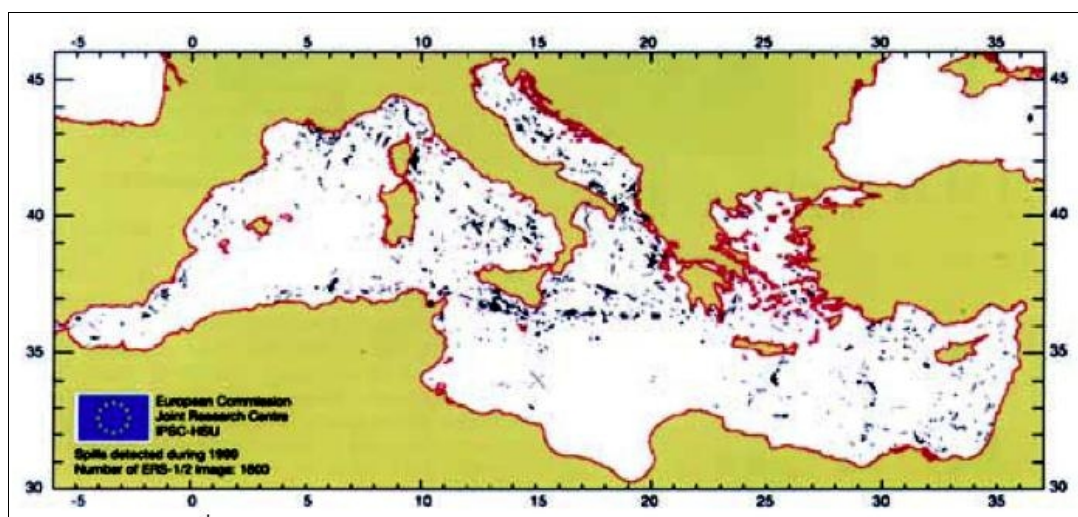


Figura 5: Immagine delle tracce dovute agli scarichi delle navi rilevate dai satelliti ERS-1 e ERS-2, durante il 1999 nel Mar Mediterraneo.

2. LA CIRCOLAZIONE

Introduzione

Prima di descrivere i modelli numerici ed il modo in cui essi sono stati implementati, e' necessario descrivere, sulla base della letteratura presente, la circolazione marina nel bacino del Tirreno e la variabilità stagionale che la caratterizza, come strumento per decidere quale climatologia stagionale si vuole riprodurre e per poter confrontare poi le osservazioni presenti in letteratura con il campo idrodinamico generato dal POM.

2.1 La circolazione nel Mar Tirreno

Il Mar Tirreno è un bacino di forma triangolare suddiviso in due settori principali: un settore settentrionale, caratterizzato da una dinamica intensa, ed un settore meridionale, a cui corrispondono temperature superficiali più elevate ed una dinamica più caotica ma di minore entità.

Il Mar Tirreno può essere considerato un bacino di passaggio; gli scambi con il mediterraneo occidentale avvengono attraverso il canale di Sardegna a sud e tramite il Canale di Corsica a nord, mentre l'apertura con il Mediterraneo Orientale e' costituita dal Canale di Sicilia.

Secondo Serravall e Cristofalo (1999) le acque tirreniche sono costituite dalla sovrapposizione di quattro strati:

- uno strato superficiale (*Modified Atlantic Water* o *MAW*) che interessa i primi 200 m di profondità (temperatura potenziale 13.5-13.9°C e salinità 38.0-38.5 psu);
- uno strato sottostante (*Levantine Intermediate Water* o *LIW*) a profondità comprese tra 250 e 700 m (temperatura potenziale 13.5-13.9°C e salinità 38.4-38.6 psu);
- uno strato più profondo e denso (*Western Mediterranean Deep Water* o *WMDW*) localizzato tra i 700 ed i 3000 m (temperatura potenziale 12.90-13.50°C e salinità 38.4-38.6 psu);

- uno strato di fondo che raggiunge profondità superiori ai 4200 m e si origina nel Mediterraneo orientale (*Aegean Deep Water* o *AeDW* e *Adriatic Deep Water* o *AdDW*).

Lo strato più superficiale è costituito dalla *MAW*; si tratta di uno strato di acqua di origine atlantica, che dopo essere entrato nel Mar Mediterraneo dallo Stretto di Gibilterra, subisce delle modificazioni dovute all'evaporazione ed a processi convettivi innescati da locali fenomeni di raffreddamento presenti lungo il suo percorso. In figura 6 è mostrata la circolazione della *MAW* nel Mar Mediterraneo. Tale corrente superficiale scorre lungo le coste algerine e tunisine ed in seguito il suo flusso si suddivide in due vene: una si porta nel Mediterraneo orientale, la seconda entra nel Tirreno. Una parte di tale flusso subisce un ricircolo scorrendo verso ovest lungo le coste sarde meridionali, mentre il flusso restante scorre lungo le coste della Sicilia ed inizia il suo percorso verso nord. In corrispondenza dell'Isola d'Elba, circa due terzi del flusso proseguono verso il Bacino Ligure-Provenzale attraverso il Canale di Corsica, mentre il flusso restante fluisce lungo le coste della Corsica per poi uscire dal Canale di Sardegna.

Un elemento particolarmente interessante della circolazione del Mar Tirreno è rappresentato dalla presenza di un vortice freddo localizzato ad est delle Bocche di Bonifacio generato dai venti che soffiano verso est attraverso le Bocche e dalla presenza di un fronte termico localizzato lungo il 41° parallelo. Tale vortice controlla, fino a bloccarli del tutto, i flussi di provenienza meridionale. A sud est del vortice ciclonico e' presente un gyre anticiclonico, generato anch'esso dai venti occidentali che attraversano lo Stretto di Bonifacio.

Lo strato d'acqua intermedio nel Mar Tirreno e' costituito dalla *LIW*, la cui circolazione nel Mar Mediterraneo è rappresentata in figura 7. Si tratta di una massa d'acqua che si forma in inverno nel bacino levantino settentrionale, vicino l'Isola di Rodi, dove sia l'elevata evaporazione, dovuta a forte vento, sia la mancanza di apporti fluviali, fanno sì che la *LIW* sia caratterizzata da elevata salinità. In parte la *LIW* formatasi nel bacino orientale scorre verso ovest ed una vena consistente entra nel Tirreno attraverso il Canale di Sicilia, dove viene deviata verso destra, lungo le coste siciliane. La corrente fluisce diretta verso nord lungo le coste peninsulari, fino al Canale di Corsica, dove circa un terzo del flusso attraversa il canale ed i due terzi si portano verso sud scorrendo lungo le coste della Corsica e della Sardegna, per

uscire attraverso il Canale di Sardegna.

La *WMDW* (Fig.8) si forma nel bacino Liguro-Provenzale , durante i mesi invernali, e descrive un gyre anticiclonico nel bacino algerino. Nella regione orientale del bacino la corrente si suddivide in due flussi, uno scorre lungo le coste occidentali della Sardegna, e l'altro attraversa il Canale di Sardegna per portarsi nelle regioni profonde del Mar Tirreno e restarne intrappolata. Lo strato più profondo è costituito dalla *AeDW* e dalla *AdDW* (Fig.8); la prima si origina dal mescolamento della *MAW* e della *LIW* nel Mar Egeo durante i mesi primaverili, mentre la seconda ha origine nel Mar Adriatico in seguito al mescolamento della *MAW* e della *LIW* durante la stagione invernale. La parte più superficiale, quindi la più leggera di queste masse d'acqua attraversa il Canale di Sicilia, entrando nel Mar Tirreno. Si portano nella parte profonda del bacino dove si mescolano con le acque residenti, formando la *TDW* (*Tyrrhenian Dense Water*). La *TDW*, scorre lungo le coste italiane formando un gyre ciclonico nel bacino e uscendo attraverso il Canale di Sardegna (Millot e Taupier, 2004 – Millot, 1999).

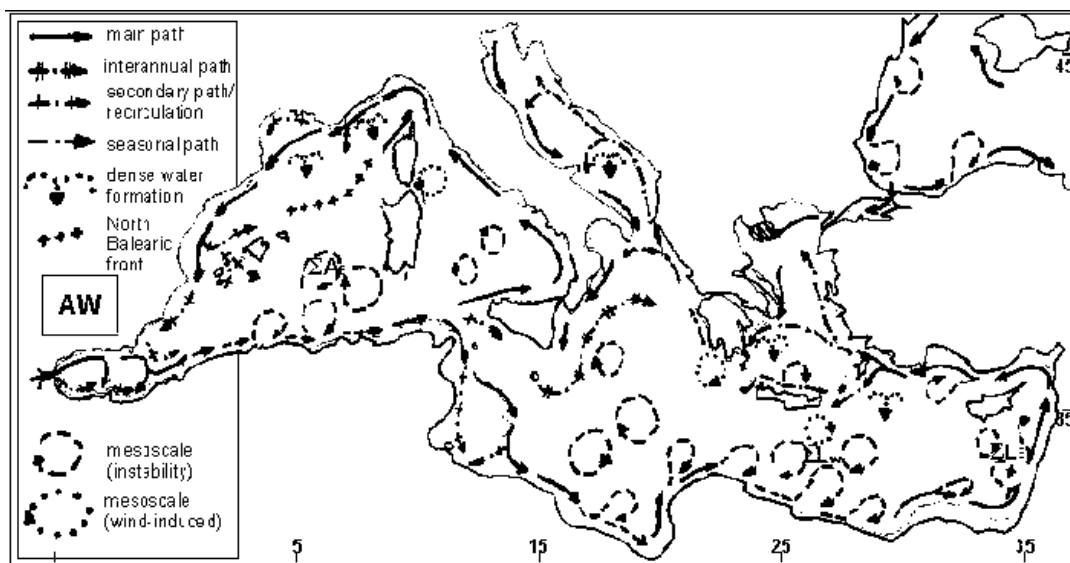


Figura 6: Circolazione della AW (da Millot, Taupier, 2004).

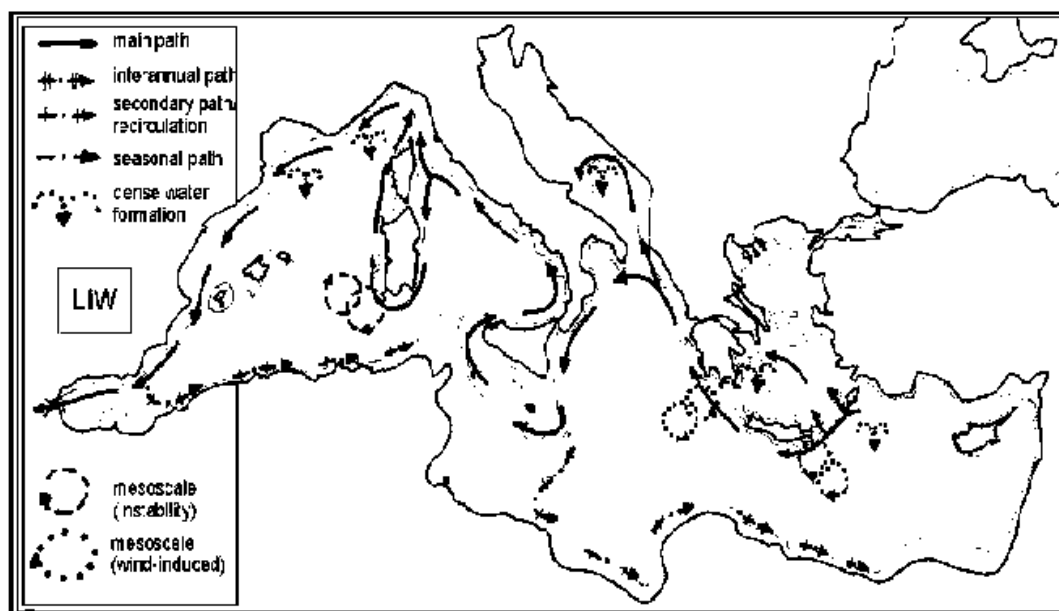


Figura 7: Circolazione della LIW (da Millot, Taupier, 2004).

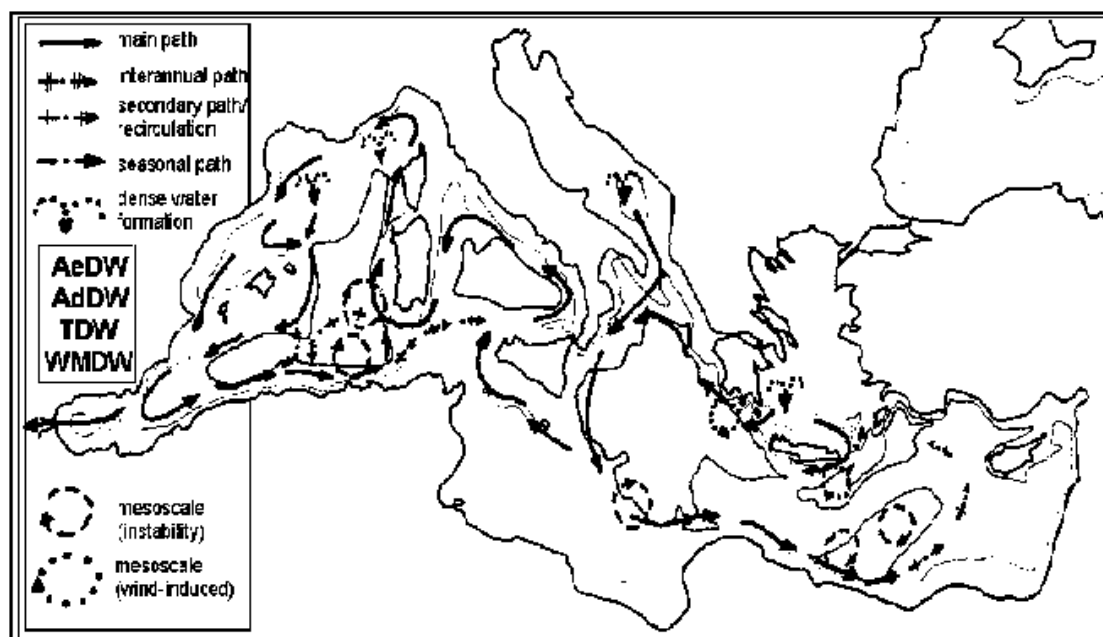


Figura 8: Circolazione della AeDW, AdDW, TDW, WMDW (da Millot, Taupier, 2004).

2.2 Variabilità stagionale

La dinamica del Mar Tirreno è soggetta a una marcata variabilità stagionale. I massimi valori di flusso della *MAW* che entra nel bacino dal Canale di Sardegna si registrano durante i mesi invernali e primaverili, mentre tale flusso diminuisce durante i mesi estivi e autunnali. In particolar modo durante l'estate tutto il flusso entrante scorre lungo le coste della Tunisia verso sud portandosi nel Mediterraneo orientale, senza essere deflesso nel Tirreno. Tale fenomeno è dovuto alla presenza di un fronte termico che si stabilisce dalle coste sud-orientali della Sardegna a quelle nord-orientali della Sicilia. Sempre in estate ed in autunno si blocca l'uscita del flusso dal Canale di Corsica, che inizia ad indebolirsi già durante la primavera, e dunque in tale stagione il Mar Tirreno risulta isolato dal resto del Mediterraneo, risultando momentaneamente un "bacino chiuso". Il fronte termico si indebolisce in inverno e viene quindi ricostituita la circolazione lungo le coste italiane e ristabilito il flusso uscente in Corsica. Anche la massa d'acqua in ricircolo in prossimità del Canale di Sardegna subisce un'oscillazione stagionale; infatti durante i mesi estivi e autunnali si porta maggiormente all'interno del bacino rispetto ai mesi invernali e primaverili.

Inoltre il vortice presente nei pressi delle Bocche di Bonifacio, sebbene sia presente tutto l'anno, cambia di forma e dimensione; durante il periodo estivo-autunnale si orienta zonalmente, riuscendo a catturare gran parte del flusso diretto verso nord lungo le coste della Sardegna, mentre nei mesi invernali assume orientamento meridionale. Modelli numerici e dati sperimentali farebbero risalire queste variazioni alla variabilità stagionale della corrente litorale diretta verso nord (*Della Croce, 2000*).

L'uscita della *LIW* dal Canale di Sardegna sembra presentare un andamento opposto rispetto alla corrente superficiale; i valori minimi di *outflow* si riscontrano durante l'inverno e la primavera, mentre in estate e in autunno si hanno i valori massimi.

La corrente dello strato profondo, *WMDW* che entra nella porzione meridionale del Canale di Sardegna presenta valori minimi durante i mesi estivi, valori massimi durante l'autunno ed intermedi in inverno e primavera. Dopo aver circolato nel bacino, la corrente esce come *TDW* dalla zona settentrionale del Canale di Sardegna, presentando un'oscillazione opposta ai valori di *inflow*: valori massimi in estate e minimi in autunno.

3. I MODELLI NUMERICI

Introduzione

Dopo aver introdotto il problema del trasporto e della dispersione di inquinanti nel Mar Tirreno e dopo aver descritto le caratteristiche principali della circolazione marina dell'area oggetto di studio, verranno descritti i modelli numerici utilizzati per le simulazioni effettuate.

Come accennato nel capitolo precedente il sistema di modelli utilizzato nel presente studio è costituito da un modello di circolazione e da un modello lagrangiano di dispersione utilizzati in cascata; infatti il modello di circolazione genera un campo idrodinamico in uscita, che serve come input per il modello di dispersione.

Come modello di circolazione è stato scelto il *POM* (*Princeton Ocean Model*, A. F. Blumberg e Mellor, 1987), perché è un modello tridimensionale ed è *open source*. Come modello di dispersione di inquinanti è stato scelto il *LAWAM* (*LAGrangian WAter Model*, G. Leuzzi e P. Monti, 2007); si tratta di un modello lagrangiano adatto ad applicazioni di tipo costiero.

Il sistema di modelli è stato implementato allo scopo di riprodurre la circolazione tipica della stagione invernale nel Mar Tirreno e di utilizzare i campi idrodinamici in output dal POM come dati di input del LAWAM.

3.1 II POM

Il POM è un modello tridimensionale di circolazione oceanica che utilizza un sistema di coordinate sigma in cui la coordinata verticale è scalata sulla profondità della colonna d'acqua. Il sistema di coordinate sigma risulta necessario quando l'area di studio è caratterizzata da una significativa variabilità della topografia.

Il modello ha una superficie libera ed utilizza una tecnica, nota come *splitting mode* per risolvere le equazioni integrate sulla verticale e le equazioni tridimensionali con due differenti time step.

Il modello risolve l'equazione di continuità, l'equazione di conservazione del moto, le equazioni di

conservazione della temperatura, della salinità e assume l'equilibrio idrostatico e l'approssimazione di Boussinesq.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] - fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] + fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$\rho g = - \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \left[u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \left[u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial S}{\partial y} \right)$$

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

in cui (u, v, w) sono le componenti del vettore velocità, ρ è la densità, g è l'accelerazione di gravità, p è la pressione e $f=2\Omega \sin\varphi$ è il parametro di Coriolis. Le variabili θ e S sono rispettivamente la temperatura potenziale e la salinità.

I coefficienti di mixing verticale, K_M e K_H sono calcolati usando schema di chiusura della turbolenza di *Mellor e Yamada (1982)*, mentre i termini di diffusione orizzontale (AM) sono calcolati usando la formula di *Smagorinsky (Smagorinsky, 1993)*.

$$A_M = C\Delta x\Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2}{2} + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$$

in cui C è un parametro solitamente compreso tra 0.10 e 0.20, ma può anche essere fissato a zero se il passo di griglia è molto piccolo. I vantaggi dell'utilizzo della relazione di Smagorinsky sono che C è adimensionale, che A_M decresce con un incremento della risoluzione e che A_M è piccolo se i gradienti di velocità sono piccoli.

Le equazioni del modello sono discretizzate su una griglia staggered "C" di Arakawa. Per la griglia orizzontale sono utilizzate coordinate curvilinee ortogonali ma può essere facilmente implementato anche un sistema di coordinate rettilinee, che è stato adottato nel presente studio.

Considerando un sistema di coordinate cartesiano, la superficie libera ed il fondo sono localizzati rispettivamente a $z = \eta(x,y,t)$ ed a $z = -H(x,y)$.

Le equazioni in coordinate sigma (Fig.9) sono basate sulle seguenti trasformazioni:

$$\begin{aligned} x^* &= x; \\ y^* &= y; \\ \sigma &= \frac{z - \eta}{H + \eta}; \\ t^* &= t. \end{aligned}$$

in cui $D \equiv H + \eta$ dove $H(x,y)$ è la topografia sul fondo ed $\eta(x,y,t)$ è l'elevazione superficiale.

Inoltre σ assume valori decrescenti da $z = \eta$, dove $\sigma = 0$, a $z = H$, dove $\sigma = -1$.

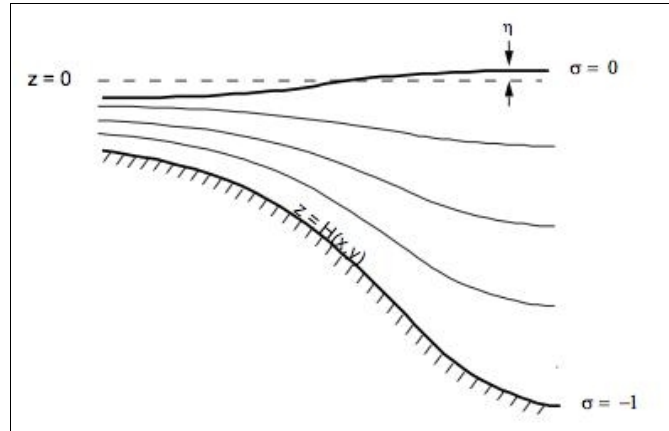


Figura 9: Sistema di coordinate sigma (POM's user guide, G. Mellor).

Il vantaggio principale dell'utilizzo del sistema di coordinate sigma è che si ottiene una rappresentazione della topografia del fondo lisciata ed risulta utile se si considera un dominio caratterizzato da una significativa variabilità nella topografia.

Tuttavia uno svantaggio dell'uso di modelli in coordinate sigma è l'esistenza di un errore numerico del gradiente di pressione baroclino che viene calcolato con la seguente formula (Mellor *et al.*, 1994):

$$\frac{\partial b^*}{\partial x^*} = \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{\sigma}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial \sigma}$$

in cui $b^* = b^*(x^*, \sigma')$.

La *buoyancy* b e' data da $b = \rho g / \rho_0$, in cui ρ è la densità, ρ_0 è la densità di riferimento, g è l'accelerazione di gravità.

La tecnica delle differenze finite con cui viene calcolata la derivata introduce un errore di troncamento dato da (Mellor *et al.*, 1994):

$$E\left(\frac{\partial b^*}{\partial x^*}\right) = \frac{H}{4} \frac{\partial_x H}{\partial x} \left[\left(\frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \right) + \frac{\sigma H}{3} \left(\frac{\partial^3 b}{\partial z^3} \right) + \dots \right] \times \left\{ (\partial \sigma)^2 - \sigma^2 \left(\frac{\partial_x H}{H} \right) \right\}$$

Come si evince dalla formula, l'errore aumenta proporzionalmente a dH/dx e quindi è maggiore laddove la batimetria non è sufficientemente lisciata.

3.2 II LAWAM

Il moto di un fluido può essere descritto in un sistema di riferimento euleriano o lagrangiano. Il metodo euleriano descrive l'andamento temporale delle grandezze in un dato punto dello spazio e utilizza derivate euleriane ($\delta/\delta t$) indipendenti dalle derivate spaziali. Il metodo lagrangiano descrive l'andamento temporale delle grandezze seguendo le traiettorie degli elementi fluidi, per cui le derivate lagrangiane (d/dt) tengono anche conto del moto del fluido.

L'uso di un sistema di riferimento lagrangiano nello studio della dispersione, permette di fissare l'attenzione sulle traiettorie delle particelle che passano per la sorgente di inquinante e che contribuiscono quindi direttamente al suo trasporto.

L'utilizzo di un modello lagrangiano offre numerosi vantaggi rispetto ad un modello euleriano. In primo luogo la soluzione ottenuta con un metodo lagrangiano è sempre conservativa e mai negativa, mentre il metodo euleriano è suscettibile ad una eccessiva dispersione numerica e a oscillazioni artificiali per problemi in cui dominano i processi avvevativi o con forti gradienti sul campo di concentrazione iniziale. In secondo luogo, se la sorgente di inquinante non occupa l'intero dominio, un modello lagrangiano può essere più efficiente da un punto di vista computazionale rispetto al modello euleriano. (*D. Spivakovskaya et al., 2007*).

Le particelle considerate sono porzioni di fluido con dimensioni maggiori della distanza media delle molecole, in modo da considerare il fluido continuo e sufficientemente piccole da trascurare le variazioni interne di pressione e di velocità. In questo modo possono essere considerate puntiformi nelle equazioni del moto. Inoltre si assume che le particelle si muovano indipendentemente l'una dall'altra (*single particle model*).

La traiettoria di una particella passiva in un flusso turbolento può essere valutata risolvendo un sistema di equazioni stocastico non lineare rappresentato dall'Equazione di Langevin:

$$[1] \quad \begin{aligned} du^i &= a^i(\underline{x}, \underline{u}, t)dt + b^{ij}(\underline{x}, \underline{u}, t)d\xi^j, \\ dx^i &= u^i dt, \end{aligned}$$

in cui:

t = tempo di volo;

\underline{x} = posizione della particella;

\underline{u} = velocità della particella;

i, j = indici degli assi.

I termini a e b includono la struttura della turbolenza e rappresentano rispettivamente il termine di *drift* ed il termine diffusione. Il termine $d\xi$ è una forzante stocastica, scorrelata rispetto alla velocità.

a e b sono determinate da

$$\frac{\partial g}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x^i} (u^i g) - \frac{\partial}{\partial u^i} (a^i(\underline{x}, \underline{u}, t) g) + \frac{\partial^2}{\partial u^i \partial u^j} (B^{ij}(\underline{x}, \underline{u}, t) g).$$

in cui:

$$B^{ij} = 1/2(b^{ik} b^{jk});$$

$$g = g(\underline{x}, \underline{u}, t)$$

Il termine g è la *Probability Density Function* (PDF) dell'inquinante ovvero la concentrazione e g_w è la PDF del fluido.

L'incognita a si ottiene assumendo che l'equazione sia risolta quando $g = g_w$.

Tale assunzione è nota come condizione di *buon mescolamento* (“*Well mixed criterion*”, Thomson, 1987) ed afferma che se le particelle sono ben mescolate all'inizio, devono rimanere tali.

Sostituendo g con g_w , integrando rispetto a u^i , e dividendo per g_w , l'equazione diventa:

$$a^i = \frac{1}{g_w} \left[\frac{\partial}{\partial u^j} (g_w B^{ij}) + \phi^i(\underline{x}, \underline{u}, t) \right].$$

in cui ϕ^i soddisfa :

$$\frac{\partial \phi^i}{\partial u^i} = -\frac{\partial g_w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x^i} (u^i g_w),$$

con $\phi \rightarrow 0$ se $|u| \rightarrow \infty$, poiché nella [4] g_w e le sue derivate si annullano quando la velocità $|u|$ tende all'infinito.

La velocità della particella $u^i(x,t)$ può essere descritta dividendola in due parti: u_w^i e u_f^i .

Il primo termine rappresenta la parte deterministica e corrisponde al campo di velocità euleriano in (x,t) , il secondo rappresenta le fluttuazioni turbolente intorno alla media.

L'equazione di Langevin può descrivere l'evoluzione nel tempo di u_f^i e la condizione di buon-miscelamento si applica anche a questa variabile:

$$[2] \quad dw_f = a dt + b d\xi$$

Nel caso di turbolenza gaussiana non-stazionaria Thomson (1987) ottiene la seguente formula per ϕ :

[3]

$$\begin{aligned} \frac{\phi^i}{g_w} = & \frac{1}{2} \frac{\partial V^{il}}{\partial x^l} + \frac{\partial \overline{u_w^i}}{\partial t} + \overline{u_w^l} \frac{\partial \overline{u_w^i}}{\partial x^l} + \left(\frac{1}{2} (V^{-1})^{ij} \left(\frac{\partial V^{il}}{\partial t} + \overline{u_w^m} \frac{\partial V^{il}}{\partial x^m} \right) + \frac{\partial \overline{u_w^i}}{\partial x^j} \right) (\overline{u^j} - \overline{u_w^j}) \\ & + \frac{1}{2} (V^{-1})^{ij} \frac{\partial V^{il}}{\partial x^k} (\overline{u^j} - \overline{u_w^j}) (\overline{u^k} - \overline{u_w^k}) \end{aligned}$$

In cui V rappresenta la matrice di covarianza della turbolenza e V^{-1} indica l'inverso quindi si ha:

$$[4] \quad a^i = -B^{ij} (V^{-1})^{jk} (\overline{u^k} - \overline{u_w^k}) + \frac{\phi^i}{g_w}.$$

Il LAWAM integra la [2] in ciascuno dei tre assi indipendentemente. La soluzione è consistente con la [3] e la [4], quando la velocità della particella è suddivisa in valore medio e fluttuazione, V è diagonale e si trascura il gradiente trasversale delle varianze di velocità.

4. I DATI SATELLITARI

Introduzione

La tecnica del *Remote Sensing* permette di acquisire informazioni ed immagini a distanza, da satelliti o da aerei. La radiazione elettromagnetica generata dall'oggetto osservato, si propaga e viene misurata e registrata da un sensore remoto. Analizzando ed interpretando tali misure di campo elettromagnetico è possibile risalire alle proprietà di interesse dell'oggetto. Il *Remote Sensing* permette di acquisire informazioni di diverso tipo sull'ambiente terrestre: su un corpo d'acqua e' possibile studiare e monitorare ad esempio la qualità dell'acqua, la temperatura superficiale del mare e la concentrazione di clorofilla, e sulla superficie terrestre si possono stimare fenomeni globali come la desertificazione, la deforestazione, gli incendi, e locali, come lo sviluppo urbano, l'uso del territorio e le frane. Uno dei vantaggi dell'utilizzo dei dati satellitari è che permette di osservare vaste aree geografiche in un tempo relativamente breve, fornendo una visione sinottica dei fenomeni studiati. La tecnica del *Remote Sensing* consente inoltre di ottenere dati da regioni altrimenti inaccessibili e rende visibili fenomeni regionali, invisibili dalla superficie terrestre.

In questo studio è stata effettuata una indagine preliminare per determinare se fosse possibile utilizzare i dati di temperatura superficiale del mare acquisiti da satellite, per forzare il modello di circolazione. Lo scopo di tale indagine è quello di capire se le osservazioni satellitari ricostruissero con sufficiente dettaglio la variabilità mensile della temperatura e quanto tali dati si accordassero con i dati di temperatura superficiale del mare rilevati con metodi di misura diretti. I dati satellitari qui analizzati sono stati acquisiti dal MODIS (*Moderate Resolution Image Spectroradiometer*) e i dati in situ utilizzati sono quelli rilevati dal sensore di temperatura delle stazioni della Rete Mareografica Nazionale. Verrà dunque illustrato il confronto tra i dati in situ e i dati satellitari per l'anno 2007.

4.1 La temperatura superficiale

La SST (*Sea Surface Temperature*) è la temperatura del mare misurata in superficie. Tuttavia la sua definizione operativa cambia a seconda dello strumento di misura utilizzato per rilevarla. Esistono infatti numerose tecniche di misura. In questo studio sono stati utilizzati e posti a confronto i dati orari di SST rilevati dai sensori delle stazioni della Rete Mareografica Nazionale, che misurano la temperatura ad un metro di profondità e i dati satellitari acquisiti dal MODIS che misura la *skin temperature* ovvero la temperatura riferita al sottilissimo strato più superficiale del mare dello spessore di pochi micron.

Poiché le misure dirette e le misure satellitari rilevano la temperatura a differenti profondità, i dati satellitari possono discostarsi dai dati rilevati *in situ*. Tale differenza è dovuta alla concomitanza di due fenomeni schematicamente rappresentati in figura 10 (Fairall et al., 1996): il raffreddamento superficiale (Profili A e B) ed il riscaldamento superficiale (Profilo B).

Il raffreddamento superficiale causato dagli scambi di calore all'interfaccia aria-acqua, provoca una diminuzione della *skin temperature* di qualche decimo di grado; tale fenomeno è presente durante tutto l'arco della giornata e si riscontra in una sottostima del dato acquisito da satellite. Il riscaldamento superficiale è dovuto al fatto che gli strati più superficiali si riscaldano maggiormente a causa dell'irraggiamento solare. Tale fenomeno a differenza del precedente può originare variazioni maggiori, anche fino a 3°C ed è molto difficile da modellizzare, poiché l'entità del riscaldamento e la profondità dello strato interessato dipendono non solo dall'irraggiamento solare ma anche dai meccanismi di rimescolamento indotti dalla turbolenza che caratterizza lo strato limite marino (Melani et al., 2007).

Inoltre, come si vedrà in seguito, i dati satellitari di SST sono affetti da un errore dell'ordine di 0.3-0.5°C causato dall'incertezza nella determinazione della copertura nuvolosa e dell'assorbimento da parte del vapore acqueo di una parte della radiazione emessa.

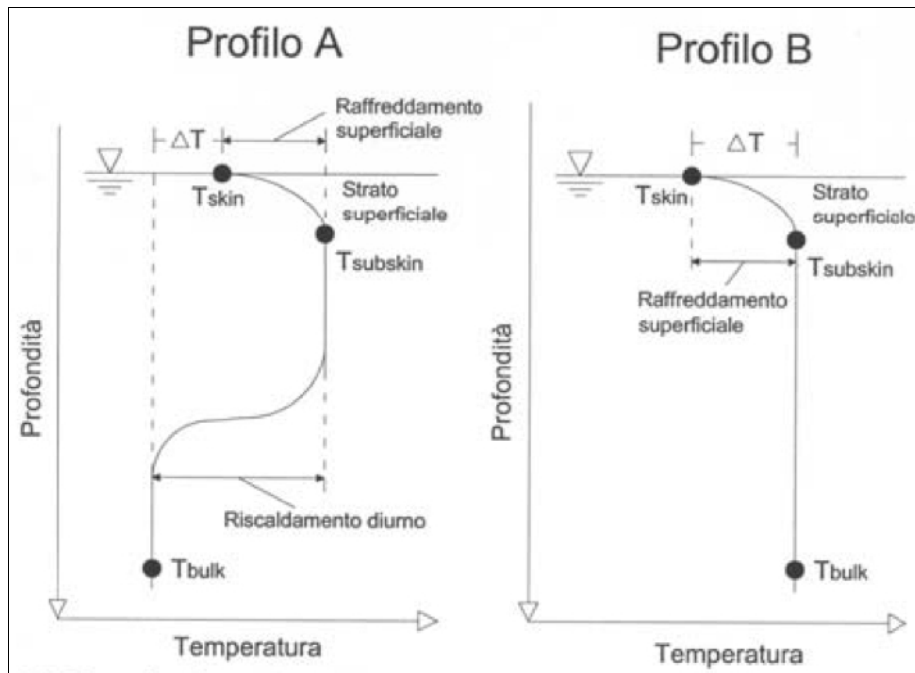


Figura 10: Rappresentazione schematica dei profili di temperatura del mare in funzione della profondità degli strati superficiali.

4.2 La temperatura superficiale: dati satellitari

I dati satellitari di temperatura superficiale sono stati acquisiti dal *MODIS* (*Moderate Resolution Image Spectroradiometer*) lo spettrometro che equipaggia i satelliti polari *AQUA EOS* (*Earth Observing System*) e *TERRA EOS* della NASA. I due satelliti (Fig.11-12) percorrono un'orbita eliosincrona (Fig.13), ovvero cambiano la loro inclinazione in modo tale da sorvolare la stessa area alla stessa ora solare. In particolare il satellite *TERRA* attraversa l'equatore da nord a sud in orbita discendente alle 10:30 (ora locale) di mattina, mentre *AQUA*, in orbita ascendente, quindi da sud a nord attraversa l'equatore alle 1:30 (ora locale) del pomeriggio. Il *MODIS* ha un intervallo di acquisizione dei dati ripartito in 36 bande a lunghezza d'onda diversa ed una risoluzione spaziale di 250 m in due bande (canali 1-2), di 500 m in 5 bande (canali 3-7) e di 1 km in 29 bande (canali 8-36).



Figura 11: AQUA EOS (Earth Observing System) NASA



Figura 12: TERRA EOS (Earth Observing System) NASA

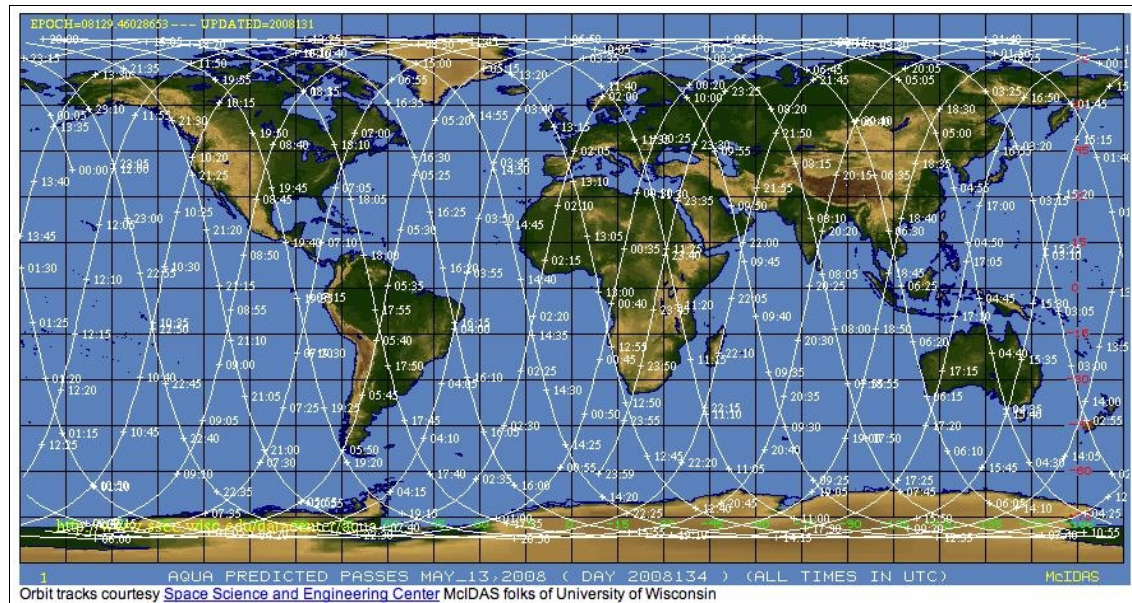


Figura 13: Orbite dei satelliti TERRA e AQUA della NASA.

I dati del MODIS sono disponibili sotto forma di vari livelli:

- Dati di Livello 0: dati grezzi di radianza;
- Dati di Livello 1: dati di radianza in 36 bande calibrati e geolocalizzati;
- Dati di Livello 2: prodotti derivati dall'analisi multispettrale su differenti canali;
- Dati di Livello 3: prodotti derivati dai dati accumulati (*binned data*) corrispondenti a periodi di un giorno, 3 mesi, 8 giorni, un mese, una stagione o un anno.

Nelle figure 14-19 sono rappresentati rispettivamente il bin giornaliero, il bin su tre giorni, su 8 giorni, su un mese, su una stagione e su un anno. Il *daily bin* è ottenuto considerando tutti i dati disponibili in 24 ore. Si noti come i dati sono notevolmente disomogenei nello spazio poiché le orbite del satellite sono più distanti della larghezza del *Field of View (scan)*, come si può osservare dalla figura 13.

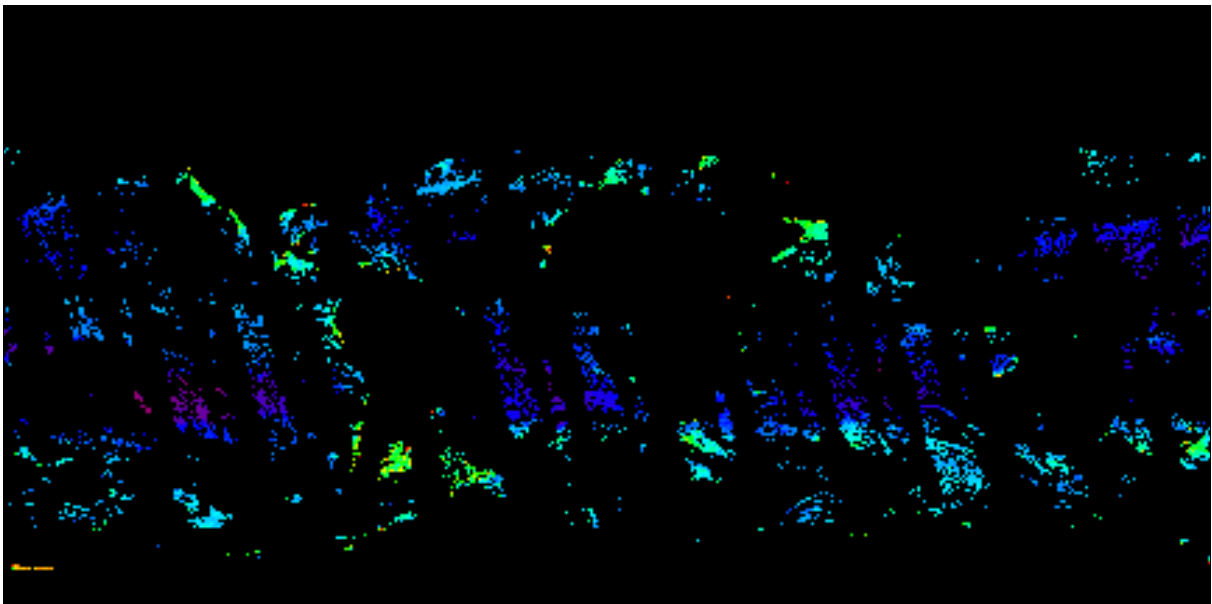


Figura 14: Bin giornaliero (Daily bin).

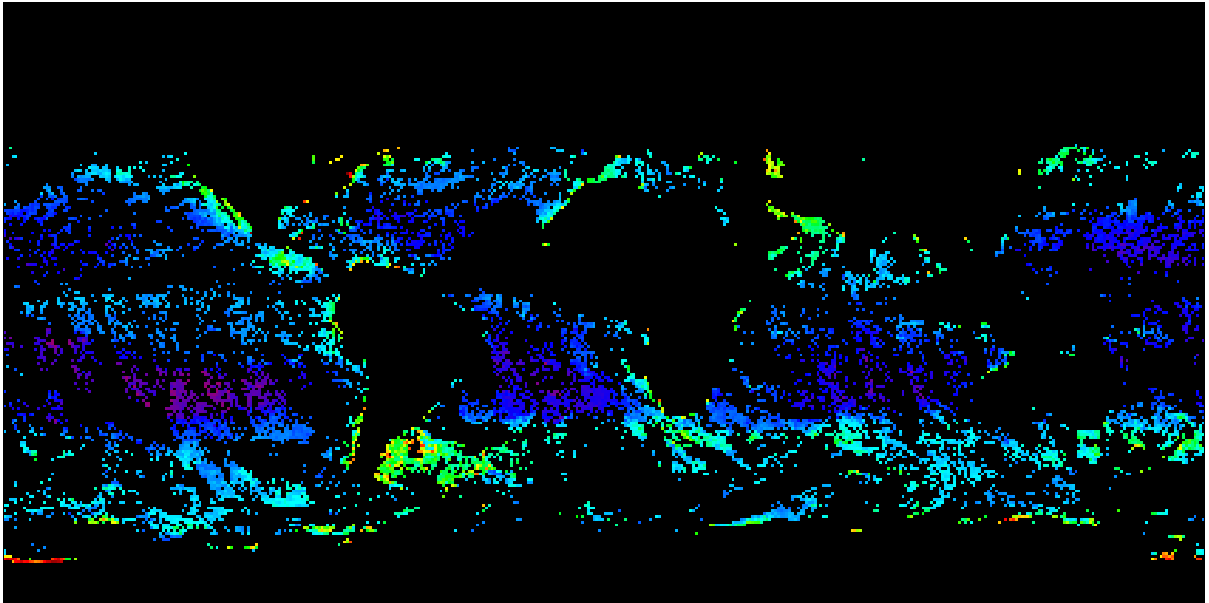


Figura 15: Bin su 3 giorni (3-day bin).

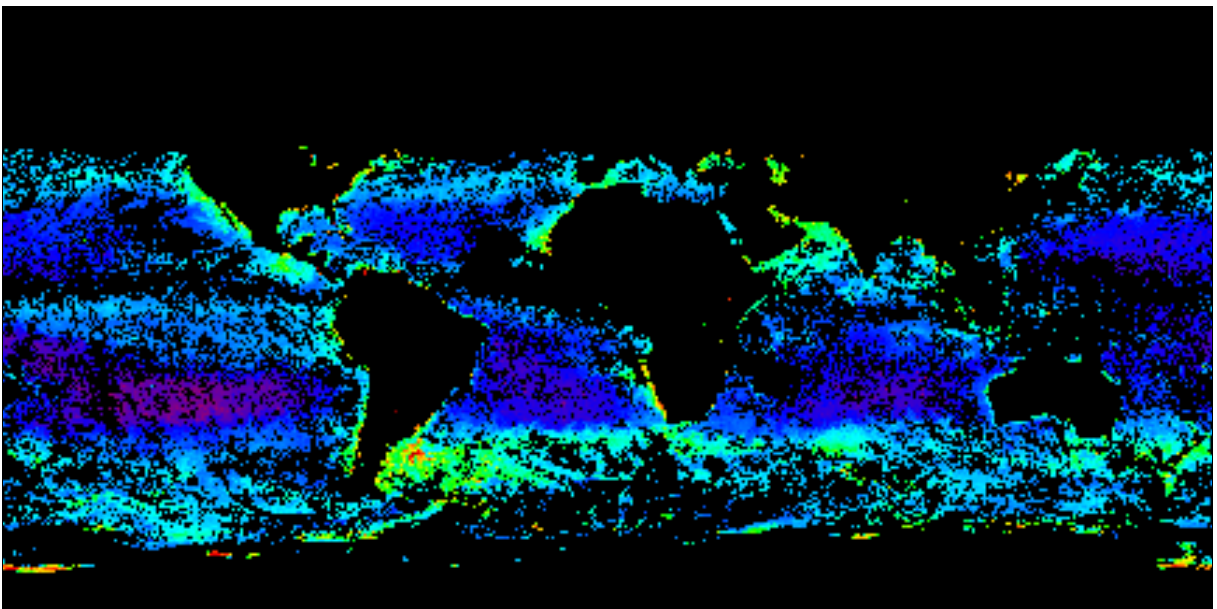


Figura 16:Bin su 8 giorni (weekly bin).

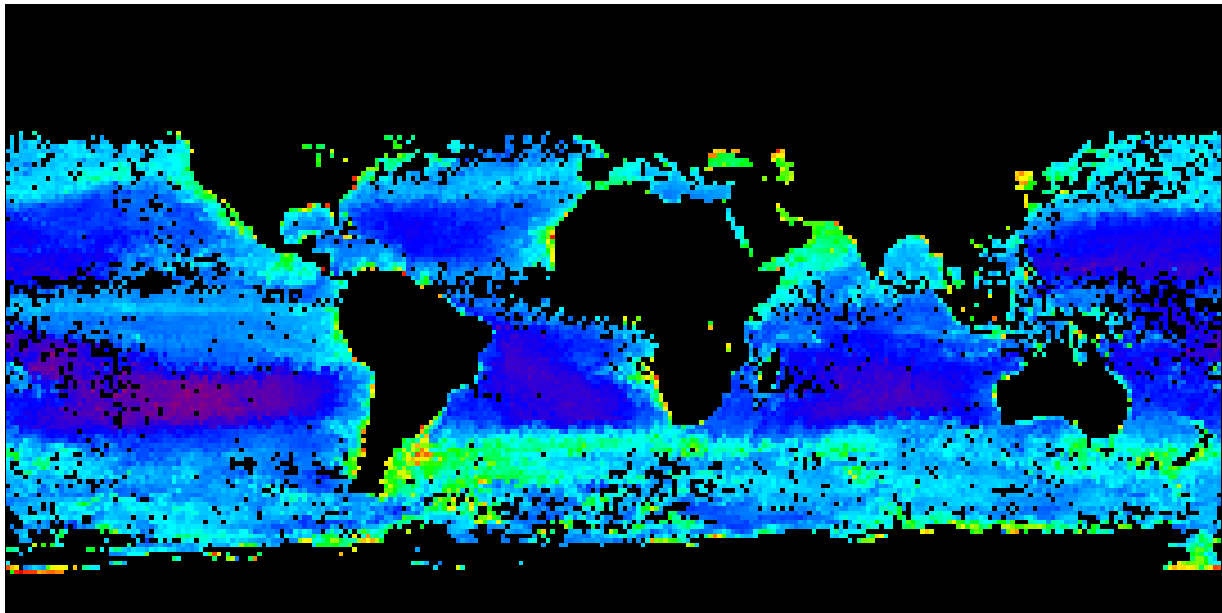


Figura 17: Bin mensile (Monthly bin).

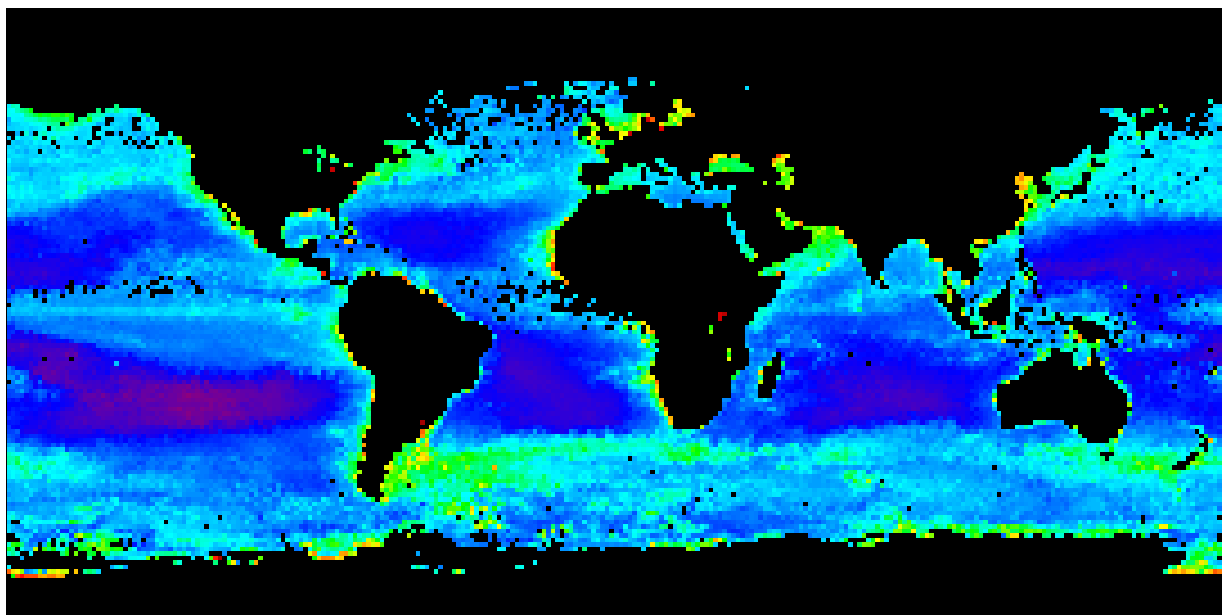


Figura 18: Bin stagionale (Seasonal bin).

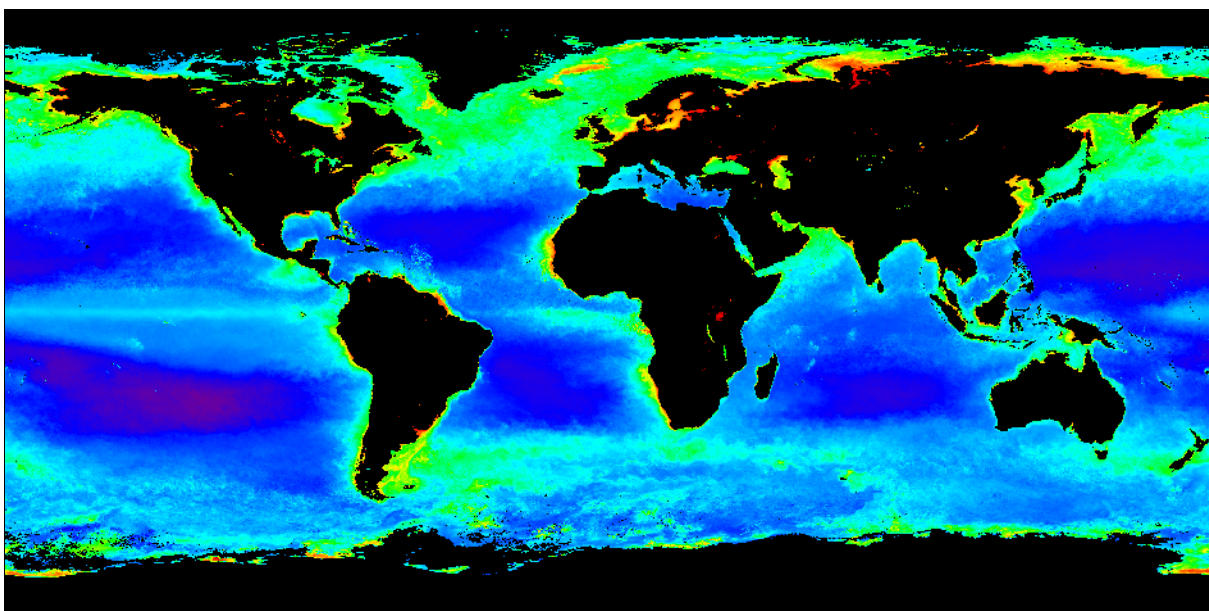


Figura 19: Bin annuale (Yearly bin).

4.3 La temperatura superficiale: osservazioni in situ

Per effettuare un confronto tra i dati acquisiti da satellite e le osservazioni di temperatura superficiale in situ, sono stati utilizzati i dati rilevati dal sensore delle stazioni della Rete Mareografica Nazionale (Fig.24). La RMN è gestita dall'ISPRA ex-APAT ed è costituita da 26 stazioni di misura (Fig.20-22-23-24), uniformemente distribuite sul territorio nazionale e ubicate prevalentemente all'interno di strutture portuali. I parametri marini rilevati sono il livello del mare e la temperatura superficiale dell'acqua. Il sensore di temperatura dell'acqua è un termometro a resistenza con elemento sensibile in platino (Pt100) caratterizzato da un campo di misura compreso tra -40 e 60°C ed una precisione dell'ordine di 0.1°C (Fig.21).



Figura 20: Sensore di temperatura superficiale del mare delle stazioni della RMN



Figura 21: Stazione mareografica di Cagliari.

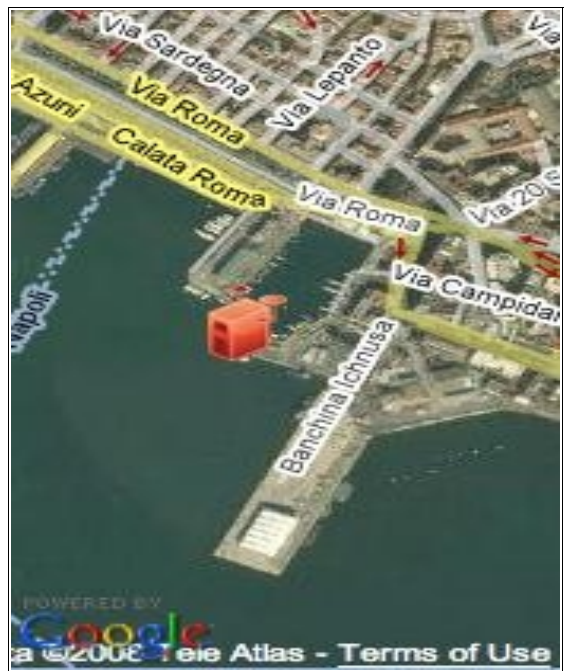


Figura 22: Ubicazione della stazione mareografica di Cagliari all'interno del porto.

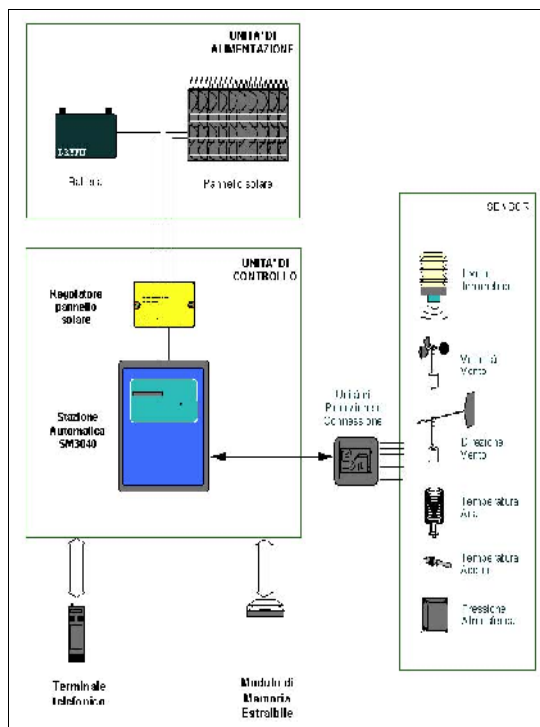


Figura 23: Schema della struttura di una stazione periferica della RMN.

4.4 Confronto tra i dati

Lo scopo di tale indagine è stata quella di determinare se fosse possibile utilizzare la temperatura superficiale rilevata dal satellite come forzante del POM e quanto tali dati si accordassero con quelli rilevati direttamente in situ con il sensore della Rete Mareografica Nazionale. Sono stati dunque effettuati i seguenti confronti per l'anno 2007 e per le stazioni di Livorno, Palermo, Cagliari, Ravenna, Trieste e Venezia:

- Confronto tra il bin mensile del MODIS e la media mensile dei dati orari della RMN;
- Confronto tra il bin annuale del MODIS e la media annuale dei dati orari della RMN;
- Confronto tra la media dei bin mensili del MODIS e la media annuale dei dati orari della RMN.

Confronto tra il bin mensile dei dati del MODIS e la media mensile dei dati orari della RMN

Per tutte le stazioni prese in considerazione si osserva un accordo tra il bin mensile satellitare e la media mensile dei dati in situ nel rappresentare la variabilità annuale della temperatura superficiale. Analizzando i dati mese per mese si nota che nel Mar Tirreno relativamente ai mesi estivi del 2007 (Luglio e Agosto) e al mese di Gennaio, a causa dell'assenza di copertura nuvolosa, il confronto tra i dati di temperatura superficiale rilevati da satellite e i dati misurati in situ nelle stazioni della RMN risulta contenuto entro l'errore dello strumento del MODIS; si osserva dunque un buon accordo tra i dati. Relativamente all'alto Adriatico invece la sovrastima o la sottostima dei dati satellitari rispetto ai dati in situ risulta di maggiore entità, poiché l'area è più piccola ed il satellite effettua un minor numero di passaggi.

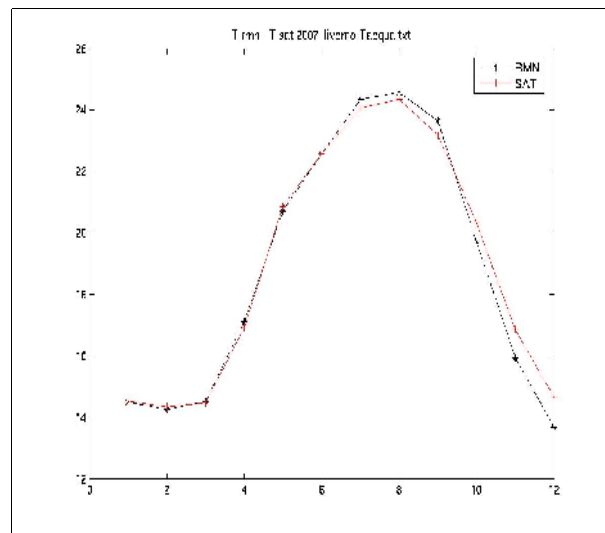
In particolare, nel mese di Gennaio nel Mar Tirreno, i dati satellitari si accordano con i dati rilevati in situ: nelle stazioni di Livorno, Palermo, e Cagliari il bias (differenza tra il valore di temperatura del bin mensile del MODIS e il valore medio mensile misurato nella stazione RMN) assume rispettivamente il valore di 0.0°C, -0.3°C, -0.6°C, mentre per le stazioni di Ravenna, Trieste e Venezia il bias è rispettivamente di -1.1°C , -0.9°C , -1.1°C.

Negli altri mesi del 2007 si osservano, sia per il Mar Tirreno che per l'alto Adriatico, scostamenti superiori all'errore del MODIS a causa della frequente copertura nuvolosa che ha compromesso la corretta stima della temperatura media. Sia per il Mar Tirreno che per il Mar Adriatico si nota che il bias è maggiore nei mesi di transizione. In primavera ed autunno si riscontra infatti una non-stazionarietà della temperatura; in tali condizioni le osservazioni mancanti dovute alla copertura nuvolosa possono condizionare sensibilmente la stima del bin mensile. In particolare, in riferimento al mese di aprile, si ha un bias di $+0.8^{\circ}\text{C}$ nella stazione di Palermo ed un bias di -0.8°C nella stazione di Cagliari. Per quanto riguarda l'alto Adriatico lo scostamento anche in questo caso è più accentuato, assumendo per le stazioni di Ravenna, Trieste e Venezia i seguenti valori: $+1.2^{\circ}\text{C}$, $+1.2^{\circ}\text{C}$, $+0.8^{\circ}\text{C}$.

In riferimento al periodo autunnale per il mese di Ottobre nelle stazioni di Livorno, Palermo e Cagliari si osservano i seguenti scostamenti di temperatura: $+0.6^{\circ}\text{C}$, $+1.6^{\circ}\text{C}$, -0.7°C ; per le stazioni di Ravenna Trieste e Venezia il bias assume i valori $+0.7^{\circ}\text{C}$, $+1.0^{\circ}\text{C}$, $+2.9^{\circ}\text{C}$.

Le tabelle e i grafici in Fig.25-26-27 illustrano i dati del bin mensile, la media annuale dei dati orari della RMN, la loro differenza e la rappresentazione grafica.

LIVORNO	Tsat	Trmn	Tsat-Trmn °C
GENNAIO	14.5	14.5	0.0
FEBBRAIO	14.3	14.2	+0.1
MARZO	14.5	14.5	0.0
APRILE	16.9	17.1	-0.2
MAGGIO	20.9	20.7	+0.2
GIUGNO	22.6	22.6	0.0
LUGLIO	24.1	24.4	-0.3
AGOSTO	24.3	24.6	-0.3
SETTEMBRE	23.2	23.6	-0.4
OTTOBRE	20.3	19.7	+0.6
NOVEMBRE	16.8	15.9	+0.9
DICEMBRE	14.6	13.7	+0.9



PALERMO	Tsat	Trmn	Tsat-Trmn °C
GENNAIO	16.6	16.9	-0.3
FEBBRAIO	15.6	15.7	-0.1
MARZO	15.3	15.7	-0.4
APRILE	17.9	17.1	+0.8
MAGGIO	20.5	20.0	+0.5
GIUGNO	23.6	22.8	+0.8
LUGLIO	27.0	26.2	+0.8
AGOSTO	27.1	27.0	+0.1
SETTEMBRE	25.5	25.8	-0.3
OTTOBRE	24.2	22.6	+1.6
NOVEMBRE	19.3	18.7	+0.6
DICEMBRE	14.8	15.7	-0.9

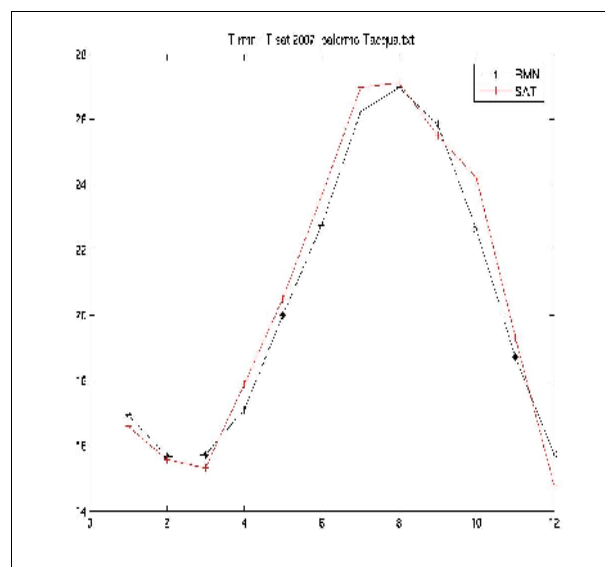
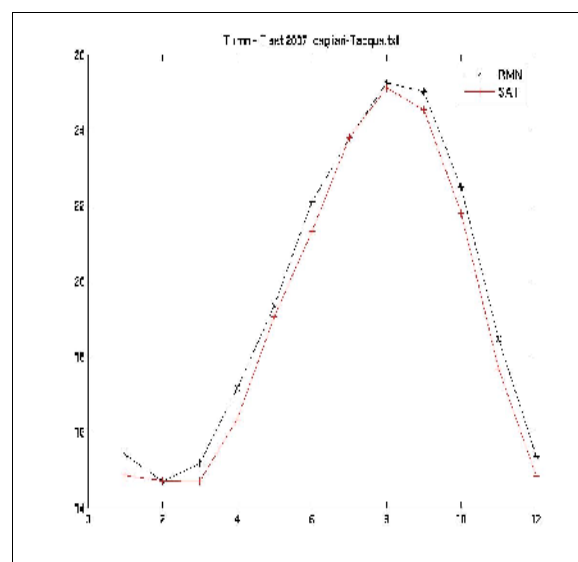


Figura 25: Tabella di confronto e grafico di confronto per le stazioni di Livorno e Palermo

CAGLIARI	Tsat	Trmn	Tsat-Trmn °C
GENNAIO	14.8	15.4	-0.6
FEBBRAIO	14.7	14.7	0.0
MARZO	14.7	15.1	-0.4
APRILE	16.3	17.1	-0.8
MAGGIO	19.0	19.3	-0.3
GIUGNO	21.3	22.1	-0.8
LUGLIO	23.8	23.8	0.0
AGOSTO	25.1	25.3	-0.2
SETTEMBRE	24.5	25.0	-1.5
OTTOBRE	21.8	22.5	-0.7
NOVEMBRE	17.7	18.5	-0.8
DICEMBRE	14.8	15.4	-0.6



RAVENNA	Tsat	Trmn	Tsat-Trmn °C
GENNAIO	9.5	10.6	-1.1
FEBBRAIO	9.6	10.7	-1.1
MARZO	12.6	13.0	-0.4
APRILE	17.6	16.4	+1.2
MAGGIO	21.3	19.8	+1.5
GIUGNO	23.8	23.2	+0.6
LUGLIO	25.4	25.8	-0.4
AGOSTO	25.6	26.3	-0.7
SETTEMBRE	22.8	23.1	-0.3
OTTOBRE	19.7	19.0	+0.7
NOVEMBRE	13.0	13.0	0.0
DICEMBRE	7.8	9.1	-1.3

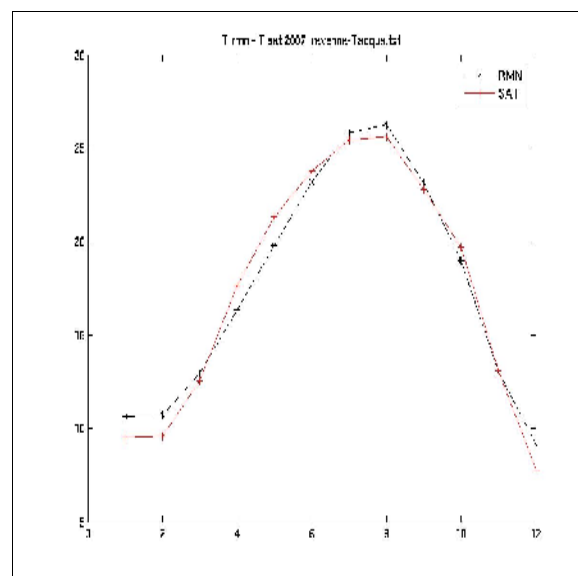
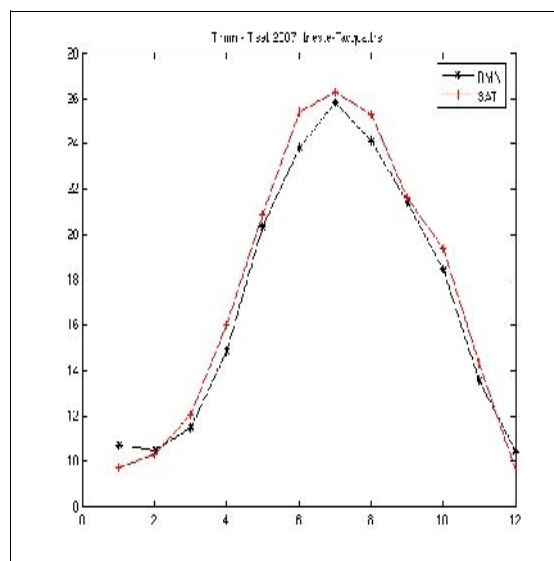


Figura 26: Tabella di confronto e grafico di confronto per le stazioni di Cagliari e Ravenna

TRIESTE	Tsat	Trmn	Tsat-Trmn °C
GENNAIO	9.8	10.7	-0.9
FEBBRAIO	10.3	10.5	-0.2
MARZO	12.0	11.5	+1.5
APRILE	16.0	14.8	+1.2
MAGGIO	20.9	20.3	+0.6
GIUGNO	25.4	23.8	+1.6
LUGLIO	26.3	25.8	+0.5
AGOSTO	25.3	24.1	+1.2
SETTEMBRE	21.6	21.5	+0.1
OTTOBRE	19.4	18.4	+1.0
NOVEMBRE	14.3	13.6	+0.7
DICEMBRE	9.6	10.4	-0.8



VENEZIA	Tsat	Trmn	Tsat-Trmn °C
GENNAIO	10.1	11.2	-1.1
FEBBRAIO	10.4	11.3	-0.9
MARZO	12.3	10.6	+1.7
APRILE	16.5	15.7	+0.8
MAGGIO	20.9	20.9	0.0
GIUGNO	24.1	24.5	-0.4
LUGLIO	26.1	27.3	-1.2
AGOSTO	25.6	26.3	-0.7
SETTEMBRE	22.6	21.7	+0.9
OTTOBRE	18.9	16.0	+2.9
NOVEMBRE	12.6	11.9	0.7
DICEMBRE	9.9	10.2	-0.3

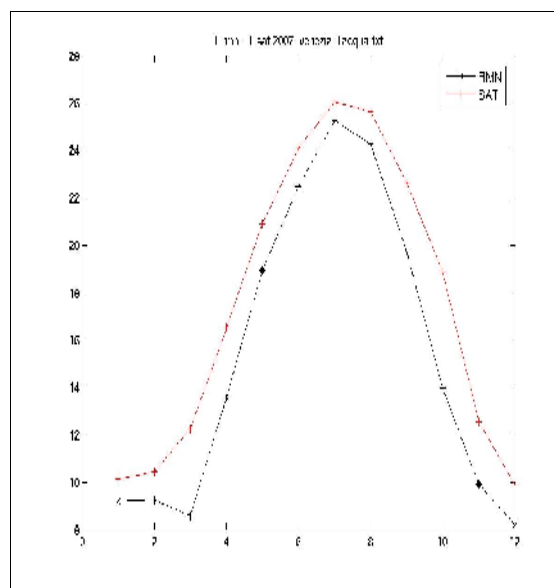


Figura 27: Tabella di confronto e grafico di confronto per le stazioni di Trieste e Venezia

A titolo di esempio in Fig. 28-29 è mostrato l'andamento della temperatura superficiale oraria rilevata in situ presso la stazione di Ravenna nei mesi di maggio (mese di transizione) e dicembre (mese invernale).

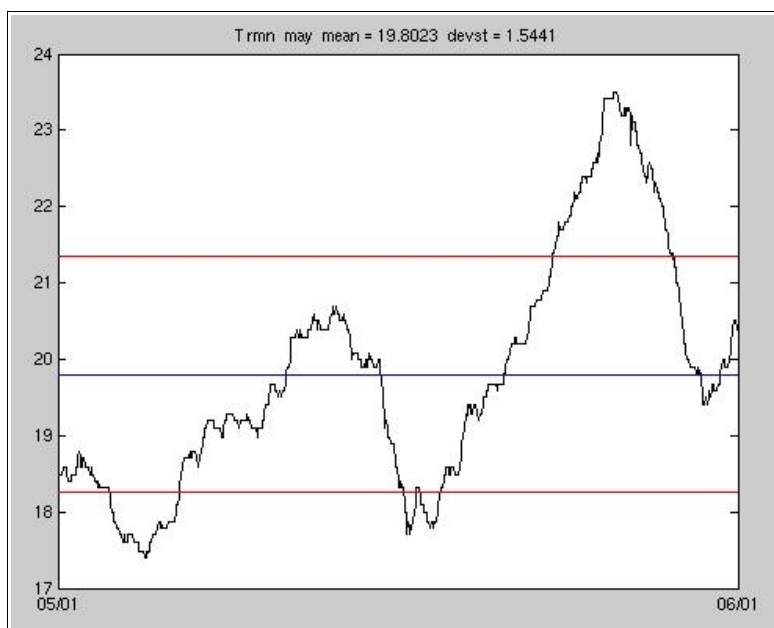


Figura 28: Grafico della temperatura oraria nel mese di Maggio, Stazione di Ravenna.

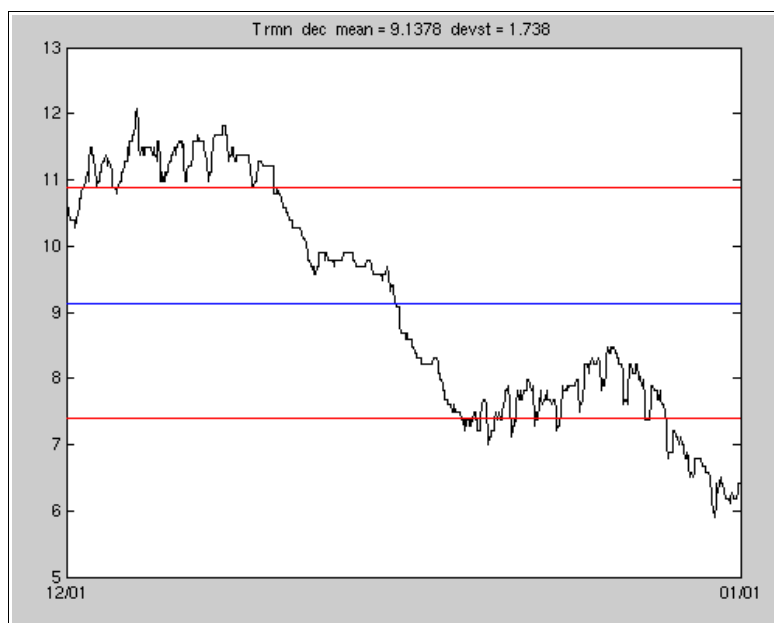


Figura 29: Grafico della temperatura oraria nel mese di Dicembre, Stazione di Ravenna.

Confronto tra il bin annuale del MODIS e la media annuale dei dati orari della RMN

Dal confronto tra il bin annuale satellitare e la media annuale dei dati orari rilevati in situ (Tabella 3) si evince una sovrastima della temperatura satellitare in tutte le stazioni considerate ad eccezione di Livorno, dove la misura satellitare è sottostimata di circa -0.3°C . In particolar modo la sovrastima per la stazione di Trieste è di circa 1°C e per le stazioni di Ravenna e Venezia supera i 3°C . Tale errore sulla stima della temperatura è attribuibile ai problemi analizzati nel caso precedente; il fattore condizionante è costituito anche in questo caso dal numero totale dei giorni nuvolosi durante i quali che hanno compromesso la corretta stima della temperatura media. Si noti inoltre come la differenza tra il dato satellitare ed il dato rilevato in situ sia più rilevante nell'alto Adriatico, dove l'area è piccola ed il satellite effettua un minor numero di passaggi.

<u>STAZIONI</u>	<u>Tsat</u>	<u>Trmn</u>	<u>Tsat-Trmn °C</u>
LIVORNO	18.5	18.8	- 0.3
PALERMO	21.5	20.4	+ 1.1
CAGLIARI	20.4	19.5	+ 0.9
RAVENNA	20.9	17.5	+ 3.4
TRIESTE	17.9	17.0	+ 0.9
VENEZIA	20.5	17.4	+ 3.1

Tabella 3: Confronto tra il bin annuale del MODIS e la media annuale dei dati orari della RMN

Confronto tra la media dei bin mensili del MODIS e la media annuale dei dati orari della RMN

Dal confronto con la media dei bin mensili non si evince un totale accordo tra i dati rilevati in situ nelle stazioni della Rete Mareografica Nazionale, tuttavia l'entità della stima e della sottostima delle osservazioni satellitari è compresa entro il limite di accuratezza del MODIS, ad eccezione della misura per la stazione di Trieste dove l'errore è di 0.6°C. Probabilmente la causa di tale sovrastima è la stessa riscontrata nell'errore del bin annuale in riferimento all'Alto Adriatico (Tabella 4).

<u>STAZIONI</u>	<u>Tsat</u>	<u>Trmn</u>	<u>Tsat-Trmn °C</u>
LIVORNO	18.9	18.8	+ 0.1
PALERMO	20.6	20.4	+ 0.2
CAGLIARI	19.1	19.5	- 0.4
RAVENNA	17.4	17.5	- 0.1
TRIESTE	17.6	17.0	+ 0.6
VENEZIA	17.5	17.4	+ 0.1

Tabella 4: Confronto tra la media dei bin mensili del MODIS e la media annuale dei dati orari della RMN

In conclusione, lo studio dei dati per il Mar Tirreno del 2007 mostra che il bias risulta contenuto entro i limiti d'errore del MODIS. In generale, tuttavia, l'accordo tra i dati della Rete Mareografica Nazionale rilevati in situ e i bin mensili è talvolta condizionato dalla mancanza dei dati MODIS dovuta alla copertura nuvolosa. Tale situazione risulta più evidente nei periodi di transizione tra la stagione calda e la stagione fredda, quindi prevalentemente in autunno e in primavera nell'alto Adriatico. Per lo stesso motivo il bin annuale risulta meno affidabile, in particolar modo in alto Adriatico. Nella valutazione delle caratteristiche climatologiche medie annuali la media annuale dei bin mensili sembra essere dunque più affidabile, anche se per discutere adeguatamente il problema sarebbero necessarie ulteriori analisi su un periodo più lungo. In questo studio, come campo di input per il modello di circolazione, è stato utilizzato il bin mensile del MODIS per la temperatura superficiale del Gennaio 2007.

5. APPLICAZIONI

Introduzione

Il sistema di modelli descritto in precedenza è stato utilizzato nel bacino del Tirreno, in quanto rappresenta un'area fortemente interessata dal traffico marittimo di prodotti oleosi e quindi soggetta a sversamenti sia accidentali che operazionali.

In particolar modo si è deciso di implementare il sistema di modelli riproducendo con il POM la circolazione tipica della stagione invernale; come si è visto in modo più dettagliato nel secondo capitolo, il massimo valore di flusso di acque superficiali che entrano nel bacino dal Canale di Sardegna si registra durante i mesi invernali e primaverili, mentre tale flusso diminuisce durante i mesi estivi e autunnali. In particolar modo durante l'estate tutto il flusso entrante scorre lungo le coste della Tunisia verso sud portandosi nel Mediterraneo orientale, senza essere deflesso nel Tirreno. Inoltre già durante la primavera l'uscita del flusso dal Canale di Corsica inizia ad indebolirsi e dunque in tale stagione il Mar Tirreno resta isolato dal resto del Mediterraneo, risultando momentaneamente un "bacino chiuso", finché viene ricostituita la circolazione durante la stagione invernale.

Dopo aver raggiunto, in una prima fase di spin-up del POM, un campo idrodinamico che riproducesse le principali caratteristiche della circolazione generale stagionale del bacino, è stata effettuata una simulazione non stazionaria, forzando il modello con un campo di wind-stress ogni sei ore; gli output sono stati utilizzati come dati di input per il modello di dispersione lagrangiano LAWAM, insieme alle caratteristiche della sorgente dell'inquinante, ovvero le coordinate, la profondità di sversamento, la quantità e la qualità dell'inquinante e la grandezza della sorgente (areale o puntuale). Sono stati riprodotti alcuni scenari di *oil spill* in alcune zone cruciali del bacino del Tirreno, caratterizzate da una frequenza elevata di incidenti, sia perché interessate da un intenso traffico marittimo di prodotti oleosi sia perché il tratto costiero in cui sono localizzate è caratterizzato dalla presenza di oil-terminal. Nell'ambito di tale studio, il sistema di modelli è stato implementato in una configurazione non operativa, con condizioni iniziali medie, con lo scopo di descrivere alcuni scenari di rischio, in zone ritenute vulnerabili. Pur trattandosi di una fase preliminare di simulazioni, il sistema nella sua configurazione operativa può essere di largo impiego e utilità nei casi di incidente; la sua

risposta “in tempo reale” del modello può infatti indirizzare gli interventi di bonifica e di mitigazione dei danni.

Verrà di seguito descritta l' implementazione del POM e del LAWAM. Sarà mostrato il dominio delle simulazioni, i dati di input e la *sensitivity analysis* effettuata per scegliere le condizioni al contorno.

5.1 L'implementazione del POM

5.1.1 Il dominio del modello, la batimetria e le condizioni iniziali

Le condizioni iniziali utilizzate dal POM sono fornite da un preprocessore, GRID_WIND, che prepara un file di input per il modello comprendente la batimetria, i dati di vento, i dati di temperatura e di salinità.

La corrente iniziale è posta pari a zero nell'intero dominio, ma è presente una struttura termoalina data dai campi di temperatura e di salinità del MED6 relativi al mese di gennaio.

La griglia di calcolo è costituita da una matrice di 41x61x25 nodi, la cui origine è posta all'angolo nord-ovest della griglia (latitudine 43° 00' 00" e longitudine 9.3° 00' 00").

La batimetria

La batimetria è ottenuta dal database ETOPO5 (Fig. 31) del National Geophysical Data Center (NGDC). I dati batimetrici sono in metri e ciascun valore è riferito al valore centrale della cella considerata. Poiché ETOPO5 include dati acquisiti da diverse fonti e successivamente assemblati insieme, l'accuratezza dei dati risulta difficile da definire. I dati in Europa hanno una risoluzione di 5 minuti latitudine/longitudine ed una risoluzione verticale di un metro.

Nella fase di pre-processing è stata lisciata la batimetria per ridurre l'errore di gradiente di pressione, che è dovuto all'utilizzo delle coordinate sigma (*Mellor et al. 1994*) e che aumenta in corrispondenza di una batimetria troppo ripida. In Fig.30 è mostrata la batimetria lisciata utilizzata per le simulazioni, relativa al dominio del modello.

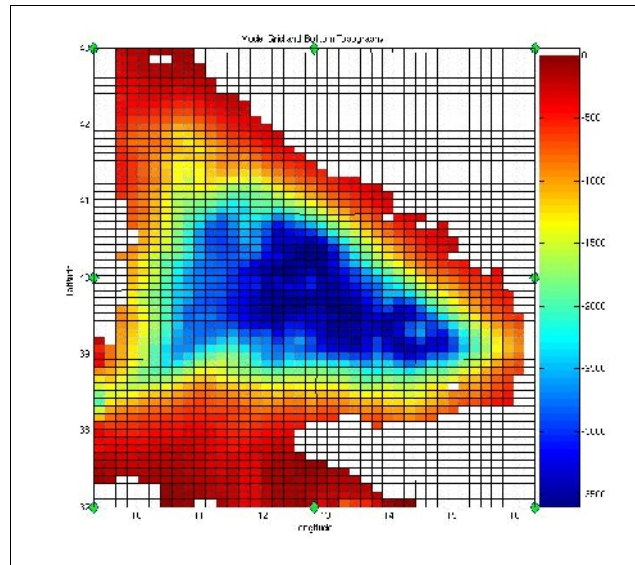


Figura 30: Topografia e griglia di calcolo del dominio (Profondita' in metri).

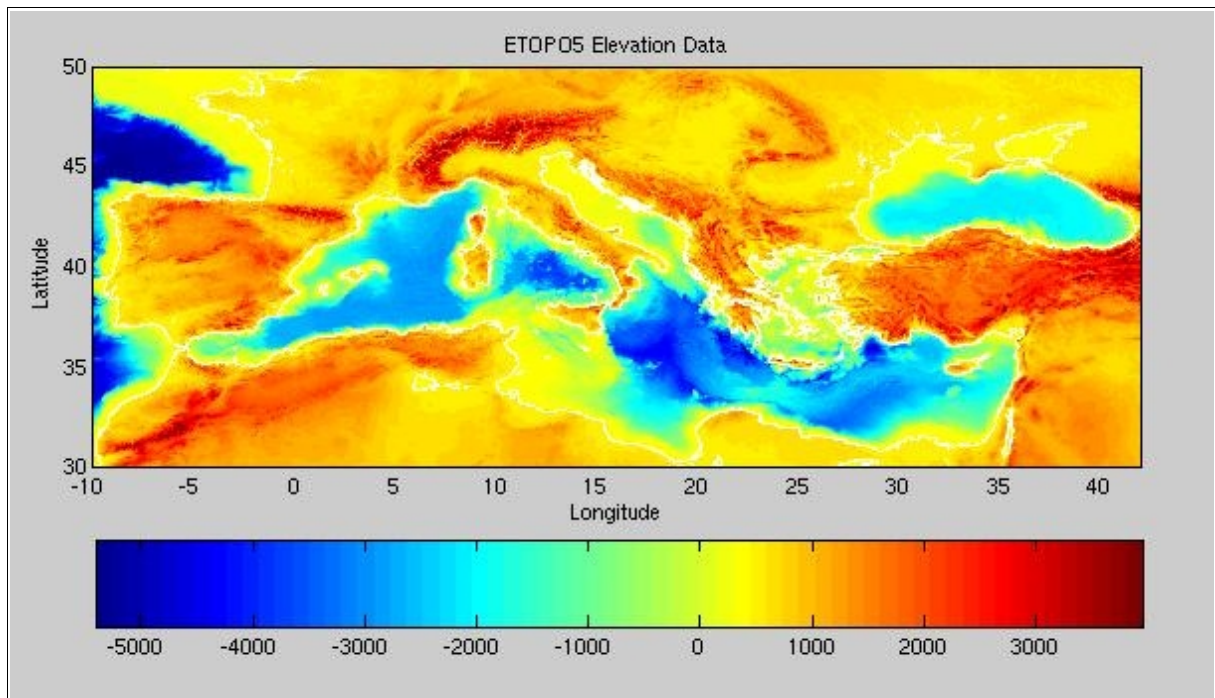


Figura 31: Batimetria ETOPO5

I dati di temperatura e salinità

Il modello e' stato inizializzato con i campi di temperatura e di salinità medi del database MED6 (*Brankart e Pinardi, 2001*). Si tratta di dati climatologici ricostruiti sulla base di un database storico idrologico MEDATLAS. I dati di temperatura e salinità sono campi tridimensionali immagazzinati sotto forma di matrici 3D su una griglia regolare di 0.25 gradi. I campi medi presentano una grande variabilità nello spazio e nel tempo, a seconda dell'area analizzata. Ad esempio sono disponibili numerosi dati per il Mar Tirreno, mentre il set di dati a disposizione è più piccolo per il Mar Ionio (*Reseghetti, 2007*).

Successivamente è stato effettuato il rilassamento superficiale con il campo di temperatura superficiale da satellite e di salinità superficiale del MED6.

In Fig.32-33 sono posti a confronto il campo di temperatura superficiale medio del MED6 e quello da satellite. Si noti come le differenze di temperatura tra la parte settentrionale e la parte meridionale del bacino del Tirreno siano più evidenti nel campo di SST rilevato da satellite ed in particolar modo come sia meglio rappresentata l'area fredda localizzata ad est delle Bocche di Bonifacio generata dai venti che soffiano verso est attraverso le Bocche e dalla presenza di un fronte termico localizzato lungo il 41° parallelo.

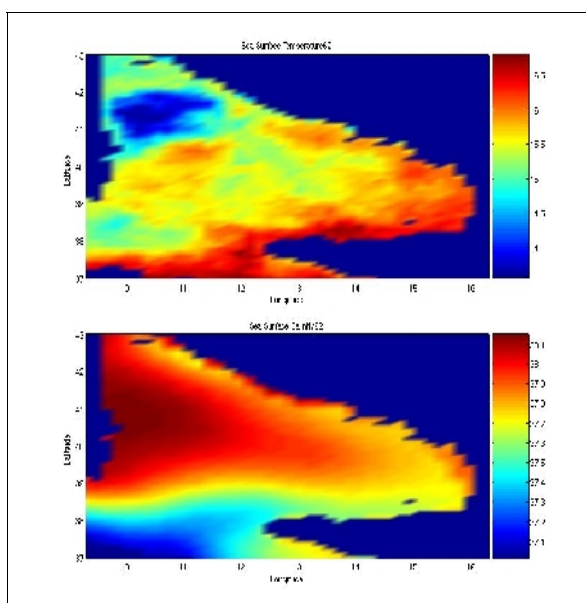


Figura 32: Campo di temperatura superficiale (MODIS) e campo di salinità superficiale (MED6).

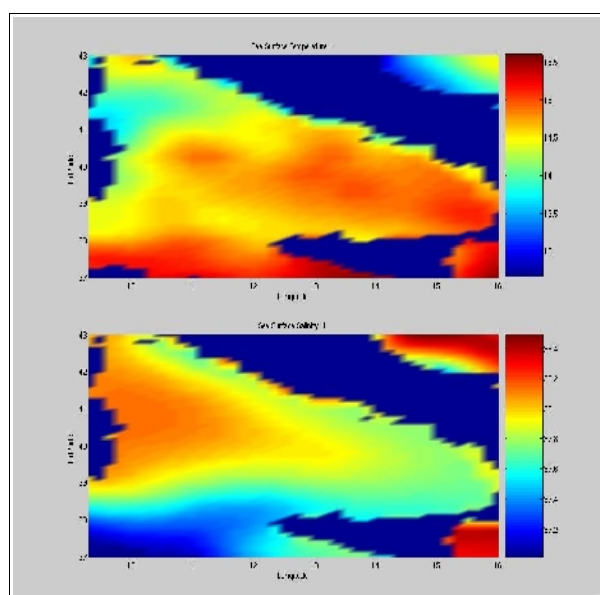


Figura 33: Campo di temperatura e salinità superficiali medie di gennaio (MED6).

I dati di vento

I dati di vento sono ottenuti dall'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Come dato di input dei run effettuati nella fase di spin-up e' stato usato il campo medio mensile di gennaio, che deriva dalla media delle analisi dell'ECMWF relative al solo mese di gennaio nella serie storica dal 1993 al 2005 (Fig. 34).

Per il run “in tempo reale” sono stati utilizzati i dati di vento relativi al mese di gennaio 2007, con un campo ogni 6 ore (Fig.35).

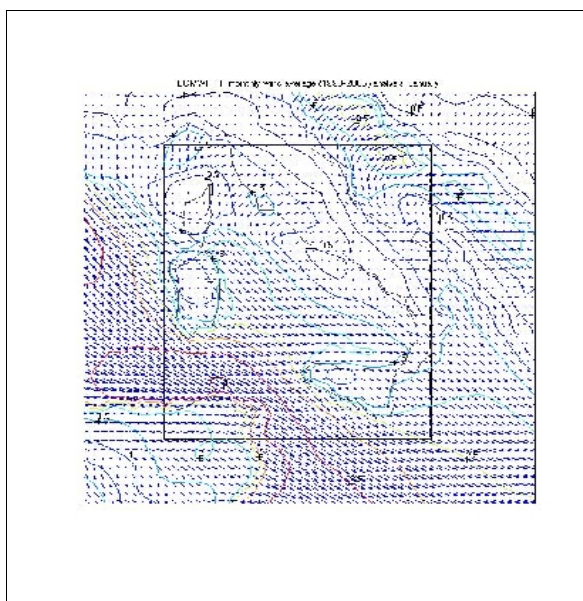


Figura 34: Campo di vento medio mensile di gennaio (ECMWF).

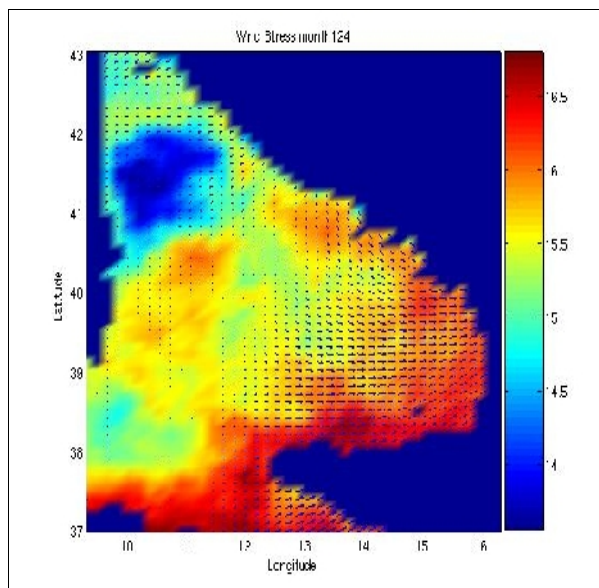


Figura 35: Campo di wind stress di gennaio 2007.

5.1.2 Le condizioni al contorno

Particolare attenzione è stata rivolta alla definizione delle condizioni al contorno (*boundary conditions*) sulla velocità della corrente in inflow ed in outflow dal bacino. E' stata effettuata una analisi di sensitività nella fase di spin-up del modello per capire come diversi valori di velocità attribuiti ai flussi in entrata e in uscita dal bacino condizionino il funzionamento del modello e quindi la circolazione generata.

Le condizioni al contorno possono essere modificate sia direttamente, agendo sulla velocità dei flussi in entrata e in uscita dal bacino, sia indirettamente, modificando la sezione delle aree attraversate dalle correnti, imponendo la velocità nulla in differenti punti del grigliato sul contorno del dominio.

Tali simulazioni sono state effettuate allo scopo di trovare il giusto equilibrio tra outflow ed inflow, in modo da riprodurre la circolazione invernale del bacino descritta in letteratura. Le condizioni al contorno ottimali sono state impiegate nella simulazione forzata inoltre con i dati di temperatura superficiale acquisiti dal satellite MODIS e riferiti al bin mensile del Gennaio 2007. Lo scopo del run di spin-up così effettuato è di ottenere, una volta raggiunto l'equilibrio del sistema, le condizioni medie per il periodo di riferimento. Il campo idrodinamico e' stato poi utilizzato per effettuare il restart di un mese con i dati di wind-stress reali riferiti al gennaio 2007 con un campo ogni 6 ore, e che e' stato utilizzato per il modello di dispersione lagrangiano LAWAM.

Verranno di seguito descritte le condizioni al contorno utilizzate nel run di spin-up invernale (RUN 1) e a titolo di esempio saranno illustrate 2 ulteriori simulazioni (RUN 2 e RUN 3) con condizioni al contorno differenti allo scopo di mostrare come la scelta della velocità dei flussi in ingresso ed in uscita dal bacino condizioni la circolazione generata dal modello.

RUN 1

Nel presente studio sono state poste due *open lateral boundaries* (condizioni al contorno aperte) che ben rappresentano la climatologia invernale della circolazione del Tirreno (Fig. 37); è stato posto un flusso in uscita da sud a nord dal Canale di Corsica, un flusso in uscita nella parte settentrionale del Canale di Sardegna da est ad ovest ed uno in entrata nella parte meridionale del Canale di Sardegna da ovest ad est. Le velocità a sud nel Canale di Sicilia sono state poste a zero poiché nei mesi invernali i flussi in entrata e quelli in uscita sostanzialmente si compensano.

Nella tabella5 sono riportati i valori utilizzati per l'area (m^2) di ciascuna sezione attraversata dal flusso, i flussi (Sv) in entrata ed in uscita dal bacino e le velocità con cui tale flusso d'acqua attraversa la sezione (m/s). In particolare per il flusso di acqua in entrata nel Mar Tirreno dalla parte meridionale del Canale di Sardegna è stata utilizzata una velocità di 0.090 m/s e per il flusso uscente dalla parte settentrionale del Canale di Sardegna e' stata scelta la velocità di 0.020 m/s.

La scelta dei valori delle velocità per i flussi che attraversano il Canale di Sardegna è stata effettuata sulla base dei dati in letteratura (*Vetrano et al.*) che evidenziano per la stagione invernale una forte corrente superficiale di acqua atlantica proveniente dal bacino di Algeria e che scorre lungo la costa della Tunisia con un massimo di velocità di 0.40 m/s, un flusso in uscita sul lato opposto del Canale di Sardegna che interessa principalmente profondità intermedie con un massimo di velocità in superficie di circa 0.15 m/s. In figura 36 è mostrata la sezione del Canale di Sardegna con la distribuzione delle velocità orizzontali.

Mediando le velocità lungo la colonna d'acqua si sono ottenuti i seguenti valori: 6.09 cm/s per la velocità del flusso in ingresso e 1.29 cm/s per la velocità del flusso in uscita. E' stata aumentata di circa 3 cm/s la velocità media in entrata e di 0.7 cm/s la velocità media in uscita per forzare la circolazione generata dal modello.

Le velocità scelte, in relazione alla sezione attraversata corrispondono ad un inflow di 2.026 Sv e un outflow di 1.280 Sv.

Per quanto riguarda la condizione al contorno sul canale di Corsica, si è utilizzato come flusso la differenza tra i flussi in entrata e in uscita dal Canale di Sardegna.

L'area delle sezioni attraversate dai flussi sono state modificate nelle varie simulazioni

scegliendo il numero e la posizione dei punti in cui la velocità del flusso è stata posta pari a zero.

In Fig.38 è mostrato il campo di elevazione superficiale e il campo di velocità superficiale del RUN1. Si riconoscono i tratti principali della circolazione invernale tipica del Tirreno; pertanto si è deciso di utilizzare le condizioni al contorno del RUN 1.

Dei risultati della simulazione con le condizioni al contorno idonee e con i dati di temperatura da satellite se ne parlerà più approfonditamente nel capitolo 6.

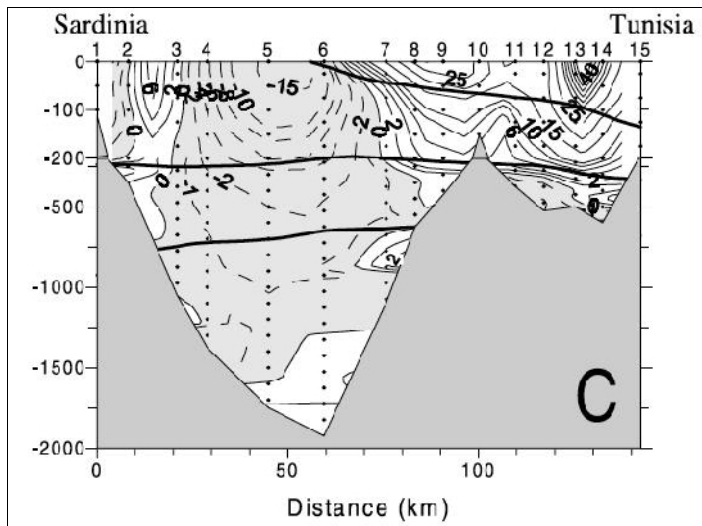


Figura 36: Sezione del Canale di Sardegna e distribuzione delle velocità orizzontali.

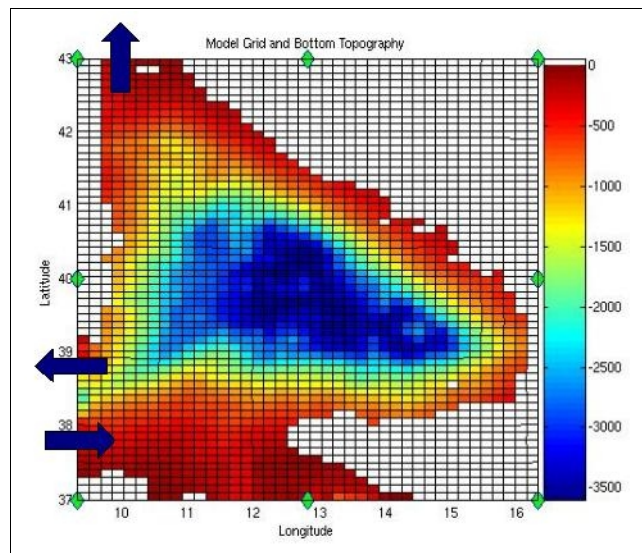


Figura 37: Batimetria del dominio, su cui sono evidenziate le direzioni dei flussi al contorno del RUN 1

BOUNDARY	DIRECTION	SECTION (m ²)	FLOW (Sv)	VELOCITY (m/s)
North Boundary	Outflow	1.316*10 ⁷	0.746	0.057
West Boundary	Outflow	6.284*10 ⁷	1.280	0.020
	Inflow	2.262*10 ⁷	2.026	0.090
South Boundary	-	-	-	-

Tabella 5: Condizioni al contorno del RUN 1

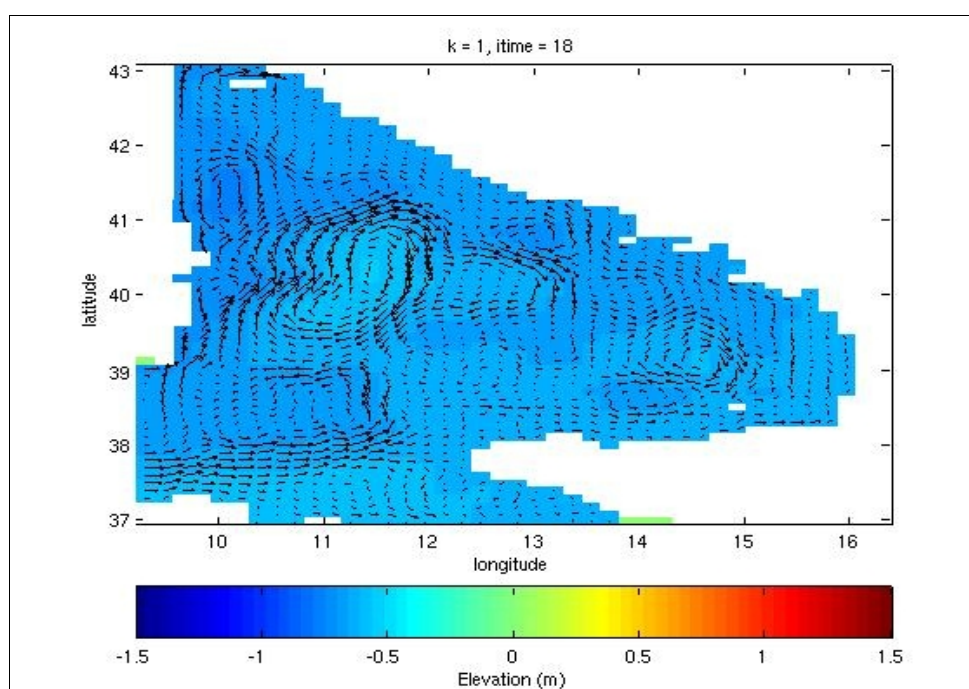


Figura 38: Campo di elevazione superficiale del RUN1

RUN2

Il RUN 2 è il primo dei due esempi mostrati per evidenziare come la scelta delle condizioni al contorno sia determinante nell'evoluzione della circolazione generale nel bacino generata dal modello.

La seguente simulazione è stata effettuata con le *open lateral boundaries* della simulazione precedente (RUN 1), ma presenta anche due flussi, uno in ingresso ed uno in uscita nel bordo a sud, attraverso il Canale di Sicilia (Fig.39). I valori dei flussi utilizzati sono quelli presenti in letteratura (Vetrano *et al.*) ovvero 2.51 Sv e 1.730 Sv rispettivamente in entrata e in uscita dal Canale di Sardegna, 0.78 Sv in uscita dal Canale di Corsica e 1.6 Sv in ingresso nella parte orientale del Canale di Sicilia e 1.6 Sv in uscita dalla parte occidentale dello stesso Canale (Tab.6).

I flussi d'acqua in entrata e in uscita dal Canale di Sardegna risultano più veloci rispetto al caso precedente, poiché il flusso è maggiore e l'area è più ristretta. La velocità del flusso in entrata lungo le coste tunisine infatti è stata posta a 0.26 m/s e quella in uscita lungo le coste sarde a 0.12 m/s. Nel Canale di Corsica sostanzialmente la velocità ed il flusso sono rimasti invariati.

Nella Fig. 40 è mostrato il campo di velocità orizzontale e l'elevazione marina al termine della simulazione. Si noti come il campo idrodinamico generato sostanzialmente non si discosta dal campo generato con le condizioni al contorno del RUN 1. Risulta però più difficile trovare le giuste condizioni sui flussi che soddisfino la legge di bilancio della massa.

BOUNDARY	DIRECTION	SECTION (m ²)	FLOW(Sv)	VELOCITY (m/s)
North Boundary	Outflow	1.316*10 ⁷	0.780	0.059
West Boundary	Outflow	1.48*10 ⁷	1.730	0.120
	Inflow	0.966*10 ⁷	2.510	0.260
South Boundary	Outflow	0.553*10 ⁷	1.600	0.289
	Inflow	0.936*10 ⁷	1.600	0.171

Tabella 6: Condizioni al contorno del RUN 2

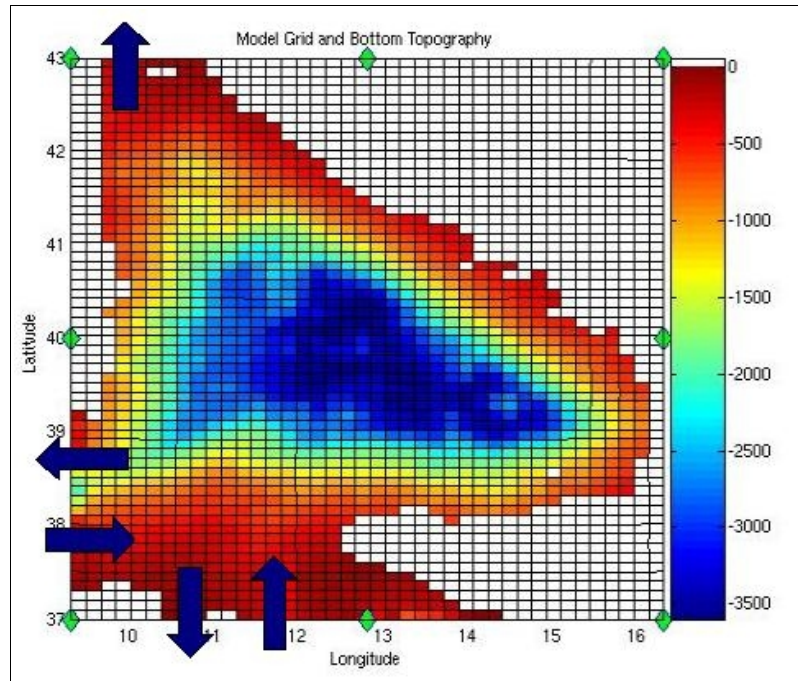


Figura 39: Batimetria del dominio, su cui sono evidenziate le direzioni dei flussi al contorno del RUN 2

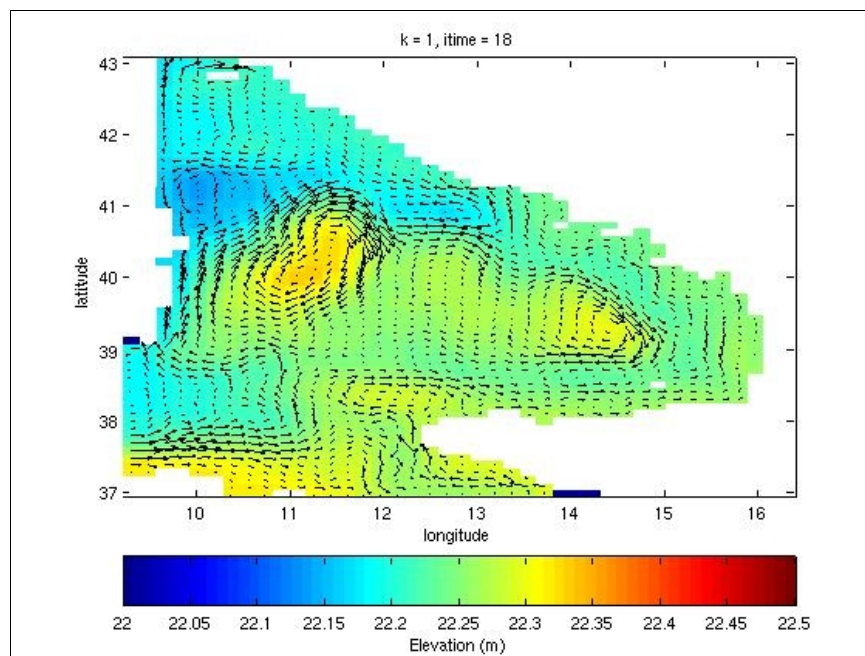


Figura 40: Elevazione della superficie del mare e campo di velocità orizzontale del RUN 2

RUN 3

Il secondo run di esempio (RUN 3) è stato effettuato con le *open lateral boundaries* del RUN1 (Fig. 41). Per il flusso in uscita dal Canale di Corsica è stata mantenuta la stessa area, ma è stato utilizzato un valore più basso di velocità di circa 1 cm/s e quindi il flusso uscente è di circa 0,15 Sv in meno. Sul bordo ovest nel Canale di Sardegna è stato posto solo un punto di flusso nullo, allo scopo di separare il canale in due zone distinte, uno attraversato dal flusso in entrata e l'altro dal flusso in uscita. Pertanto le due aree risultano più grandi del RUN 1 e del RUN 2. Per il flusso in entrata e' stata imposta una velocità di 0.216 m/s e per il flusso in uscita una velocità di 0.05 m/s. I flussi che ne risultano sono pari a 6.3 Sv di inflow e 5.7 Sv di outflow (Tab.7).

Nella Fig. 42 è mostrato il campo di velocità orizzontale e l'elevazione marina al termine della simulazione. Anche in questo caso, come nel RUN 2, si noti come le condizioni al contorno sulla velocità scelte generano un campo idrodinamico non sostanzialmente differente da quello relativo al RUN 1.

BOUNDARY	DIRECTION	SECTION (m ²)	FLOW (Sv)	VELOCITY (m/s)
North Boundary	Outflow	1.316*10 ⁷	0.600	0.046
West Boundary	Outflow	11.377*10 ⁷	5.700	0.050
	Inflow	2.921*10 ⁷	6.300	0.216
South Boundary	-	-	-	-

Tabella 7: Condizioni al contorno del RUN 3

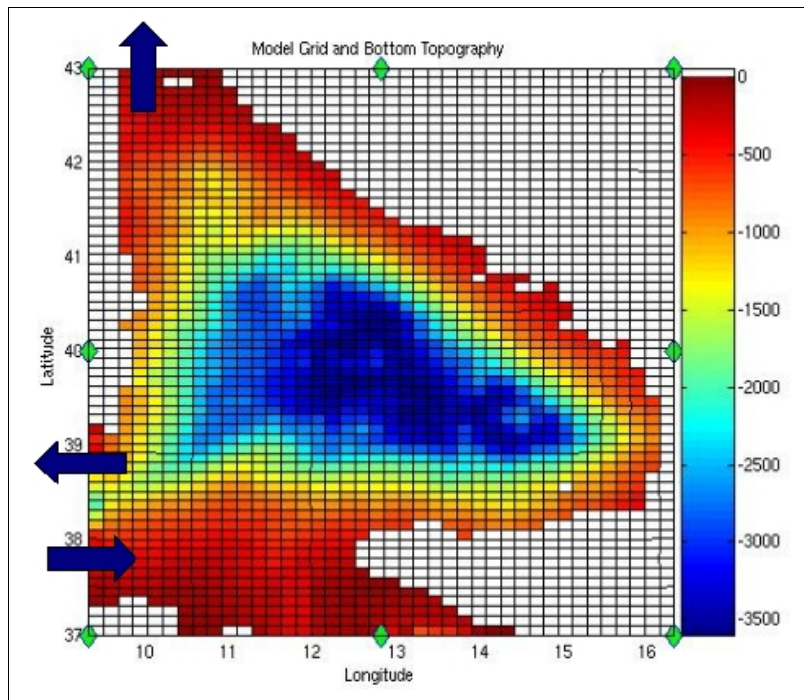


Figura 41: Batimetria del dominio, su cui sono evidenziate le direzioni dei flussi al contorno del RUN 3

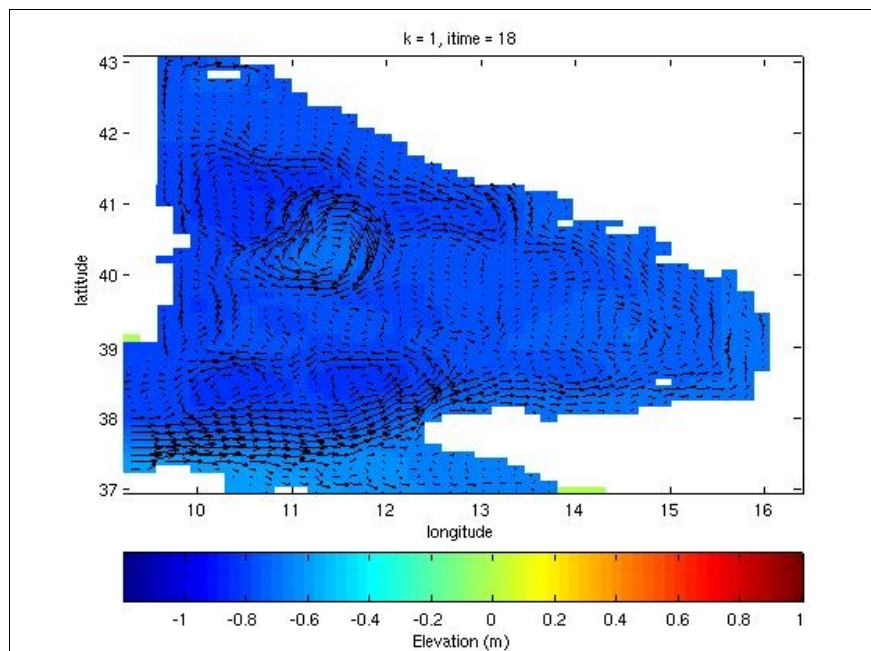


Figura 42: Elevazione della superficie del mare e campo di velocità orizzontale del RUN 3

5.2 L'implementazione del LAWAM

Il campo idrodinamico del run di spin-up invernale con i dati di temperatura superficiale acquisiti da satellite è stato utilizzato come dato di input per il run non stazionario di un mese. Il modello in questa configurazione è stato forzato con un campo di vento ogni 6 ore relativo al gennaio 2007. Il campo idrodinamico riferito agli ultimi 15 giorni di tale run è stato utilizzato come campo idrodinamico di input per le applicazioni del LAWAM. Il modello di dispersione lagrangiano è stato implementato per riprodurre alcuni casi di *oil spill* in alcune zone cruciali del bacino del Tirreno, caratterizzate da una frequenza elevata di incidenti, sia perché interessate da un intenso traffico marittimo di prodotti oleosi sia perché il tratto costiero in cui sono localizzate e' caratterizzato dalla presenza di oil-terminal.

5.2.1 I Dati di input

Insieme al modello lagrangiano è stato sviluppato da G. Leuzzi e P. Monti un modulo di pre-processing (INLAWAM) che consente di ricavare i dati di ingresso necessari al LAWAM, a partire dal file di output prodotto dal POM; questo file contiene informazioni su batimetria, campi di velocità, energia cinetica e diffusività turbolenta.

Poiché il POM lavora sui nodi del grigliato, mentre il LAWAM lavora sulle celle, la griglia del LAWAM è data da una matrice di 41x61x15 nodi; infatti sulle coordinate x e y il dominio è stato “shiftato” di metà cella e i livelli verticali sono uno in meno rispetto a quelli del POM. Inoltre essendo il POM un modello nato per lavorare in coordinate curvilinee la sua griglia è in latitudine e longitudine anche se il nostro grigliato è rettilineo; il grigliato del LAWAM invece è in metri misurati rispetto all'origine del grigliato posta nell'angolo a sud-est.

Le tre componenti della velocità sono direttamente disponibili dal campo idrodinamico mentre le tre varianze della velocità e la lunghezza di scala lagrangiana sono derivate dall'energia cinetica turbolenta e dalla diffusività turbolenta.

Gli altri dati di input del LAWAM sono le caratteristiche della sorgente di inquinante, anch'esse fornite da INLAWAM, ovvero le coordinate della sua posizione, la profondità a cui avviene lo sversamento, la quantità e la qualità dell'inquinante e la grandezza della sorgente

(areale o puntuale).

Le coordinate della sorgente e la profondità di sversamento sono espresse in metri e la posizione è riferita all'origine del grigliato di LAWAM. Poiché come abbiamo detto il grigliato del LAWAM è in metri rispetto all'origine, nella fase di pre-processing è necessario convertire le coordinate geografiche della sorgente di inquinante in metri, anche se tale operazione causa un errore sulla posizione.

La quantità di materiale sversato è espressa in kg/s e può essere emessa da una sorgente areale o puntuale.

Le caratteristiche dell'inquinante sono espresse nel modello in termini di velocità di sedimentazione, definita a partire dalla densità del materiale attraverso la legge di Stokes.

E' possibile simulare lo sversamento di due inquinanti differenti, modificando in modo opportuno i tempi di decadimento di ciascun materiale. In questo studio è stato simulato lo sversamento di un solo tipo di petrolio ma sarebbe comunque possibile simulare lo scarico in mare di un prodotto oleoso e la sua evoluzione in un'altra fase con una differente densità, in seguito ai processi di “*weathering*” (CAP.1).

In Fig. 43-44 sono mostrati i campi di energia cinetica turbolenta e di diffusività turbolenta in superficie con il campo di velocità orizzontale in ingresso nel modello lagrangiano.

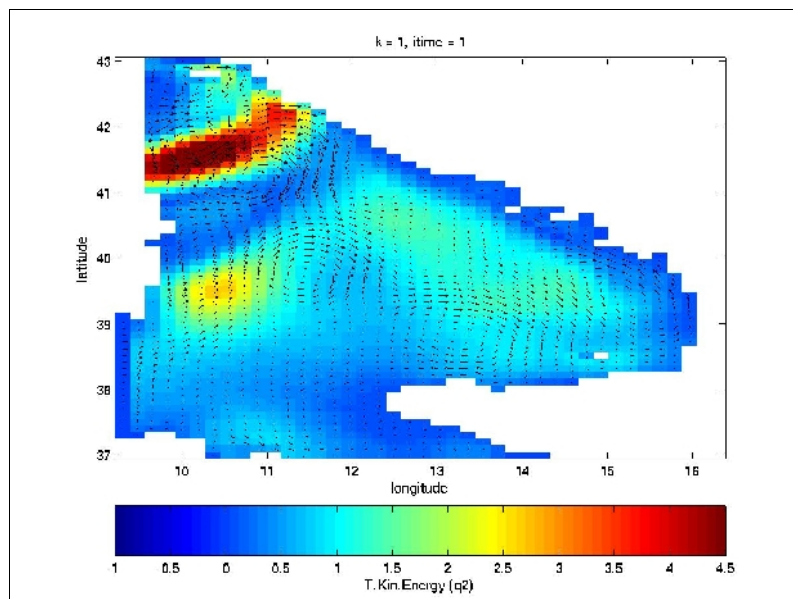


Figura 43: Energia cinetica turbolenta q^2 , (m^2/s^2) e campo di velocità orizzontale del run non stazionario

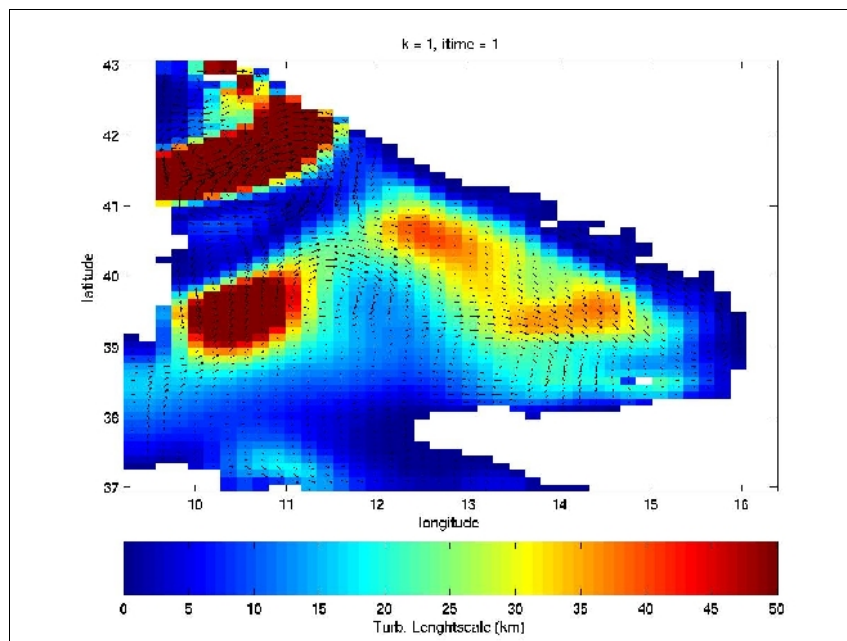


Figura 44: Lunghezza di scala della turbolenza $q^2 l$ (m^3/s^2) e campo di velocità orizzontale del run non stazionario

5.2.2 Le caratteristiche degli incidenti simulati

Sono state effettuate tre simulazioni di *oil spill* nel bacino del Tirreno nei seguenti punti di coordinate (Fig.45):

- A = Latitudine: 41°27'00" - Longitudine: 11°28'12";
- B = Latitudine: 38°20'24" - Longitudine: 12°24'36";
- C = Latitudine: 40°50'00" - Longitudine: 10°30'00";

La scelta delle aree in cui effettuare le simulazioni è stata dettata da due esigenze. In primo luogo si è ritenuto necessario incentrare l'attenzione sulle zone più cruciali del bacino del Tirreno, caratterizzate da una frequenza elevata di incidenti, sia perché interessate da un intenso traffico marittimo di prodotti oleosi sia perché il tratto costiero in cui sono localizzate

è caratterizzato dalla presenza di oil-terminal. In secondo luogo si è deciso di prendere in considerazione zone contraddistinte da diversi valori della componente verticale della velocità. In particolar modo il punto A ubicato nella costa nord orientale del Tirreno è localizzato in un'area critica, poiché vicino all'oil terminal di Fiumicino, dove sono avvenuti numerosi incidenti. Il punto B, vicino alla costa palermitana è stato interessato anch'esso da frequenti incidenti con conseguenti sversamenti di inquinanti; inoltre entrambi i punti sono posti in zone di down-welling in cui la velocità verticale è diretta verso il basso e tende a portare sul fondo del bacino il materiale sversato. Il punto C è invece ubicato invece in una zona di upwelling. In ciascun punto è stato simulato uno sversamento di 7000 t, emesse in modo continuo in 24 ore a 20 m di profondità. E' stato scelto un valore di sedimentazione (w_s) di 0.001 m/s per simulare un olio leggero con una densità minore dell'acqua marina.

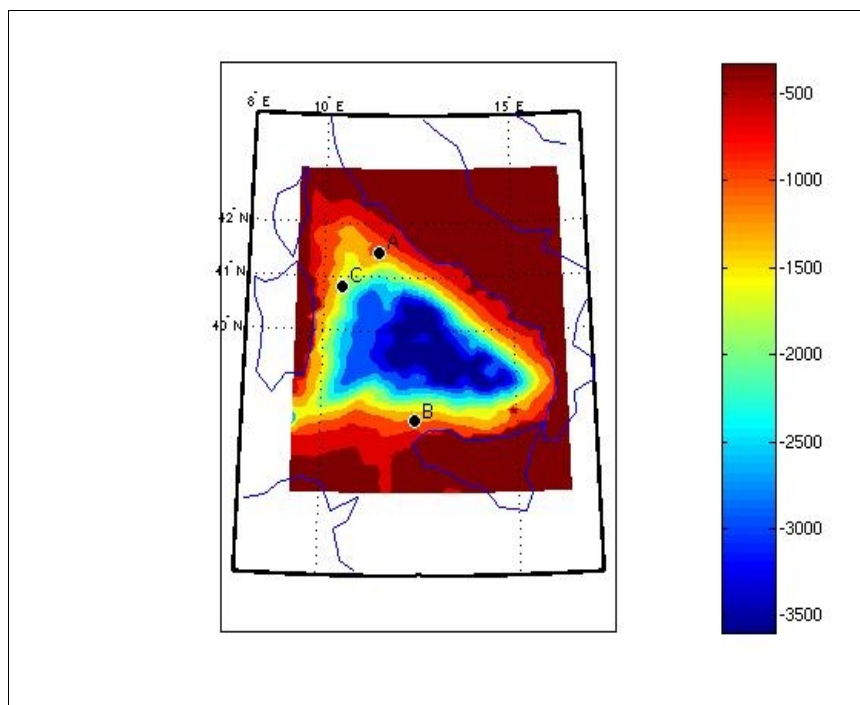


Figura 45: Posizioni delle tre sorgenti di inquinante delle simulazioni effettuate

6. ANALISI DEI DATI

Il POM è stato implementato durante la fase di spin-up utilizzando in input i campi medi che forniscono risultati rappresentativi delle caratteristiche stagionali o del periodo di riferimento.

I run in configurazione non stazionaria forniscono per contro informazioni istantanee dei campi, non più mediati ma relativi ad un preciso istante temporale. In questa seconda configurazione il modello sarà forzato con dati di input acquisiti ogni 6 ore.

La durata di una simulazione di spin-up deve essere sufficientemente lunga per permettere alla circolazione generata di raggiungere una situazione stazionaria, di equilibrio, per poter poi effettuare un run non stazionario utilizzando come dati di input il campo all'equilibrio ottenuto dal run di spin-up.

Nelle nostre applicazioni, con la configurazione del modello che verrà di seguito descritta, l'equilibrio del campo si stabilisce dopo 90 giorni di simulazioni.

Verranno illustrati i risultati ottenuti dal run di spin-up invernale, il cui campo idrodinamico in uscita sarà utilizzato come condizione iniziale per effettuare il run non stazionario “in tempo reale”, che è stato forzato con un campo di vento ogni 6 ore relativo al gennaio 2007. Il campo idrodinamico riferito agli ultimi 15 giorni di tale run, di cui saranno illustrati i campi di output, è stato utilizzato come campo di input per le applicazioni del LAWAM.

6.1 Run di spin-up

E' stata effettuata una simulazione di spin-up di 90 giorni; tale durata corrisponde al tempo necessario al modello per raggiungere una condizione di stazionarietà.

I dati di input della **simulazione di spin-up** sono i seguenti:

- Campo di salinità superficiale (SSS, *Sea Surface Salinity*) medio di gennaio dalla climatologia mensile del MED6;
- Campo di temperatura superficiale (SST, *Sea Surface Temperature*) medio da satellite di gennaio 2007;
- Campo di vento medio di gennaio (ECMWF, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

Le condizioni aperte al contorno sono state scelte in base ai risultati emersi dalla *sensitivity analysis* e corrispondono a quelle del RUN1 del paragrafo 5.1.2 e brevemente riassunte Fig.46 e nella Tab.8.

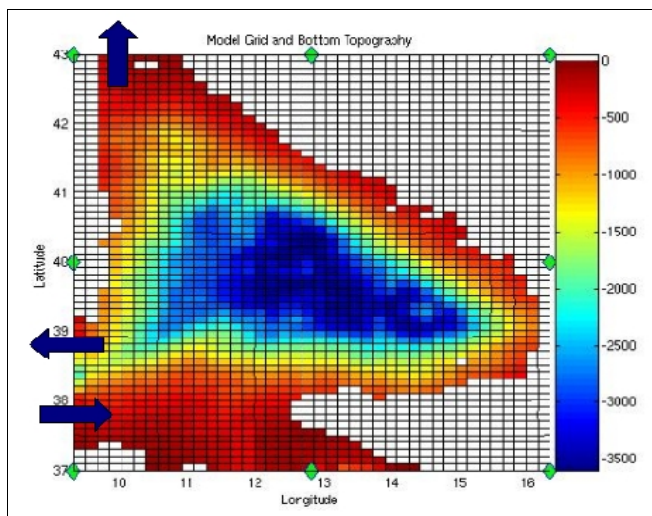


Figura 46: Batimetria del dominio, su cui sono evidenziate le direzioni dei flussi al contorno del RUN 1

BOUNDARY	DIRECTION	SECTION (m ²)	FLUSSO (Sv)	VELOCITY (m/s)
North Boundary	Outflow	1.316*10 ⁷	0.746	0.057
West Boundary	Outflow	6.284*10 ⁷	1.280	0.020
	Inflow	2.262*10 ⁷	2.026	0.090
South Boundary	-	-	-	-

Tabella 8: Condizioni al contorno del run di spin-up

Nelle Fig.47 è mostrato il campo di temperatura superficiale da satellite insieme al campo di velocità orizzontale, dopo 90 giorni di simulazione climatologica di gennaio, ovvero nella condizione di equilibrio.

Si riconoscono sostanzialmente i tratti principali della circolazione invernale, tipica del Tirreno; la corrente superficiale che entra nel Canale di Sardegna lungo le coste tunisine in parte entra nel Mar Tirreno ed in parte ricircola scorrendo verso ovest lungo le coste sarde meridionali. Il flusso entrato nel Tirreno scorre lungo le coste settentrionali della Sicilia ed inizia il suo percorso verso Nord. Nella parte settentrionale del bacino del Tirreno, in parte la corrente esce dal Canale di Corsica, in parte si porta a sud lungo le coste della Corsica e della Sardegna, per poi uscire dalla parte settentrionale del Canale di Sardegna.

E' riconoscibile anche un altro elemento caratteristico della circolazione del bacino: un vortice freddo ad est delle Bocche di Bonifacio che controlla, fino a bloccarli del tutto i flussi di provenienza meridionale. A sud del vortice è presente inoltre un gyre anticiclonico di modesta entità che risulta più sviluppato intorno ai 200 m di profondità. (Fig.48).

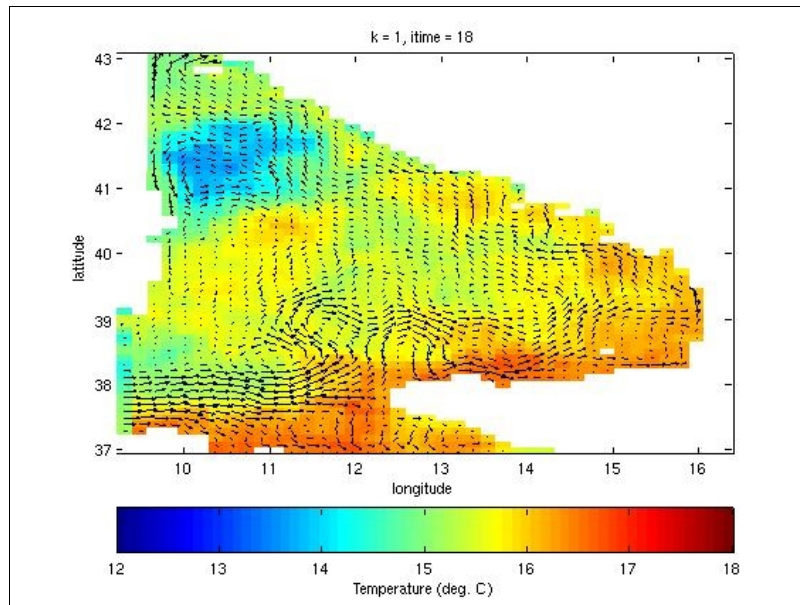


Figura 47: Campo di temperatura e campo di velocità orizzontale alla superficie del run di spin-up

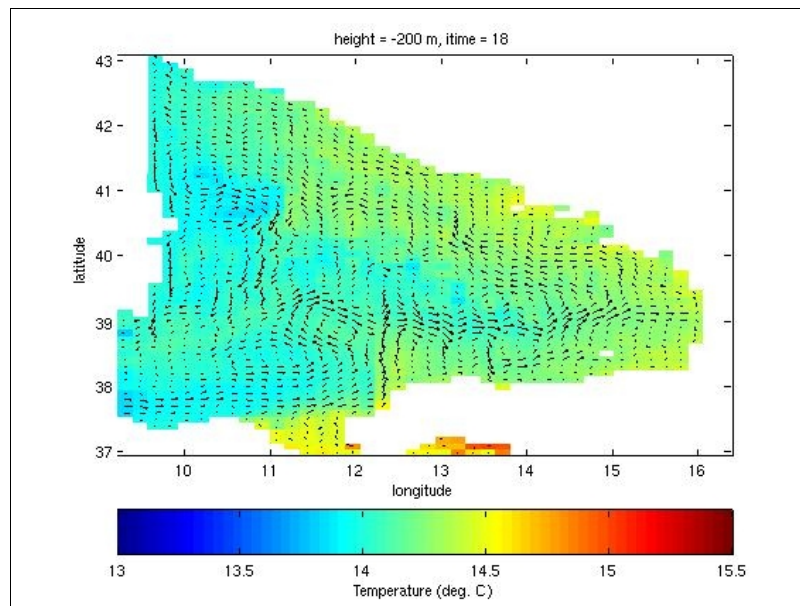


Figura 48: Campo di temperatura e campo di velocità orizzontale alla profondità di 200 m del run di spin-up

6.2 Run non stazionario

Il campo idrodinamico generato dal run di spin-up dopo 90 giorni rappresenta una condizione di equilibrio ed è stato utilizzato come condizione iniziale per effettuare il run non stazionario di un mese, che è stato forzato con un campo di vento ogni 6 ore relativo al gennaio 2007. Il campo idrodinamico riferito agli ultimi 15 giorni di tale run, di cui saranno illustrati i campi di output, è stato utilizzato come campo idrodinamico di input per le applicazioni del LAWAM.

I dati di input della **simulazione non stazionaria** effettuata sono i seguenti:

- Campo di salinità superficiale (SSS, *Sea Surface Salinity*) medio di gennaio dalla climatologia mensile del MED6;
- Campo di temperatura superficiale (SST, *Sea Surface Temperature*) medio da satellite di gennaio 2007;
- Campo di vento di gennaio 2007, con dati ogni 6 ore (4 uscite al giorno)(*ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

In Fig.49 è mostrato il campo di temperatura superficiale da satellite ed il campo di velocità orizzontale in superficie dopo 15 giorni di simulazione non stazionaria. Il campo in figura è quello utilizzato come condizione iniziale per le simulazioni del LAWAM. La circolazione concorda con la circolazione tipica del bacino, in maniera più completa rispetto a quella generata dal run di spin-up. In particolar modo è predominante la circolazione ciclonica tipica del bacino ed il gyre ciclonico ubicato in prossimità dello stretto di Bonifacio risulta di intensità maggiori, in accordo con la descrizione presente in letteratura.

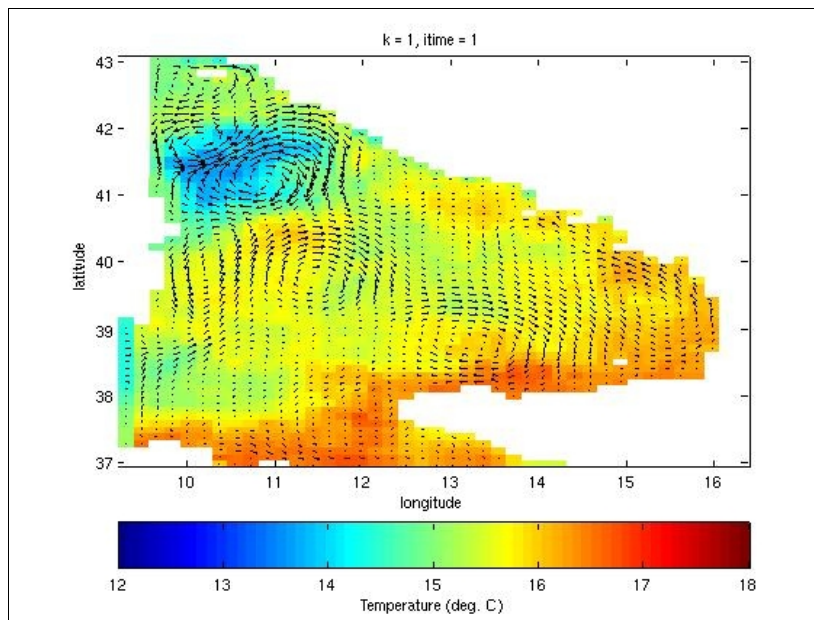


Figura 49: Campo di temperatura e campo di velocità orizzontale alla superficie del run non stazionario

6.3 Simulazioni di oil spill

Le tre simulazioni di *oil spill* sono state effettuate utilizzando come campo idrodinamico quello relativo ai primi 15 giorni di simulazione non stazionaria del POM.

Le simulazioni di sversamento sono state riprodotte in tre punti del dominio, A, B e C nella Fig.45 (paragrafo 5.2.2).

In ciascun punto è stato simulato uno sversamento di 81 kg/s per un totale di 7000 t, emesse in modo continuo in 24 ore, a 20 m di profondità.

Di seguito vengono riportate le immagini dei risultati del modello di dispersione dopo 9 ore di sversamento e al termine dei 15 giorni di simulazione.

Per ciascun istante scelto viene mostrata la dispersione orizzontale di inquinante, la dispersione verticale di inquinante, in una sezione del bacino secondo la latitudine ed una secondo la longitudine. La concentrazione è espressa in kg/km². Nelle immagini della dispersione orizzontale è rappresentata la concentrazione di inquinante sommata su tutta la colonna d'acqua. Nelle sezioni verticali è rappresentata la proiezione delle concentrazioni di

inquinante sommate su tutto il bacino; alle sezioni verticali è sovrapposto il profilo della batimetria alla latitudine ed alla longitudine della sorgente.

La **prima simulazione** è stata effettuata nel punto **A** di coordinate:

- Latitudine: $41^{\circ}27'00''$;
- Longitudine: $11^{\circ}28'12''$;

Il punto A ubicato nella costa nord orientale del Tirreno è localizzato in un area critica, poiché vicino all'oil terminal di Fiumicino, dove sono avvenuti numerosi incidenti.

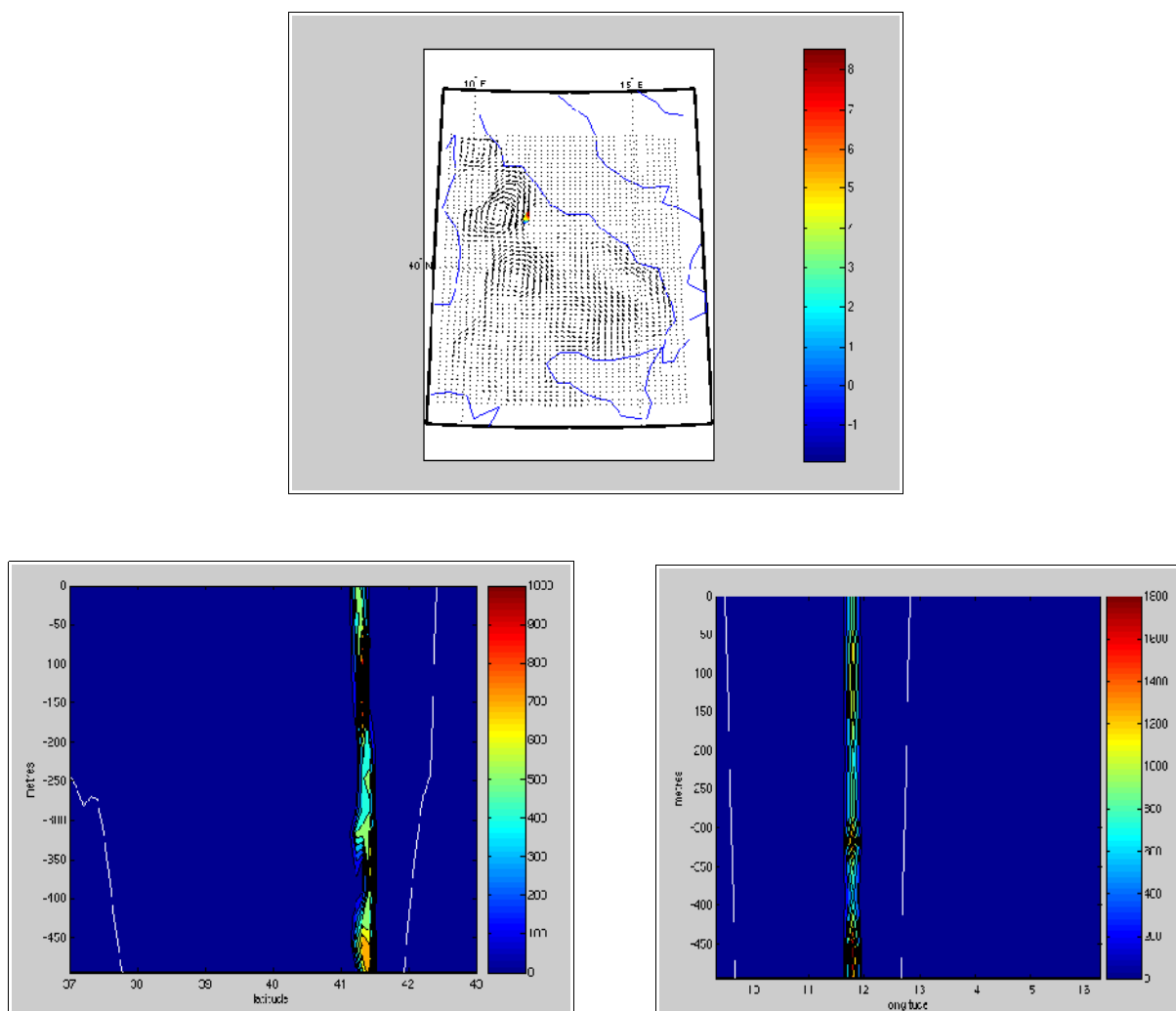


Figura 50: Dispersione orizzontale, dispersione verticale presa alla longitudine della sorgente e dispersione verticale sulla sezione presa alla latitudine della sorgente (itime3-punto A)

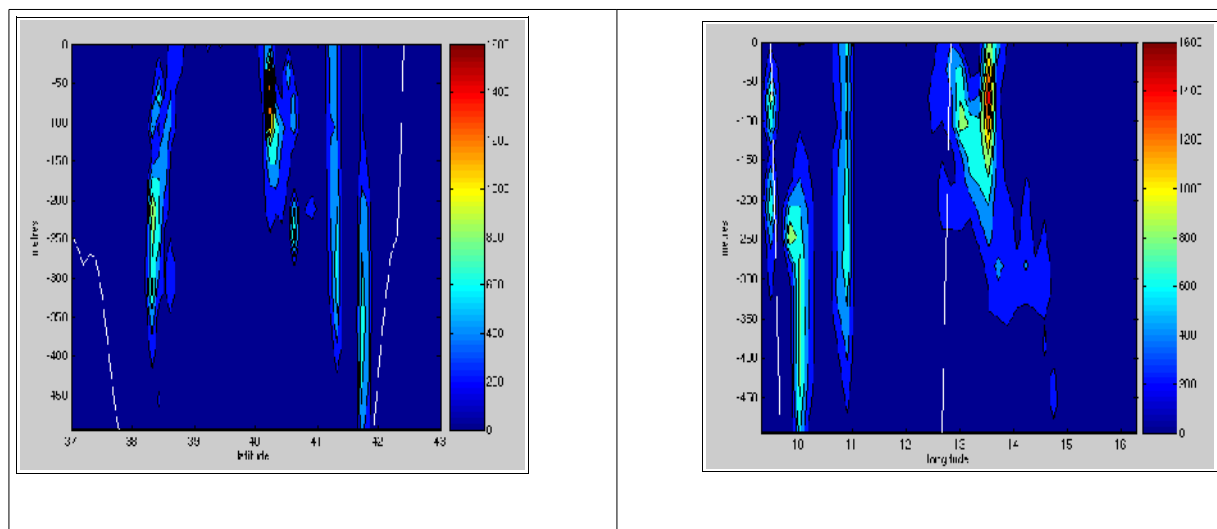
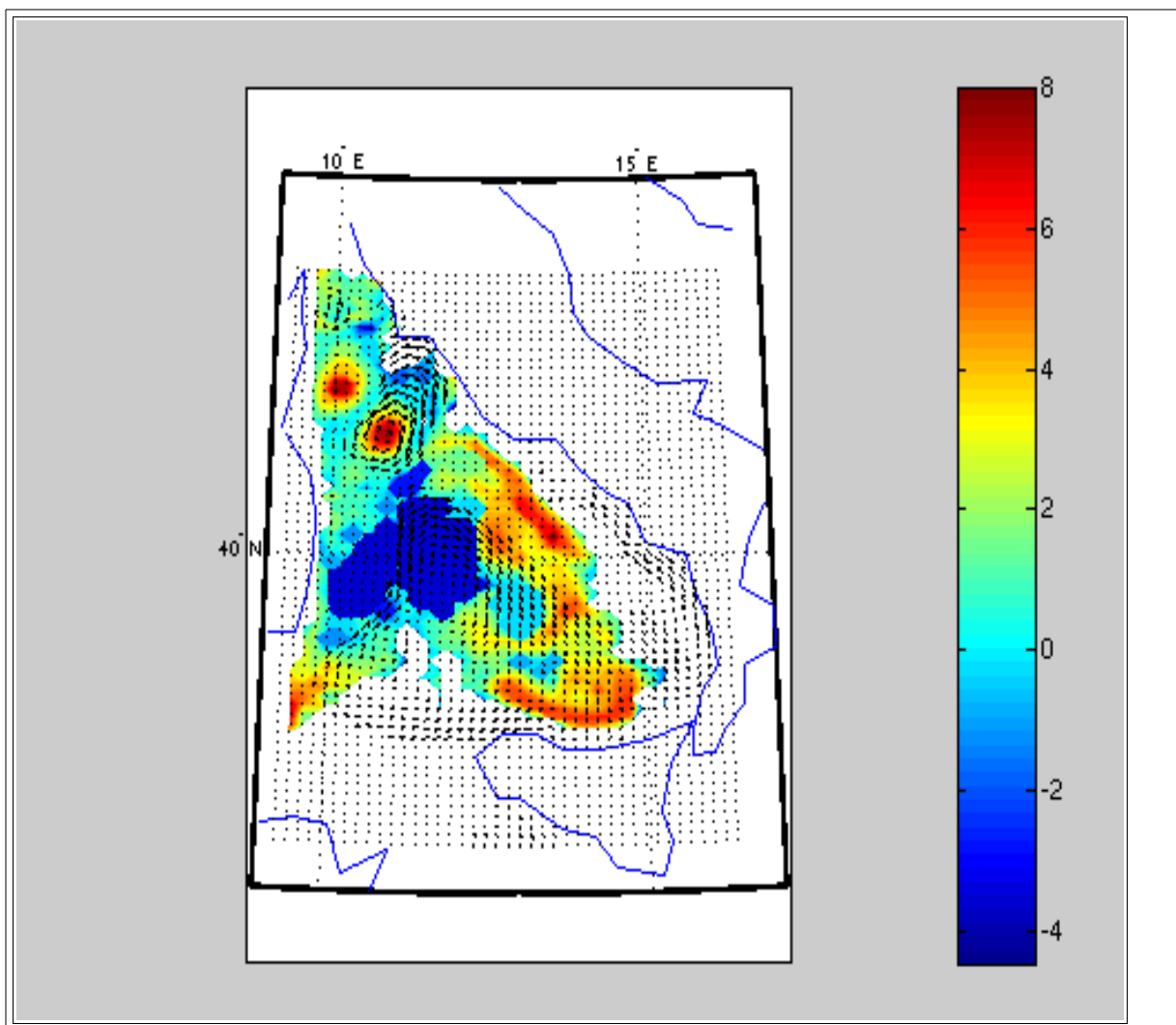


Figura 51: Dispersione orizzontale, dispersione verticale presa alla longitudine della sorgente e dispersione verticale sulla sezione presa alla latitudine della sorgente (itime120-punto A)

La **seconda simulazione** è stata effettuata nel punto **B** di coordinate:

- Latitudine: $38^{\circ}20'24''$
- Longitudine: $12^{\circ}24'36''$

Il punto B vicino alla costa palermitana è stato interessato anch'esso da frequenti incidenti e conseguenti sversamenti di inquinanti.

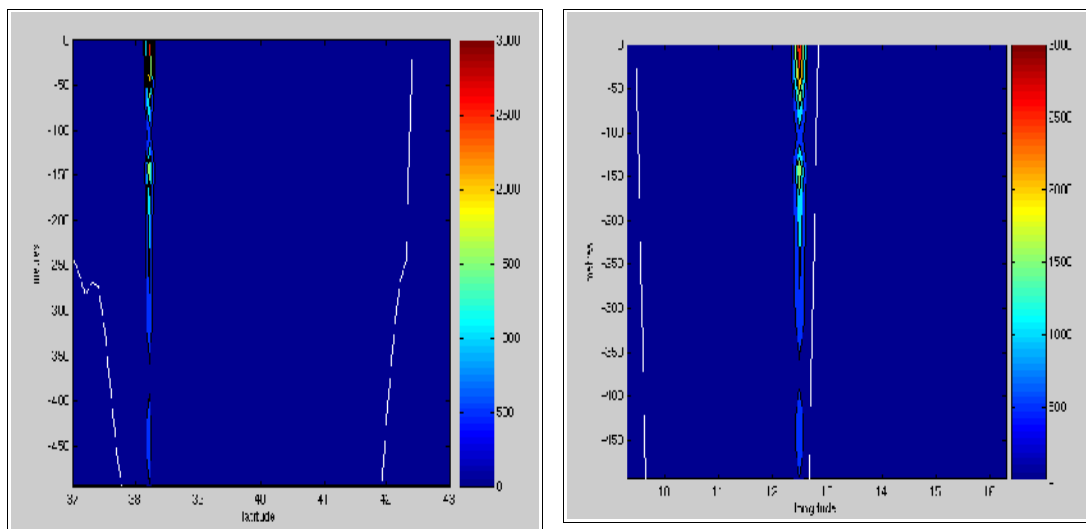
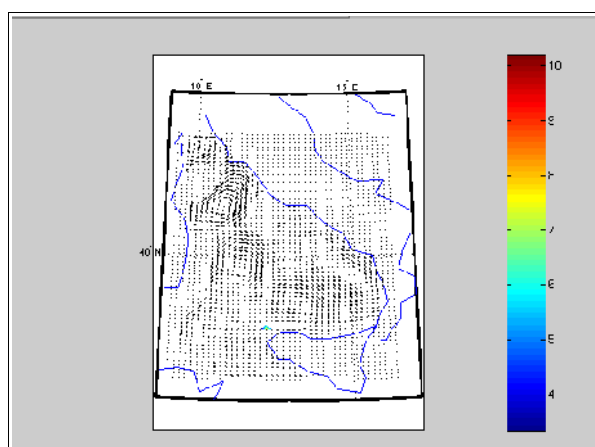


Figura 52: Dispersione orizzontale, dispersione verticale presa alla longitudine della sorgente e dispersione verticale sulla sezione presa alla latitudine della sorgente (itime3-punto B)

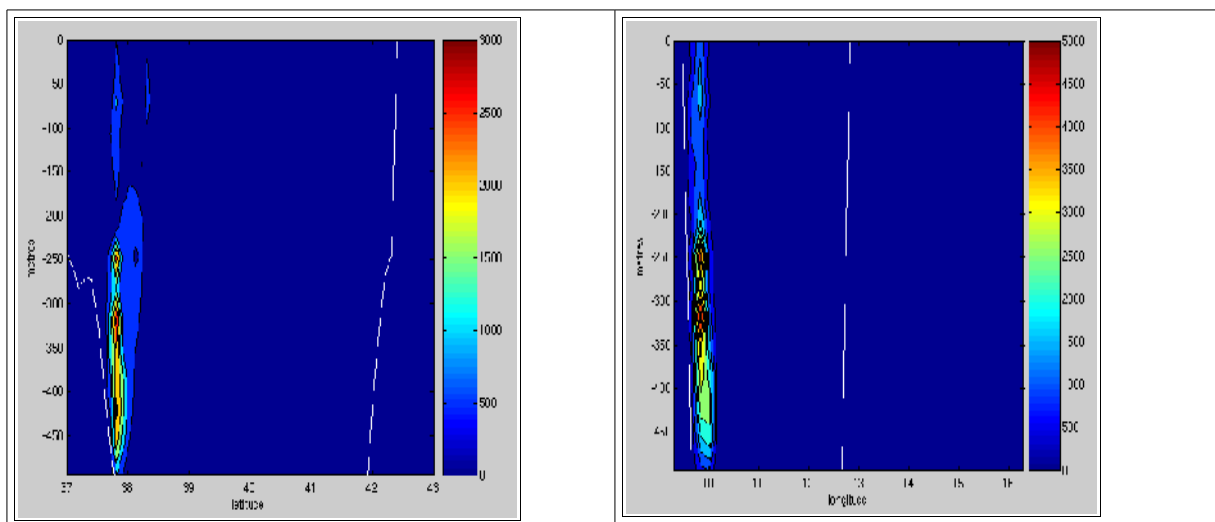
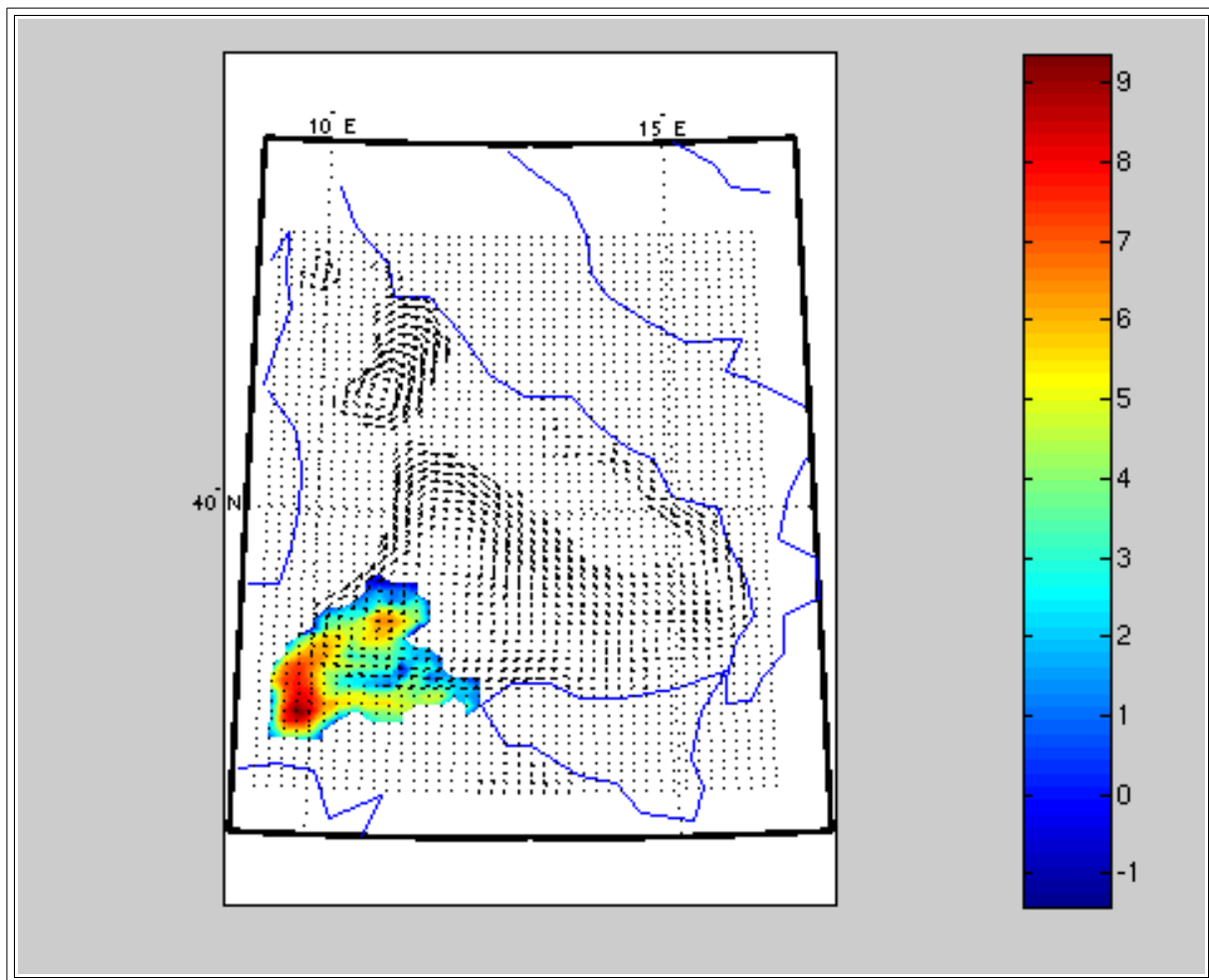


Figura 53: Dispersione orizzontale, dispersione verticale presa alla longitudine della sorgente e dispersione verticale sulla sezione presa alla latitudine della sorgente (itime120-punto B)

La **terza simulazione** è stata effettuata nel punto **C** di coordinate:

- Latitudine: $40^{\circ}50'00''$
- Longitudine: $10^{\circ}30'00''$

Il punto C è invece ubicato a nord delle Bocche di Bonifacio.

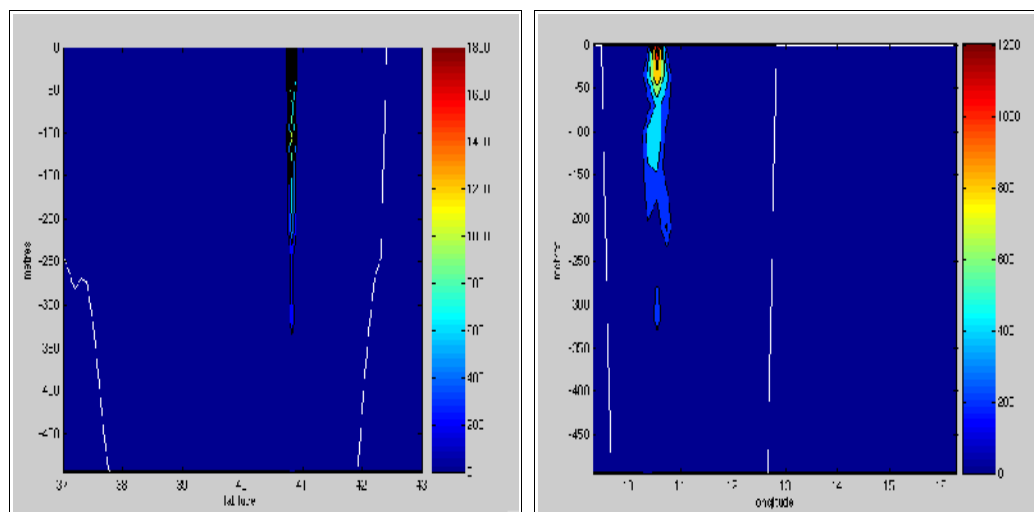
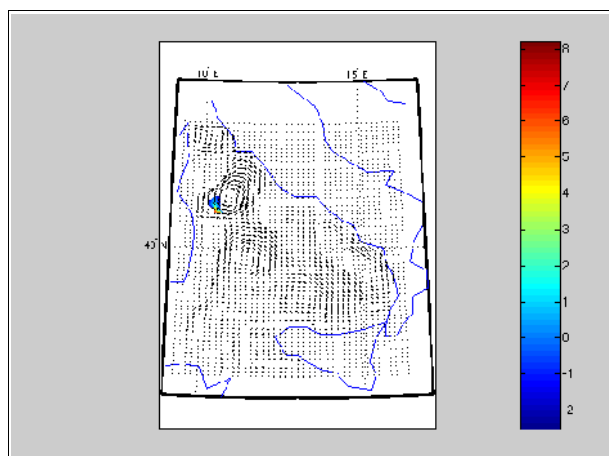


Figura 54: Dispersione orizzontale, dispersione verticale presa alla longitudine della sorgente e dispersione verticale sulla sezione presa alla latitudine della sorgente (itime3-punto C)

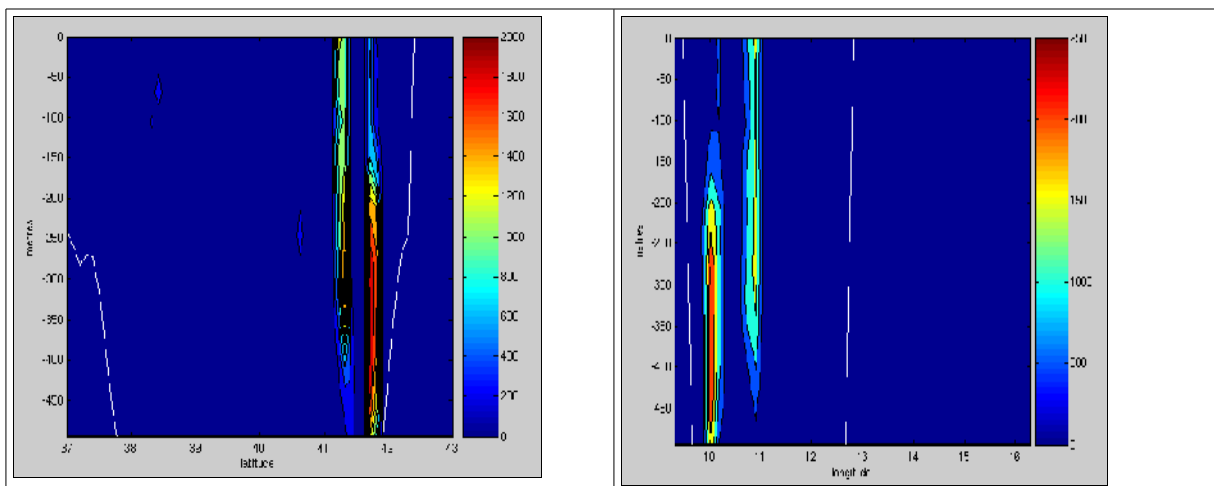
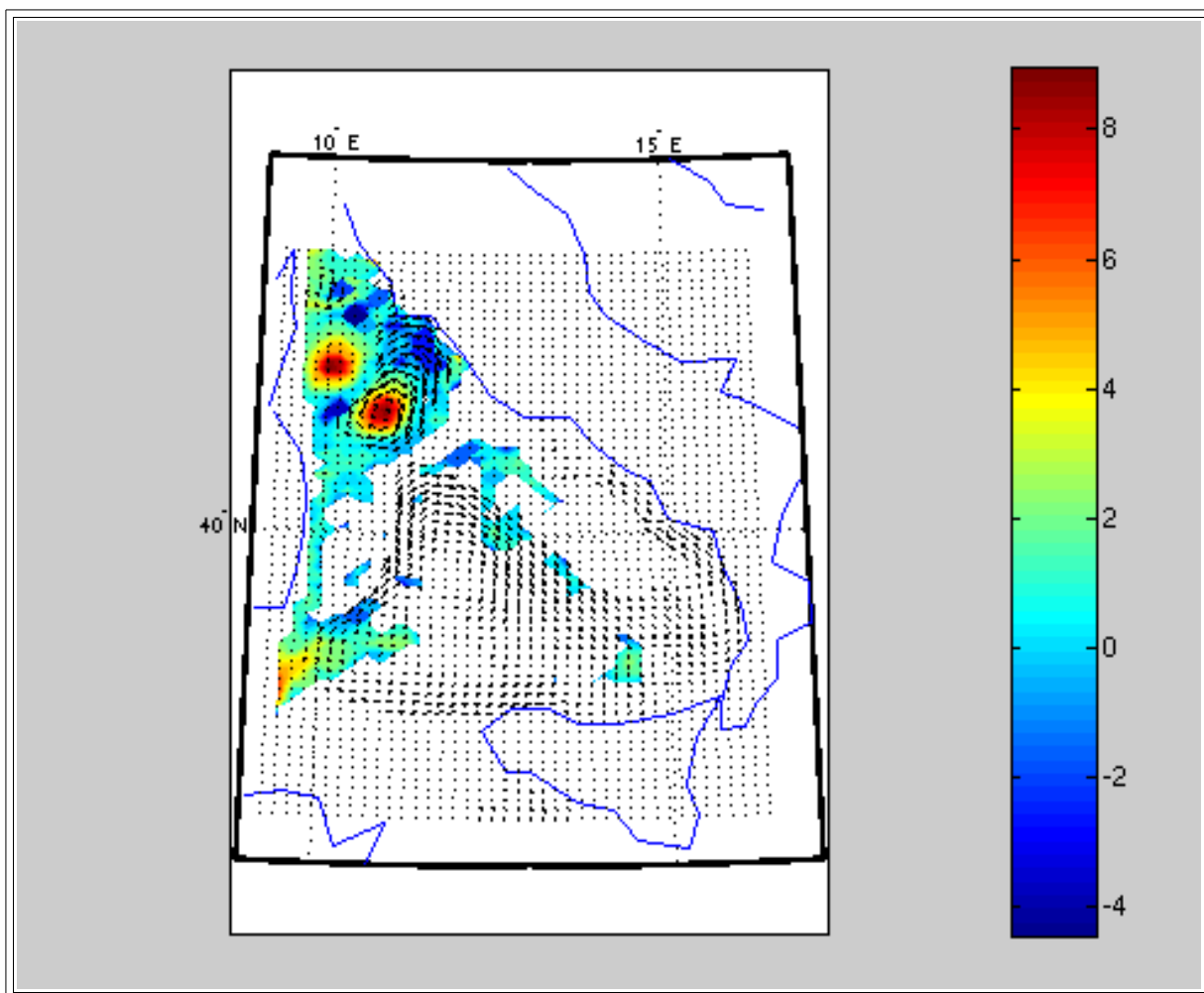


Figura 55: Dispersione orizzontale, dispersione verticale presa alla longitudine della sorgente e dispersione verticale sulla sezione presa alla latitudine della sorgente (itime120-punto C)

In tutte le simulazioni di *oil spill* si nota che la dispersione orizzontale dell'inquinante segue sostanzialmente la circolazione generale del bacino.

L'inquinante emesso dal punto A (Fig.50-51) segue la corrente diretta verso nord e si porta verso il Canale di Corsica; successivamente si divide lungo tre principali direzioni di dispersione: una parte esce dal Canale di Corsica, una parte e' portata verso sud dal gyre ciclonico ubicato a Nord dello stretto di Bonifacio, mentre la terza parte segue il gyre anticiclonico posto a sud est rispetto al gyre ciclonico e si porta verso sud fino a lambire la costa settentrionale della Sicilia.

L'inquinante emesso dal punto B (52-53) viene portato verso ovest a causa del ricircolo diretto verso il Canale di Sardegna e dopo 15 giorni si porta verso nord-est seguendo il campo di velocità predominante.

L'inquinante emesso dal punto C (54-55) si dirige in parte a sud dello stretto di Bonifacio, in parte verso nord e in parte segue il vortice anticiclonico a sud dello stretto portandosi verso sud est. Le direzioni di dispersione risultanti da questa ultima simulazione sono sostanzialmente in accordo con quelle seguite dall'inquinante emesso dal punto A.

Dopo 9 ore di sversamento, nel punto A l'inquinante ha raggiunto una profondità di circa 450 m e la concentrazione risulta sostanzialmente omogenea da 0 a 4; nel punto B l'inquinante ha raggiunto una profondità di 400 m, ma il massimo di concentrazione è presente tra 0 e 100 m; nel punto C l'inquinante ha raggiunto circa 300 m di profondità ma il massimo di concentrazione risulta tra 0 e 50 m.

La differenza principale tra i risultati delle simulazioni, è la velocità con cui avviene l'affondamento del materiale, che dipende dalla componente verticale del campo idrodinamico che assume valori positivi o negativi nelle diverse celle. In particolar modo, il punto C è ubicato in una zona di up-welling, a differenza dei punti A e B posti in zone di down-welling in cui la velocità verticale è diretta verso il basso e tende a portare sul fondo del bacino il materiale sversato. In Fig. 57 si può vedere come nel punto A la velocità sia diretta verso il basso su tutta la colonna d'acqua; nel punto B la velocità è diretta verso il basso nella parte più superficiale della colonna d'acqua fino ai 200 m di profondità e assume valori positivi a profondità maggiori; nel punto C la velocità invece risulta diretta verso l'alto fino ai 500 m di profondità. Dalle osservazioni in letteratura (*Millot et al.*) a nord dello stretto è presente una zona di divergenza e quindi di upwelling e a sud una zona di convergenza e quindi di

downwelling. Tali fenomeni sono associati rispettivamente al gyre ciclonico a nord e al gyre anticiclonico a sud dello stretto entrambi originati dai venti occidentali che passano attraverso lo stretto. Queste due zone di velocità verticale opposta non sono ben definite in Fig. 56, probabilmente a causa della bassa risoluzione della griglia di calcolo.

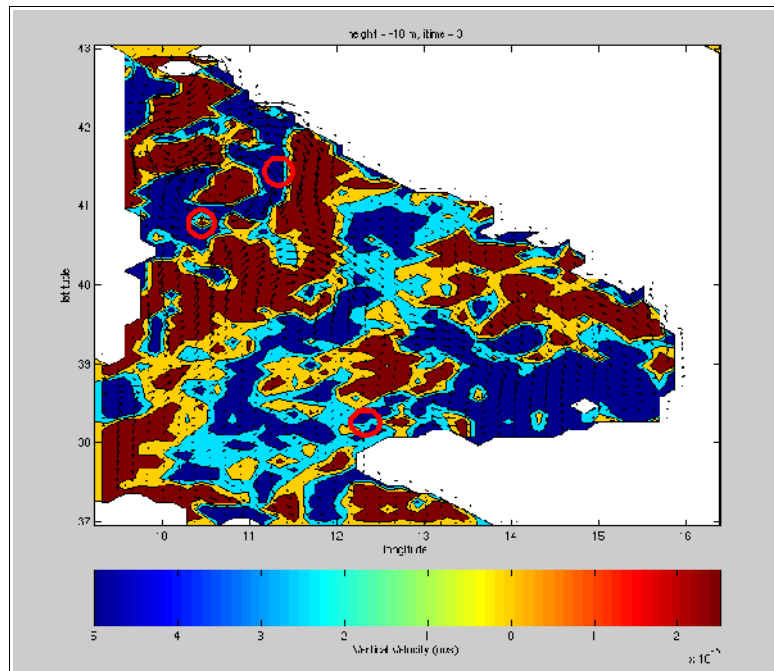


Figura 56: Campo di velocità verticale a 10 m di profondità.

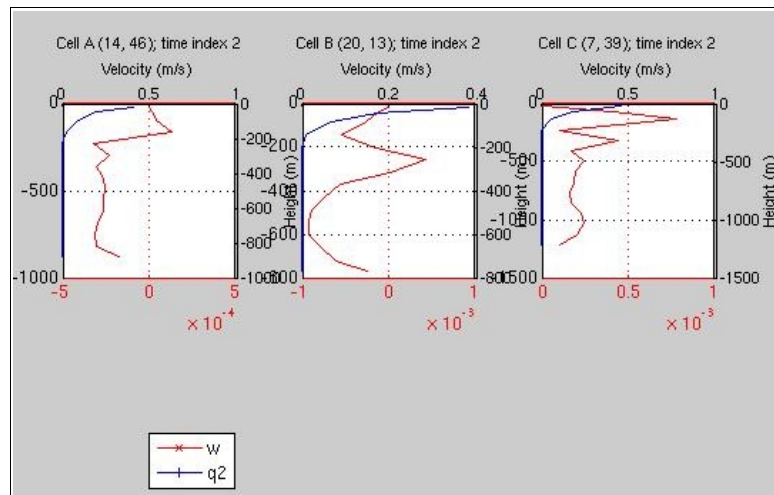


Figura 57: Profili verticali della componente verticale della velocità w e dell'energia cinetica turbolenta $q2$.

7. CONCLUSIONI

E' stato utilizzato un sistema di modelli accoppiati POM-LAWAM per studiare la circolazione del bacino del Tirreno e la dispersione di inquinanti.

Dall'analisi dei risultati emerge che il modello idrodinamico ottenuto dalla fase di spin-up con i campi medi di wind-stress, di temperatura e di salinità, è in grado di riprodurre le principali caratteristiche della circolazione invernale nel Tirreno; inoltre il funzionamento del modello non è sensibilmente condizionato dalla scelta delle *boundary conditions* prese in considerazione. Dalla *sensitivity analysis* è emerso che il campo idrodinamico generato da simulazioni con diverse condizioni al contorno al contorno sulla velocità ma con gli stessi dati di temperatura, salinità e wind-stress, raggiunge uno stato stazionario che riproduce la circolazione descritta in letteratura in circa 90 giorni. Una difficoltà, legata alla bassa risoluzione considerata, consiste nel soddisfare la legge di bilancio della massa.

Inoltre la circolazione del bacino risulta più vicina a quella osservata rilassando la superficie con il campo di temperatura da satellite. Infatti il campo di SST da satellite rappresenta in modo più realistico la temperatura del bacino rispetto al campo medio del MED6; in particolar modo nel campo di temperatura da satellite è più evidente il vortice freddo localizzato ad est delle Bocche di Bonifacio.

Dai risultati della simulazione è emerso che, fornendo al modello i dati di vento acquisiti ogni 6 ore, la circolazione nel bacino concorda con la circolazione descritta in letteratura in modo più completo rispetto a quella generata dal modello nella fase di spin-up. In particolar modo è più marcata la tipica circolazione ciclonica del Tirreno ed il gyre anticiclonico a sud dello stretto di Bonifacio risulta di dimensioni simili a quelle descritte in letteratura.

I risultati del modello di dispersione lagrangiana mostrano che la dispersione orizzontale dell'inquinante segue la circolazione generale del bacino; inoltre emerge che la dispersione verticale non dipende soltanto dalla velocità di sedimentazione dell'inquinante, ovvero dalla sua densità, ma anche dal valore della componente verticale della velocità nella cella considerata.

Il sistema di modelli accoppiato POM-LAWAM nella configurazione utilizzata in questo studio è risultato uno strumento valido per fasi preliminari di simulazioni di circolazione e

dispersione di inquinanti, poiché consente di effettuare velocemente numerosi run. In particolare il sistema di modelli potrebbe essere impiegato per la determinazione degli scenari di rischio da oil spill.

Il sistema nella sua configurazione operativa ad alta risoluzione potrebbe inoltre essere di utile impiego nei casi di incidente; la sua risposta “in tempo reale” potrebbe infatti indirizzare gli interventi di bonifica e di mitigazione dei danni.

Bibliografia

- Blumberg, A.F., e Mellor, G.L., A Description of a Three-Dimensional Coastal Circulation Model, *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, ed. da N.S. Heaps, AGU Coastal and Estuarine Sciences, V. 4, 1-16, 1987.
- Ezer, T., On the response of the Atlantic Ocean to climatic changes in high latitudes: Sensitivity studies with a sigma coordinate ocean model, *The Ocean and Rapid Climate Change: Past, Present, and Future*, V.126, American Geophysical Union, 2001.
- Ezer, T., On the seasonal mixed layer simulated by a basin-scale ocean model and the Mellor-Yamada turbulence scheme, *Journal of Geophysics Research*, V. 105, N°C7, 16,843-16,855, 2000.
- Ezer, T., e Mellor, G.L., A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z-level grids, *Ocean Modelling* V. 6, 379-403.
- Ezer, T., e Mellor, G.L., Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, V.32, 185-208.
- Fairall, C.W, Bradley, E.F., Godfrey, J.S., Wick, G.A., Edson J.B., Yung G.S., Cool skin and warm layer effects on sea surface temperature, *Journal of Geophysics Research*, V. 101, 1295-1308, 1996.
- Gasparini, G.P., Schröder, K., Vetrano, A., Astraldi, M., Canali e stretti quali punti di osservazione privilegiata per lo studio della variabilità interannuale nel bacino Mediterraneo, *Clima e Cambiamenti climatici – Le attività di ricerca del CNR*, 521-524, 2007.
- Legambiente e Dipartimento di Protezione Civile, L'inquinamento da idrocarburi nel Mediterraneo, dossier realizzato nell'ambito di *Clean UP the Med*, 2007.
- Leuzzi, G., Monti, P., A coupling of POM with a Lagrangian, first order, autoregressive model', atti del 5th International Symposium on Environmental Hydraulics, 4-7 December, Tempe, AZ, 2007.
- Melani, S., Orlandi A., Brandini C., Ortolani A., Temperatura superficiale del mare da

dati satellitari, *Clima e Cambiamenti climatici – Le attività di ricerca del CNR*, 333-336, 2007.

- Mellor, G.L., Users guide for a three-dimensional primitive equation, numerical ocean model, 2004.
- Mellor, G.L., Ezer, T., A Gulf Stream model and an altimetry assimilation scheme, *Journal of Geophysics Research*, V. 96, N°C5, 8,779-8,795, 1991.
- Mellor, G.L., Ezer, T., e Oey, L.Y., The pressure gradient conundrum of sigma coordinate ocean models, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, V. 11, 1126-1134, 1993.
- Mellor, G.L., Oey, L.Y., e Ezer, T., Sigma coordinate pressure gradient errors and the seamount problem, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, V. 15, 1122-1131, 1997.
- Mellor, G.L., Yamada, T., Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews of Geophysics and Space Geophysics*, V. 20, N°4, 851-875, 1982.
- Millot, C., Circulation in the Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Systems* V. 20, 423-442, 1999.
- Millot, C., e Taupier-Letage I., Circulation in the Mediterranean Sea, *The Handbook of Environmental Chemistry*, V. 1 (*The Natural Environment and the Biological Cycles*), Springer-Verlag Editor, 2004.
- REMPEC, Statistical analysis for alerts and accidents database, 2008.
- Reseghetti, F., Empirical reconstruction of salinity from temperature profiles with phenomenological constraints, *Ocean Science Discussions*, V. 4, 1-39, 2007.
- Rinaldi, E., Studio della circolazione superficiale del Mar Tirreno mediante dati da satellite e dati in situ, Tesi di laurea, 2007.
- Serraval, R., e Cristofalo G.C., On the presence of a coastal current of Levantine intermediate water in the central Thyrrenian Sea, *Oceanologica Acta*, V. 22, N°3, 281-290, 1999.
- Sorgente R, Drago A. F., e Ribotti, A., Seasonal variability in the Central Mediterranean Sea circulation, *Annales Geophysicae*, V. 21, 299-322, 2003.
- Spivakovskaya, D., Heemink A.W., Deleersnijder, E., The backward Îto method for

the Lagrangian simulation with large space variations of the diffusivity, *Ocean Science Discussion*, V. 4, 623-652, 2007.

- Thomson, D.J., Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows, *Journal Fluid Mechanics*, V. 180, 529-556, 1987.
- Tkalich, P., Huda, K., e Gin K., A multiphase model of oil spill dynamics, *Journal of Hydraulic Research*, V. 40, 1-11, 2003.
- Vetrano, A., Gasparini, G.P., Molcard, R., Astraldi, M., Water flux estimates in the Central Mediterranean Sea from an inverse box model, *Journal Geophysics Research*, V. 109, C01019, doi:10.1029/2003JC001903, 2004.
- Jona Lasinio, G., Determinazione delle mappe della climatologia delle onde nel Mar Mediterraneo per la valutazione degli effetti delle condizioni meteo-marine sui trasporti marittimi, 2006.