

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di laurea specialistica in SCIENZE AMBIENTALI MARINE E
OCEANOGRAFIA

**MAPPE DI RISCHIO DA SVERSAMENTO DI
IDROCARBURI PER IL MAR TIRRENO**

Tesi di laurea in OCEANOGRAFIA FISICA

Relatore:

Prof.ssa **Nadia Pinardi**

Presentata da:

Maria Cutarella

Correlatore:

Dott. **Giovanni Coppini**

(I sessione)
Anno Accademico 2007/2008

INDICE

1 Introduzione	3
1.1 Traffico marittimo di idrocarburi nel Mar Mediterraneo	5
1.1.1 Il trasporto petrolifero in Italia.....	7
1.2 Inquinamento marino da idrocarburi	10
1.2.1 Processi di trasformazione e dispersione dell'olio in mare	13
1.2.2 Gli effetti sull'ambiente.....	18
1.2.3 La normativa.....	23
1.3 Il sistema di previsioni di inquinanti a mare	28
1.3.1 MFS: previsioni di corrente	28
1.3.2 Medslik	30
1.4 Obiettivi della tesi	32
2 Modello di dispersione e trasformazione degli idrocarburi a mare	34
2.1 Le correnti di MFS	34
2.1.1 Schema di assimilazione dati.....	36
2.1.2 Controllo di qualità delle previsioni di MFS	37
2.2 Il modello di dispersione e trasformazione: MEDSLIK.....	38
2.2.1 Interfaccia grafica di input.....	39
2.2.2 Modulo di simulazione	42
2.2.3 Interfaccia grafica di output.....	42
2.3 Descrizione dei modelli di trasformazione e dispersione di Medslik.....	45
2.3.1 Avvezione e diffusione della macchia d'olio.	45
2.3.2 Il problema dell' avvezione	48
2.3.3 Algoritmi di trasformazione e dispersione dell'olio.....	50
2.4 Parameters Form.....	52
3 Esperimento di simulazione della dispersione di idrocarburi a mare.....	54
3.1 Area di studio: il Mar Tirreno	54
3.1.1 Circolazione nel Mar Tirreno	55
3.2 Definizione disegno sperimentale	59
3.2.1 Tabella dell'esperimento	62
3.2.2 Analisi statistiche.....	65

4 Mappe di pericolosità	68
4.1 Traccia A: x1-Milazzo.....	70
4.2 Traccia B: x1-Fiumicino	79
4.3 Traccia C, D e E: x1-Livorno, x1-Genova, x1_Savona.....	85
4.4 Traccia F: x1-Cagliari	91
4.5 Punto x1.....	100
4.6 Mappe di pericolosità nel Mar Tirreno.....	108
5 Conclusioni	113
Bibliografia.....	115

Capitolo 1

1 Introduzione

Il petrolio costituisce la principale fonte di energia per la società moderna e viene trasportato per lunghissime distanze sia attraverso oleodotti che con trasporti marittimi.

L'Europa rappresenta il maggior importatore mondiale. Gran parte del greggio e dei suoi derivati (circa il 90%) viene trasportato via mare (Tranfaglia, Migliaccio, 2005), spesso non rispettando le normative vigenti sulla sicurezza della navigazione (Delilah H.A. Al-Khudhairi, 2002). Infatti, le compagnie di navigazione considerano, ancora, la revisione e la manutenzione ordinaria delle navi come costi aggiuntivi, che in un'ottica di maggiori guadagni, è necessario ridurre sempre di più anche a discapito della sicurezza.

Stabilire con esattezza la quantità di idrocarburi che si perde ogni anno in mare risulta estremamente complesso, anche perché oltre agli incidenti una parte degli idrocarburi viene dispersa in mare illegalmente (inquinamento operativo o operativo) al fine di evitare le procedure di lavaggio delle sentine in porto che comporterebbero un aggravio di costi per gli armatori. Il tema dell'inquinamento da idrocarburi colpisce particolarmente l'opinione pubblica per gli effetti e i danni ben visibili che esso determina sull'ambiente, anche se l'inquinamento operativo avviene in mare aperto e può essere monitorato solo attraverso immagini satellitari o aeree.

L'inquinamento da idrocarburi in mare è riconosciuto come una delle principali cause di inquinamento marino ed ha un grave impatto sia biologico che economico.

Il Mar Mediterraneo, in particolare, è uno dei mari più fortemente inquinati a causa della sua morfologia. È un bacino semichiuso delimitato dalle coste dell'Europa Meridionale, dell'Asia Occidentale e dell'Africa Settentrionale e presenta solo due comunicazioni con i mari adiacenti: ad ovest è in collegamento con l'Oceano Atlantico attraverso lo stretto di Gibilterra e a Sud-Est comunica col Mar Rosso attraverso il canale di Suez. Il ruolo svolto dallo stretto di Gibilterra è fondamentale per la sopravvivenza delle forme di vita del Mar Mediterraneo: anche se la sua estensione e la sua profondità sono limitate, il continuo apporto di acque dall'Oceano Atlantico impedisce l'abbassamento del livello marino causato dall'eccessiva evaporazione, che altrimenti sarebbe di circa un metro all'anno, portandolo al totale prosciugamento in appena 1000 anni (Gazale-Porcheddu, 1991). A causa di queste ridotte comunicazioni il ricambio delle acque superficiali è lento, occorrono infatti circa 80-100 anni, mentre si stima che l'intero volume venga rinnovato in un arco di tempo di circa 7500 anni (Cerrano *et al.*, 2004). A questo si aggiunge il fatto che il Mediterraneo è un'area fortemente antropizzata dove è intenso il traffico e la raffinazione del petrolio. Basti pensare che in esso transita il 30% del traffico marittimo internazionale e il 20-25% del petrolio trasportato via mare (REMPEC, 2002); vi circolano quindi enormi quantità di idrocarburi. Le principali rotte del Mediterraneo consentono il trasporto degli idrocarburi tra la Russia, il nord Africa e i paesi Europei occidentali.

Il seguente lavoro tratta del rilascio di idrocarburi operativo da nave nell'ambiente marino.

Si prende in considerazione il bacino del Mar Tirreno, analizzando sulla base delle rotte principali seguite dalle navi e del quantitativo di idrocarburi ivi trasportato la dispersione degli idrocarburi in mare a seguito di rilasci operativi e realizzando delle mappe di pericolosità di tali inquinanti.

1.1 Traffico marittimo di idrocarburi nel Mar Mediterraneo

Il Mar Mediterraneo rappresenta il canale preferenziale per il trasporto di merci di ogni genere. Ogni anno il bacino è attraversato da centinaia di navi che trasportano merci di vario genere, dal petrolio greggio alle merci manufatte. Ma è il trasporto di petrolio greggio e dei prodotti della raffinazione che rappresenta uno dei principali e più preoccupanti rischi per il Mediterraneo sia per il forte rischio di incidente, con conseguente sversamento di prodotti oleosi e inquinanti in mare, che per gli inquinamenti derivati dall'attività operativa illegale delle navi, come lo scarico in mare di acque di sentina e il lavaggio delle cisterne delle petroliere.

Dai dati forniti dall'Unione petrolifera e dal REMPEC (Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea), centro dell'UNEP/MAP (United Nations Environment Programme/Mediterranean Action Plan) e di IMO (International Maritime Organization che svolge attività sulla prevenzione e lotta all'inquinamento da idrocarburi nel Mar Mediterraneo) il traffico petrolifero nel Mediterraneo ammontava, nel 2000, ad oltre 360 milioni di tonnellate annue di petrolio (tabella 1.1), cifra che è ormai arrivata a sfiorare le 400 milioni di tonnellate all'anno con una movimentazione di circa 8 milioni di barili al giorno di petrolio (Bilardo e Mureddu, 2004).

Tipologia prodotti	Intra Mediterraneo	Dal Mediterraneo	Per il Mediterraneo	Totale (Tonnellate)
<i>Prodotti petroliferi</i>	<i>122.670.000</i>	<i>90.010.000</i>	<i>135.810.000</i>	<i>345.000.000</i>
<i>Prodotti chimici pericolosi</i>	<i>10.170.000</i>	<i>9.920.000</i>	<i>9.460.000</i>	<i>19.450.000</i>
<i>Altro</i>	<i>39.480.000</i>	<i>77.130.000</i>	<i>162.380.000</i>	<i>288.900.000</i>

Tabella 1.1 Traffico marittimo nel Mar Mediterraneo

Sempre secondo il REMPEC i principali movimenti annui di petrolio nel Mediterraneo possono essere così schematizzati:

- 180 milioni di tonnellate di petrolio greggio e condensato partono dal Medio Oriente diretti principalmente verso l'Italia. Di questi, 125 milioni di tonnellate passano attraverso il Canale di Suez e dalla condotta di Sumed, 50 milioni attraverso il Bosforo, e 5 milioni dalla Turchia;
- 100 milioni di tonnellate di petrolio greggio e condensato partono dal Nord Africa con destinazione principale la Francia. In particolare 60 milioni provengono dalla Libia e 40 milioni dall'Algeria;
- 20 milioni di tonnellate partono da Paesi mediterranei verso altri Paesi del bacino;
- 20 milioni di tonnellate lasciano il Mediterraneo, di cui 10 milioni attraverso lo Stretto di Gibilterra (soprattutto prodotti raffinati in partenza dalla Francia) e 10 milioni attraverso il canale di Suez ;
- 40 milioni di tonnellate attraversano il Mediterraneo. Di questi 20 milioni di petrolio greggio e condensato entrano nel Mediterraneo partendo dal Mar Nero attraverso il Bosforo e lo Stretto di Gibilterra e 20 milioni partono dall'Egitto (canale di Suez e condotta di Sumed) uscendone poi dallo Stretto di Gibilterra.

Dati forniti dall'UNEP MAP stimano che quantità di 100-150.000 tonnellate di idrocarburi finiscono annualmente nel Mar Mediterraneo, rendendo questo mare quello con la più alta densità di idrocarburi a livello mondiale (Legambiente, 2007).

1.1.1 Il trasporto petrolifero in Italia

L'Italia, avendo una produzione interna alquanto limitata (circa 4.5 milioni di tonnellate all'anno di petrolio grezzo), importa 2.194.000 barili di petrolio al giorno per un totale di circa 110 milioni di tonnellate all'anno (ENI, 2007), di cui circa il 75% è rappresentato da petrolio grezzo ed il rimanente da prodotti derivati.

L'Italia è la nazione con il più alto numero di raffinerie (17), che lavorano un quarto del greggio di tutto il Mar Mediterraneo, circa 2.300.800 barili al giorno, e di principali porti petroliferi (14) e detiene il primato del greggio versato nei principali incidenti con 162.600 tonnellate, subito seguita dalla Turchia, con quasi 50.000 tonnellate e dal Libano, con 29.000 tonnellate (Biliardo e Mureddu, 2004). Proprio a Genova diciassette anni fa si è verificato l'incidente più grave del Mediterraneo, quello della petroliera Haven, considerato il maggior sversamento di tutto il Mediterraneo e uno dei peggiori nel mondo relativi al trasporto marittimo (Amato, ICRAM, 2003). La petroliera cipriota "Amoco Milford Haven", poi ribattezzata Haven, faceva parte di un gruppo di superpetroliere gemelle costruite tra il 1972 e il 1973 nei cantieri navali di Cadice. In data 11 aprile 1991 alle ore 12:40 avvenne il disastro. La petroliera si trovava alla fonda davanti al porto petroli di Genova Multedo quando, durante un'operazione di travaso di greggio, si verificò un'esplosione a bordo. L'incendio durò per tre giorni fino al mattino del 14 Aprile, mentre la nave derivava verso il mare aperto sotto l'effetto della corrente e del vento spandendo petrolio fiammeggiante intorno a sé. Il rimorchiatore "Olanda" dei Rimorchiatori Riuniti del porto di Genova agganciò la nave dal timone di poppa avvicinandola alla costa. Nel corso del rimorchio, però, la prora si staccò affondando ad una profondità di quasi 500 metri. Il relitto galleggiante, inclinato e appruato, continuò a bruciare fino alla completa estinzione spontanea dell'incendio e finì

per affondare dopo poco le ore 10 del 14 aprile posandosi su un fondale di circa 80 metri davanti ad Arenano (figura 1.1).



Figura 1.1 L'inizio dell'affondamento della petroliera Haven

(Fonte: www.haven.it)

Al momento dell'incidente la Haven trasportava 144.000 tonnellate di olio pesante iraniano, oltre ad altre 1.223 tonnellate di diesel e carburanti presenti a bordo (Amato, ICRAM, 2003). Una grande quantità di olio bruciato affondò rapidamente sotto forma di bitume mentre il resto del carico fu disperso dalla corrente Liguro-Provinciale e dai venti predominanti. Si stima che l'affondamento ha riguardato una quantità di circa 10.000-50.000 tonnellate di olio (Medugno, 1992; Fresi, 1992; Volterra, 1992). Il disastroso incendio della petroliera ha avuto effetti devastanti: la morte di cinque persone dell'equipaggio, tra cui il Comandante; la dispersione di petrolio, non solo nelle acque liguri ma anche in quelle francesi, ed ha innescato

una serie di problematiche a catena riguardanti gli impatti che uno sversamento di idrocarburi può avere sull'ambiente marino.

Quello dell' Haven è ad oggi il relitto più grande del Mar Mediterraneo. L'Italia è stata quindi particolarmente segnata da questo evento dato che il petrolio, inesorabilmente sparso in mare, ha avuto effetti devastanti per l'ecosistema marino.

L'Italia importa petrolio da vari paesi produttori:

- Medio Oriente (Arabia Saudita, Iran, Iraq, Kuwait, Syria) che contribuisce per un 45%;
- Africa (Algeria, Camerun, Congo, Egitto, Libia, Nigeria, Tunisia) che contribuisce per un 35%;
- Russia, Azerbaijan, Kazaki (paesi Ex-URSS) che contribuiscono per un 20%.

Le merci raggiungono il nostro paese con sbarchi presso specifici terminal petroliferi, che sono poi abitualmente situati in prossimità degli impianti di raffinazione e/o comunque a ridosso di oleodotti necessari per il trasferimento presso le raffinerie. Di seguito sono riportati i principali terminal portuali petroliferi italiani con relativa percentuale di prodotto transitato annualmente (tabella 1.2) (relativa alle sole importazioni di petrolio grezzo).

Trieste	29%	Cagliari	11%	Milazzo (Messina)	6%
Augusta (Siracusa)	12%	(Gela, Falconara, Fiumicino, Livorno, Taranto)	13%	Savona-Vado Ligure	5%
Genova- Multedo	12%	Priolo (Siracusa)	7%	Venezia Porto Marghera	5%

Tabella 1.2 Principali terminal portuali petroliferi in Italia

1.2 Inquinamento marino da idrocarburi

Una delle definizioni più complete del fenomeno di inquinamento marino sembra essere quella formulata nel corso della sesta sessione della “C.O.I. (Commissione Oceanografica Internazionale)” dell'UNESCO tenutasi a Parigi nel settembre del 1969 secondo la quale l'inquinamento marino è *“l'immissione da parte dell'uomo nel mezzo marino (ivi compresi gli estuari) direttamente o indirettamente, di sostanze o di energie che provocano effetti deleteri, quali danni alle risorse biologiche, pericoli per la salute dell'uomo, ostacoli alle attività marittime, compresa la pesca, diminuzione della quantità dell'acqua dal punto di vista della sua utilizzazione e riduzione delle possibilità offerte nel settore del tempo libero”*.

Nel caso particolare di inquinamento marino da idrocarburi, il problema è ormai noto da più di un secolo, ma solo nel 1967, con l'affondamento della petroliera liberiana “Torrey Canyon” al largo della Cornovaglia, in Gran Bretagna, lo si è esaminato con più attenzione. Dopo l'episodio della Torrey Canyon gli incidenti di petroliere in mare sono aumentati in modo esponenziale, e bisogna poi aggiungere l'inquinamento operativo legato agli scarichi delle acque di lavaggio delle petroliere e quello legato alle perdite di idrocarburi nelle operazioni di perforazione o “drilling”.

L'inquinamento da idrocarburi può essere relazionato a diverse fonti. Oltre alla ben nota responsabilità del trasporto marittimo si affianca quella assai meno nota, ma non meno rilevante, delle fonti di origine terrestre. Gli oli lubrificanti usati, e non correttamente riconsegnati agli enti competenti per un loro corretto recupero, finiscono spesso nelle fogne e nei corpi idrici, per poi raggiungere il mare. Un'altra importante fonte di inquinamento da idrocarburi, seppur difficile da monitorare e quantificare, è data dalle acque reflue piovane che,

“pulendo” le strade dai sedimenti oleosi depositati sull’asfalto (oltre che ovviamente dalle altre sostanze ivi depositate), finiscono per portare parte di tali sostanze a mare. Rilasci di idrocarburi in mare possono derivare dalle attività industriali, dalle operazioni di carico-scarico o di lubrificazione effettuate in ambito portuale, dalle attività di estrazione petrolifera “offshore”, dalle attività operative delle navi, da operazioni illegali come lo scarico degli oli di sentina, oltre che dagli eventi accidentali che coinvolgono petroliere o altre categorie di navi (in relazione ai notevoli quantitativi di combustibile necessario per la propulsione navale). Anche l’inquinamento atmosferico da idrocarburi incombusti (tipico dell’industria e dei trasporti, ivi compresi quelli marittimi) può contribuire, per precipitazione, a deteriorare la qualità dell’ambiente marino. Inoltre, una quota dell’inquinamento marino da idrocarburi ha origini naturali: per infiltrazione dal fondo degli oceani e per erosione delle rocce sedimentarie.

Il seguente schema mostra gli apporti, in termini di percentuali, delle varie fonti all’inquinamento da idrocarburi (figura 1.2)

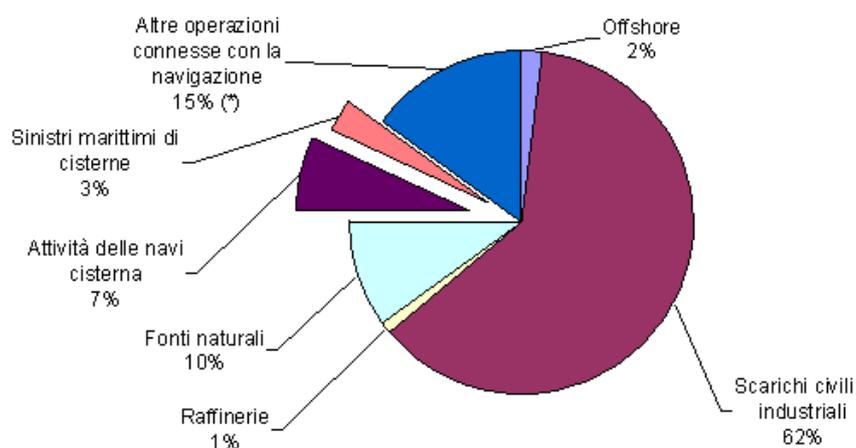


Figura 1.2 Apporto delle varie fonti all’inquinamento da idrocarburi

Nel caso particolare di inquinamento da idrocarburi collegato alle attività in mare, esso può avere differenti origini:

- ***Inquinamento accidentale***: dovuto a rotture di condotte, naufragi, operazioni ai terminali;
- ***Inquinamento sistematico***: causato dall'immissione continua nel tempo di inquinanti (scarichi fognari, reflui industriali, etc.);
- ***Inquinamento operativa***: dovuto alla normale attività di esercizio delle navi: lavaggio cisterne, scarico delle acque di zavorra e di sentina.

Secondo le statistiche IMO, nel Mar Mediterraneo, la percentuale degli inquinamenti da idrocarburi da navi è del 10%. Si tratta di statistiche relative agli sversamenti accidentali che non tengono conto delle operazioni illegali, quali il lavaggio delle cisterne. Analizzando le cause di questi incidenti, si evince che per il 64% dei casi esse sono imputabili ad errore umano, per il 16% a guasti meccanici e per il 10% a problemi strutturali della nave, mentre il restante 10% non è attribuibile a cause certe (figura 1.3).

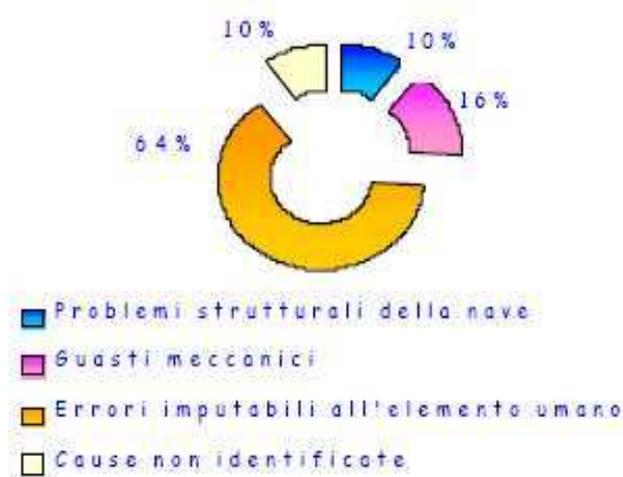


Figura 1.3 Cause di sversamento accidentale di idrocarburi da navi

Ulteriori informazioni sugli sversamenti accidentali sono contenute nel database dell' ITOPF (The International Tanker Owners Pollution Federation Limited) in cui sono elencati: il numero di oil spills, le quantità annuali di petrolio sversato, i luoghi di sversamento, le navi e il tipo di petrolio coinvolto. (www.itopf.com).

Nel corso degli anni si è osservato che, per quanto rilevanti e di ampia portata, gli sversamenti accidentali rappresentano solo una piccola quota del totale degli scarichi dovuti al traffico marittimo; più rilevanti sono le operazioni di routine, in particolare lo zavorramento e il lavaggio delle cisterne (WWF/Legambiente, 2001). Secondo le statistiche dell'ITOPF, l'85% degli sversamenti da navi riguarda quantità minori di 7 tonnellate e l'80% di questi sono collegati alle attività di routine delle navi (O'Brein, ITOPF, 2006). Ogni giorno una grande quantità di olio viene normalmente sversata nei mari durante queste pratiche vietate in tutto il Mediterraneo (Marpol 73/78).

Questa tesi esamina la questione della pericolosità connessa alle attività di esercizio delle navi e agli sversamenti che possono avvenire lungo le rotte delle navi.

1.2.1 Processi di trasformazione e dispersione dell'olio in mare

A seguito di uno sversamento di idrocarburi in mare, meglio conosciuto con l'espressione "oil spill", le sostanze inquinanti si spargono sulla superficie marina formando una pellicola molto sottile, una macchia, che non rimane invariata nel tempo ma subisce una serie di trasformazioni fisiche, chimiche e biologiche che ne modificano le caratteristiche e il comportamento.

I fattori che maggiormente influiscono sul comportamento di idrocarburi a mare sono:

- le caratteristiche fisiche degli idrocarburi, in particolare la viscosità e la densità;
- la composizione e le caratteristiche chimiche degli idrocarburi;
- le condizioni meteorologiche (stato del mare, temperatura dell'aria);
- le caratteristiche dell'acqua di mare (temperatura, presenza di batteri, nutrienti, ossigeno disciolto).

È importante conoscere i processi di trasformazione e di dispersione dell'olio in mare e come essi interagiscono nell'alterare la natura dell'inquinante. La figura 1.4 mostra una rappresentazione schematica di tali processi per uno sversamento di idrocarburi sotto moderate condizioni marine.

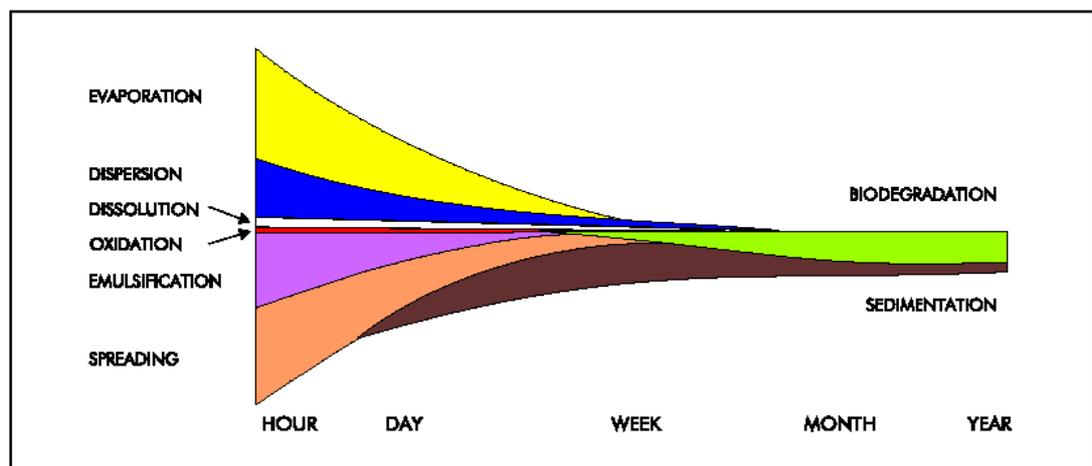


Figura 1.4. Rappresentazione schematica dei processi di trasformazione e dispersione dell'olio in mare. L'ampiezza delle bande mostra l'importanza di ciascun processo in relazione al tempo (fonte: ITOFF, www.itopf.com).

Di seguito si dà una descrizione dei processi in questione. Essi sono raggruppati in figura 1.5

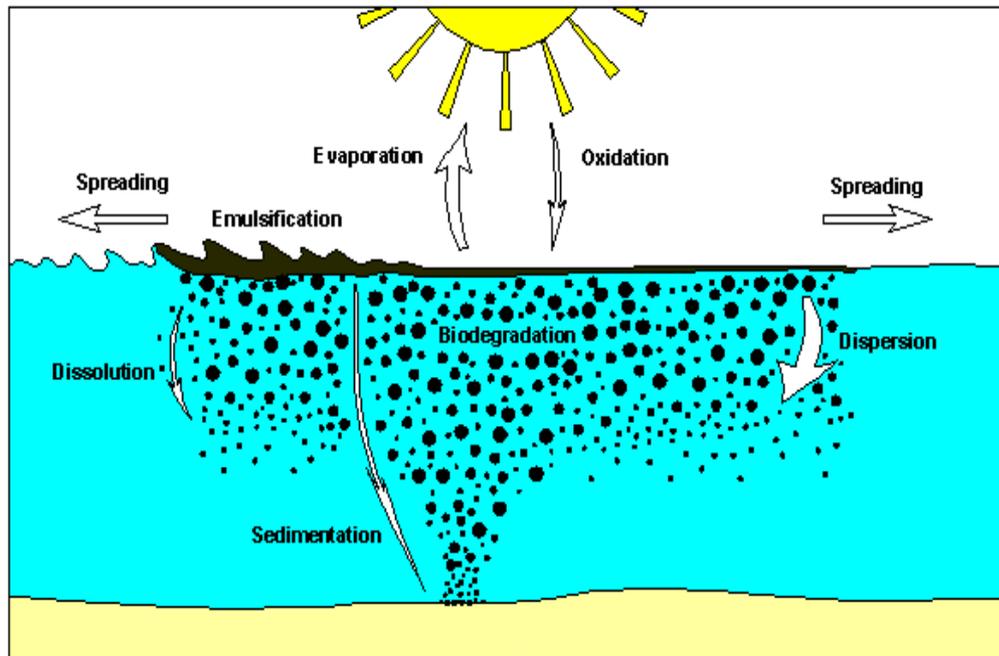


Figura 1.5. Processi di trasformazione e dispersione dell'olio in mare

(fonte: ITOPE, www.itopf.com)

1. **Propagazione**: subito dopo lo sversamento, gli idrocarburi iniziano a propagarsi come una singola macchia con una velocità dipendente dalla loro stessa viscosità: idrocarburi con bassa viscosità (fluidi) si espandono più velocemente di quelli a viscosità superiore.. La propagazione raramente è uniforme ed è quindi possibile osservare variazioni nello spessore (densità) dell'inquinante. La percentuale alla quale gli idrocarburi si propagano è anche determinata da condizioni fisiche quali temperatura, correnti, velocità del vento e correnti tidali.
2. **Evaporazione**: è il principale processo responsabile della rimozione di idrocarburi dalla superficie dell'acqua, tanto più rapido quanto maggiore è la percentuale di elementi leggeri e volatili. Durante le prime ore dallo sversamento evaporano i composti più leggeri, inclusi gli aromatici più tossici; nello

spazio di un giorno evapora il 50% dei composti a 13-14 atomi di carbonio e dopo un mese più della metà dei composti fino a 19 atomi di carbonio non sono più presenti.

3. **Dispersione**: di solito gli idrocarburi si disperdono come frammenti o goccioline di varia grandezza sotto l'azione delle onde e della turbolenza. Tali goccioline resteranno sospese nella colonna d'acqua o ritorneranno in superficie in base alle differenze della loro densità con quella dell'acqua e in funzione delle dimensioni delle goccioline stesse. La velocità alla quale avviene la dispersione dipende in gran misura dalla natura degli idrocarburi e dallo stato del mare. Tale dispersione è più veloce se gli idrocarburi sono leggeri e a bassa viscosità e se il mare è molto agitato.

4. **Emulsificazione**: si ha un' emulsione quando due liquidi si combinano con uno dei due che finisce sospeso sull'altro. In questo contesto l'emulsificazione è il processo mediante il quale le goccioline d'acqua di mare si trovano sospese sugli idrocarburi in conseguenza di un mescolamento dovuto a turbolenze alla superficie del mare. Si formano masse viscite di varia dimensione che galleggiando arrivano sulle spiagge.

5. **Dissoluzione**: i componenti più leggeri che formano gli idrocarburi possono essere dissolti nell'acqua di mare. I composti più solubili sono gli idrocarburi aromatici come il benzene o il toluene, i quali sono anche i primi ad essere persi attraverso l'evaporazione.

6. **Ossidazione**: l'inquinante reagisce chimicamente con l'ossigeno disgregandosi in prodotti solubili o formando composti persistenti: il catrame, originatosi dall'ossidazione di

strati di olio ad elevata viscosità. È la luce del sole ad essere la principale responsabile di questo processo che dipende dal tipo di olio e dalla sua esposizione alla luce. È in ogni caso un evento molto lento.

7. **Sedimentazione**: molti composti degli idrocarburi hanno una densità elevata tale da affondare nell'ambiente marino. Tale affondamento è dovuto all'adesione delle particelle di sedimento o di sostanza organica degli idrocarburi.

8. **Biodegradazione**: l'acqua di mare contiene un range di microrganismi marini (es. batteri) che può utilizzare gli idrocarburi come fonte di energia degradandoli parzialmente o completamente. I principali fattori che determinano la biodegradazione sono: il livello di nutrienti nell'acqua (nitrati e fosfati); la temperatura dell'acqua; il livello di ossigeno presente. La biodegradazione è favorita dall'aumento della temperatura e dall'intimo contatto tra le molecole di acqua e quelle degli idrocarburi; inoltre è un processo che richiede ossigeno, di conseguenza può avvenire solo all'interfaccia idrocarburi-acqua dato che non vi è ossigeno all'interno dell'inquinante stesso.

I processi di propagazione, evaporazione, dispersione, emulsificazione e dissoluzione sono quelli più importanti durante le prime fasi di uno sversamento, mentre l'ossidazione, la sedimentazione e la biodegradazione determinano il destino finale dell'olio.

Gli idrocarburi che sedimentano sul fondo sono quelli più dannosi per l'ecosistema marino: analisi condotte sui sedimenti di una spiaggia inquinata hanno evidenziato che alcune componenti idrocarburiche rimangono assolutamente inalterate per molti anni interferendo con la vita sia degli organismi superiori che dei microrganismi.

1.2.2 Gli effetti sull'ambiente

L'impatto di un oil spill nell'ambiente marino è legato alla probabilità che le sostanze inquinanti raggiungano animali, ecosistemi o coste. In generale, uno sversamento consistente produce effetti **acuti** nel breve termine e **cronici** nel lungo periodo sugli organismi marini (in particolare sulle uova o sui piccoli pesci), sui crostacei (ad esempio sullo zooplancton, che rappresenta la principale fonte di cibo per i pesci), sugli invertebrati filtratori (coralli, spugne, anemoni di mare, bivalvi, etc.) e sull'avifauna che viene a contatto con gli strati oleosi galleggianti.

Parlando di effetti acuti, quando il petrolio viene immesso in mare forma, come detto prima, una sottile pellicola che ha una serie di effetti negativi. Essa impedisce gli scambi gassosi; limita la penetrazione della luce limitando quindi l'attività fotosintetica di alghe e diminuendo la produzione primaria; aderisce agli organismi che vivono all'interfaccia aria/acqua (mammiferi marini, uccelli, organismi bentonici intertidali, alghe, ecc.) impedendone le normali funzioni vitali. Analizzando invece gli effetti cronici questi si verificano qualora la tossicità negli organismi rimane ad un livello subletale anche se le sostanze inquinanti presenti provocano delle sostanziali alterazioni chimico fisiche. Si possono riscontrare infatti alterazioni fisiologiche, fisiche e comportamentali; modificazioni della composizione in specie e modificazioni delle alterazioni fisiologiche (esempio: preda-predatore).

In generale gli impatti recati da un oil spill sull'ecosistema marino sono condizionati da diversi fattori (IPIECA, 1991):

1. **Tipo di petrolio:** i greggi e i prodotti petroliferi differiscono notevolmente per la loro tossicità. Tale parametro si riduce in funzione del tempo di permanenza del petrolio in mare, di

conseguenza uno sversamento che raggiunge una spiaggia rapidamente sarà più tossico per la vita costiera di un altro, soggetto all'azione degli agenti fisici in mare per diversi giorni prima di arenarsi. Da numerosi esperimenti condotti su piante ed animali si è dedotto che effetti gravi sono associati a composti a basso punto di ebollizione (esempio aromatici); il più grave danno tossico è causato da sversamenti di petrolio leggero, soprattutto se confinato in una piccola area. Sversamenti di olio pesante, per contro, possono ricoprire tratti di spiaggia e uccidere gli organismi presenti per soffocamento piuttosto che per effetti tossici acuti.

2. **Quantità di petrolio:** in presenza di un elevato quantitativo di petrolio sversato, la penetrazione entro i sedimenti può aumentare: cresce in questo caso la possibilità che le masse oleose, aggregando pietrisco e ghiaia nel processo di solidificazione, formino strati duri persistenti. Questi pavimenti asfaltici permangono più a lungo sulla zona di retrospiaggia ove possono costituire una barriera fisica che ostacola la ricolonizzazione di piante e arbusti. Dopo uno sversamento, la rimozione in massa del petrolio effettuata da squadre di intervento può accelerare in alcuni casi il ripristino, riducendo l'effetto di soffocamento delle specie biologiche e la possibilità di formazione di pavimenti asfaltici.
3. **Fattori geomorfologici:** in mare aperto è più facile che il petrolio si disperda e quindi il danno ecologico apportato è più limitato. A ridosso delle coste, invece, il danno può rilevarsi più pronunciato in acque basse di baia ed insenature protette, dove la concentrazione di petrolio nell'acqua può raggiungere livelli maggiori rispetto al mare aperto. Il petrolio che raggiunge le coste può andare incontro a diversi destini

provocando una serie di effetti condizionati da due importanti fattori: il livello di energia della costa (grado di esposizione al moto ondoso) e il tipo di substrato. Su coste rocciose esposte, le forme di vita costiera subiscono effetti dannosi minimi con tempi di ripristino delle condizioni di normalità brevi dato che il petrolio non aderisce facilmente su questo tipo di superficie ed anche se lo fa viene rapidamente rimosso dall'azione delle onde. L'elevata persistenza del petrolio si ha, invece, sulle biomasse algali, dove è probabile il suo intrappolamento. Le aree litorali più riparate sono in genere quelle con sedimenti sabbiosi, oppure con battigia fangosa: tra di esse vi sono le paludi costiere e, nei tropici, le aree umide a mangrovie. Tali zone possiedono un'alta produttività biologica ma rappresentano anche le peggiori trappole per il petrolio e per questo motivo sono oggetto di particolare attenzione quando avviene uno sversamento.

4. **Condizioni atmosferiche:** la temperatura e la velocità del vento influiscono sulla riduzione della tossicità del petrolio perché ne favoriscono l'evaporazione. La temperatura, in particolare, influisce sulla viscosità del petrolio, e quindi c'è la tendenza sia alla dispersione che alla penetrazione nei sedimenti. Inoltre essa, insieme all'apporto di ossigeno e di sostanze nutritive, determina il ritmo di degradazione microbica che rappresenta il destino ultimo del petrolio nell'ambiente.
5. **Fattori biologici:** le varie specie viventi hanno differenti sensibilità. Per esempio, molte alghe marine sono abbastanza resistenti, probabilmente a causa del loro rivestimento mucillaginoso e dall'azione di ripulita delle maree. Al

contrario, gli alberi di mangrovia sono molto sensibili all'azione del petrolio.

Di seguito si riportano alcune immagini degli effetti di uno sversamento di petrolio sull'ambiente marino (figura 1.6, 1.7 e 1.8).



Figura 1.6 Effetti dell'incidente della nave Prestige, naufragata al largo delle coste spagnole nel Novembre del 2002.



Figura 1.7 Aspetto del litorale libanese a seguito del disastro ecologico del 2007. 15mila tonnellate di olio combustibile pesante sono finite in mare a causa di un bombardamento israeliano che ha colpito la centrale elettrica di Jieh, a 28 chilometri da Beirut.



Figura 1.8 Immagini del disastro ambientale nel Mar Nero nel 2007: naufragio di cinque navi cariche di zolfo, petrolio e materiali ferrosi.

Legato al concetto di oil spill vi è il problema, particolarmente rilevante, dell'introduzione di specie esotiche nell'ecosistema marino attraverso le acque di zavorra che può alterare lo stato dell'ecosistema stesso. L'istituto centrale per la ricerca applicata al mare (ICRAM), istituto di riferimento del Ministero dell'ambiente per la ricerca marina, da tempo ha rilevato una tendenza alla tropicalizzazione delle specie marine del Mediterraneo, imputandone le cause proprio al progressivo indebolimento delle specie endogene originarie in conseguenza all'inquinamento massivo delle nostre acque con la conseguente immissione di organismi e microrganismi esotici accidentalmente prelevati altrove e trasportati nelle cisterne.

1.2.3 La normativa

L'intenso traffico marittimo e la relativa movimentazione di grandi quantità di idrocarburi ha fatto nascere l'esigenza di una forte regolazione internazionale, oltre che nazionale e comunitaria, delle attività a mare tramite convenzioni specifiche e/o globali. Un primo approccio alle discipline internazionali risale agli anni '50 quando vennero stipulate le prime convenzioni riguardanti la tutela dell'ambiente marino, alcune riferite a specifici settori, altre riguardanti specifici mari o bacini. Particolare importanza assumono:

- 1** la convenzione di Londra del '54 sulla prevenzione dall'inquinamento da idrocarburi (oilpol 1954);
- 2** il trattato di Mosca del '63 sul divieto di esperimento delle armi nucleari nello spazio subacqueo;

- 3 la convenzione di Bruxelles del '69 riguardante l'intervento in alto mare in caso di incidente, per contenere il rischio di inquinamento marino di idrocarburi;
- 4 la convenzione di Londra del '72 sulla prevenzione dell'inquinamento marino derivante dallo scarico di rifiuti e di altre sostanze (CLC 1969)
- 5 la convenzione di Londra del '73 per la prevenzione dell'inquinamento legato alle navi (Marpol 1973) con il protocollo 1978.

E' proprio l'ultima convenzione, la Convenzione Internazionale per la prevenzione dell'inquinamento dalle navi, del 2 novembre del 1973, emendata dal Protocollo del 17 febbraio del 1978 e nota come MARPOL 73/78 , che rappresenta, nell'ambito del trasporto marittimo, il principale strumento per la prevenzione e il controllo degli impatti ambientali delle navi. Essa contiene misure per prevenire e ridurre non solo l'inquinamento accidentale da sostanze pericolose ma anche quello operativo. La MARPOL si compone di una convenzione principale integrata da tre protocolli e sei allegati, tutti dedicati alla prevenzione dell'inquinamento del mare. In particolare l'allegato I regola uno degli aspetti di maggiore preoccupazione per l'opinione pubblica: lo sversamento di idrocarburi in mare. Esso fissa degli appositi standard relativamente alle caratteristiche costruttive delle navi superiori ad un certo tonnellaggio, prevedendo per esse l'obbligo di dotarsi di apposite strutture atte alla conservazione a bordo dei residui di idrocarburi. La convenzione prevedeva, all'inizio della sua emanazione, la realizzazione di cisterne per zavorre segregate che consentivano un ridotto impatto ambientale per le operazioni connesse a carico, scarico, lavaggio e zavorramento e costituivano un importante requisito soprattutto per il contenimento degli sversamenti operativi. Il protocollo del '78, entrato in vigore nel 1983, estendeva il requisito della costruzione delle cisterne anche alle petroliere adibite al trasporto di greggio maggiori di 20.000 tonnellate

di portata e a quelle adibite al trasporto di prodotti petroliferi maggiori di 30.000 tonnellate. Inoltre introdusse un ulteriore requisito: la protezione del carico con spazi vuoti o adibiti a zavorra (protective location) in maniera tale da ridurre i rischi da sversamento in caso di collisione o incaglio. Successivamente, a seguito di decisioni dell'IMO, (6 marzo 1992), sono state apportate modifiche alla MARPOL, entrate in vigore il 6 luglio 1996. Esse prevedevano l'obbligo costruttivo del doppio scafo per le navi cisterna di nuova costruzione e per le navi motoscafo, consegnate in un periodo antecedente il 6 luglio 1996, un programma di progressiva eliminazione, secondo un preciso calendario. Ulteriori e più rigide misure vennero poi introdotte dalle modifiche entrate in vigore il 1 settembre 2002.

L'allegato I della MARPOL 73/78 prevede anche la presenza nei porti di appositi impianti dove le petroliere e le altre navi hanno l'obbligo di scaricare i residui e le miscele di idrocarburi. Infatti tali sostanze non possono essere assolutamente scaricate in mare, tranne nel caso in cui siano contemporaneamente soddisfatte una serie di condizioni tassativamente elencate. Alcune zone per la loro particolare conformazione sono ritenute "zone speciali". In queste aree è assolutamente vietato " ad ogni petroliera e ad ogni altra nave di stazza lorda uguale o superiore alle 400 tonnellate" lo scarico in mare. Fra le zone speciali individuate dalla MARPOL è compreso anche il Mar Mediterraneo, pertanto l'Italia è fra i paesi con le norme più rigorose. In Italia, la difesa dell'ambiente marino è fondamentalmente basata sulla legge del 31 dicembre 1982, n. 979 (Disposizioni sulla difesa del mare), la legge 8 luglio del 1986 n. 349, istitutiva del Ministero dell'ambiente e indicante alcune regole in materia di danno ambientale, e sulla legge 28 febbraio del 1992, n. 220. Ad esse fanno corollario una serie di leggi settoriali per la tutela delle acque dall'inquinamento, la gestione dei traffici e così via. In particolare l'articolo 16 della legge 979 fa divieto a tutte le navi, nell'ambito delle

acque territoriali e nelle acque marittime interne, compresi i porti, di versare in mare o causare lo sversamento di idrocarburi o miscele di idrocarburi, nonché delle altre sostanze nocive all'ambiente marino. È inoltre vietato alle navi battenti bandiera italiana di scaricare le medesime sostanze anche al di fuori delle acque territoriali. Di conseguenza è prevista un'attività di controllo e di sorveglianza della navigazione delle navi che trasportano idrocarburi e sostanze pericolose attraverso una flotta antinquinamento che oltre ad intervenire in caso di inquinamento avvenuto (raccogliere le eventuali sostanze inquinanti dal mare), svolge anche un'importante opera di deterrente grazie al pattugliamento continuo delle coste rispetto all'inquinamento cosiddetto "volontario", o anche da lavaggio delle cisterne. Oggi c'è grande collaborazione tra il Ministero dell'ambiente e il Comando generale delle Capitanerie di porto.

La convenzione MARPOL comprende poi anche altri allegati che hanno grande rilevanza per il controllo e la prevenzione degli impatti ambientali delle navi. Il 27 settembre 2003 è entrato in vigore per le navi di nuova costruzione l'allegato IV che regola lo scarico delle acque nere dalle navi detto "sewage". Tale termine comprende i liquami scaricati da toilette, da locali di medicazione e da locali bestiame, nonché altre acque di scarico; ma non regola gli scarichi di acque grigie, cioè provenienti da cucine, lavanderie, etc.

L'applicazione delle disposizioni emanate dalla MARPOL è stata sollecitata dalla "Convenzione sulla salvaguardia del Mar Mediterraneo" e dalla "Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare", stipulate rispettivamente a Barcellona nel 1976 e a Montego Bay nel 1982. La convenzione delle Nazioni Unite sul Diritto del Mare (10 dicembre 1982) di Montego Bay (UNCLOS) è stata ratificata e resa esecutiva in Italia con la legge 6 dicembre 1994, n. 689. Essa rappresenta il testo di base del diritto internazionale del mare per ampiezza di contenuti e per numero delle parti contraenti, vincola infatti oltre 195 Stati; sancisce la libertà di navigazione nelle

acque internazionali; disciplina e garantisce anche la navigazione nelle acque territoriali e negli stretti. Questa convenzione stabilisce il diritto di ogni Stato a fissare fino a 12 miglia marine dalla linea di base il proprio limite esterno delle acque territoriali e inoltre dà il diritto di transito continuo e rapido definito “passaggio inoffensivo” alle navi degli altri Stati. Il passaggio è inoffensivo quando non pregiudica la pace, il buon ordine e la sicurezza dello Stato rivierasco e se non è finalizzato a realizzare nelle acque territoriali attività di ricerca, di pesca e di inquinamento, ma questo ultimo solo se internazionale e grave. In altre parole non è previsto né ammesso nessun intervento nei confronti di navi internazionali in transito o in accesso nelle nostre acque, neanche a fronte di pericolo o rischio di inquinamento.

Per quanto riguarda la normativa concernente la tutela, nello specifico, del Mar Mediterraneo è da citare la ormai famosa Convenzione di Barcellona del '76. Nel 1975 sull'iniziativa del programma ambientale delle Nazioni Unite (UNEP) tutte le nazioni che si affacciano sul Mediterraneo (tranne l'Albania, l'Algeria e la Siria) si sono riunite a Barcellona per formare una struttura chiamata MAP (Mediterranean Action Plan), piano di azione mediterraneo, il cui obiettivo era fermare la degradazione veloce del mare approntando tutte le misure adatte a evitare, ridurre e combattere l'inquinamento nella zona del Mar Mediterraneo. La convenzione contiene sei protocolli che forniscono un profilo dettagliato delle misure che devono essere utilizzate per raggiungere l'obiettivo prefissato. Tale Convenzione è stata adottata nel 1976 ed è stata ratificata dalle parti interessate nel 1978. Essa, per oltre 20 anni, è stata scritta e riscritta. Nel 1995 le correzioni alla Convenzione hanno stabilito il Principio Precauzionale ed insieme come nuovo ed ultimo obiettivo l'eliminazione completa delle fonti di inquinamento. Tale principio comporta che misure precauzionali siano da attuare qualora ci siano ragioni fondate che un'attività sia probabile causa di danno all'ambiente, anche se non ci sia una prova conclusiva. Questa

ristrutturazione del MAP è attualmente conosciuta come MAP II. Oggi 20 paesi mediterranei includendo l'Unione Europea sono le parti contraenti della Convenzione di Barcellona.

1.3 Il sistema di previsioni di inquinanti a mare

Nel trattare un oil spill tre sono gli aspetti principali da analizzare: dove arriverà l'olio, quando arriverà e quale sarà il suo stato all'arrivo. Le prime due sono le questioni generalmente più critiche da affrontare, esse dipendono completamente dall'aver valori attendibili delle correnti marine e dati ugualmente attendibili del vento.

1.3.1 MFS: previsioni di corrente

Per il Mar Mediterraneo, il Gruppo Nazionale di Oceanografia Operativa (GNOO) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) è in grado di produrre previsioni dello stato del mare (correnti marine, temperature, salinità, ecc.). Il Sistema di Previsioni del Mediterraneo, Mediterranean Forecasting system (MFS), è stato sviluppato negli anni passati all'interno di progetti finanziati dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, dal Ministero degli Affari esteri e dalla Comunità europea, e viene oggi mantenuto operativo dal gruppo di oceanografia operativa dell'INGV.

MFS rappresenta un utile strumento atto ad indagare l'evoluzione di tutte le componenti della circolazione integrando in un unico sistema osservazioni in situ, da satellite e simulazioni numeriche. Grazie ad esso vengono emesse vere e proprie "previsioni del tempo del mare", relative a campi di temperatura, salinità, intensità e direzione delle correnti e livello del mare non mareale. All'interfaccia area-mare

vengono previsti i campi di sforzo del vento, di anomalia di elevazione della superficie del mare e di flusso di calore. Il codice numerico utilizzato per il modello è OPA (acronimo per Ocean Parallelise), versione 8.1, sviluppato dall'Istituto Pierre Simon Laplace, Laboratoire d'Océanographie DYnamic et de Climatologie, Paris. Una descrizione dettagliata di questo codice si trova in Madec et al. (1998). Il modello è alle equazioni primitive, le equazioni di Navier-Stokes e presenta una risoluzione orizzontale pari a $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ e 72 livelli verticali non omogeneamente distribuiti. La figura seguente mostra il dominio del modello e la sua batimetria (figura 1.9)

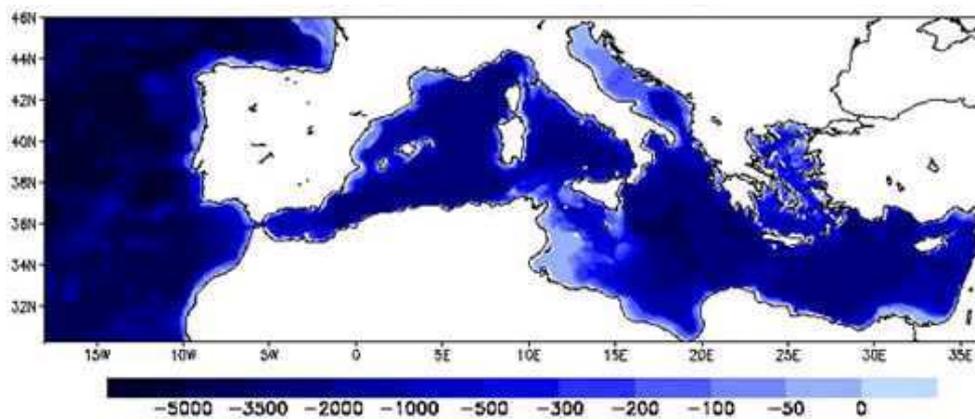


Figura 1.9 Dominio e batimetria usata nel MFS

Usando i forzanti atmosferici dell'ECMWF messi a disposizione dell'INGV dall'Aeronautica Militare Italiana, il sistema di previsione produce ogni giorno dieci giorni di previsione oceanica consultabili su siti web aggiornati giornalmente (<http://gnoo.bo.ingv.it/mfs> per il Mar Mediterraneo e <http://gnoo.bo.ingv.it/afs/> per il Mar Adriatico). A titolo di esempio viene mostrata di seguito un'immagine riferita all'andamento delle correnti superficiali (figura 1.10):

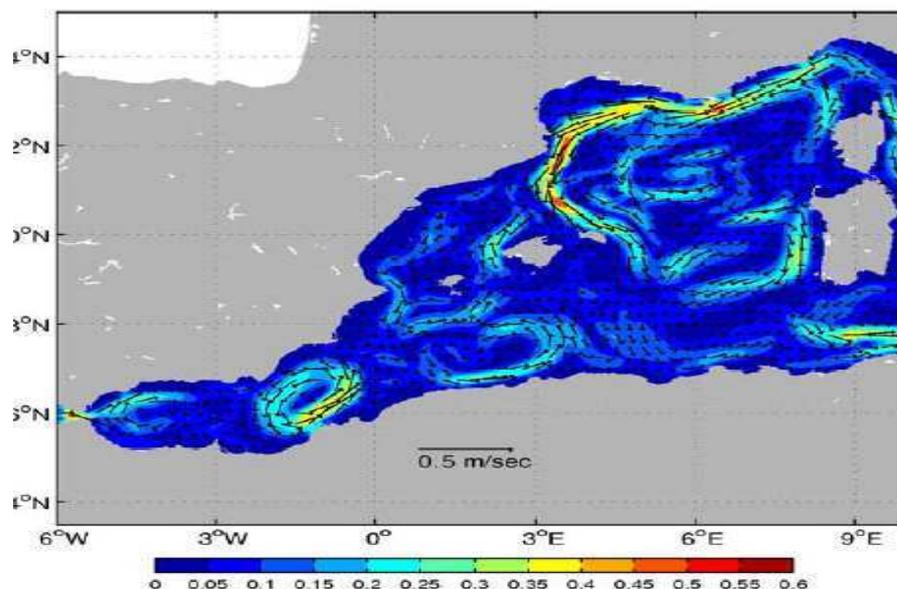


Figura 1.10 Intensità e direzione delle correnti superficiali calcolate dalle analisi di MFS per il mese di Novembre 2007 nel Mediterraneo occidentale. Si nota una maggiore intensità lungo le costa Liguro-Provenzale, nel Golfo del Leone e nel Mare di Alboran.

Il sistema di previsioni ed analisi del Mar Mediterraneo risulta un utile strumento per migliorare la capacità di conoscere lo stato del mare e il suo evolvere nel tempo, per valutare la salute dell'ecosistema marino, ed in particolare per raggiungere l'obiettivo della gestione sostenibile delle risorse e la protezione dell'ambiente costiero (Pinardi et al., 2003).

1.3.2 Medslik

I dati di corrente prodotti dal sistema MFS possono essere utilizzati da specifici strumenti nella gestione di situazioni di emergenza. In particolare, a seguito di un oil spill, vengono accoppiati al sistema di previsione MFS modelli di dispersione di inquinanti che permettono di simulare la dispersione e la trasformazione della macchia di inquinante in mare nello spazio e nel tempo. Il modello di dispersione degli inquinanti utilizzato in questa tesi si chiama MEDSLIK

(Zodiatis et al. 2003, Lardner et al. 1998). Esso predice il destino di uno sversamento di idrocarburi in mare. Il sistema accoppiato MFS-MEDSLIK è in grado di predire la dispersione e la trasformazione di una macchia d'olio. Il sistema di previsioni MFS fornisce al modello MEDSLIK le informazioni relative alla direzione e intensità delle correnti, alla direzione e intensità del vento e alla temperatura della superficie del mare. Il modello MEDSLIK offre, tramite la sua interfaccia grafica, la possibilità di definire il tipo di olio sversato, la posizione, il tempo e la durata dello sversamento. Gli input necessari al modello MEDSLIK, forniti da MFS o definiti dall'utente attraverso l'interfaccia, sono schematizzati in figura 1.11.

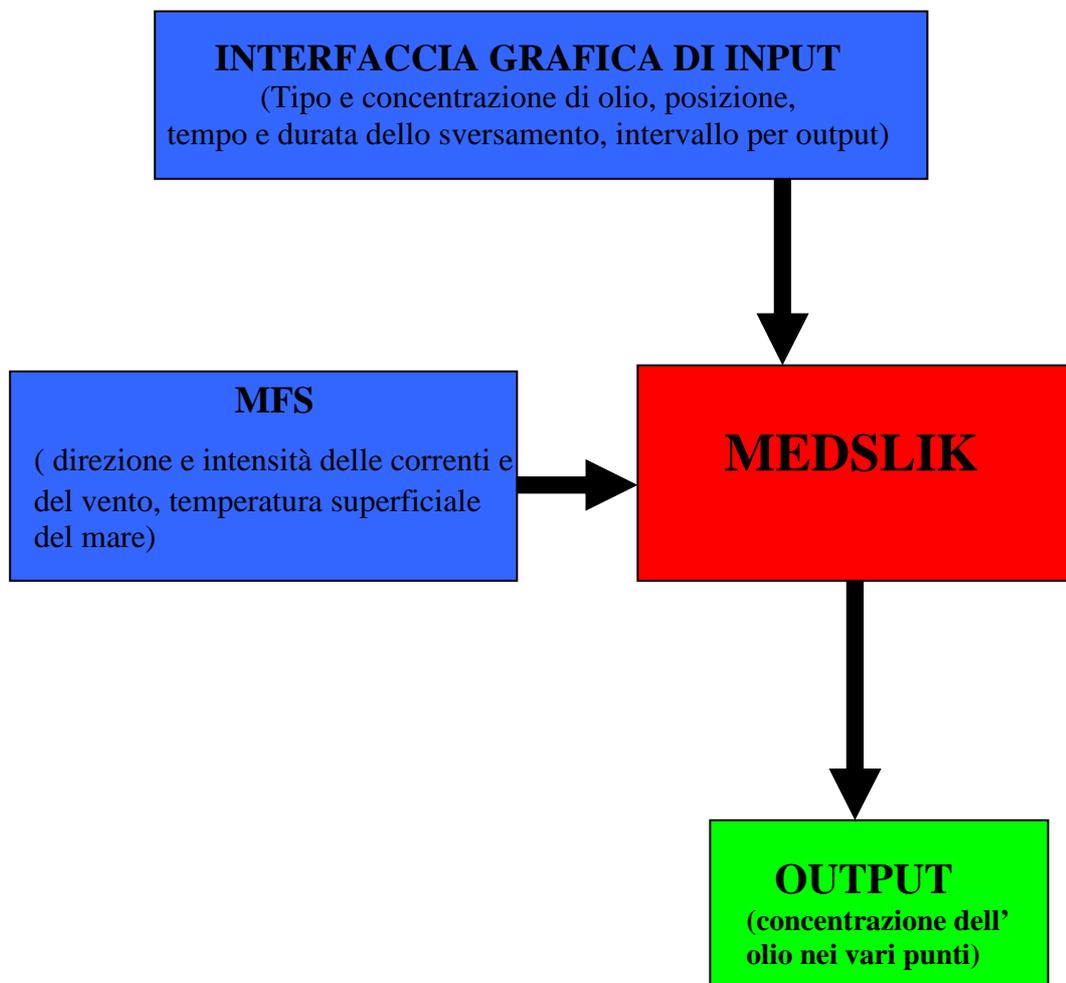


Figura 1.11 Schema sistema accoppiato MFS-Medslík.

In questa tesi il sistema MFS-MEDSLIK viene utilizzato per stimare la distribuzione degli idrocarburi rilasciati da sversamenti operativi lungo le principali rotte del Mar Tirreno.

1.4 Obiettivi della tesi

L'obiettivo di questa tesi è valutare la variabilità spaziale e temporale della pericolosità legata agli sversamenti operativi da nave, definendo mappe di pericolosità di certi livelli di concentrazione di idrocarburi in mare.

La dispersione di inquinanti a mare, nello specifico nel Mar Tirreno, associata allo sversamento di idrocarburi viene analizzata considerando, in particolare, gli sversamenti legati alle attività di routine delle navi, che costituiscono quello che è stato definito sopra come “inquinamento operativo”. Al fine di valutare come questi idrocarburi si disperdono in mare è stato pianificato e svolto un esperimento di modellistica, descritto in dettaglio nei capitoli successivi. Il disegno dell'esperimento si articola come segue:

- ✓ si definiscono le rotte principali di trasporto di petrolio seguite dalle navi nel Mar Tirreno;
- ✓ si discretizza lo sversamento operativo, che può avvenire in qualsiasi punto lungo la rotta, ipotizzando che gli sversamenti avvengano, lungo ogni rotta, in punti distanti circa 50 miglia l'uno dall'altro, detti punti di rilascio;
- ✓ si svolgono simulazioni in ogni punto di rilascio per ogni giorno del 2005 e si segue la dispersione e la trasformazione dell'olio per i 10 gg successivi al rilascio;
- ✓ viene salvato l'output del modello come snapshot giornaliero. Esso contiene la concentrazione dell'olio nei punti di rilascio.

Ogni simulazione fornisce così, per ogni punto e per ogni giorno, dieci file di output. Si procede quindi all'analisi di tali output:

- ✓ l' output viene aggregato nello spazio sommando i vari punti di una singola rotta, definita traccia;
- ✓ l'output viene aggregato nel tempo, calcolando la massima concentrazione riscontrata nei 10 giorni di simulazione.

Il risultato intermedio è una mappa mensile di concentrazione di ogni singola traccia.

A questo punto si esegue un'analisi statistica: si fissa una concentrazione soglia di riferimento e si calcola la percentuale delle simulazioni che superano tale soglia.

Il risultato finale consiste in mappe di pericolosità. La pericolosità è presentata come la frequenza di accadimento dell'evento di superamento della concentrazione soglia di riferimento degli idrocarburi a mare e viene espressa come percentuale di simulazioni che superano la soglia di riferimento.

Capitolo 2

2 Modello di dispersione e trasformazione degli idrocarburi a mare

2.1 Le correnti di MFS

Prima di descrivere in dettaglio il modello di dispersione e trasformazione di idrocarburi utilizzato in questa tesi è opportuno soffermarsi su alcuni aspetti del sistema di previsione del Mediterraneo dato che le correnti svolgono un ruolo fondamentale ai fini dell'analisi della dispersione di un'inquinante in mare.

Il sistema MFS si basa sull'ipotesi che la circolazione generale a larga scala influenzi direttamente o indirettamente, le variazioni idrodinamiche e le proprietà degli ecosistemi, sia nelle aree costiere, sia nelle zone di piattaforma continentale(Pinardi et al., 2003).

MFS è costituito da un modello numerico (OPA) forzato da dati atmosferici (forzanti atmosferici dell'ECMWF messi a disposizione dall'Aeronautica Militare Italiana) e uno schema per l'assimilazione di tutti i dati disponibili sia raccolti in situ che da satellite, questo perché le osservazioni provenienti sia da dati da satellite che in situ hanno una bassa risoluzione spaziale e temporale e quindi devono essere integrate con i modelli numerici attraverso le tecniche di assimilazione di dati.

In figura 2.1 è mostrato lo schema di assimilazione giornaliero.

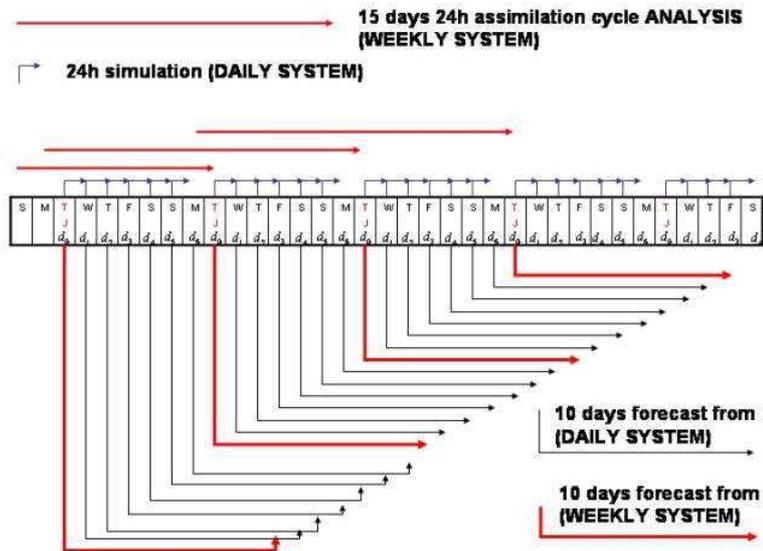


Figura 2.1 Ciclo di assimilazione giornaliero

I dati disponibili per il Mar Mediterraneo sono quelli di profili verticali da sonde a perdere chiamate XBT (Expandable BathyThermograph) la cui raccolta è coordinata dall'ENEA: (<http://enea.santateresa.iy/soop>), profili verticali di temperatura e salinità forniti dal sistema di boe derivanti e profilanti chiamate ARGO (coordinate dall'OGS, <http://poseidon .ogs.trieste.it>), dati da satellite di SLA (Sea Level Anomaly, messi a disposizione da CLS, Tolosa, Francia) e dati da satellite di SST (Sea Surface Temperature messi a disposizione dal Gruppo di Oceanografia da satellite dell'ISAC CNR, <http://gos.ifa.rm.cnr.it>). Questi dati vengono trasmessi in tempo reale e servono per aggiornare e correggere le simulazioni del modello numerico. Ogni giorno questo ciclo di lavoro viene ripetuto in modo da avere una previsione a dieci giorni che riguarda la direzione e l'intensità delle correnti alle varie profondità, le variazioni di temperatura e salinità e il livello del mare.

2.1.1 Schema di assimilazione dati

Dal 10 maggio 2005 MFS utilizza il SYS1 come sistema di assimilazione multivariata di dati.

Ogni settimana, il martedì, vengono assimilati tutti i dati disponibili per le due settimane precedenti (da J0-14 a J0) il giorno d'inizio della previsione. JO è il giorno di inizio della previsione. Lo schema di assimilazione utilizzato è il System for Ocean Forecast and Analysis ([SOFA](#)) che è un sistema di interpolazione ottimale di ordine ridotto (DeMey and Benkiran, 2002). La SST viene assimilata tramite un termine di rilassamento che corregge il flusso di calore alla superficie (Pinardi et al., 2003). Invece gli altri tre data sets (SLA, XBT e ARGO) vengono assimilate utilizzando una matrice di correlazione dell'errore del modello (cioè correlazione tra gli errori di temperatura, salinità, elevazione della superficie libera e funzione di flusso barotropica). L'assimilazione viene fatta con un ciclo giornaliero. Per la produzione di ciascun giorno di analisi il modello viene integrato per 24ore al termine delle quali viene fatta l'analisi. Il ciclo d'assimilazione inizia dalle due settimane che precedono il giorno d'inizio della previsione, ciò significa che vengono creati 14 giorni d'analisi. Per poter produrre i campi di background il modello viene forzato dai flussi alla superficie calcolati a partire dai dati delle analisi ECMWF per la temperatura dell'aria, umidità, venti e copertura.

2.1.2 Controllo di qualità delle previsioni di MFS

La valutazione della qualità dei prodotti di MFS viene fatta confrontando tali prodotti con i dati *in-situ* e da satellite. Attualmente il sistema MFS viene validato tramite il confronto con:

1. l'anomalia del livello del mare da satellite (SLA). Una procedura automatica calcola la radice quadratica media (Root Mean Square- RMS) delle differenze fra il valore del livello del mare del modello e quello misurato da satellite.
2. i profili di temperatura e la salinità misurati dalle boe derivanti ARGO. Ogni settimana viene calcolato l'RMS (errore quadratico medio) delle differenze fra il valore di temperatura del modello MFS e quello misurato dalle boe ARGO e dalle sonde XBT a determinate profondità (8m, 30m, 150m, 300m, 600m). Analogamente viene calcolato anche l'RMS delle differenze fra il valore di salinità del modello MFS e quello misurato dalle boe ARGO a determinate profondità.
3. i profili di temperatura collezionati con le sonde XBT.

2.2 Il modello di dispersione e trasformazione: MEDSLIK

Medslík è un modello tridimensionale progettato per predire il trasporto e il destino di uno sversamento di idrocarburi in mare. Il modello stato sviluppato da Lardner et al. nel 1998 presso il centro di Oceanografia dell'università di Cipro. Il modello viene installato su un pc Windows e consiste di tre parti: un'interfaccia grafica di input, un modulo di simulazione e un'interfaccia grafica di output (figura 2.2).



Figura 2.2 Schermata iniziale di Medslík (interfaccia grafica di input, modulo di simulazione, interfaccia grafica di output).

Attraverso l'interfaccia grafica di input l'utente inserisce i dati che riguardano lo sversamento (giorno, mese, anno, ora, quantità di olio rilasciato, luogo di rilascio, durata dello sversamento, tipo di olio, lunghezza della simulazione e intervallo per gli output); il modulo di

simulazione esegue il calcolo per calcolare la posizione dell'olio e l'interfaccia grafica di output permette all'utente di visualizzare i risultati (output) ottenuti.

La versione usata nel seguente lavoro è la 5.2.

Con questo modello si simula la dispersione di una macchia d'olio predicendone la posizione ad intervalli di tempo specificati dall'utente. L'output del modello viene salvato su una griglia regolare adottata il cui passo viene stabilito dall'utente nell'interfaccia di output.

2.2.1 Interfaccia grafica di input

L'interfaccia di input è parte essenziale di una simulazione, essa crea le condizioni iniziali su cui impostare l'esperimento e stabilisce i parametri del modello. Si descriveranno di seguito i parametri di input per una previsione di un oil spill.(figura 2.3)

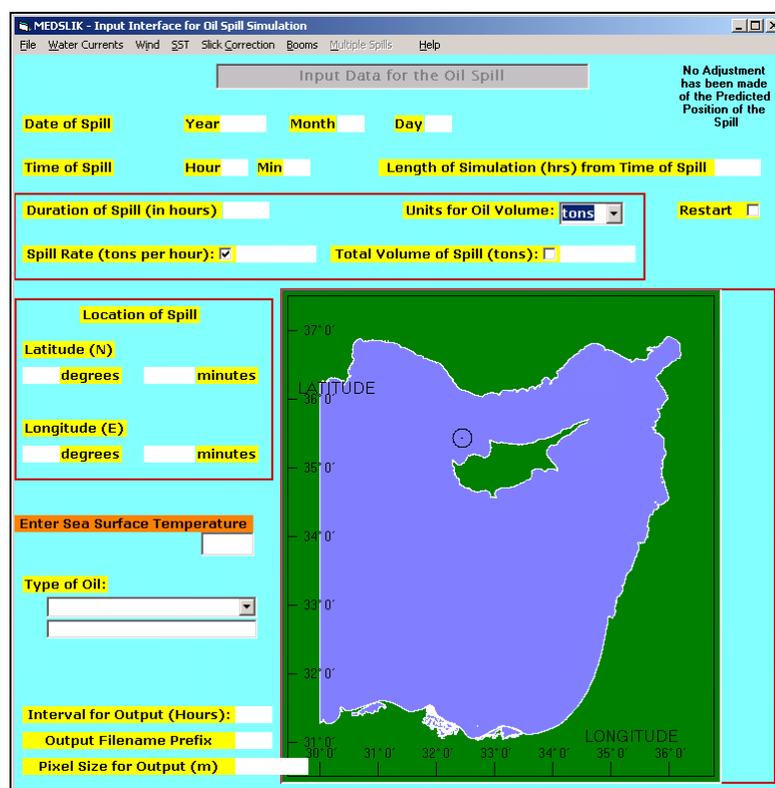


Figura 2.3 Interfaccia grafica di input per una simulazione di oil spill

Tali parametri, una volta inseriti saranno scritti in un file di input: chiamato *medslik5.inp* e poi letti dal modulo di simulazione, il quale li userà per eseguire il calcolo della simulazione.

Si tratta di:

Date of Spill: anno, mese e giorno in cui inizia lo sversamento.

Time of Spill: l'ora del giorno, tra 0 e 23 ore, e i minuti dell'ora, tra 0 e 59, in cui inizia lo sversamento.

Duration of the Spill: il numero di ore durante le quali l'olio è stato sversato. Per un oil spill istantaneo si usa il valore 0.

Length of the Simulation: il numero di ore dall'inizio dello sversamento per le quali è richiesto lo stato dell'olio.

Units of Oil Volume: unità di misura (barili, tonnellate o metri cubi dell'olio) in cui è dato il volume di olio.

Rate of Spillage: la percentuale per ora dell'olio sversato.

Total Volume of Spill: normalmente, ad eccezione degli sversamenti istantanei, questo parametro è calcolato in automatico dal programma, ma può anche essere inserito a scelta dall'utente.

Location of the Spill: latitudine e longitudine del luogo di sversamento mostrato nella mappa adiacente.

Type of oil: il nome del tipo di olio che si sta usando nella simulazione, può essere selezionato da una lista di circa 200 tipi di olio. Se non si conosce il nome preciso dell'olio si seleziona "Generic oil" e poi si inserisce il numero **API**.

Il grado API è uno dei parametri che caratterizza il petrolio grezzo e rappresenta una misura inversa della densità secondo la formula:

$$API = \left(\frac{141,5}{densità} \right) - (131,5) \quad (2.1)$$

Ad un'estensione della scala da 1 a 100 gradi corrispondono i valori di densità da 1,076° a 0,611°. Si definiscono *oli pesanti* quelli che hanno

un API<25 e *oli leggeri* quelli con un API>40. l'API dell'acqua è 10.
In particolare in Medslik :

- **API<26:** very heavy grade
- **26<API<29:** heavy grade
- **29<API<32:** medium heavy grade
- **32<API<38:** medium light grade
- **API>40:** very light grade

I grezzi leggeri sono più facili da lavorare perché sono più ricchi di componenti pregiati (frazioni leggere) che possono essere estratti dal grezzo con processi meno complessi e onerosi; quelli più pesanti sono più difficili da raffinare e richiedono processi più complessi.

Nel corso dell'esperimento di questa tesi si è inserito un grado API pari a 28, numero ottenuto facendo una media del grado API dei principali petroli importati dall'Italia. Le principali importazioni, per l'anno 2005, preso in esame nel suddetto lavoro, provengono dalla Russia, dalla Libia, dall'Arabia Saudita e dall'Iran (Unione Petrolifera, 2006), con petroli con grado API rispettivamente pari a : 32, 7.5, 33 e 31.

Time Interval for Output: intervallo (in ore) tra i vari output creati dalla simulazione; l'utente può scegliere ogni quante ore vuole visualizzare un output.

Output filename Prefix: prefisso di tre lettere da dare al nome del file di output. Il nome di default è out.

Output Pixel Size: la grandezza, in metri, dei quadrati usata dal modello di simulazione per calcolare la densità dell'olio superficiale nella macchia e dell'olio disperso.

Restart Time: nel caso si voglia far ripartire una simulazione terminata al tempo t_1 tale tempo in ore viene qui specificato. La simulazione ripartirà dal tempo t_1

2.2.2 Modulo di simulazione

Questo modulo esegue il calcolo richiesto dalla simulazione dello sversamento in una finestra DOS separata e stampa a video vari messaggi per indicare lo stato di avanzamento del processo. Vengono visualizzati anche le componenti della velocità della macchia d'olio. Una simulazione per un periodo di uno o due giorni impiegherà pochi secondi per eseguire il calcolo e a simulazione completata apparirà un messaggio di notifica nella finestra DOS; in caso la simulazione si blocchi in maniera anormale apparirà a video invece un messaggio di errore.

I risultati della simulazione vengono scritti in una sub-directory *output* all'interno di Medslik che dovranno essere spostati in un'altra cartella perchè ogni qual volta si inizia una nuova simulazione i nuovi file di output andranno a cancellare quelli vecchi.

2.2.3 Interfaccia grafica di output

Per ogni simulazione di oil-spill, attraverso il modello di simulazione vengono generati tre file di output ad intervalli uguali al valore "Time Interval for Output" inserito come dato di input dall'utente nell'interfaccia grafica di input. Il nome per questi file è *outxxxx.srf*, *outxxxx.dsp* e *outxxxx.cst*, dove *xxxx* è un intero a quattro cifre che specifica il numero di ore trascorse dall'inizio dello sversamento. Il file *outxxxx.srf* contiene le posizioni e le concentrazioni dell'olio superficiale, informazioni sulla velocità del vento al centro della macchia d'olio e sulle correnti; l'*outxxxx.dsp* contiene le posizioni e le concentrazioni dell'olio disperso e l'*outxxxx.cst* contiene le posizioni e concentrazioni dell'olio che è permanentemente a costa. Nei primi due file la concentrazione è data come unità di olio per chilometro quadrato; per l'olio a costa la concentrazione è espressa come unità di olio per chilometro lineare di costa.

Per ogni segmento di costa che è stato impattato dalla particella di olio, si tiene in memoria la quantità di olio perso da ognuna delle particelle, definitivamente attaccato al segmento. Dividendo poi per la lunghezza del segmento si ottiene il volume di olio per chilometro di costa che si è depositato su tale segmento (anche se, come si dirà più avanti, la permanenza delle particelle di olio sulla costa può non essere permanente).

La subdirectory output contiene anche un file chiamato *medslik.fte* nel quale si trovano valori di: percentuale di olio evaporato, di olio disperso nella colonna d'acqua, di olio rimasto in superficie e di olio a costa, densità e viscosità del primo e dell'ultimo olio rilasciato. Tali valori sono mostrati ad intervalli di 30 minuti.

I file di output possono essere poi visualizzati graficamente attraverso l'interfaccia grafica di output: sulla mappa viene mostrata la posizione della macchia d'olio (dispersa, in superficie o a costa) come una serie di rettangoli colorati, ogni rettangolo corrisponde ad un'area attorno al punto griglia e ogni colore indica una certa densità dell'olio in accordo alla scala di colori mostrata a destra della mappa. Quest'ultima può essere aggiornata automaticamente per nuove visualizzazioni in base alla massima densità dell'olio presente oppure mantenuta costante.

In questa tesi si prende in considerazione l'olio in superficie e la sua dispersione.

L'interfaccia grafica di MEDSLIK visualizza la concentrazione dell'olio, la velocità del vento al centro della macchia con una freccia bianca e le correnti marine dattorno alla macchia con una serie di frecce nere (figura 2.4)..

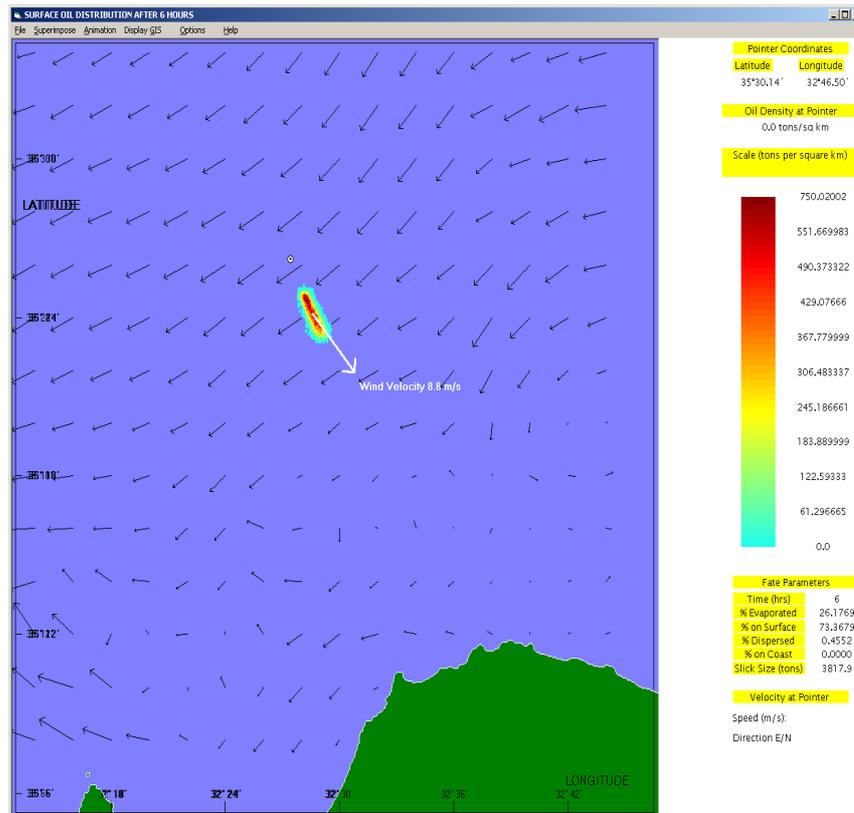


Figura 2.4 Visualizzazione dell'olio in superficie. Al centro, la macchia d'olio, la freccia bianca corrisponde alla velocità del vento e le frecce nere sono relative alle correnti marine. A destra, la scala dei colori e quindi della corrispondente densità dell'olio e i valori (in percentuale) di alcuni parametri.

2.3 Descrizione dei modelli di trasformazione e dispersione di Medslik

2.3.1 Avvezione e diffusione della macchia d'olio.

Le particelle dell'olio in uno sversamento sono trasportate dall'acqua nella quale o sulla quale esse si trovano. È quindi importante inserire i valori corretti di corrente. In Medslik l'utente può scegliere di inserire correnti climatologiche (una media a lungo termine) o può usare previsioni di corrente (forecast), forniti per il Mar Mediterraneo dal già citato sistema MFS. I dati di forecast, però, non rappresentano efficacemente l'effetto del vento sul flusso di correnti nei primi millimetri della colonna d'acqua e di conseguenza non sono adatti nel tener conto dell'effetto del vento sul movimento di una macchia d'olio. Per questa ragione, Medslik, come la maggior parte dei modelli di oil spill, incorpora due termini addizionali dovuti alla spinta del vento nel trasporto delle particelle dell'olio. Si assume che l'olio viene trasportato con una velocità pari ad una certa frazione α della velocità del vento sotto un certo angolo β alla destra della velocità del vento. Sulla base di analisi fatte sul moto di boe fluttuanti nel Golfo Arabo (Henaidi, 1984), Al Rabeh (Al Rabeh, 1994) trovò che i valori ottimali di tali parametri sono pari a : $\alpha = 0.03$ e $\beta = 26.03$. Medslik usa un valore di default di 0° .

In Medslik un oil spill è simulato usando il metodo Monte Carlo. L'inquinante, in questo caso la macchia d'olio, è suddivisa in un gran numero di particelle lagrangiane di ugual dimensione. Ad ogni istante ogni singola particella subisce uno spostamento convettivo e diffusivo. Sia (X_i, Y_i, Z_i) la posizione di una particella i ad un particolare step, con Z_i misurato verticalmente dal fondo verso l'alto.

Alla fine del primo step di lunghezza temporale τ la particella si troverà nella posizione:

$$\begin{aligned}
 X_i' &= X_i + \{u(X_i, Y_i, Z_i) + \alpha(W_x \cos \beta + W_y \sin \beta)\}\tau + \Delta X_i^{(d)} \\
 Y_i' &= Y_i + \{v(X_i, Y_i, Z_i) + \alpha(-W_x \sin \beta + W_y \cos \beta)\}\tau + \Delta Y_i^{(d)} \\
 Z_i' &= Z_i + \Delta Z_i^{(d)}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

dove $u(x, y, z)$ e $v(x, y, z)$ sono le componenti della velocità dell'acqua nelle direzioni x e y; W_x e W_y le componenti della velocità del vento e, $\Delta X_i^{(d)}$, $\Delta Y_i^{(d)}$, $\Delta Z_i^{(d)}$ sono gli spostamenti diffusivi nelle tre direzioni. La velocità verticale w non è inclusa nel modello essendo una quantità generalmente molto piccola.

Gli spostamenti diffusivi sono dati da:

$$\begin{aligned}
 \Delta X_i^{(d)} &= [2rand(0,1) - 1]\sqrt{6K_h\tau} \\
 \Delta Y_i^{(d)} &= [2rand(0,1) - 1]\sqrt{6K_h\tau} \\
 \Delta Z_i^{(d)} &= [2rand(0,1) - 1]\sqrt{6K_v\tau}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

dove K_h e K_v sono i coefficienti di diffusività orizzontale e verticale e $rand(0,1)$ è un numero random uniforme tra 0 e 1.

Può succedere, in alcuni casi, che la particella subisce uno spostamento orizzontale verso costa. La costa viene approssimata con segmenti di confine la cui lunghezza varia dai 50 metri per regioni piccole come la costa della Syria ai 250metri per il Bacino Levantino. Ad ogni step il programma controlla se la spostamento della particella interseca uno qualunque di questi segmenti; se ne interseca più di uno, quello più vicino è considerato il punto di partenza e non appena la particella raggiunge tale punto di intersezione viene classificata come “spiaggiata”. Lo “spiaggiamento”, comunque, non è permanente; si

assume infatti che a step temporali successivi c'è la probabilità che la particella può tornare indietro nell'acqua (Torgrimson, 1980; Shen, Yapa, Petroski, M. E., 1987). Tale probabilità, ad ogni step τ , è data dalla seguente relazione:

$$\text{probabilità di rilascio} = 1 - 0.5^{\tau/T_w} \quad (2.4)$$

dove T_w rappresenta il tempo di permanenza dell'olio sulla spiaggia prima di ritornare in acqua. A ciascun segmento di costa è associato un valore diverso di T_w in base al tipo di costa, per esempio coste fatte di sabbia o di rocce e così via.

Ogni particella ritorna in acqua se :

$$\text{rand}(0,1) < \text{probabilità di rilascio} \quad (2.5)$$

dove *rand* è il generatore di numeri random.

Il programma, inoltre, assume che durante ogni step una certa frazione dell'olio presente nella particella che è spiaggiata sul segmento di costa resta attaccata lì, per esempio infiltrandosi nella sabbia o formando uno strato di catrame sulla roccia. Si considera che, ad ogni step, la frazione di olio infiltrato (frazione di infiltrazione) è:

$$\text{Fraction seeping} = 1 - 2^{-\tau/T_s} \quad (2.6)$$

dove T_s è il tempo dell'infiltrazione o di qualsiasi altro metodo di attacco permanente. Anche il valore di T_s è assegnato ad ogni segmento di costa in maniera dipendente dal tipo di costa.

Così la quantità di olio rimanente in una particella sulla spiaggia è ridotta da questa frazione dovuta all'infiltrazione mentre il volume dell'olio perso è quello che rimane permanentemente sul dato segmento di costa.

Medsluk è stato usato nella simulazione dell'incidente avvenuto in Libano nel 2006; da questa esperienza si è dedotto che quando la quantità dell'olio su un segmento di costa è molto alta, la percentuale di infiltrazione di particelle che impattano nuovamente è ridotta. Per questa ragione la formula sopra è stata modificata:

$$Fraction\ seeping = [1 - 2^{-\frac{\tau}{T_s}}] \exp(-d/d_0) \quad (2.7)$$

dove d è la densità dell'olio e sul segmento (bbls/Km) e d_0 è un parametro.

Medsluk permette anche all'utente di modificare il valore di T_s per oli pesanti (con $API > 30$):

$$T_s = T_{s0} [1 + c_H (30 - API)] \quad (2.8)$$

dove T_{s0} è il tempo di default.

2.3.2 Il problema dell' avvezione

Una macchia d'olio si muove a causa di due effetti: la convezione delle correnti d'acqua e le forze di attrito del vento che forzano la macchia a scivolare sulla superficie dell'acqua. Il metodo convenzionale per trattare numericamente con un modello il secondo dei due effetti è di assumere, come accennato nel paragrafo precedente, che la velocità della macchia d'olio sia una certa frazione della velocità del vento chiamata *drift factor* e che la macchia si muova con una velocità diretta, con un certo angolo, alla destra della direzione del vento (nell'Emisfero Settentrionale), a causa degli effetti della forza di Coriolis. C'è un'accesa disputa tra i modellisti su quale sia la miglior scelta per i valori del drift factor e dell'angolo; la maggior parte dei modelli usano rispettivamente un valore attorno al

3% per il primo fattore e un valore tra 0 e 25 gradi per l'angolo. C'è però un problema con questo approccio, dato che le forze del vento guidano anche le correnti d'acqua e perciò il loro effetto sulla macchia d'olio viene contato due volte, una volta nel calcolare il flusso dell'acqua e un'altra nel calcolare il moto dell'olio. Non c'è una soluzione appropriata a questo problema ma la versione 5 di Medslik è abbastanza flessibile da permettere all'utente di utilizzare un range di opzioni atte ad attenuare il problema. La scelta di default di Medslik è di usare la velocità dell'acqua a 30 metri per computerizzare la convezione dell'olio. Questa è una profondità media dello strato rimescolato nel Mar Mediterraneo, cioè è la profondità alla quale gli effetti delle forze in superficie sono significativamente ridotti. Usando questa velocità l'effetto del doppio conteggio è minimizzato. Nel caso in cui però, l'utente crede che lo strato rimescolato sia ad una profondità maggiore di questa in un particolare periodo dell'anno, può scegliere una differente profondità con un'appropriata scelta dei parametri del modello. Medslik offre un'ampia gamma di scelte da poter fare per superare il problema variando i parametri del modello. Ad esempio, nelle acque basse, è possibile avere un modello di previsione delle correnti con una risoluzione molto buona nel mostrare la struttura verticale del flusso così che il moto dello strato superficiale è calcolato accuratamente. In questo caso la scelta migliore sarebbe utilizzare un valore di drift factor che tenda a zero e usare il flusso della superficie dell'acqua calcolato solo per predire il moto della macchia. In passato si è visto che questo approccio andava bene nelle aree marine con profondità attorno ai 40 metri. Un altro approccio permesso da Medslik è di ridurre l'effettivo vento usato per calcolare il moto della macchia d'olio con una quantità uguale al vento usato per calcolare il flusso dell'acqua. In questo caso la velocità dell'acqua più ragionevole sarebbe quella alla superficie. Questo approccio assume però che il modello idrodinamico calcoli

correttamente la velocità dello strato superficiale dell'acqua, assunzione che in acqua profonda è alquanto ottimista.

2.3.3 Algoritmi di trasformazione e dispersione dell'olio

Il moto di una particella di olio, a seguito di uno sversamento, è governato, oltre che da spostamenti convettivi e diffusivi, anche da vari processi fisici che cambiano lo stato dell'olio, di cui si diceva nel primo capitolo. Per le prime ore dal suo sversamento l'olio diffonde meccanicamente sulla superficie dell'acqua sotto l'azione delle forze gravitative e le particelle di cui esso si compone subiscono spostamenti diffusivi. A questo si aggiunge il fatto che le frazioni più leggere dell'olio scompaiono attraverso l'evaporazione e le frazioni rimanenti iniziano ad assorbire acqua o ad emulsionarsi. In Medslik questi cambiamenti si traducono in variazioni delle proprietà della macchia d'olio, come la sua densità, la sua viscosità e il suo volume. Parte di olio viene anche portato sott'acqua dall'azione delle onde. La dispersione dell'olio in mare è trattata come un processo random e gli spostamenti di ogni particella d'olio sono seguiti usando un campo di velocità a tre dimensioni. In particolare, Medslik usa una versione modificata dell'algoritmo di Mackay per l'evaporazione (Mackay, Paterson, 1980) e per l'emulsificazione (Mackay, Buist, Mascarenhas, Paterson, 1979) e l'algoritmo di Buist (Buist, 1979) e di Mackay per la dispersione. La base del modello di Mackay è dividere lo sversamento in una macchia grossa e una sottile. L'evaporazione e la dispersione sono considerate separatamente per queste due parti. In più il modello include il flusso dell'olio dalla macchia grossa a quella sottile.

In presenza di un oil spill per il quale la dispersione di olio può durare parecchie ore o parecchi giorni, Medslik divide lo sversamento totale in un numero di sub-sversamenti. Siccome ogni sub-sversamento si allontanerà dalla sorgente di rilascio, lo sversamento totale sarà una

catena di sub-sversamenti per i quali i vari processi sono trattati indipendentemente.

Per ogni sub-sversamento ad ogni step temporale, siano V_{tk} e V_m i volumi dell'olio restante rispettivamente nella macchia spessa e sottile, A_{tk} e A_m le loro due aree superficiali e T_{tk} e T_m i loro spessori. Si assume che lo spessore della macchia sottile sia costante uguale a 10 micron, valore tipico osservato. Ad ogni step i due volumi cambiano seguendo la seguente relazione:

$$V'_{tk} = V_{tk} - \Delta V_{tk}^{(e)} - \Delta V_{tk}^{(d)} - \Delta V_m^{(s)} \quad (2.9)$$

$$V'_m = V_m - \Delta V_m^{(e)} - \Delta V_m^{(d)} + \Delta V_m^{(s)}$$

dove $\Delta V_{tk}^{(e)}$ e $\Delta V_m^{(e)}$ rappresentano i volumi persi con l'evaporazione; $\Delta V_{tk}^{(d)}$ e $\Delta V_m^{(d)}$ sono i volumi persi con la dispersione e $\Delta V_m^{(s)}$ è la quantità trasferita dalla parte grossa a quella sottile della macchia d'olio. Questi trasferimenti di olio sono illustrati in figura 2.5.

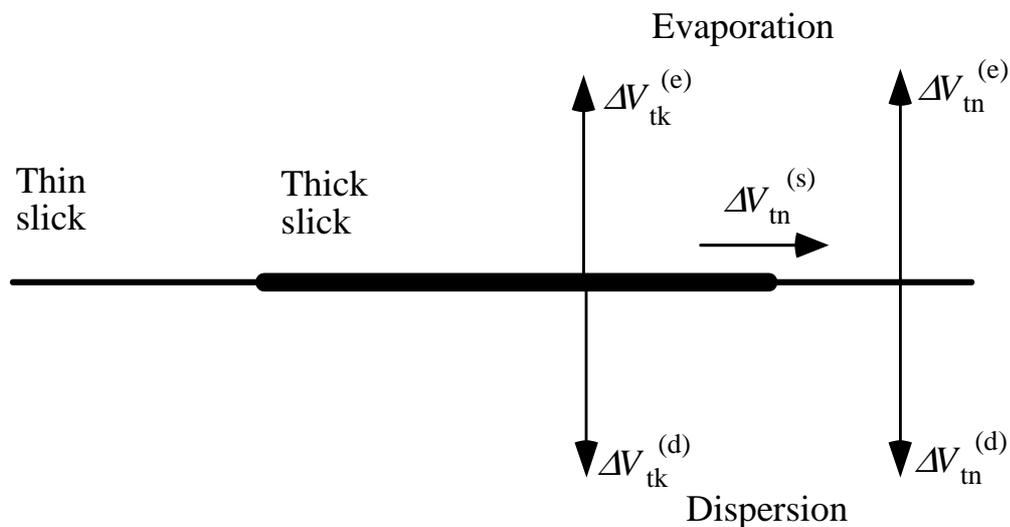


Figura 2.5 Movimento dell'olio

Avendo ricavato i volumi delle due parti, attraverso una formula empirica si calcolano le loro aree per poi giungere alla formulazione del nuovo spessore della macchia sottile:

$$T_{tk} = V_{tk} / A_{tk} \quad (2.10)$$

2.4 Parameters Form

Sono quei parametri associati alla diffusione e all'avvezione delle particelle di olio e ai modelli per i processi di emulsificazione, dispersione, evaporazione e diffusione con una maggiore probabilità di essere cambiati dall'utente nel “*modify model parameters*” di Medslik. Riguardano:

***Drift Factor* (α):** il suo valore di default è 31%, ossia 0.031. Tale valore moltiplicato la velocità del vento dà la velocità di movimento (drift) della macchia d'olio.

***Drift Angle* (β):** è l'angolo alla destra della direzione del vento secondo il quale si muove la macchia d'olio guidata dal vento. Il suo valore di default è 0.0 gradi, ciò implica che la macchia d'olio si muove direttamente sotto-vento.

***Variable Drift Angle*:** segnando la casella corrispondente a tale valore si permette al modello di usare un drift angle che decresce all'aumentare della velocità del vento.

***Reduction of Forecast Wind Speed*:** può essere appropriato in certi casi ridurre la velocità del vento cliccando sulla casella corrispondente a questo valore ed immettendo un valore di riduzione.

***Horizontal Diffusivity*:** il valore di default è di 2.0 m²/s. Un valore più grande porta la macchia d'olio a diffondersi più velocemente.

Vertical Diffusivities: ci sono due valori per la diffusione verticale, un valore più grande per la parte più alta dello strato mescolato e uno più piccolo al di sotto dello strato mescolato. I valori di default sono rispettivamente di 0.01 e 0.0001 m²/s.

Depth of Mixed Layer: il valore di default è di 30 metri.

Number of parcels: le particelle rappresentano la densità dell'olio. Maggiore è il numero di particelle utilizzato migliore è la rappresentazione della macchia d'olio ma maggiore è il tempo computazionale di calcolo. Medslik usa 10.000 particelle come default che possono diventare 100.000 in alcuni casi.

Depths of Forecast Currents: in alcuni mari, tipo il Mar Adriatico, può risultare conveniente usare profondità più piccole nel file di forecast che contengono le previsioni sulle correnti.

Selection of currents for convection of slick: il valore di default per le velocità dell'acqua è di usare una profondità di 30 metri. La motivazione di questa scelta è che a questa profondità la velocità dell'acqua è dominata dalla forza di galleggiamento perciò la velocità in superficie sono fortemente influenzate dal vento (come spiegato nei paragrafi precedenti).

Capitolo 3

3 Esperimento di simulazione della dispersione di idrocarburi a mare

3.1 Area di studio: il Mar Tirreno

Il Mar Tirreno (figura 3.1) occupa un'area di circa 155.400 chilometri quadrati ed è compreso tra la penisola italiana e le tre isole maggiori. Il suo bacino presenta una forma tipicamente triangolare, delimitato dalla parte orientale delle coste corsa e sarda, dalla costa settentrionale della Sicilia e dalla costa calabra, campana, laziale e toscana fino a Piombino dove passa il confine virtuale che lo separa dal Mar Ligure. Comunica col Mar Mediterraneo occidentale attraverso le bocche di Bonifacio e il Canale di Sardegna e col Mar Ionio attraverso lo Stretto di Messina e il Canale di Sicilia.



Figura 3.1 Il Mar Tirreno.

I fondali di questo mare presentano una configurazione morfologica particolare che si articola in rilievi vulcanici sottomarini dati dalla collisione tra la zolla eurasiatica e quella africana. Il più imponente di tali vulcani è il Marsili che si erge da fondali di 3000 metri di profondità. Da menzionare altri vulcani sommersi fra i quali il Magnaghi, il Valivov e il Palinuro, tutti facenti parte della cintura tirrenica. La profondità massima del Mar Tirreno raggiunge i 3.625 metri contrapposta ad una profondità minima in mare aperto di circa 300 metri in corrispondenza del Canale di Sicilia, caratterizzato da un'irregolare piattaforma con ampi banchi (Graham, Avventura, Terribile), che in alcuni casi riducono la batimetria a poche decine di metri.

Il Mar Tirreno è soggetto, ormai da tempo, a un processo di 'oceanizzazione', ovvero di lentissima espansione. Il fenomeno è iniziato dieci milioni di anni fa, causando l'apertura di profonde fratture e la nascita di vulcani sottomarini con una velocità superiore a quella prevista. Infatti, come evidenziato dai ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), la velocità di espansione del Mar Tirreno è probabilmente la più alta fra quelle osservate sul nostro pianeta. Il fondo marino si è fratturato e si è espanso ad una velocità di circa 20 cm all'anno : nuovo materiale proveniente dalle profondità della Terra è fuoriuscito da una lunga frattura creatasi nella crosta del mare spingendo a destra e a sinistra quella già presente.

3.1.1 Circolazione nel Mar Tirreno

Nella letteratura oceanografica il mar Tirreno viene generalmente associato a scarsa dinamica, velocità non elevate, bassi gradienti di temperatura e pressione e ad una circolazione essenzialmente ciclonica (Hopkins, 1988; Bignami et al., 1996). Gli scambi d'acqua avvengono principalmente attraverso il canale presente tra Sicilia e

Sardegna e attraverso il canale di Corsica. Il primo permette l'ingresso di acqua superficiale Atlantica e di acqua di fondo, mentre quello di Corsica è interessato da un flusso diretto verso il mar Ligure, attraverso cui viene bilanciato l'eccesso di acqua superficiale e intermedia.

In generale si osserva una corrente principale di superficie proveniente dallo stretto di Gibilterra, che lambisce le coste africane, entra nel Tirreno, tocca le coste settentrionali sicule, risale quelle calabresi e campane e si divide in due rami, uno forma una circolazione ciclonica che interessa il basso tirreno, l'altro si dirige verso le coste toscane ed il Mar Ligure piegando di nuovo verso sud (figura 3.2).



Figura 3.2 Schema della circolazione nel Mar Mediterraneo (Pinardi et al, 2004)

A profondità maggiori una corrente di acque più calde segue lo stesso tragitto mantenendosi più bassa per effetto della maggiore densità dovuta alla salinità più elevata.

La circolazione può essere descritta anche in termini dei movimenti delle masse d'acqua: volumi caratterizzati da un rapporto tra temperatura e salinità incluso in un intervallo predefinito. Le caratteristiche fisico-chimiche delle masse d'acqua tirreniche sono oggi abbastanza note. Secondo Bignami et al. (1996), le acque tirreniche sono costituite dalla sovrapposizione di tre strati: uno strato di origine "Atlantica", caratterizzato da una bassa salinità, uno strato intermedio di origine Levantina, che presenta un massimo di salinità ed, infine, uno strato di fondo, con acque più dense, contemporaneamente più fredde e più salate. Secondo Serravall e Cristofalo (1999) per il Tirreno c'è la sovrapposizione di quattro strati di acqua:

- uno strato superficiale (Modified Atlantic Water o MAW) che interessa i primi 200m di profondità (temperatura 13.5-13.9°C e salinità 38.0-38.5 psu);
- uno strato sottostante (Levantine Intermediate Water o LIW) generalmente presente in Mediterraneo a profondità comprese tra 250 e 700m (temperatura 13.5-13.9°C, salinità 38.45-38.75 psu);
- uno strato più denso e meno salato (Western Mediterranean Deep Water o WMDW) che è localizzato tra i 700 e i 3000m (temperatura 12.90-13.50°C, salinità 38.4-38.6 psu);
- uno strato di fondo che raggiunge profondità superiori ai 4200m e si origina nel Mediterraneo nord-occidentale.

Variazioni nelle caratteristiche delle masse d'acqua incidono quindi sulla circolazione: nelle acque intermedie la salinità diminuisce da sud verso nord, il contrario avviene per le acque superficiali e di fondo (Bignami et al., 1996).

Uno degli elementi più interessanti per il mar Tirreno è la presenza di un vortice (gyre) freddo localizzato ad est delle Bocche di Bonifacio

(figura 3.3). Tale vortice viene generato dai venti che soffiano verso est attraverso le Bocche e dalla presenza di un fronte termico localizzato lungo il 41° parallelo (Hopkins et al., 1992; Della Croce, 2000) e controlla, fino a bloccarli del tutto, i flussi di provenienza meridionale. Secondo Della Croce (2000), però, le caratteristiche del vortice non sono legate tutte al vento considerando il fatto che, mentre il vento influenza la colonna d'acqua per l'intera sua estensione sia nella tarda estate che in inverno, il vortice, seppure presente tutto l'anno, cambia di forma e dimensione. Modelli numerici e dati sperimentali farebbero risalire queste variazioni alla variabilità stagionale della corrente litorale diretta a nord (Della Croce, 2000).

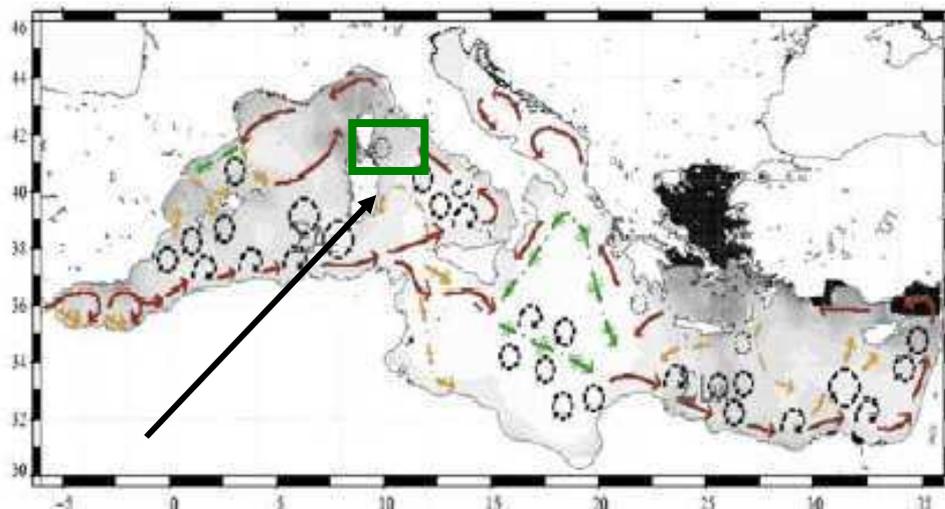


Figura 3.3 Gyre tirrenico settentrionale, evidenziato in verde (Pujol, 2007).

È da aggiungere che la circolazione nel Mar Tirreno ha la caratteristica fondamentale di avere una forte interazione con il vento che diventa molto marcata, soprattutto in inverno, per l'effetto di venti prevalenti provenienti da SO (libeccio) e da NO (maestrale). (Ovchinnikov, 1966; Budillon et al., 1999).

3.2 Definizione disegno sperimentale

Per definire l'area di studio in cui svolgere l'esperimento, si sono osservati i percorsi seguiti dalle navi e quindi le principali rotte di trasporto del petrolio nei Mari Europei. La figura 3.4 mostra uno schema delle rotte principali della movimentazione del petrolio nei Mari Europei riferita all'anno 2001 e i quantitativi di petrolio trasportato.

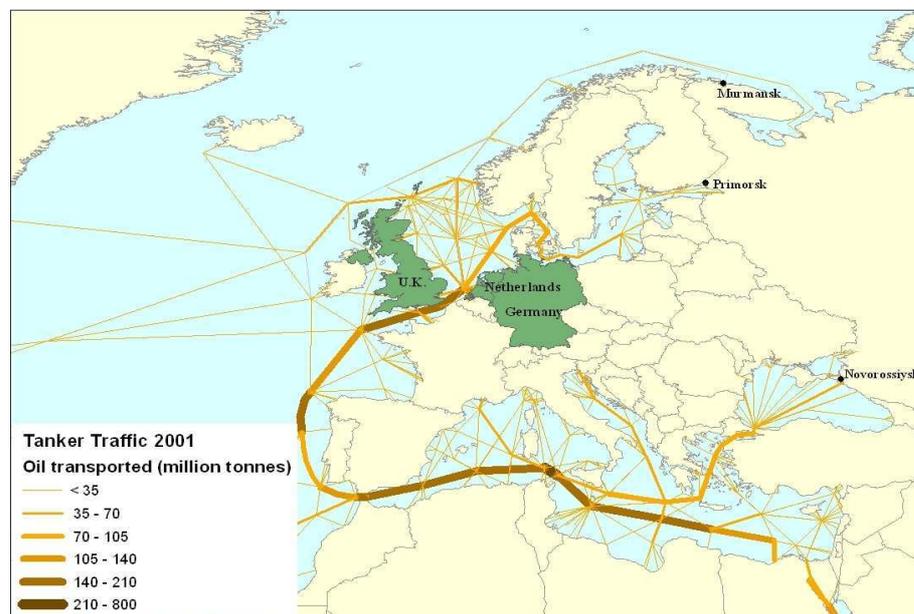


Figura 3.4 Mappa della movimentazione del petrolio nei Mari Europei per l'anno 2001 e petrolio ivi trasportato (principali rotte, porti di carico e scarico e quantitativi trasportati). (Fonte: LMIU, 2001).

Sulla base della figura 3.4 sono state identificate le principali rotte di trasporto del petrolio nel Mar Tirreno. Le rotte in questione interessano i porti di Milazzo, Fiumicino, Livorno, Genova, Savona e Cagliari e sono identificate con le lettere dell'alfabeto A, B, C, D, E, F, G. La traccia A va dal punto x1 al porto di Milazzo, la traccia B va dal punto x1 al porto di Fiumicino, le tracce C, D e E vanno

rispettivamente dal punto x2 (punto comune alle 3 tracce) ai porti di Livorno, Genova e Savona. Hanno in comune la traccia G e nell'esperimento vengono aggregate tra loro a rappresentare il Mar Ligure. Le linee H e I mostrano le due principali rotte di provenienza del petrolio diretto verso l'Italia, ma non vengono prese in considerazione nella simulazione dell'esperimento.

Il rilascio operativo dalle navi è stato discretizzato identificando singoli punti di rilascio lungo ciascuna rotta. Tali punti sono stati presi ad una distanza di 50 miglia l'uno dall'altro, di cui, il più vicino a costa dista 10 miglia dalla costa stessa (figura 3.5). Il punto x1 è il punto di maggior concentrazione essendo il punto comune a tutte le tracce. Il punto X2 è il punto di biforcazione della traccia G nelle tracce C, D e E.

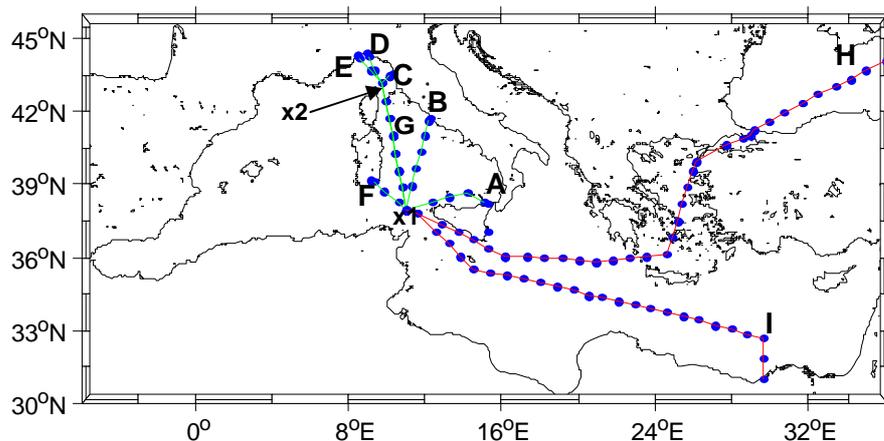


Figura 3.5 Disegno sperimentale. Le linee verdi sono le principali rotte seguite dalle navi verso l'Italia, quelle rosse rappresentano le principali rotte di provenienza del petrolio, in blu i punti di rilascio.

Per ogni rotta di interesse sono stati calcolati i quantitativi di petrolio trasportati usando come fonte i dati presentati nella relazione 2007 dell'Unione Petrolifera (tabella 3.1), dove si dà una stima delle quantità di petrolio arrivate nei porti italiani.

Si è scelto come anno di riferimento il 2005.

Italia - La stima degli arrivi di petrolio greggio nei porti (Migliaia di tonnellate)									
	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Augusta (Siracusa)	11.010	12.390	14.200	13.030	13.610	14.900	15.060	14.530	14.020
Cagliari	12.050	12.130	13.200	12.190	12.960	13.450	13.480	14.605	13.990
Falconara (Ancona)	2.850	3.340	3.300	3.650	3.540	3.700	3.390	3.365	3.335
Fiumicino (Roma)	3.310	3.680	3.580	3.750	3.510	3.600	3.700	4.030	4.170
Gela (Caltanissetta)	3.570	3.840	2.590	2.690	1.240	1.060	1.970	2.050	2.255
Genova-Multedo ⁽¹⁾	20.320	18.600	14.160	14.020	14.890	15.350	15.510	15.605	15.530
La Spezia	130	5	-	-	-	-	-	-	-
Livorno	3.700	3.175	3.710	3.970	3.940	4.200	4.030	4.240	4.010
Milazzo (Messina)	4.400	4.730	6.910	6.290	6.400	8.200	7.440	7.385	7.450
Napoli	3.620	-	-	-	-	-	-	-	-
Priolo (Siracusa)	6.600	8.550	8.850	9.750	9.520	8.600	10.130	11.145	8.285
Ravenna	270	235	60	70	30	70	40	40	140
Savona - Vado Ligure	5.050	5.790	6.490	7.010	7.020	6.450	6.970	7.235	7.675
Taranto	3.305	3.405	2.530	3.120	1.020	1.200	1.930	1.420	1.865
Trieste ⁽²⁾	25.865	27.190	34.520	35.620	34.870	34.730	35.880	36.990	36.820
Venezia-Porto Marghera	4.210	4.940	5.600	5.750	5.680	6.220	5.800	5.760	6.575
TOTALE	110.260	112.000	119.700	120.910	118.230	121.730	125.330	128.400	126.120

Tabella 3. 1 Stima degli arrivi di petrolio greggio nei porti italiani (migliaia di tonnellate) (Unione Petrolifera, 2007)

Sono stati poi calcolati i quantitativi di idrocarburi sversati operativamente dalle navi lungo ogni traccia utilizzando un fattore moltiplicativo $(2,14 \cdot 10^{-4})$ definito nell'esperimento condotto nell'Adriatico da Kyriaki Glyptou (comunicazione personale di Darko Domovic del REMPEC), si è quindi utilizzato la seguente formula:

$$Q_{sver} = (2,14 \cdot 10^{-4}) * Q_{trasp} \quad (3.1)$$

dove Q_{sver} risulta il quantitativo dell'idrocarburo sversato e Q_{trasp} risulta il quantitativo dell'idrocarburo trasportato. La tabella 3.1 presenta i quantitativi per ogni rotta.

3.2.1 Tabella dell'esperimento

Per presentare le caratteristiche dell'esperimento i singoli parametri sono stati raggruppati nella tabella sottostante (tabella 3.2) che riporta nelle colonne le diverse tracce e nelle righe le seguenti informazioni:

1. la lunghezza delle rotte, espressa in miglia;
2. la quantità di olio rilasciato in ogni porto, calcolata con la formula (3.1);
3. il numero di punti di rilascio (un punto ogni 50 miglia, in più vengono considerati i punti di rilascio aggiuntivi dati dalle tracce H e I lungo le quali viene suddiviso il quantitativo di petrolio che arriva nei porti italiani);
4. il numero di rilasci, uno al giorno, 365 all'anno;
5. la quantità di olio rilasciato per ogni punto della traccia, calcolata considerando uno sversamento al giorno: è la quantità di olio inserita come dato di input nella simulazione.

Sigle Tracce	A	B	C	D	E	F	G
Estremi delle tracce	<i>Milazzo -x1</i>	<i>Fiumicino -x1</i>	<i>Livorno -x1</i>	<i>Genova -x1</i>	<i>Savona -x1</i>	<i>Cagliari -x1</i>	<i>in comune a D, E, F</i>
Lunghezza rotte (miglia)	236	262	395	449	456	121	
Quantità di olio rilasciato per traccia e anno (ton)	<i>tot 1583</i>	<i>tot864</i>	<i>tot909</i>	<i>tot1672</i>	<i>tot1550</i>	<i>tot3130</i>	
	<i>527 dalla traccia I</i>	288	303	557	516	1043	
	<i>1055 dalla traccia H</i>	576	606	1114	1033	2086	
Numero punti rilascio	4	5	1	2	2	3	7
Numero punti aggiuntivi di rilascio	<i>26 dalla traccia I</i>						
	<i>35 dalla traccia H</i>						
Quantità di olio rilasciato per punto (usata nella simulazione) (ton)	<i>0.122</i>	<i>0.063</i>	<i>0.062</i>	<i>0.113</i>	<i>0.104</i>	<i>0.248</i>	<i>0.279</i>

Tabella 3.2 Schema dell'esperimento. Le colonne rappresentano ogni singola traccia mentre le righe presentano le varie informazioni utilizzate nell' esperimento.

Ogni giorno dell'anno 2005, per ogni punto di rilascio individuato nella figura 3.5 sono state effettuate simulazioni di rilascio di idrocarburi utilizzando i quantitativi definiti nella tabella 3.2. Gli

idrocarburi rilasciati in mare sono stati seguiti per i 10 giorni successivi al rilascio stimando la concentrazione di idrocarburi alla superficie per ogni giorno. L'output del modello è uno snapshot giornaliero alle ore 12:00 di ognuno dei 10 giorni di simulazione. Per ogni simulazione si ottengono 10 mappe di concentrazioni di idrocarburi che mostrano la trasformazione e la dispersione della macchia d'olio per i 10 giorni.(figura 3.6).

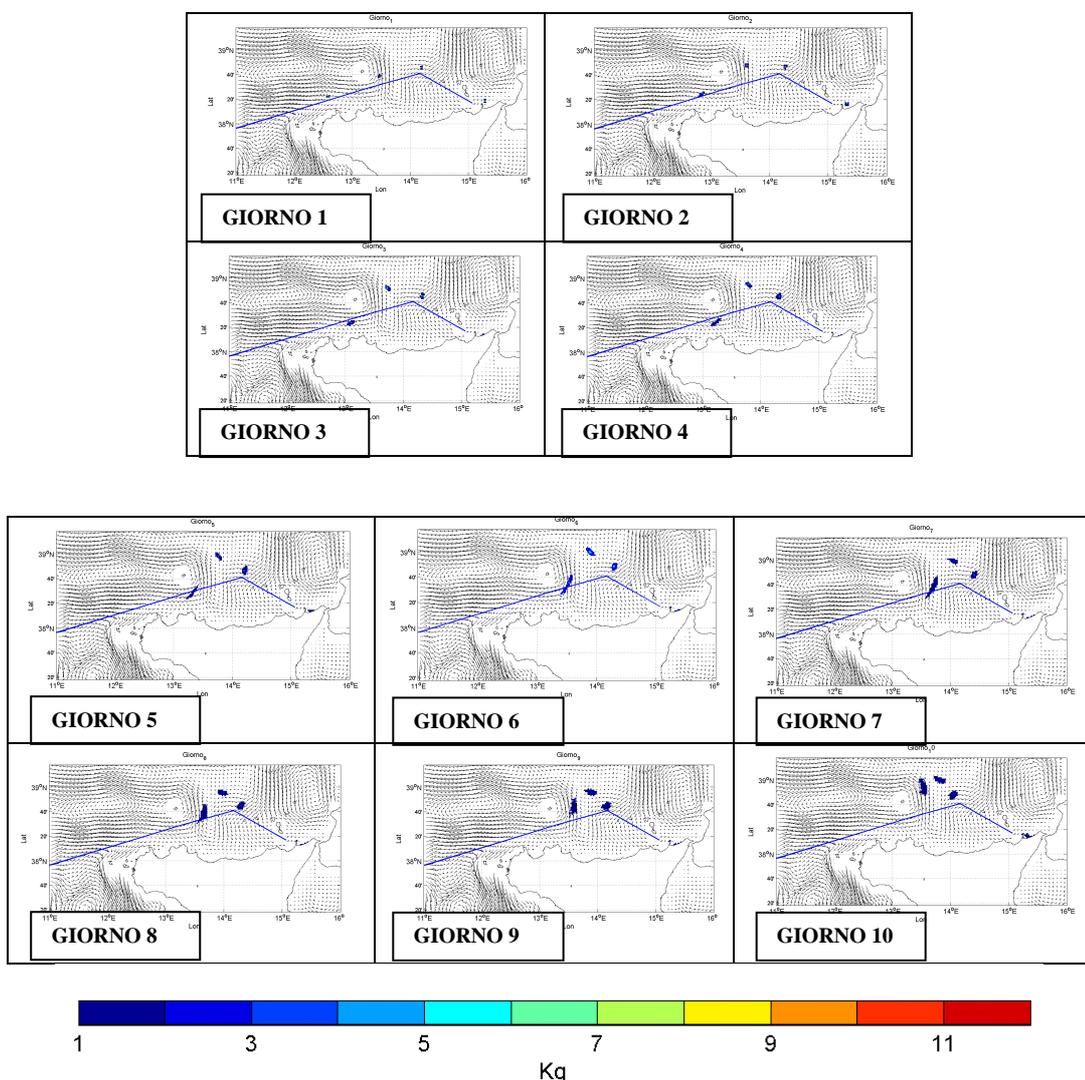


Figura 3.6: Esempio di mappe di concentrazioni di idrocarburi lungo la traccia A per la simulazione partita il giorno 1/10/2005. La dispersione degli idrocarburi è seguita nei 10 giorni successivi al giorno di rilascio.

3.2.2 Analisi statistiche

Per ogni mese sono state effettuate N simulazioni, dove N è il numero dei giorni del mese, per ciascun punto di rilascio e per ciascuna traccia. Definiamo:

- i : il numero dei punti di rilascio di ogni singola traccia ($i=1, 2, \dots, p$);
- f : i giorni di simulazione successivi al rilascio ($f=1, 2, \dots, 10$);
- η : il numero di simulazioni per ogni punto ($\eta=1, 2, \dots, N$);

Indichiamo con $C(i, j)$ la concentrazione dell'olio in unità di ton/km^2 , con $C_{i,f}(x, y)$ la concentrazione dell'olio al punto di rilascio i e al giorno f e con $C_{if\eta}(x, y)$ la concentrazione dell'olio riferita al punto di rilascio i , al giorno f e alla simulazione η . In figura 3.7 sono schematizzati i vari parametri.

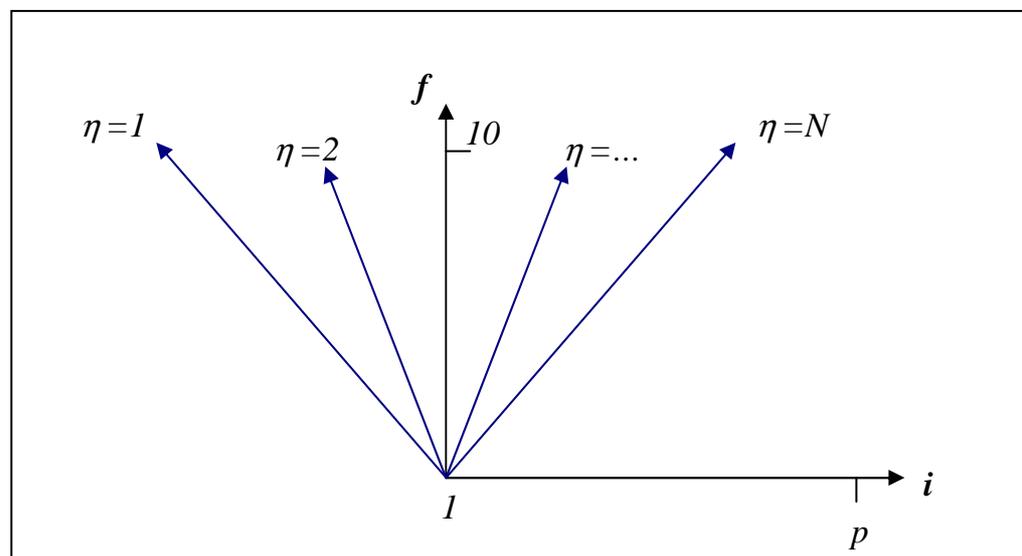


Figura 3.7 Schema dei parametri

L'analisi dei vari file di output prodotti dal modello prevede cinque passi:

1. per ciascun mese e per ogni traccia si aggregano le concentrazioni sui diversi punti della traccia, ottenendo perciò per ogni traccia e per ogni mese 10 campi per i 10gg di simulazione. La nuova matrice di concentrazione sarà:

$$\hat{C}_{f\eta}(x, y) = \sum_{i=1}^p C_{if\eta}(x, y) \quad (3.2)$$

2. Utilizzando i campi risultanti dall'aggregazione spaziale si calcola la concentrazione massima nei dieci giorni di simulazione per ciascuna delle simulazioni in quel mese. Risulteranno η matrici di concentrazione di olio che, per ciascun punto griglia, hanno associato il valore massimo di concentrazione dei 10 giorni di simulazione. In pratica si considera la matrice di concentrazione $\hat{C}_{f\eta}(x, y)$ e per ogni valore di η si calcola il valore della concentrazione massima fra i 10 giorni di simulazione. La nuova matrice con i valori massimi sarà $\tilde{C}_{\eta}(x, y)$:

$$\tilde{C}_{\eta}(x, y) = \max(\hat{C}_{f\eta}(x, y)) \quad (3.3)$$

3. nel Mar Ligure le tracce interagiscono fra loro a causa della loro vicinanza. Abbiamo tenuto conto di tale aspetto aggregando le 3 tracce fra loro. Per le restanti tracce del dominio l'analisi continua a livello di ciascuna traccia.
4. si definisce una soglia di concentrazione di riferimento pari a 0.0016 ton/km^2 . Tale valore corrisponde alla media tra le concentrazioni massime di tutte le tracce relative a tutti i mesi dell'anno. Per ogni traccia e per ogni mese si calcola, per le η simulazioni, la frequenza di accadimento degli eventi che superano la soglia di riferimento. Definiamo:

- F : la frequenza di accadimento;

- S : la soglia di riferimento;

La frequenza F è ora calcolata:

$$F = \frac{\sum_{\eta=1}^N [\tilde{C}_{\eta}(x_k, y_k) > S]}{N} \quad (3.4)$$

5. Si ottengono quindi delle mappe di pericolosità che indicano la percentuale delle simulazioni con concentrazioni maggiori al valore della soglia di riferimento. Dato che le tracce interagiscono tra di loro nel punto x_1 , punto di maggior concentrazione di olio, le mappe di ogni singola traccia vengono aggregate per fornire mappe di pericolosità dell'intero bacino Tirreno.

Capitolo 4

4 Mappe di pericolosità

Nel presente capitolo vengono discussi i risultati dell'esperimento di simulazione e in particolare vengono presentate le mappe di pericolosità.

La pericolosità viene presentata come la frequenza di accadimento dell'evento di superamento della concentrazione di soglia di riferimento degli idrocarburi a mare. La soglia di riferimento è pari a 0.0016 ed è la media tra le concentrazioni massime di tutte le tracce relative a tutti i mesi dell'anno. La frequenza di accadimento del superamento della soglia viene descritta in termini di percentuale delle simulazioni in cui la concentrazione dell'olio in un dato punto supera la soglia di riferimento. Viene perciò valutata la variabilità spaziale e temporale della pericolosità legata agli sversamenti operativi delle navi, espressa come percentuale di simulazioni che superano la soglia di riferimento. Quello che si analizza è l'idrocarburo in superficie. Le tracce C, D e E nel Mar Ligure sono ravvicinate e pertanto i relativi sversamenti interagiscono tra loro, quindi le concentrazioni derivanti dalle tre tracce sono state aggregate sommando le concentrazioni fra loro, le restanti tracce (A, B, F e il punto x1, comune alle tracce) vengono prima analizzate come singole tracce e poi successivamente aggregate tra loro e con le tracce C, D e E, per dare una mappa totale in tutto il Mar Tirreno. Le mappe di pericolosità vengono presentate per i vari mesi dell'anno evidenziando la variabilità temporale.

Sotto ad ogni grafico è mostrata la scala dei colori corrispondente alla percentuale di simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento. Per evidenziare la pericolosità più alta, i punti con percentuale maggiore e uguale a 10% sono stati contrassegnati da un asterisco rosso. La media mensile delle correnti alla superficie è

visualizzata nel background delle figure delle mappe di pericolosità, le frecce nere indicano la direzione delle correnti e la lunghezza delle frecce indica l'intensità delle correnti in m/s rispetto alla freccia di riferimento (0,4 m/s) riportata in basso a sinistra di ogni figura.

Dal confronto delle mappe di pericolosità di una stessa traccia nei vari mesi del 2005 appare subito chiaro l'alta variabilità della dispersione della macchia d'olio nei diversi mesi dell'anno a causa di variazioni mensili nel regime delle correnti marine.

I prossimi paragrafi mostrano le mappe di pericolosità per le tracce aggregate del mar Ligure (E, C e D), le tracce A, B, F, e per il punto comune X1. Per ogni traccia si riporta prima una figura con le mappe di pericolosità per i dodici mesi dell'anno in modo da evidenziare le differenze tra i vari mesi, successivamente nelle figure che seguono le mappe vengono presentate singolarmente per ogni mese.

4.1 Traccia A: x1-Milazzo

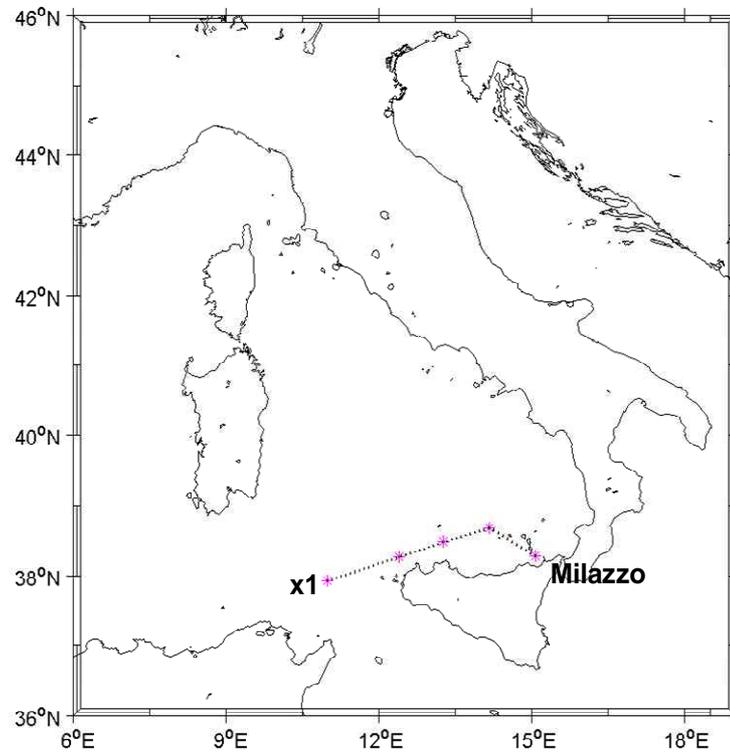


Figura 4.1 Traccia A. La linea tratteggiata rappresenta la rotta seguita dalle navi, i punti rosa sono i punti di rilascio.

La traccia A va dal punto x1 al porto di Milazzo e consiste di 4 punti di rilascio, il punto X1 non è compreso in nessuna traccia ma viene trattato a parte poiché comune a tutte le tracce.

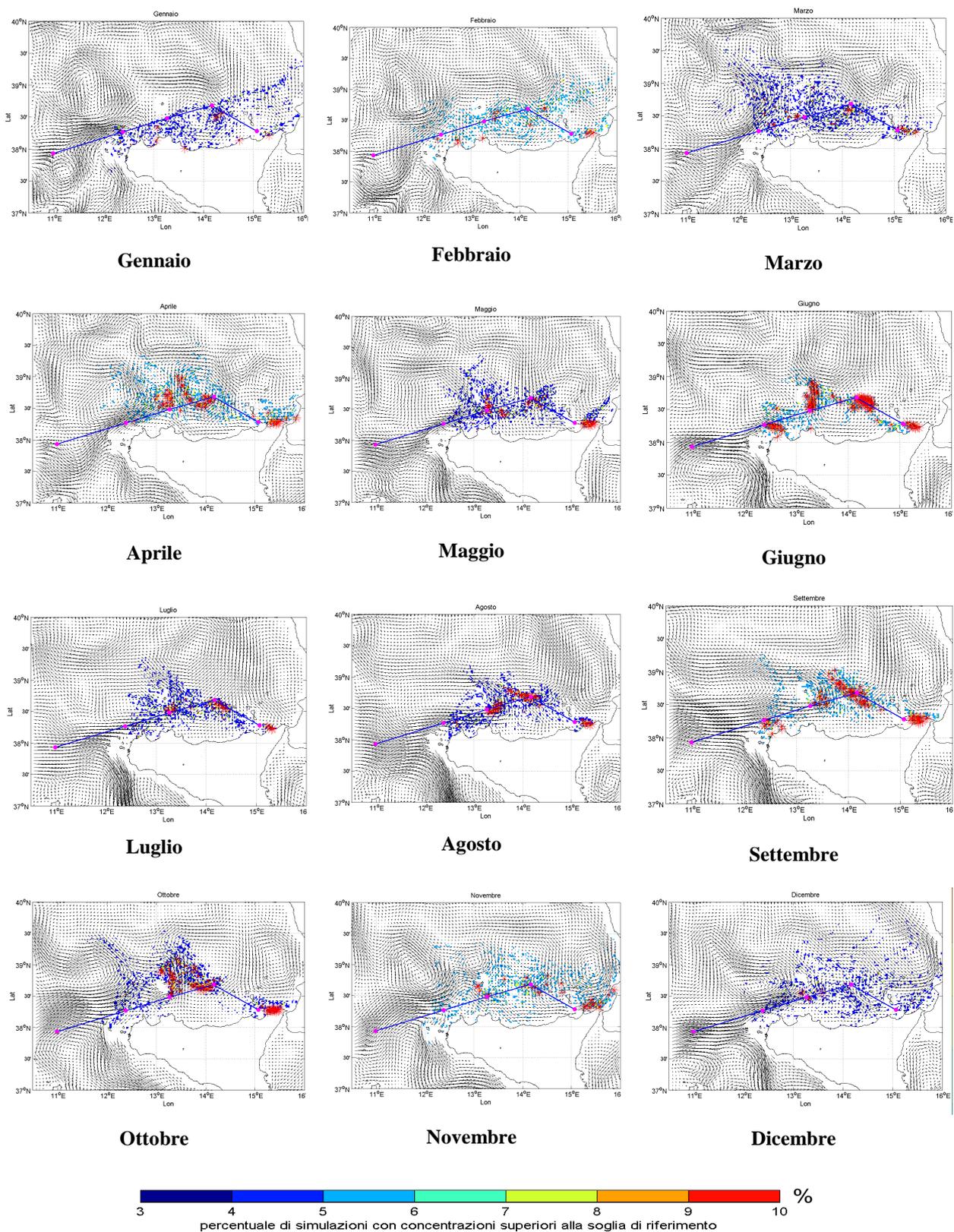


Figura 4.2 Mappe di pericolosità per la traccia A per i 12 mesi del 2005. Le figure rappresentano le mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento). La linea blu rappresenta la traccia in esame.

La figura 4.2 mostra le mappe di pericolosità della traccia A per i dodici mesi dell'anno 2005.

La circolazione in questa parte meridionale del Mar Tirreno risulta caratterizzata dalla cosiddetta biforcazione Tirrenica, le acque Atlantiche che arrivano da ovest si biforcano infatti a est della Sicilia e la ramificazione che prosegue a nord della Sicilia caratterizza questa area di studio. Una struttura ciclonica risulta evidente a nord ovest della Sicilia mentre una struttura anticiclonica è presente a ovest di Ustica. La corrente prosegue verso nord lungo le coste Calabresi.

La pericolosità più alta è riscontrata nei mesi da aprile a ottobre mentre nei mesi di gennaio, febbraio novembre e dicembre la pericolosità sembra essere più ridotta.

Il mese di giugno risulta quello con più alta pericolosità. La zona di Milazzo a nord est della Sicilia risulta fra le zone costiere a più alta pericolosità, questo è dovuto alla vicinanza del punto di rilascio. In generale si può dire che tutta la costa Tirrenica della Sicilia riceve quantità di idrocarburi rilevabili rispetto a quelle presenti al largo e cioè che lo sversamento può facilmente arrivare sulla costa.

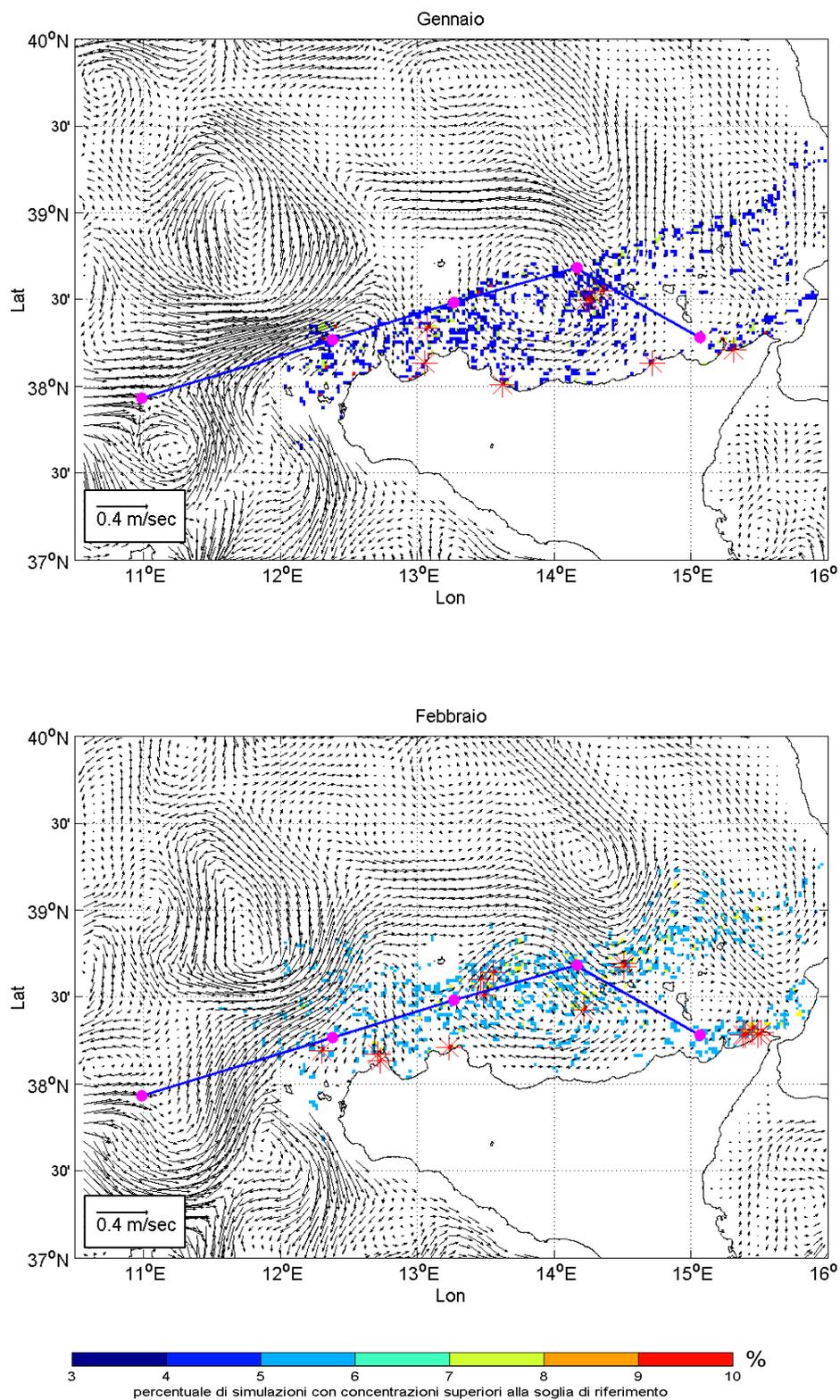


Figura 4.3 Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di gennaio e febbraio del 2005.

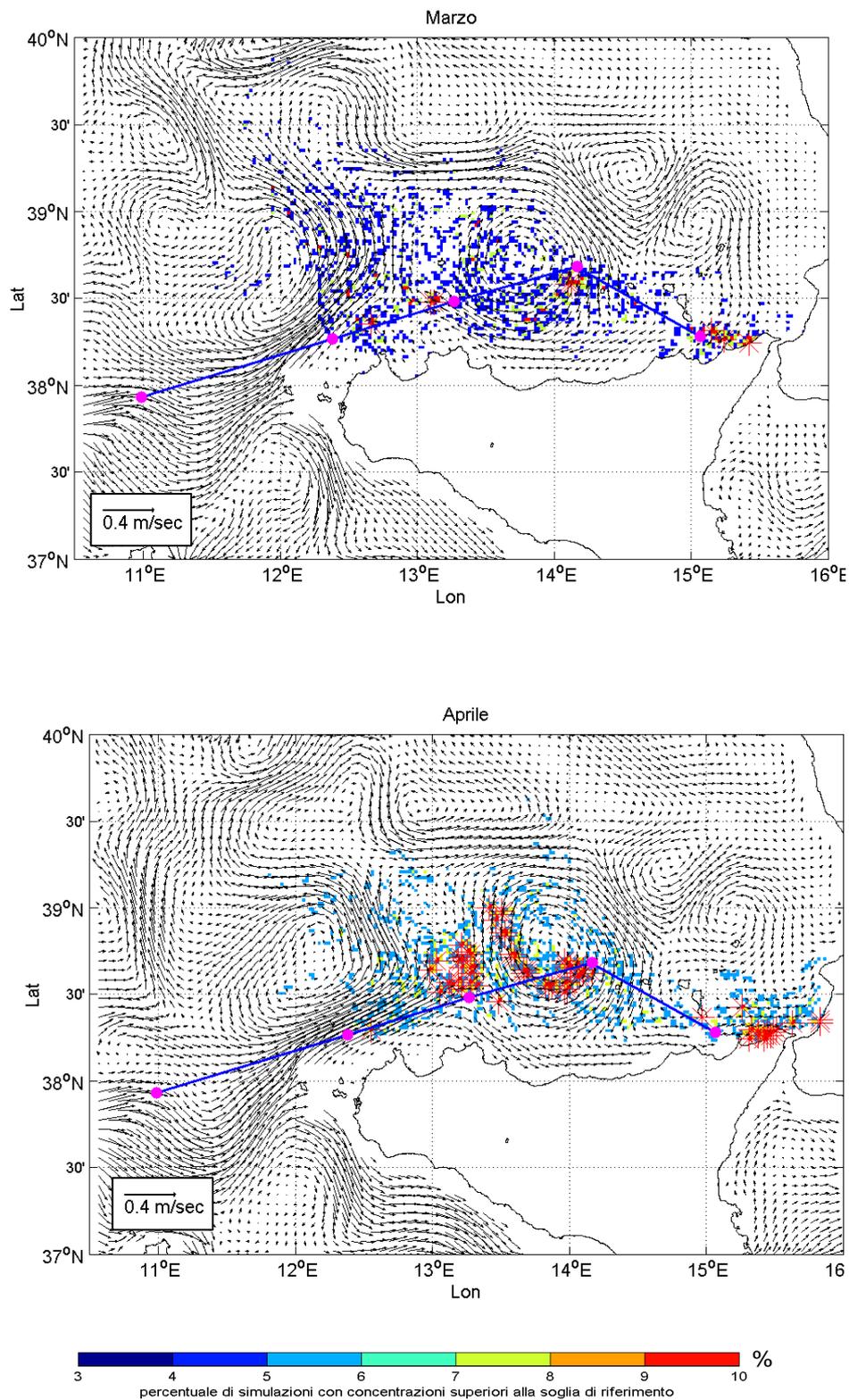


Figura 4.4. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di marzo e aprile del 2005.

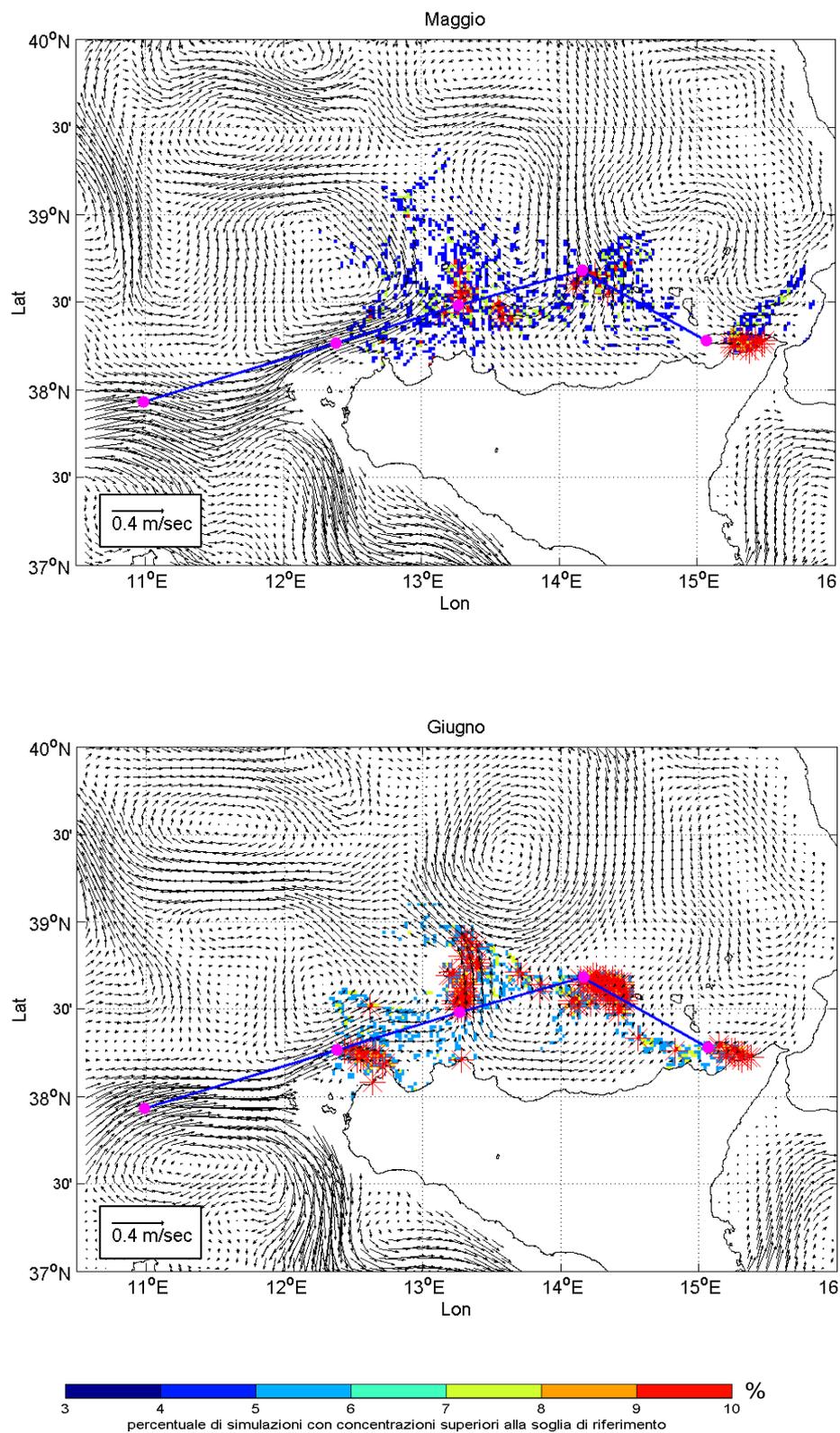


Figura 4.5. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di maggio e giugno del 2005.

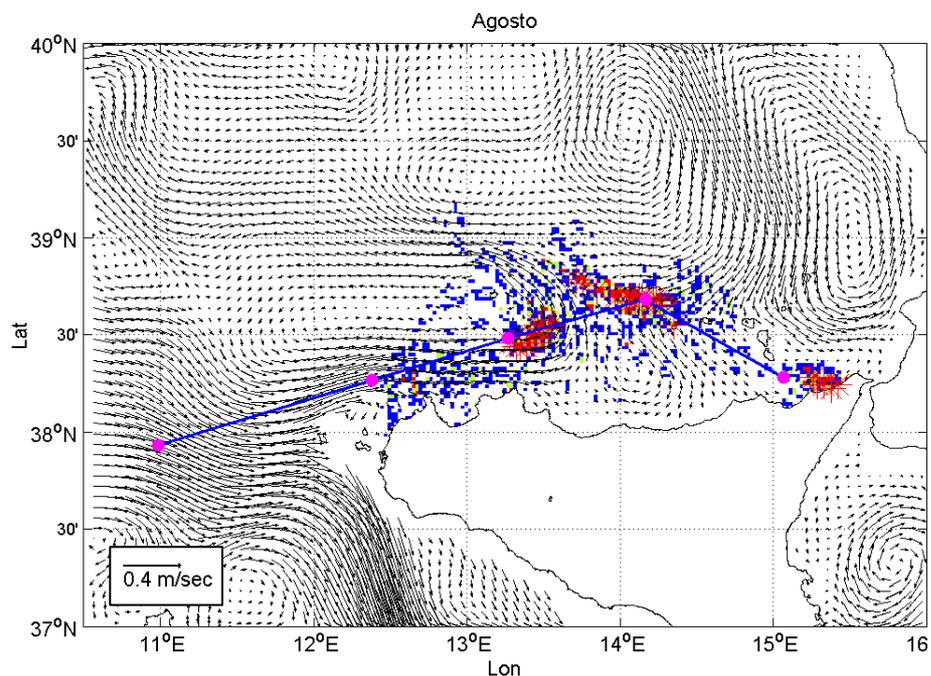
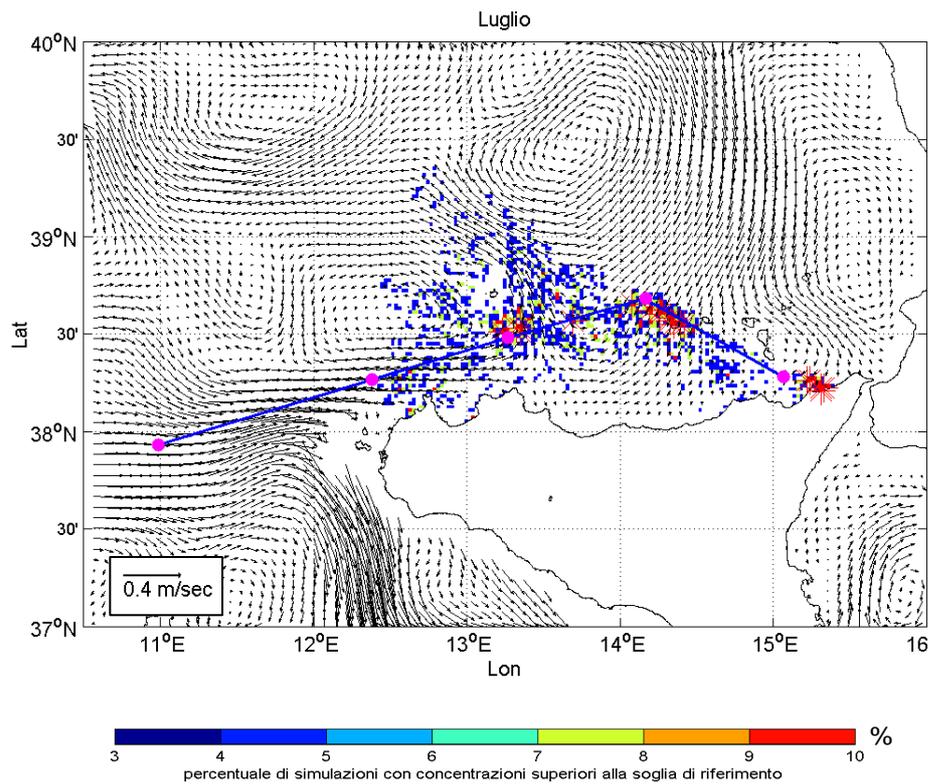


Figura 4.6. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di luglio e agosto del 2005.

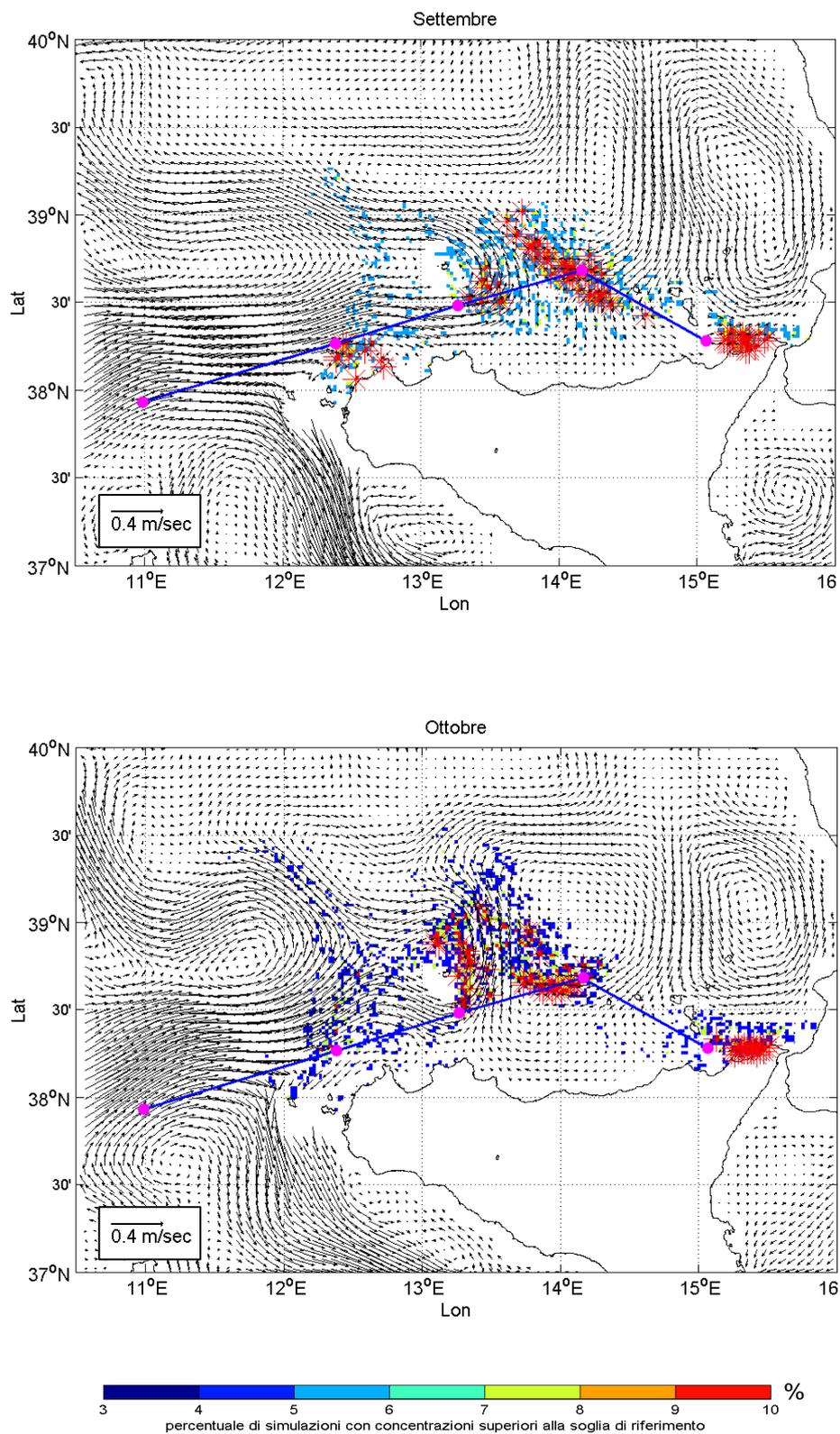


Figura 4.7. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di settembre e ottobre del 2005.

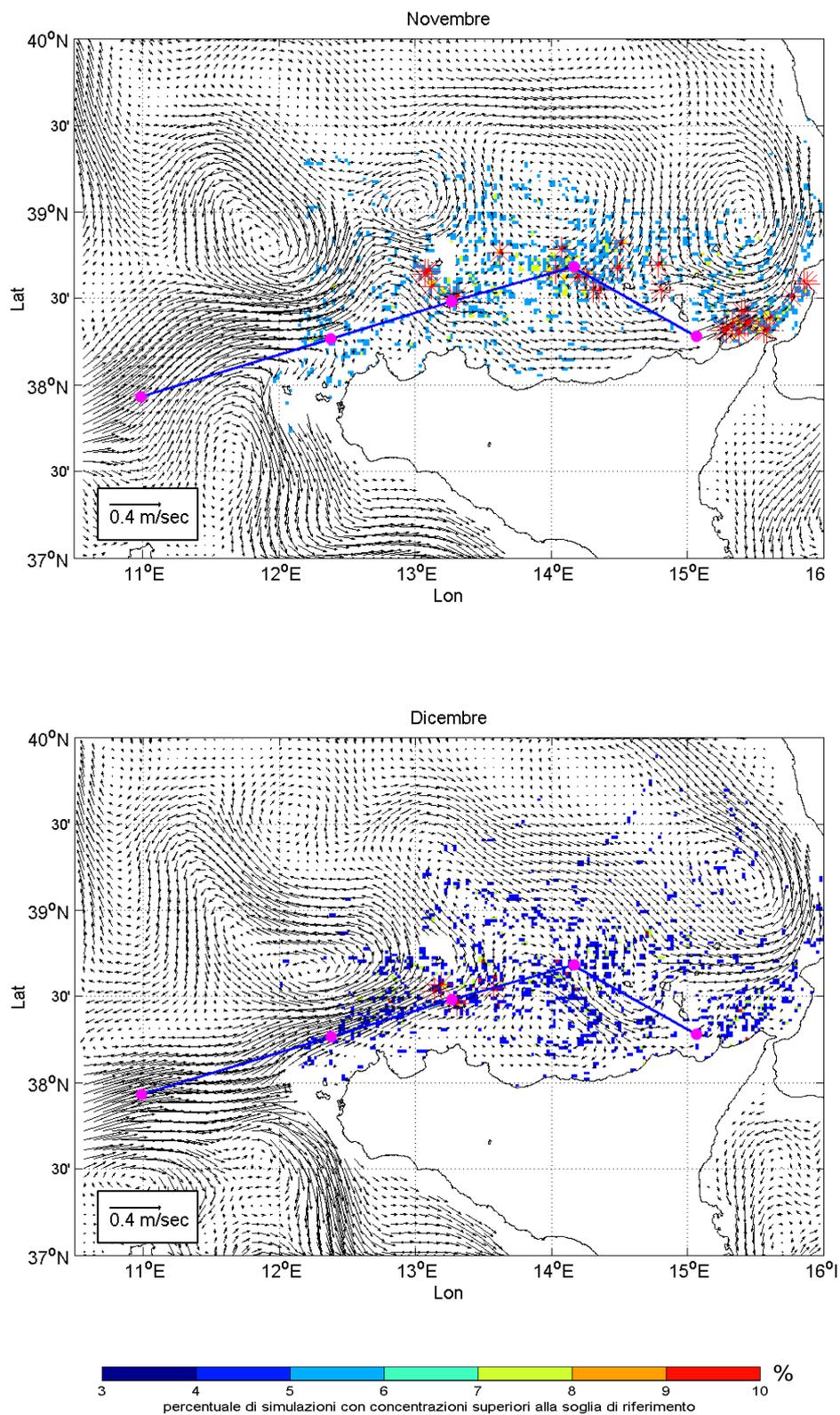


Figura 4.8. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di novembre e dicembre del 2005.

4.2 Traccia B: x1-Fiumicino

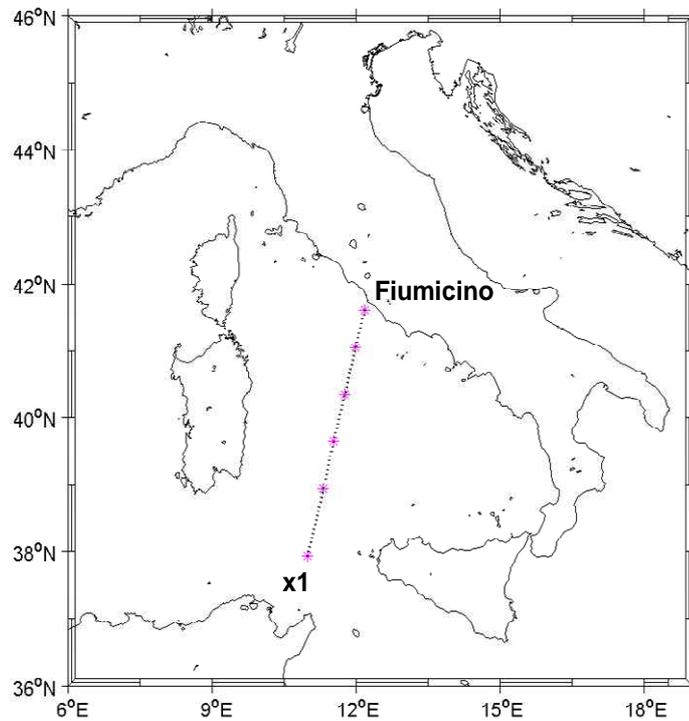


Figura 4.9 Traccia B. La linea tratteggiata rappresenta la rotta seguita dalle navi, i punti rosa sono i punti di rilascio.

La traccia B va dal punto x1 al porto di Fiumicino e consiste di 5 punti di rilascio.

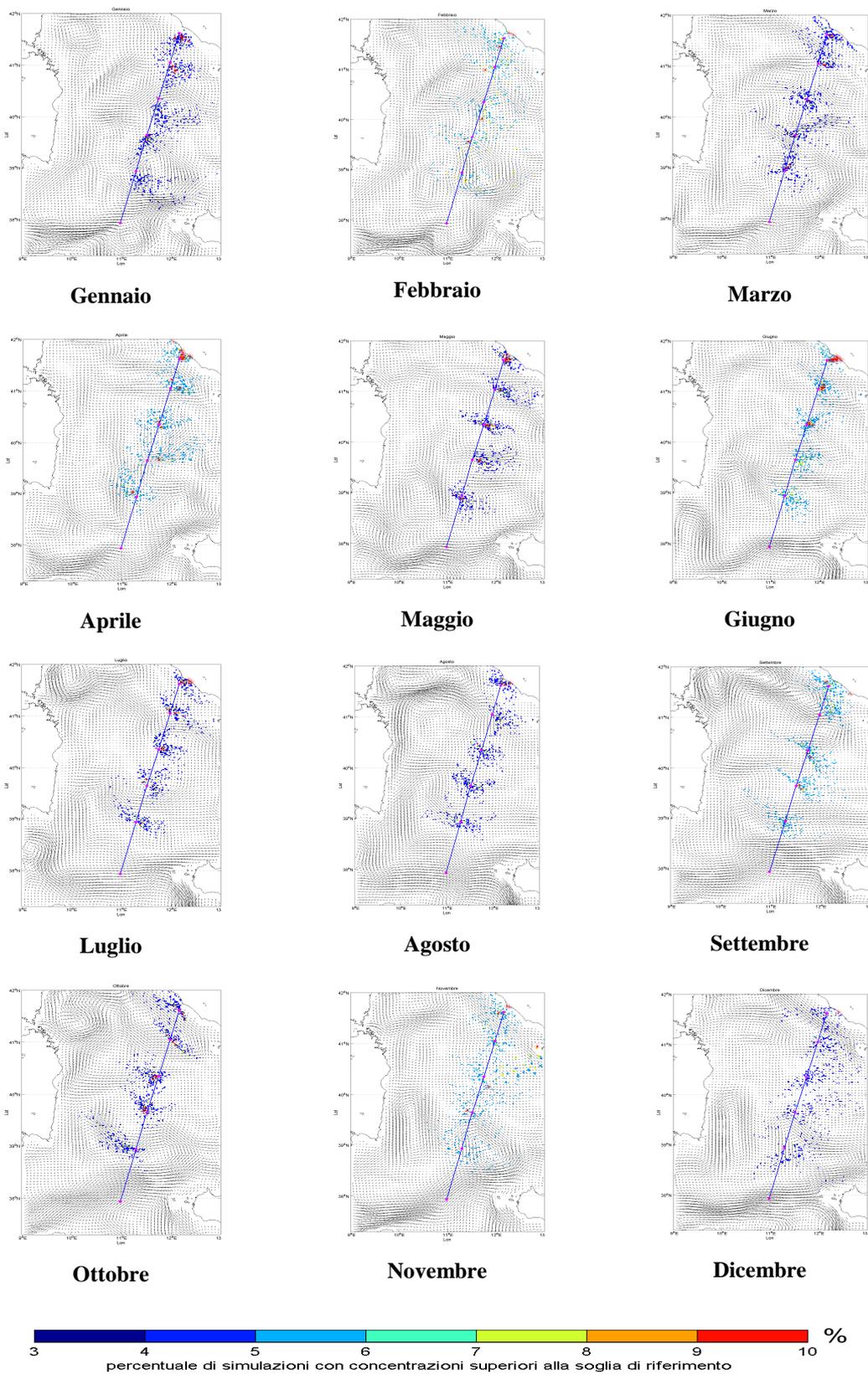


Figura 4.10 Mappe di pericolosità per la traccia B per i 12 mesi del 2005. Le figure rappresentano le mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento). La linea blu rappresenta la traccia in esame.

La figura 4.10 mostra le mappe di pericolosità della traccia B per i dodici mesi dell'anno 2005.

Dalla letteratura si evince che nel tratto di mare prospiciente la costa laziale, la circolazione generale è caratterizzata da un flusso parallelo alla linea di costa diretto verso NO, che generalmente presenta una buona correlazione con il vento. Una serie di strutture cicloniche e anticicloniche presenti in prossimità della traccia sono rilevanti per la dispersione degli idrocarburi rilasciati lungo la traccia.

La pericolosità più alta è associata ai mesi di Febbraio, Aprile, Giugno, Settembre e Novembre. In generale per questa traccia la pericolosità rimane in mare aperto tranne che per la zona circostante al punto di rilascio più prossimo a costa. Nei mesi di aprile e giugno risultano evidenti un accumulo di olio in prossimità della costa laziale (asterischi rossi).

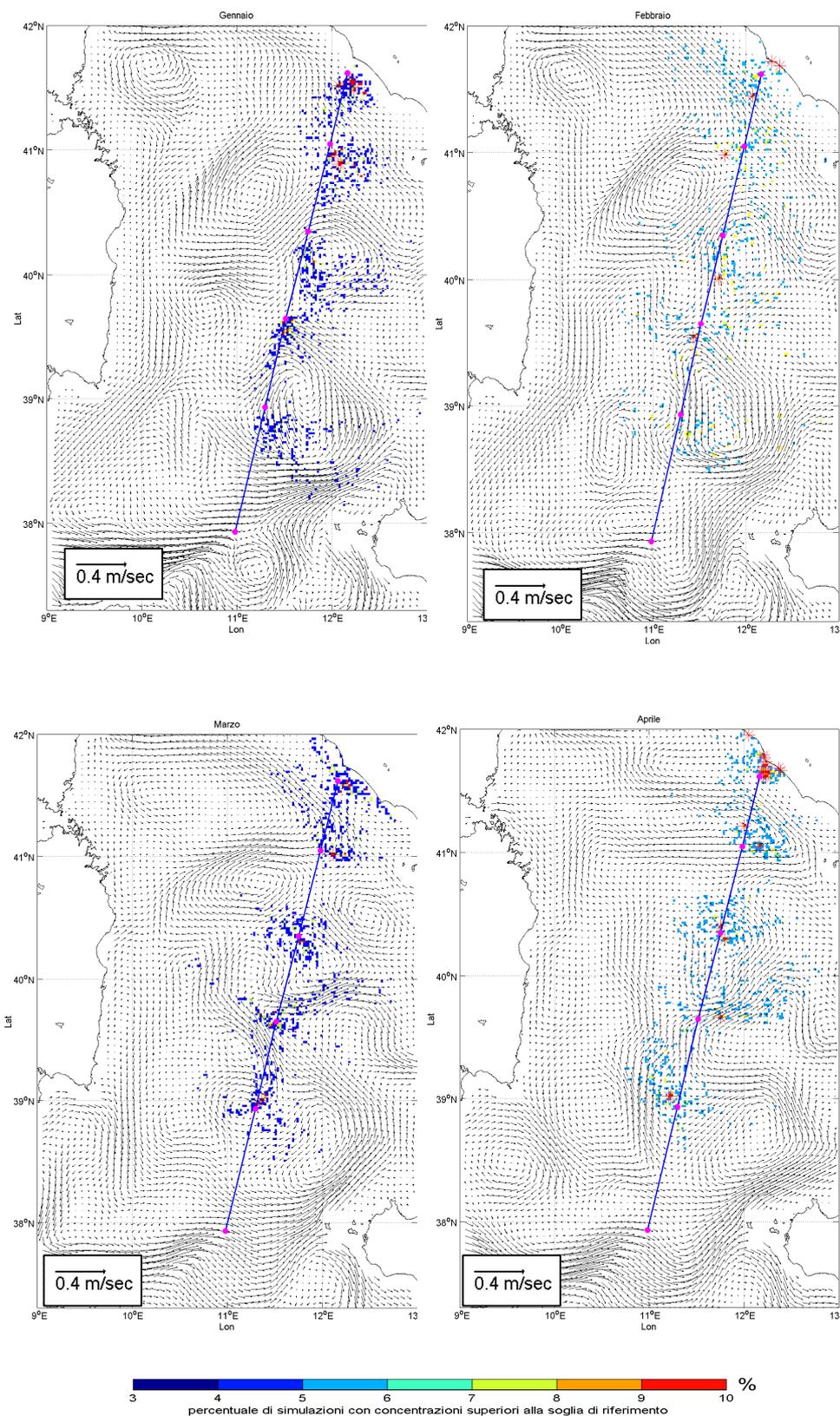


Figura 4.11. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di gennaio, febbraio, marzo e aprile del 2005.

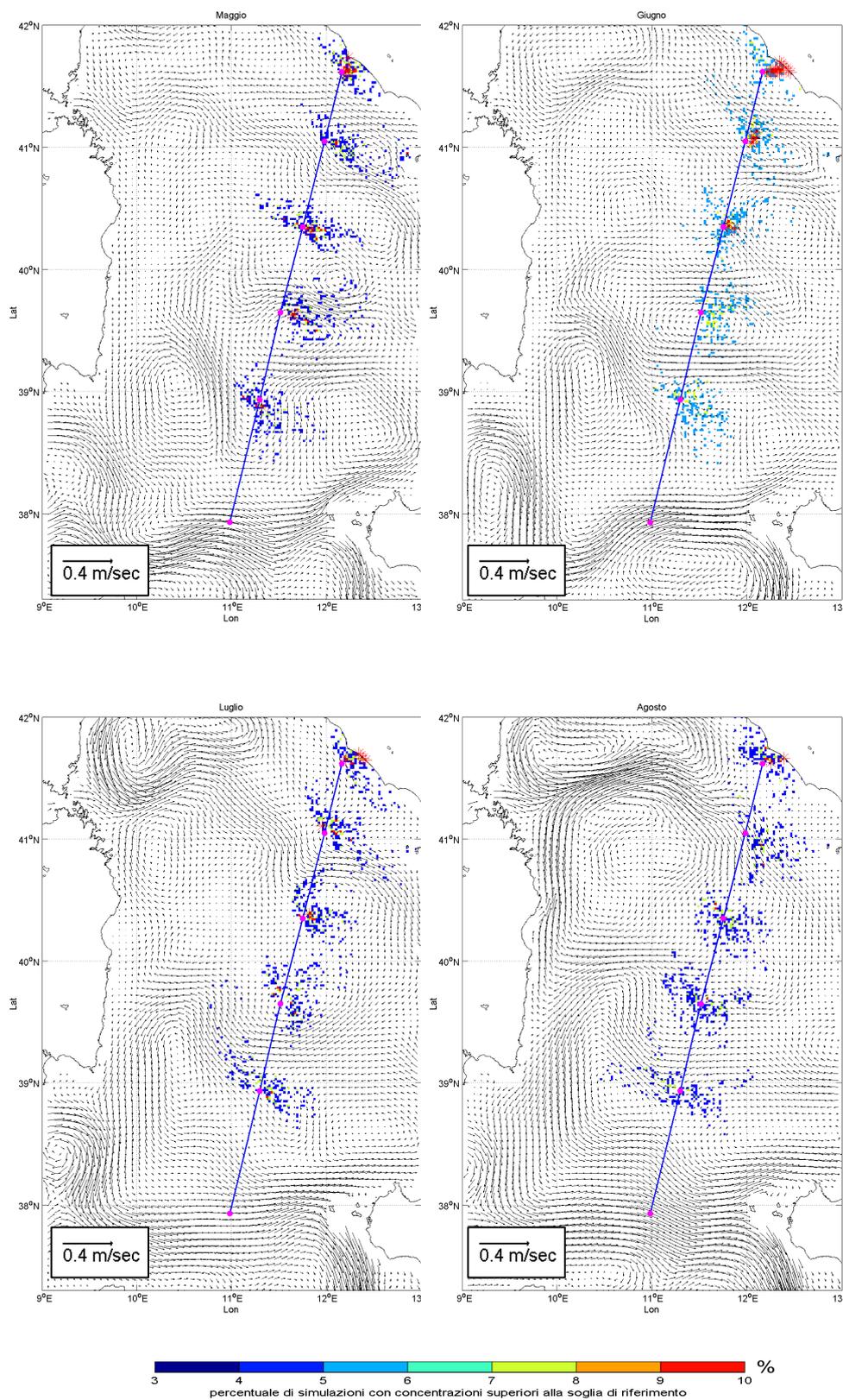


Figura 4.12. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di maggio, giugno, luglio e agosto del 2005.

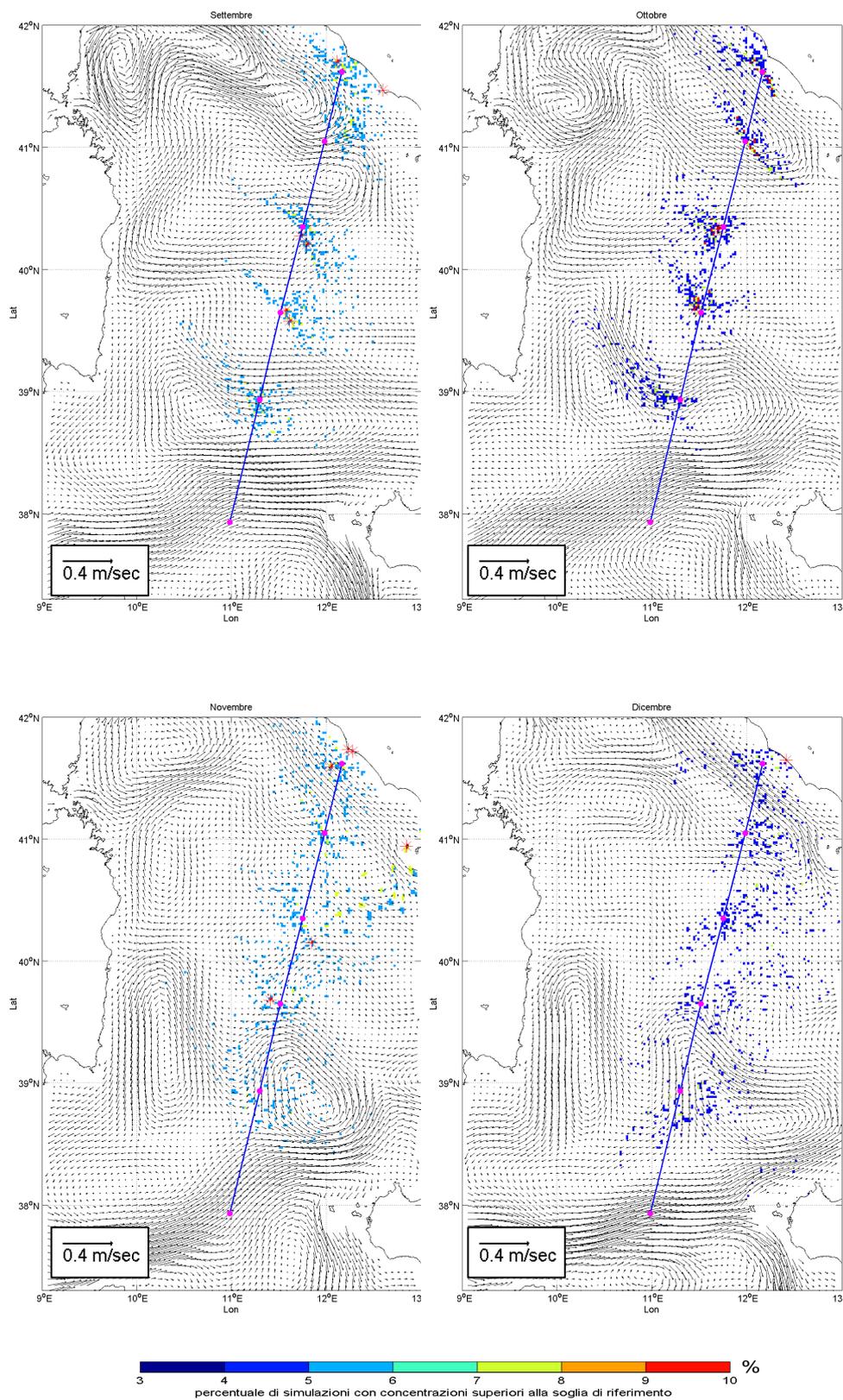


Figura 4.13. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di settembre, ottobre, novembre e dicembre del 2005.

4.3 Traccia C, D e E: x1-Livorno, x1-Genova, x1_Savona

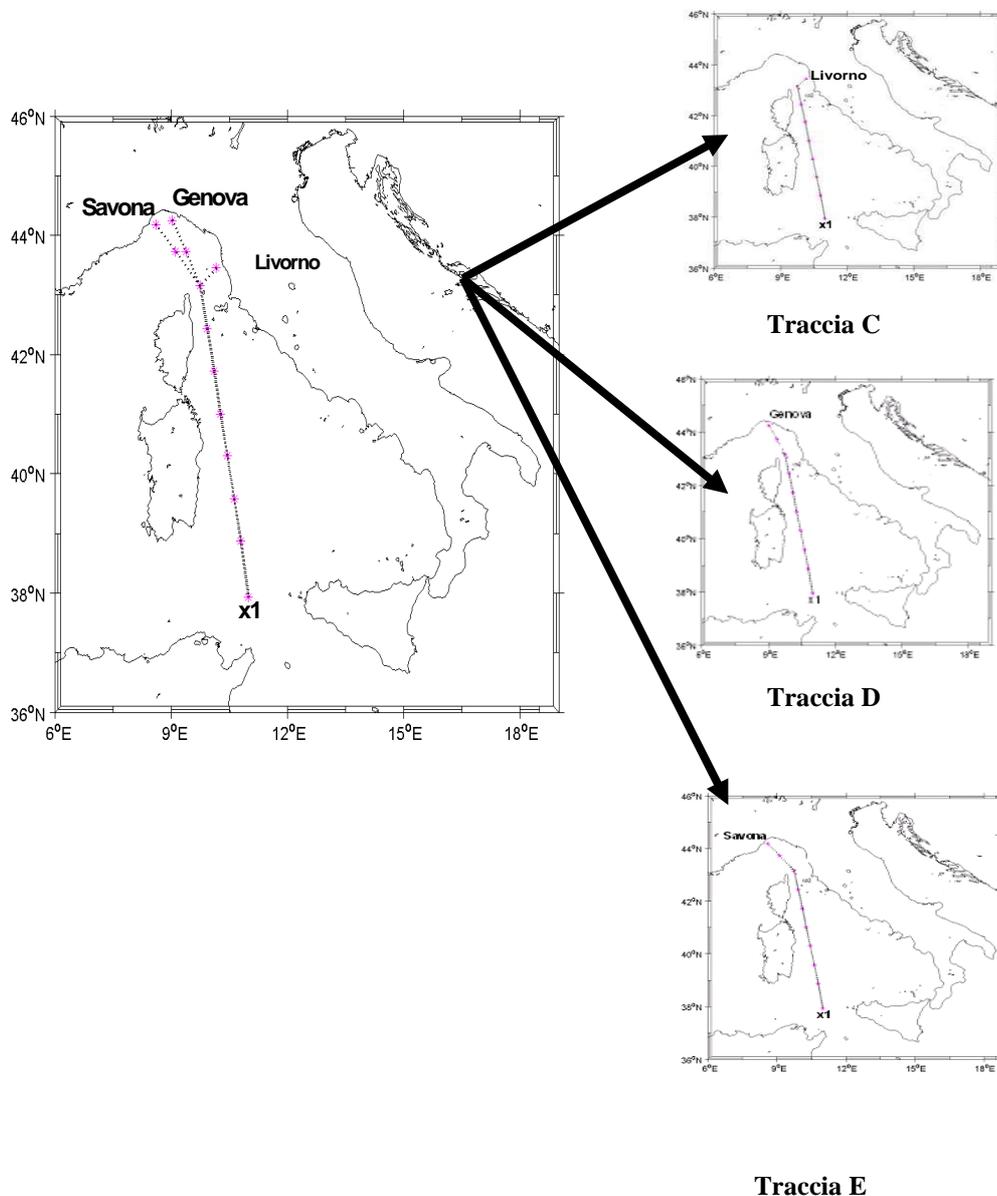


Figura 4.14 Traccia C, D ed E. La linea tratteggiata rappresenta la rotta seguita dalle navi, i punti rosa sono i punti di rilascio.

Come detto nella descrizione dell'esperimento le tracce C, D e E, rispettivamente da x1 a Livorno, Genova, Savona, sono state aggregate assieme, sommando la concentrazione di olio disperso, a causa della loro vicinanza. Le tracce suddette presentano nell'insieme 12 punti di rilascio.

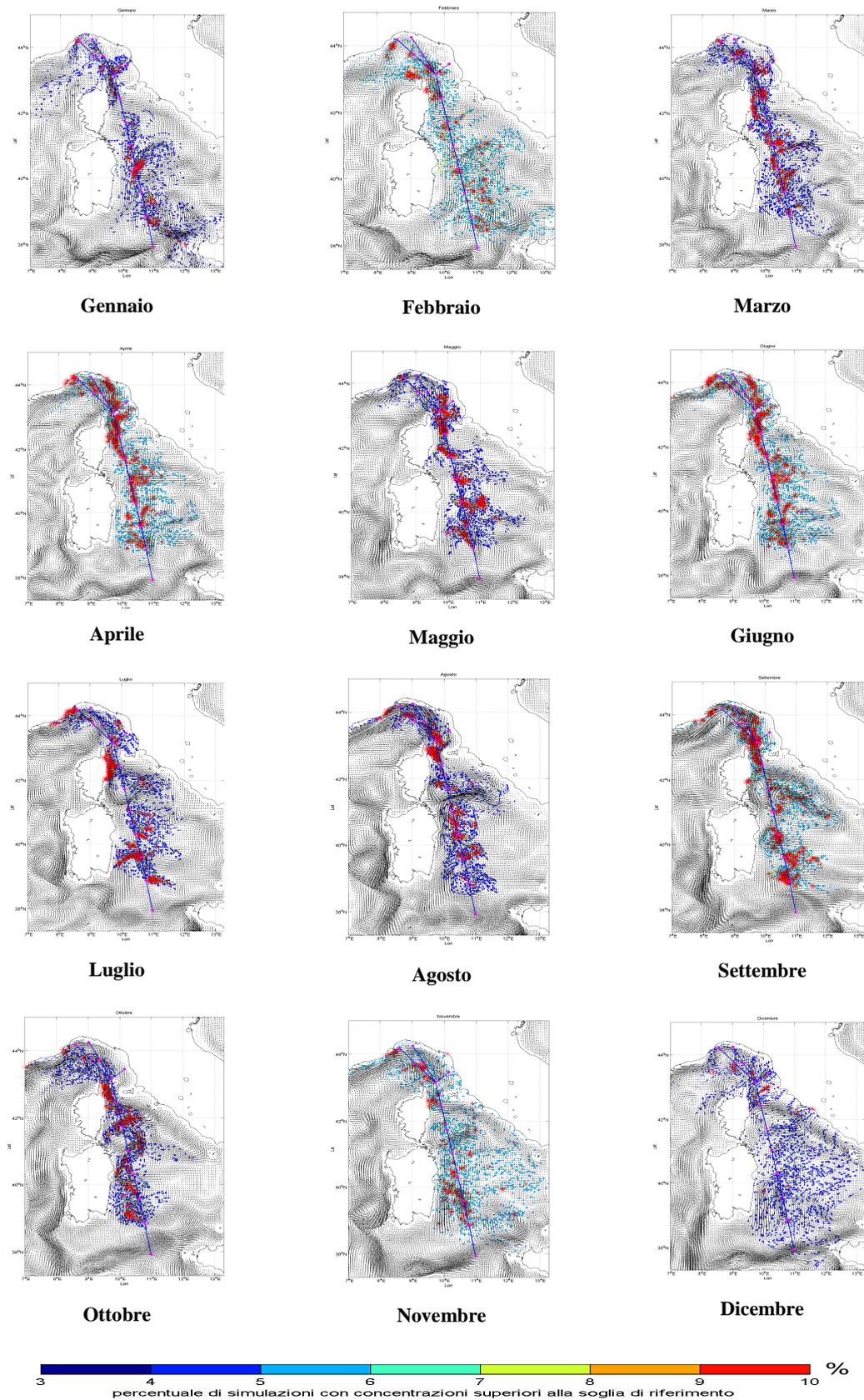


Figura 4.15 Mappe di pericolosità per le tracce C, D e E per i 12 mesi del 2005. Le figure rappresentano le mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento). La linea blu rappresenta la traccia in esame.

La figura 4.15 mostra le mappe di pericolosità delle tracce C, D e E aggregate, per i dodici mesi dell'anno 2005. In quasi tutti i mesi sono presenti alte percentuali di concentrazione dell'olio superiore alla soglia di riferimento. Zone con alta pericolosità sono riscontrate lungo la costa orientale della Corsica, la costa ligure di levante. Nei mesi di giugno e aprile anche le coste del nord della Toscana e della zona Ligure di ponente sono interessate da alte concentrazioni di olio.

L'alta concentrazione di olio lungo le coste Liguri potrebbe essere imputabile alla circolazione ciclonica (corrente Liguro provenzale) presente nel bacino Ligure che trasporta l'olio in senso antiorario verso ovest.

Nei mesi di Gennaio, Marzo e Maggio sono anche riscontrabili maggiori concentrazioni di olio nell'area antistante Livorno.

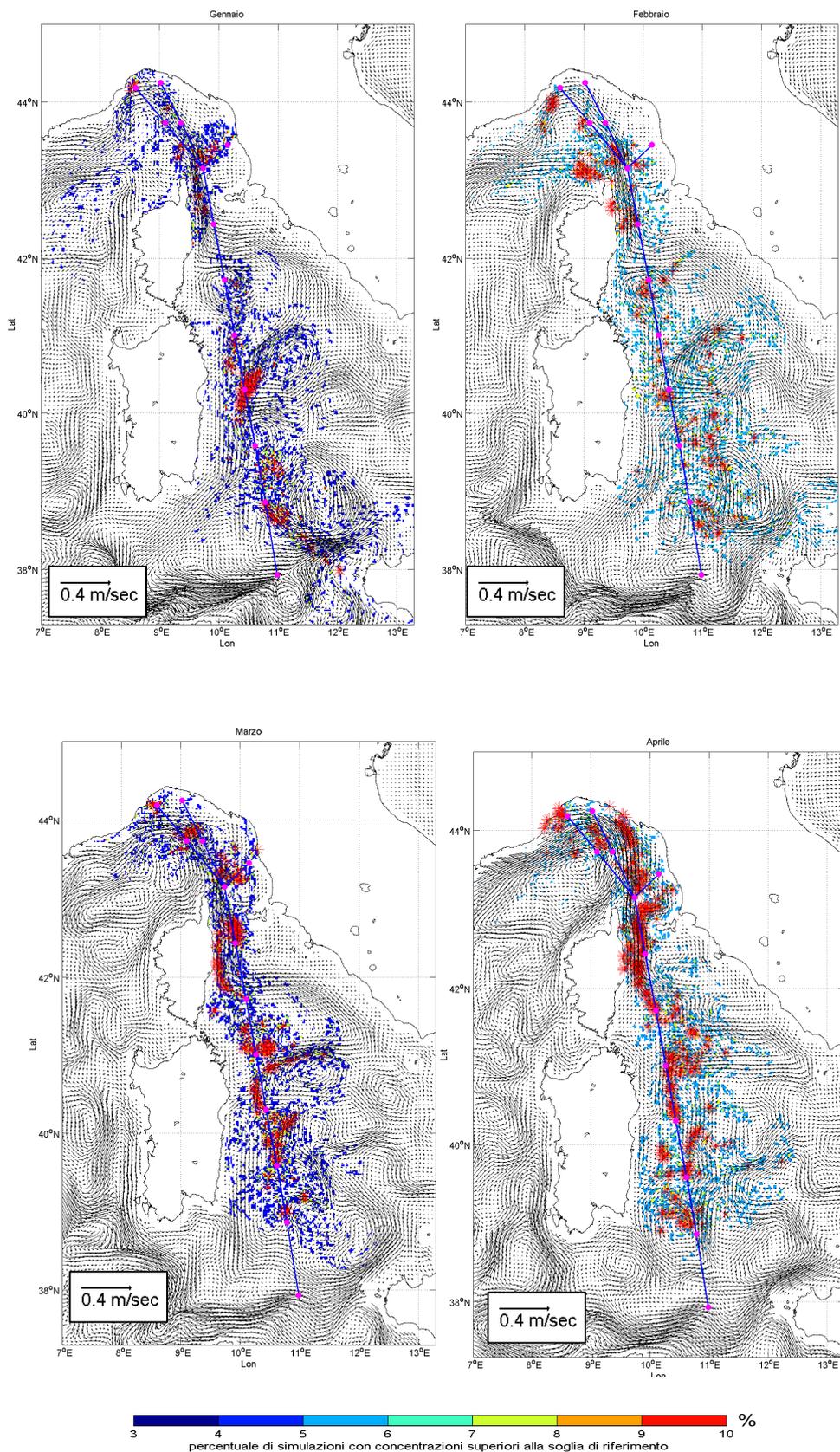


Figura 4.16. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di gennaio, febbraio, marzo e aprile.

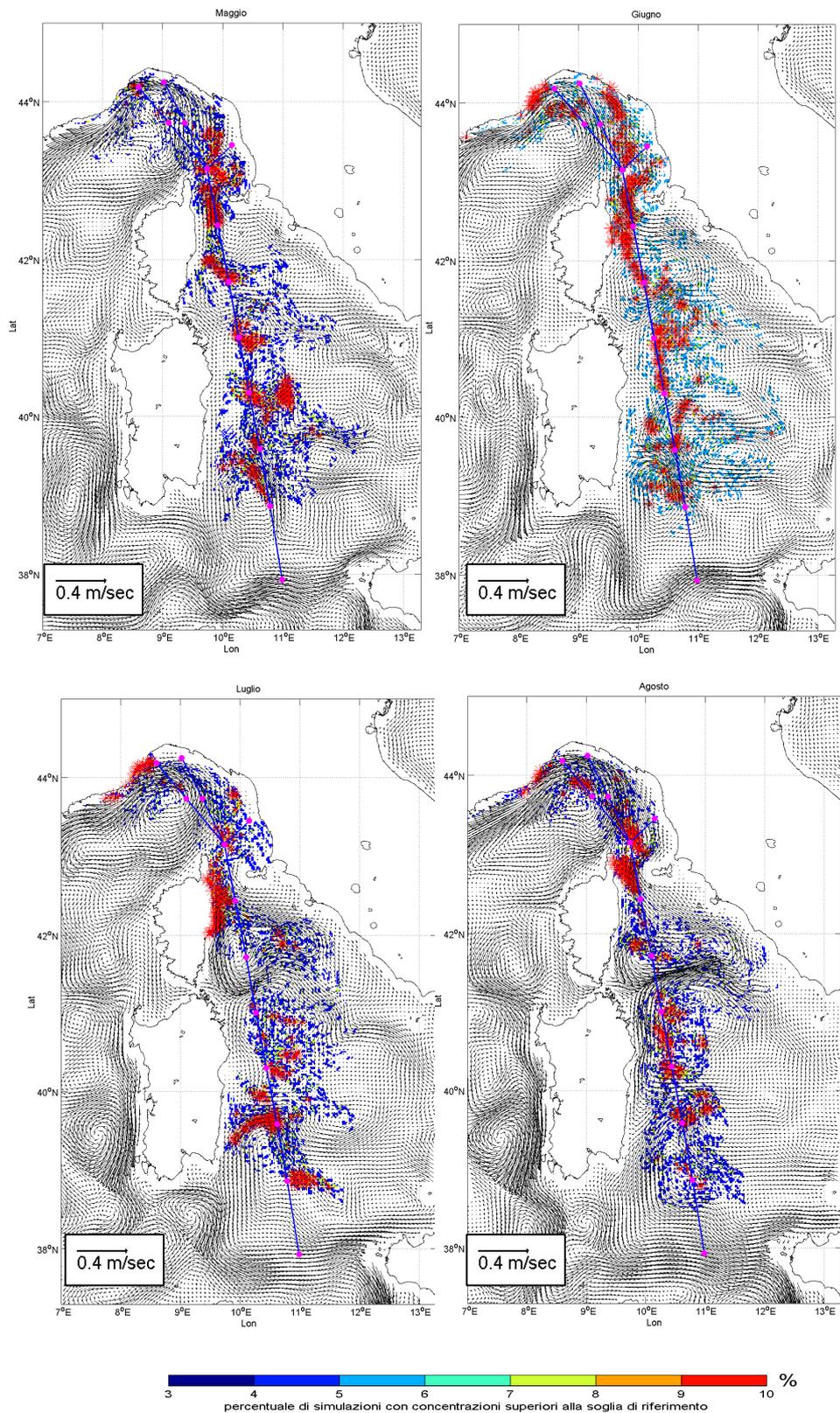


Figura 4.17. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di maggio, giugno, luglio e agosto.

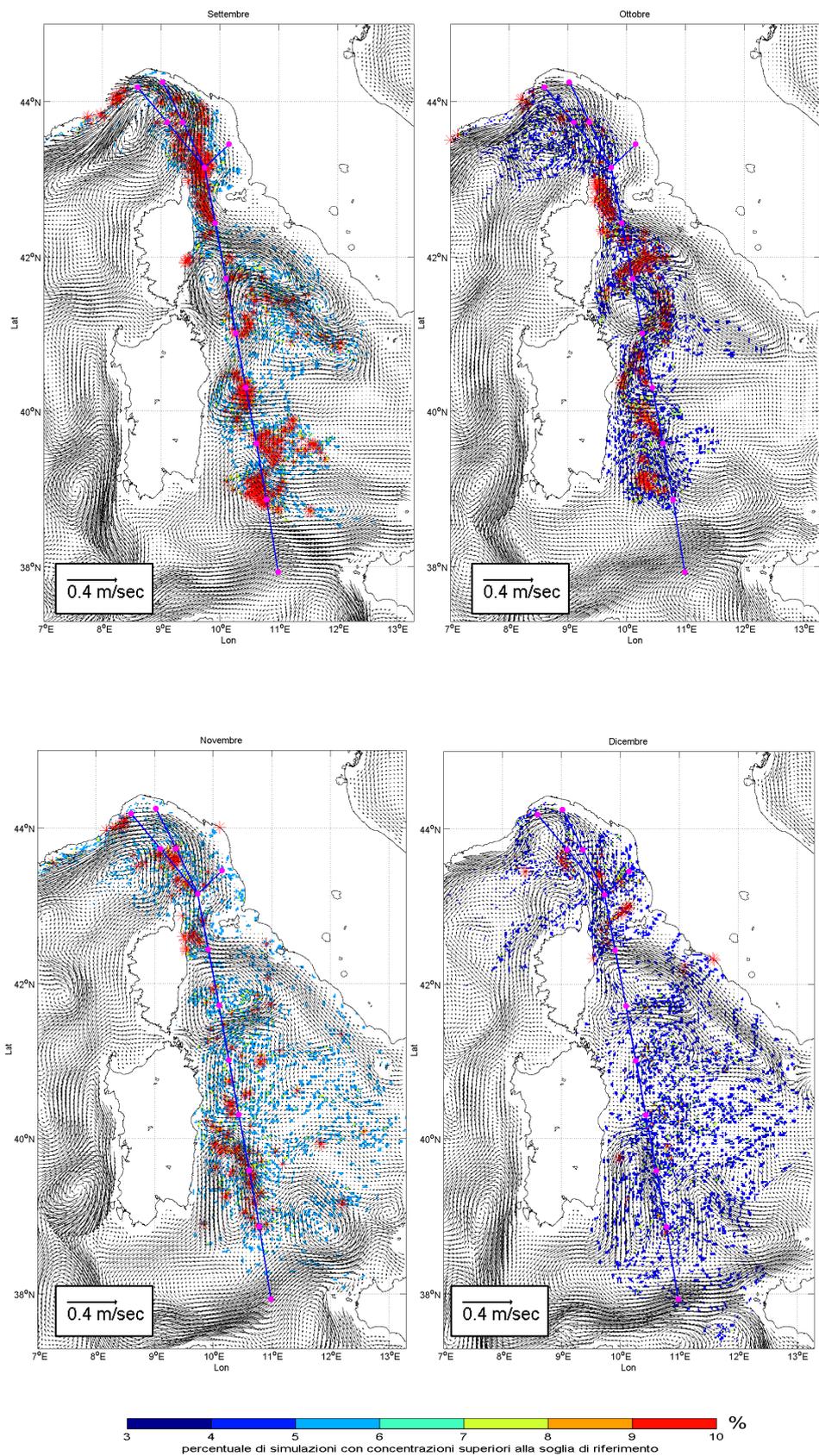


Figura 4.18. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi settembre, ottobre, novembre e dicembre.

4.4 Traccia F: x1-Cagliari

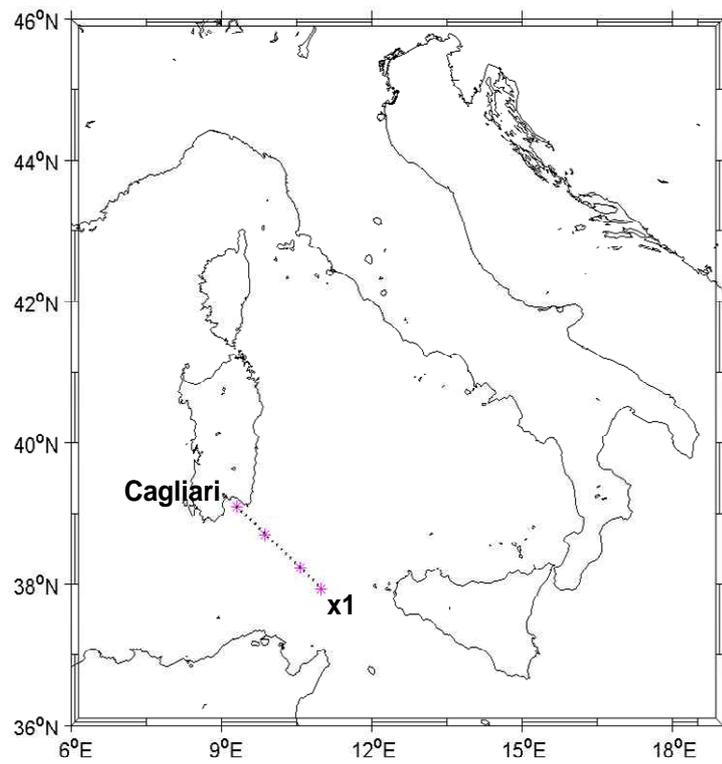


Figura 4.19 Traccia F. La linea tratteggiata rappresenta la rotta seguita dalle navi, i punti rosa sono i punti di rilascio.

La traccia F va dal punto x1 al porto di Cagliari e si articola in 3 punti di rilascio.

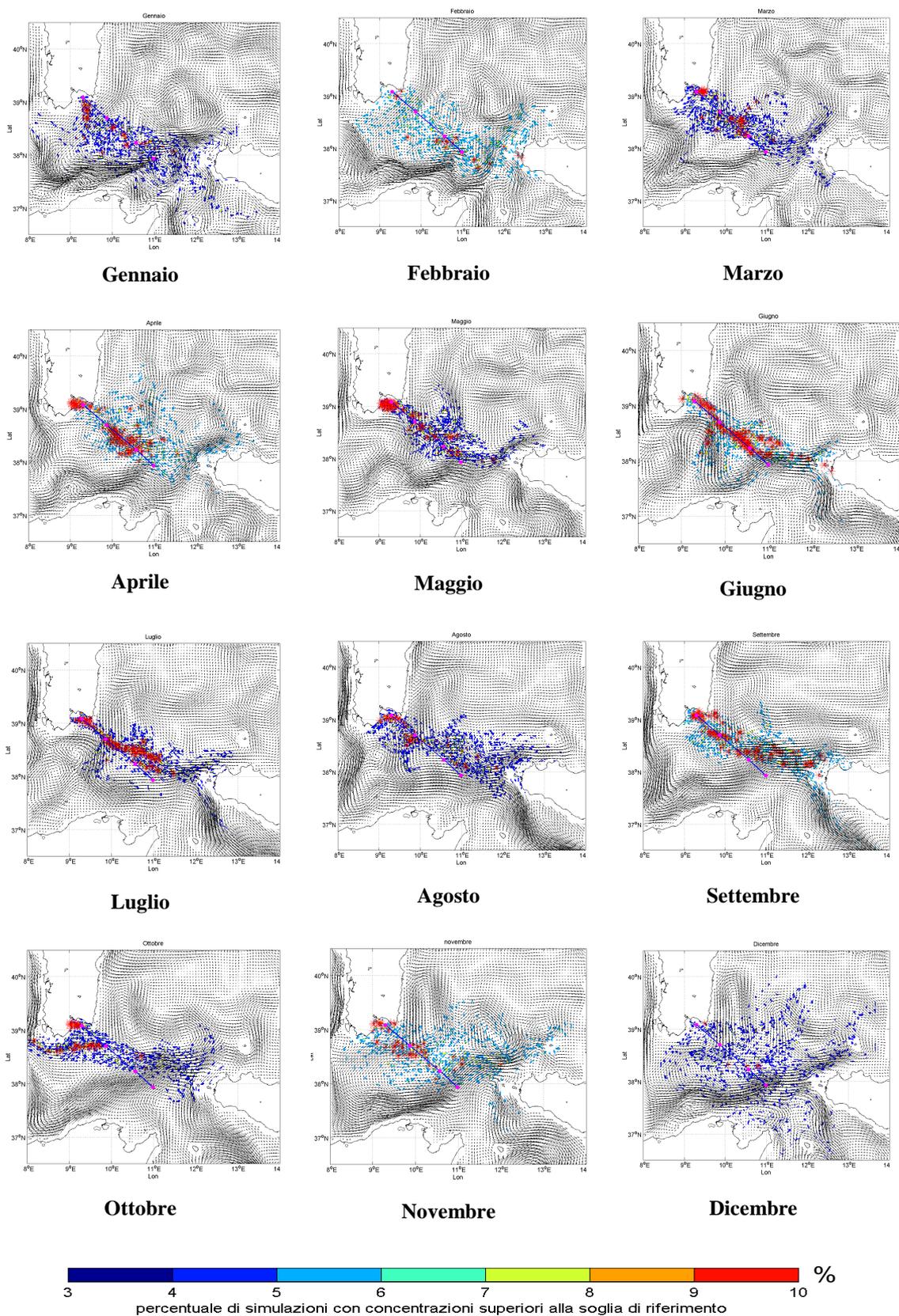


Figura 4.20 Mappe di pericolosità per la traccia F per i 12 mesi del 2005. Le figure rappresentano le mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento). La linea blu rappresenta la traccia in esame.

La figura 4.20 mostra le mappe di pericolosità della traccia F per i dodici mesi dell'anno 2005.

In questa area la Corrente Algerina, nome dato alla corrente di acqua atlantica entrante nel bacino Balearico (tra le isole Baleari e l'Africa settentrionale), è molto instabile e produce meandri da cui si formano dei vortici di grandi dimensioni (con diametro di un centinaio di chilometri) ciclonici e anticiclonici, che interessano tutta l'area e che sono più duraturi nel tempo, presentando una intensa variabilità di mesoscala (Fuda et al., 2000).

Le acque Atlantiche fluiscono lungo le coste Tunisine verso est per poi biforcarsi ad ovest della Sicilia, la parte di questa biforcazione che fluisce verso nord interessa il tratto di mare percorso dalla traccia F. Il tratto di mare prospiciente Cagliari è caratterizzato dall'interazione fra una corrente verso sud che scorre lungo le coste orientali della Sardegna e una struttura anticiclonica presente nel canale di Sardegna. Si può subito osservare una maggiore dispersione della macchia d'olio nei mesi di Febbraio, Novembre e Dicembre dove l'olio tende a distribuirsi lungo tutta l'area tra la Sardegna e la Sicilia. Zone a più alta pericolosità lungo la rotta si riscontrano invece nei mesi di Aprile, Giugno, Luglio.

Solo ad ottobre l'alta pericolosità dalla costa si sposta in direzione Ovest, probabilmente a causa di una maggiore intensità delle correnti.

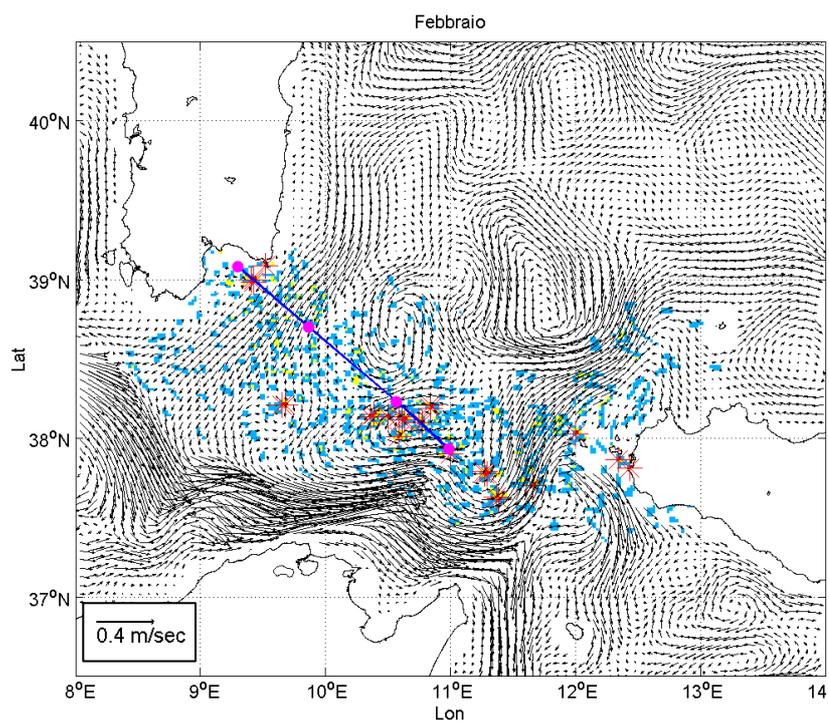
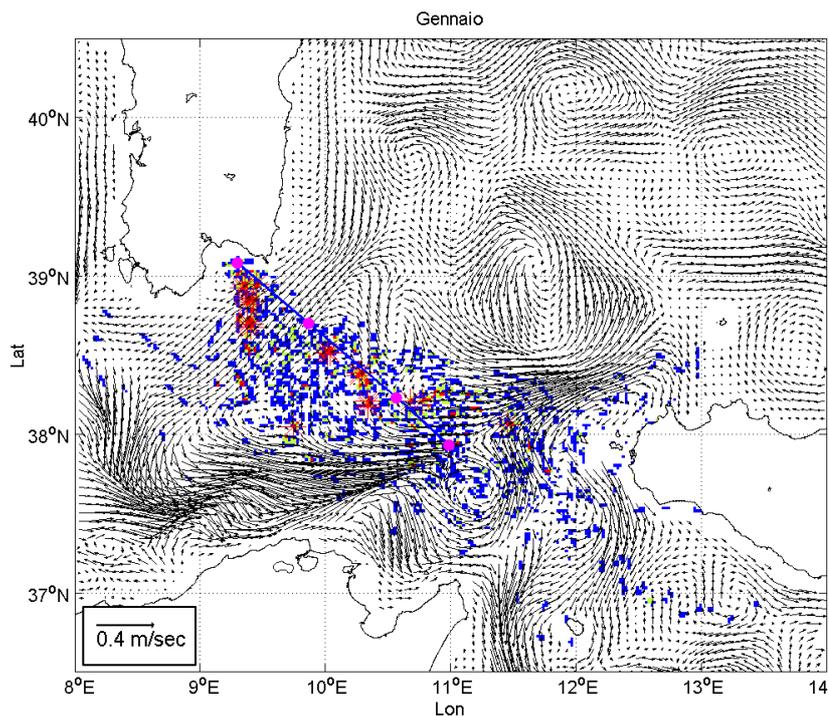


Figura 4.21. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di gennaio e febbraio del 2005

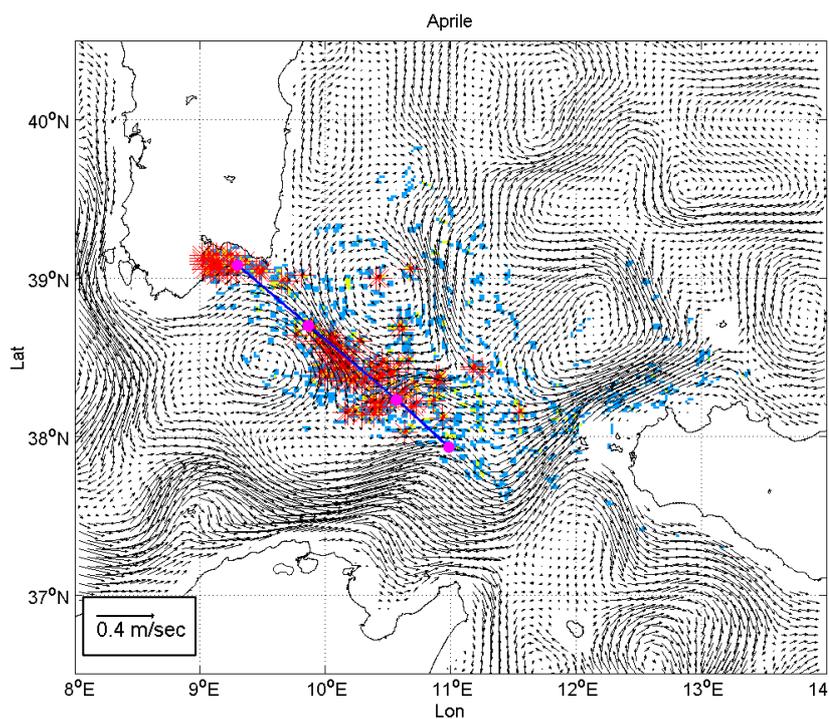
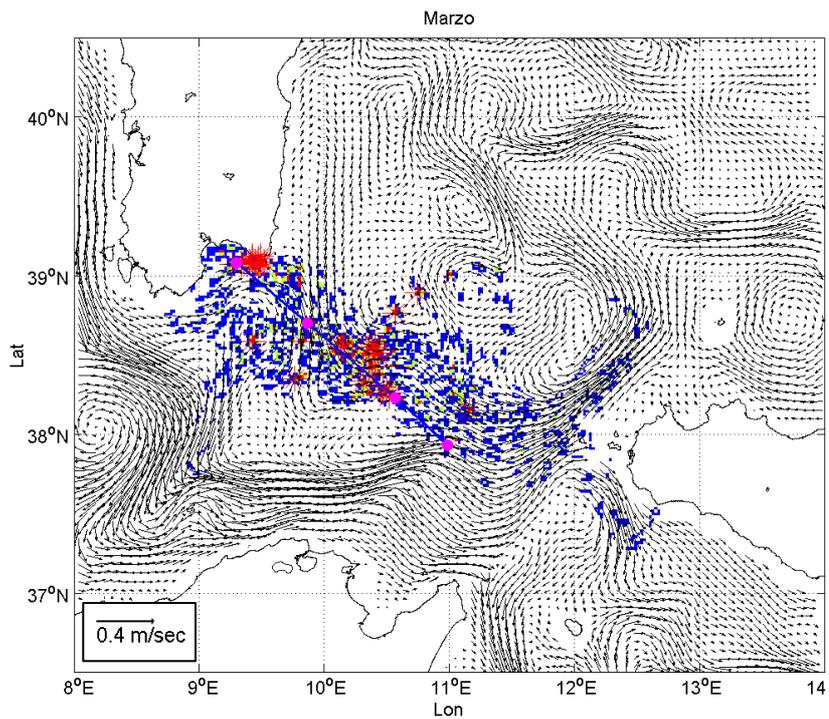


Figura 4.22. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di marzo e aprile del 2005

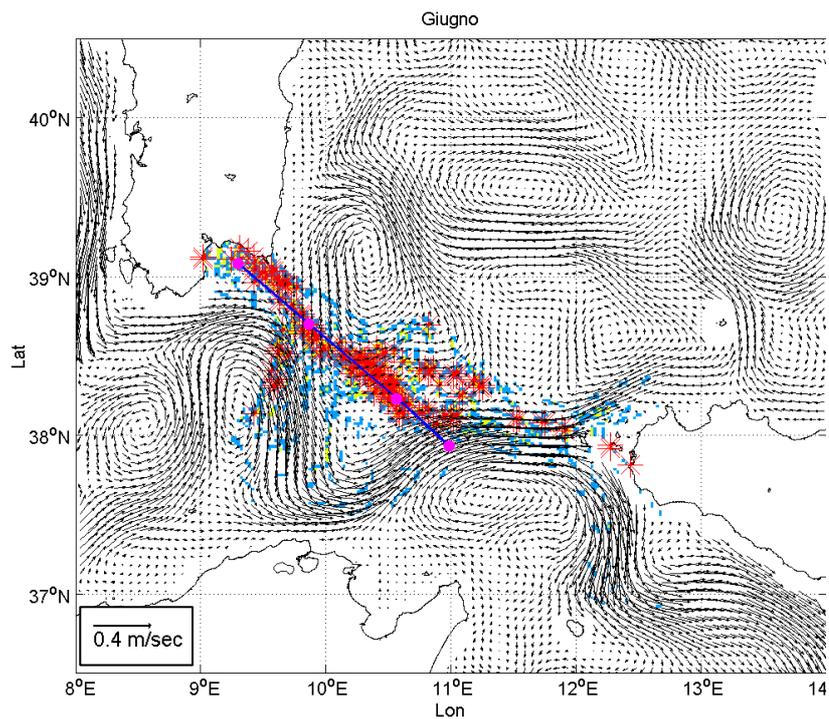
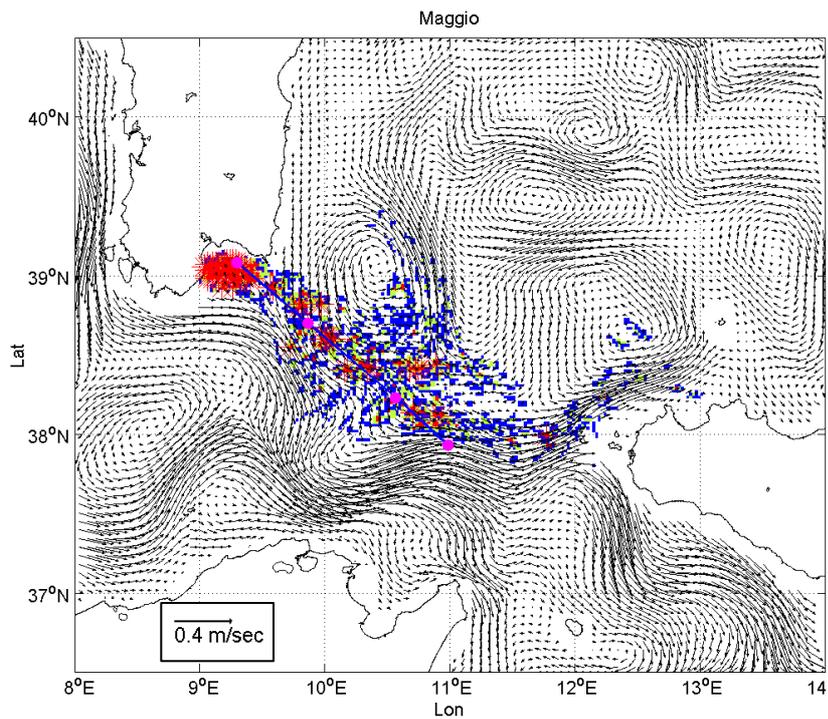


Figura 4.23. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di maggio e giugno del 2005

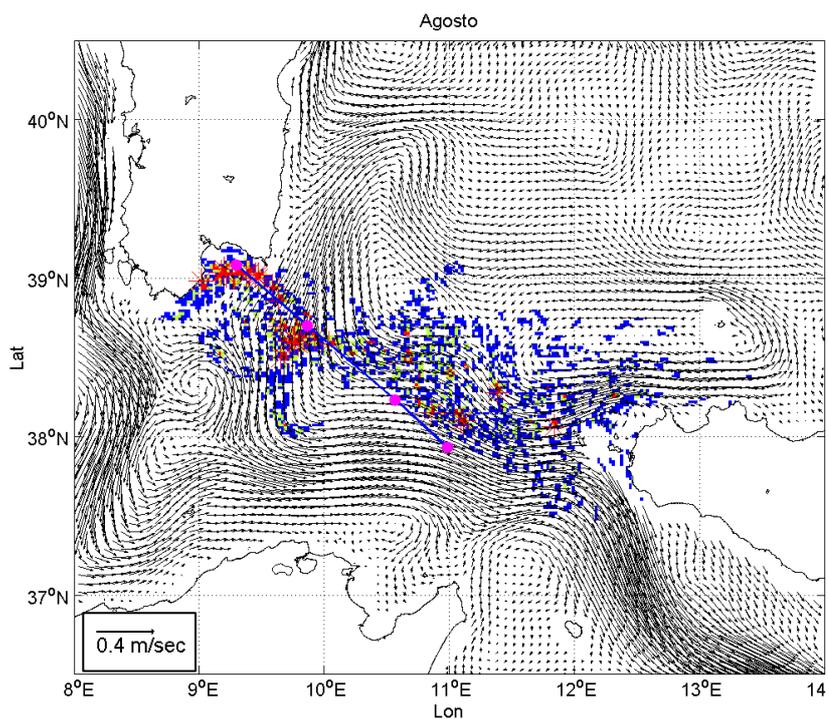
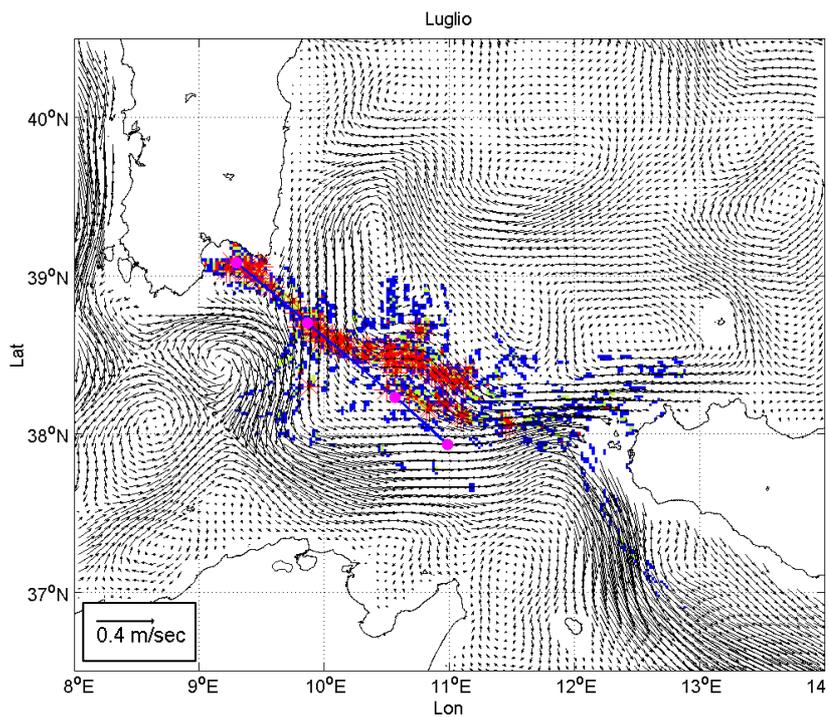


Figura 4.24. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di luglio e agosto del 2005

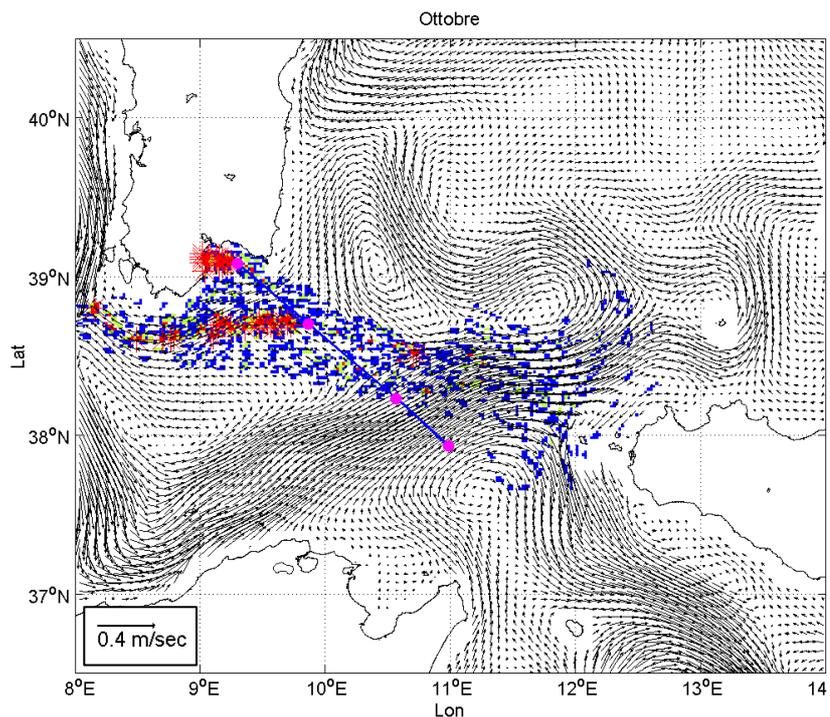
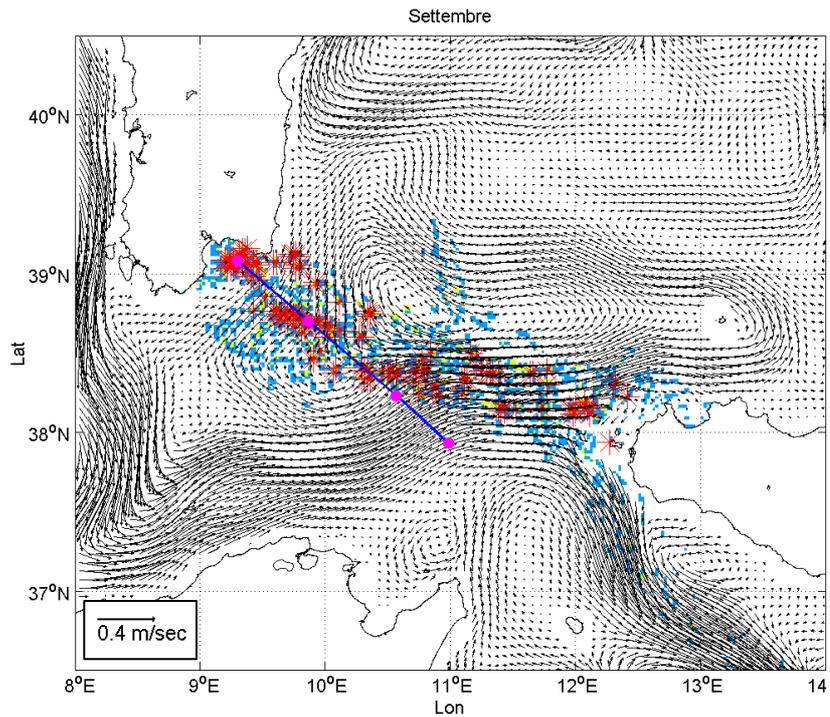


Figura 4.25. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di settembre e ottobre del 2005

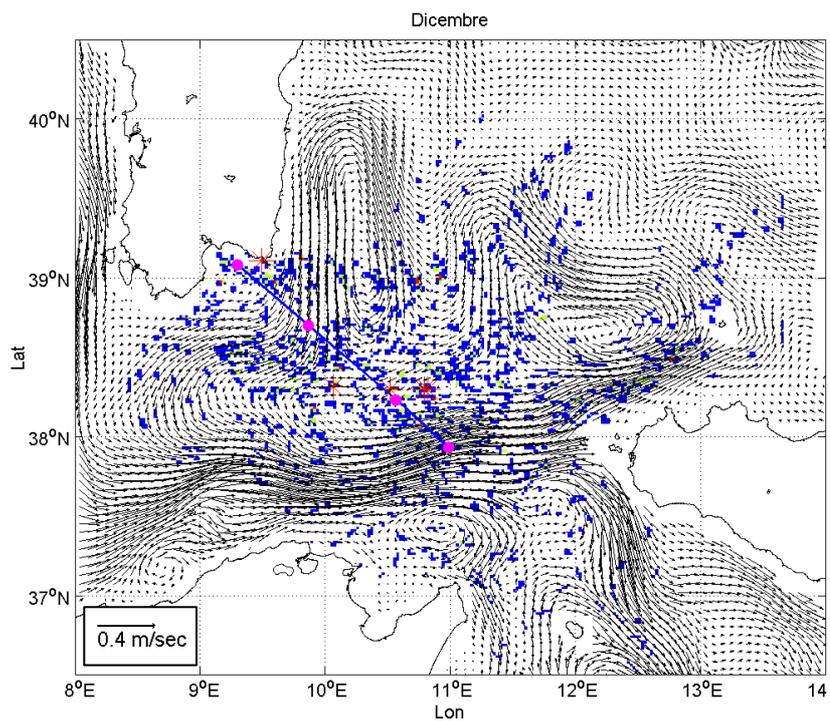
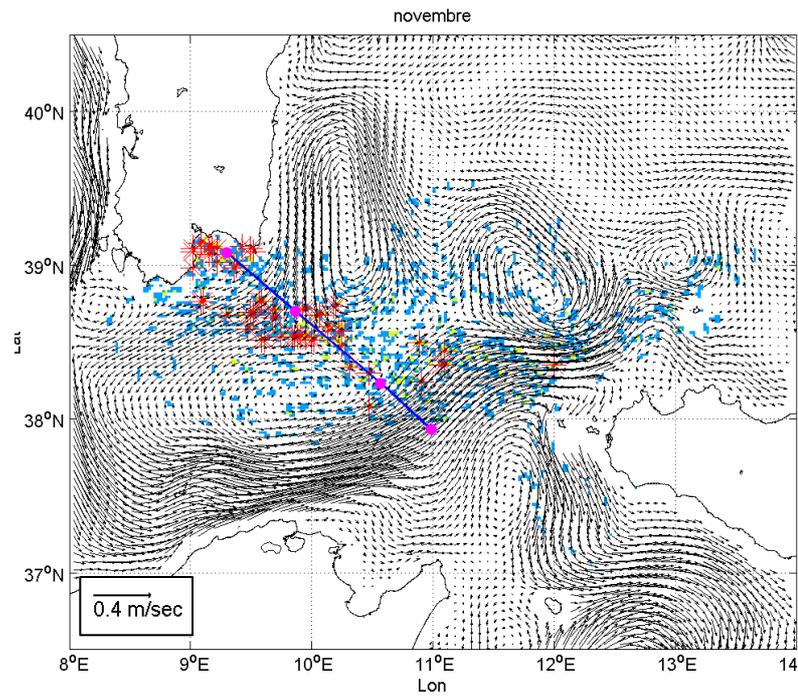


Figura 4.26 Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di novembre e dicembre del 2005

4.5 Punto x1

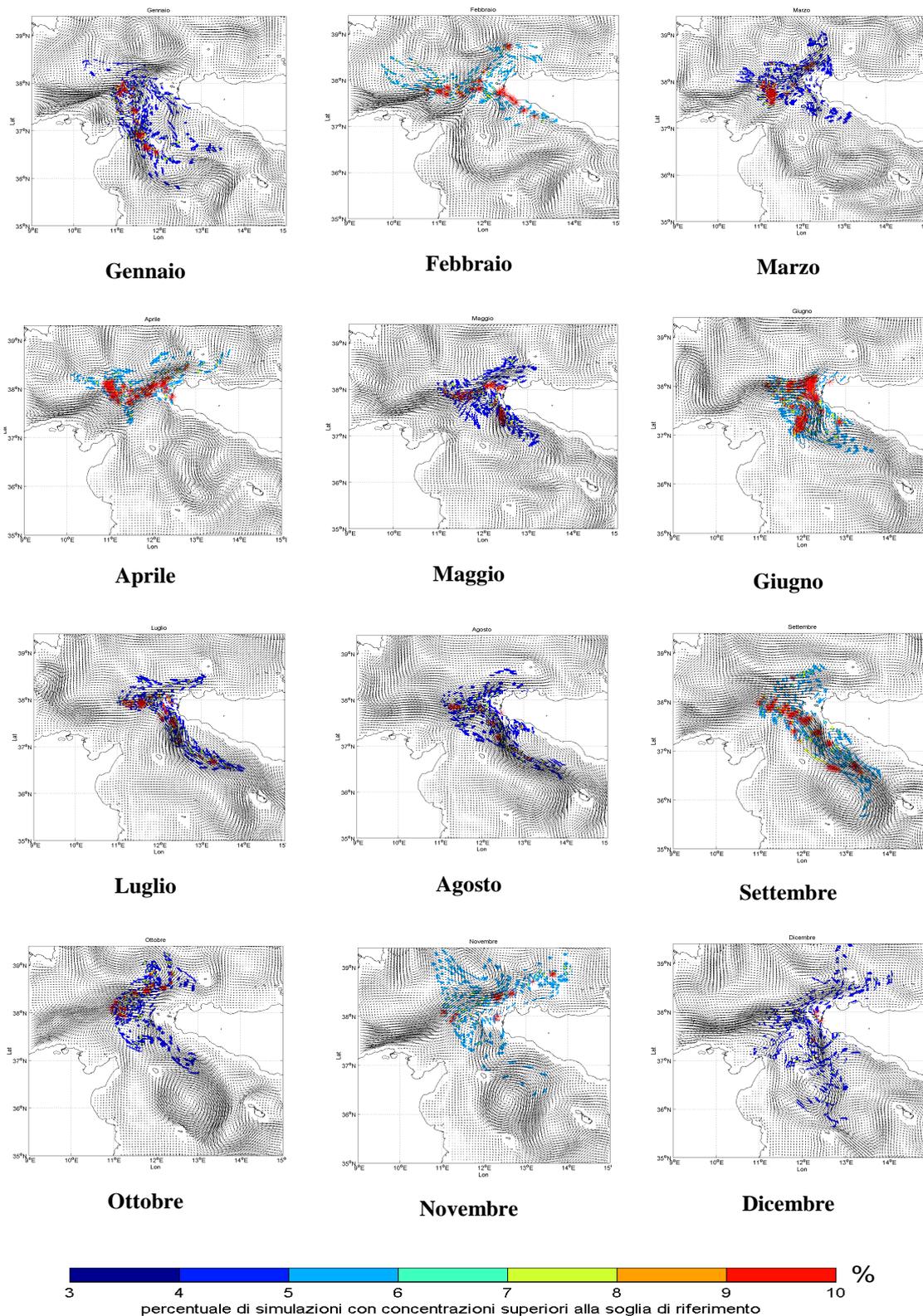


Figura 4.27 Mappe di pericolosità per il punto comune x1 per i 12 mesi del 2005. Le figure rappresentano le mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento).

Le simulazioni nel punto x1, comune a tutte le tracce, sono state eseguite considerando un rilascio di olio pari alla somma delle concentrazioni di olio relative alle singole tracce.

La figura 4.27 mostra le mappe di pericolosità del punto x1 per i dodici mesi dell'anno 2005. Dalla figura si evince subito che in tutti i mesi la pericolosità più alta è associata alle coste siciliane, ad eccezione del mese di Gennaio dove è individuata nel tratto di mare più vicino alla Tunisia a causa della presenza di intense correnti in direzione Sud_Ovest. In particolare nei mesi di Aprile, Maggio, Giugno e Ottobre la concentrazione dell'olio tende ad essere localizzata più a Nord_Ovest dell'estremità occidentale della Sicilia, mentre nei mesi di Luglio, Agosto e Settembre tale concentrazione appare spostarsi verso Sud-Est. Probabilmente tale effetto è associato alla diversa intensità della corrente algerina che, nel suo percorso verso Est, a Sud della Sardegna, si biforca in due correnti: una che entra nel Mar Tirreno (responsabile della maggiore pericolosità a Nord_Ovest del lato occidentale della Sicilia) e l'altra che prosegue verso il bacino orientale (responsabile della maggiore pericolosità a Sud_Est).

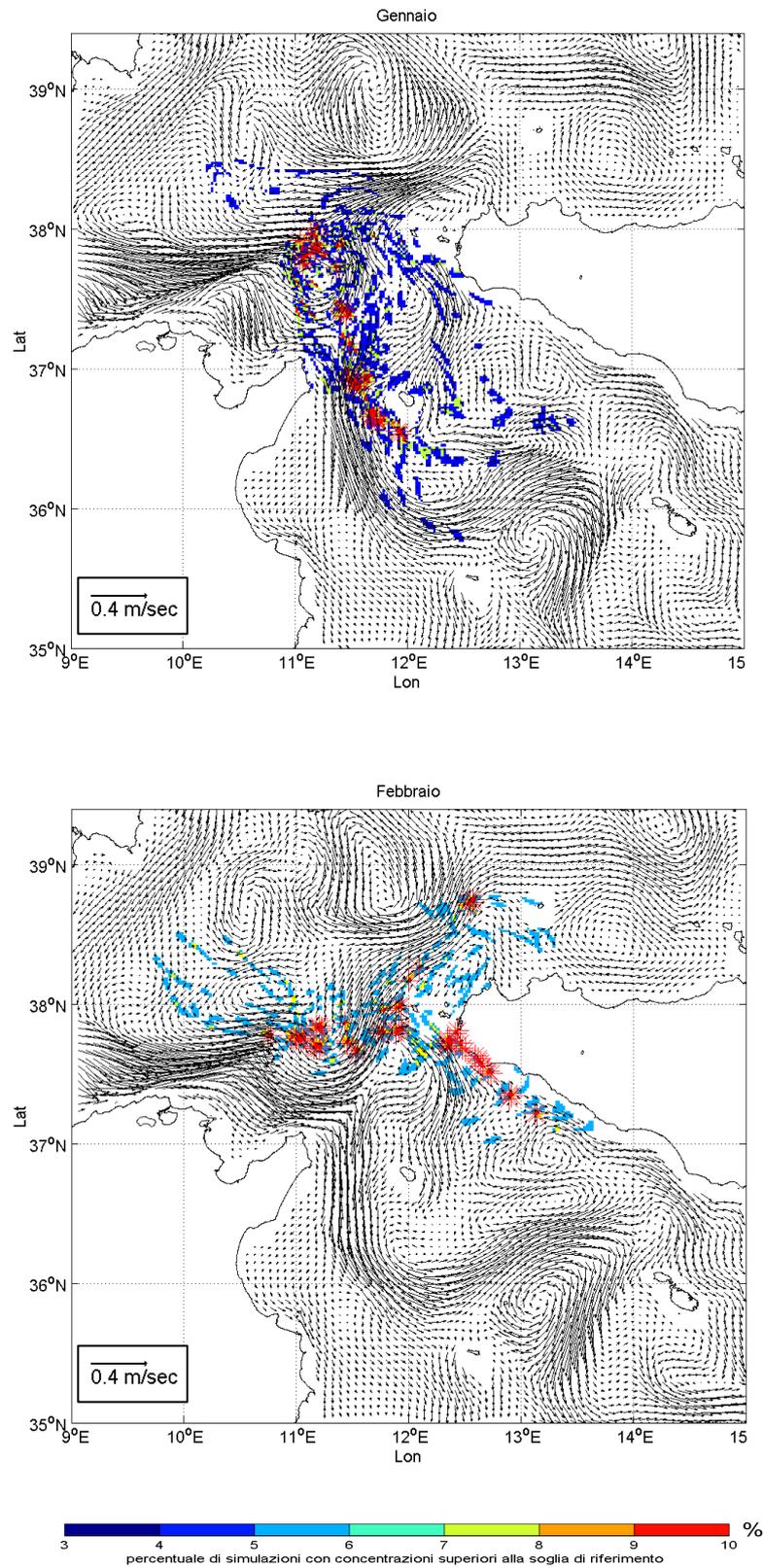


Figura 4.28. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di gennaio e febbraio del 2005

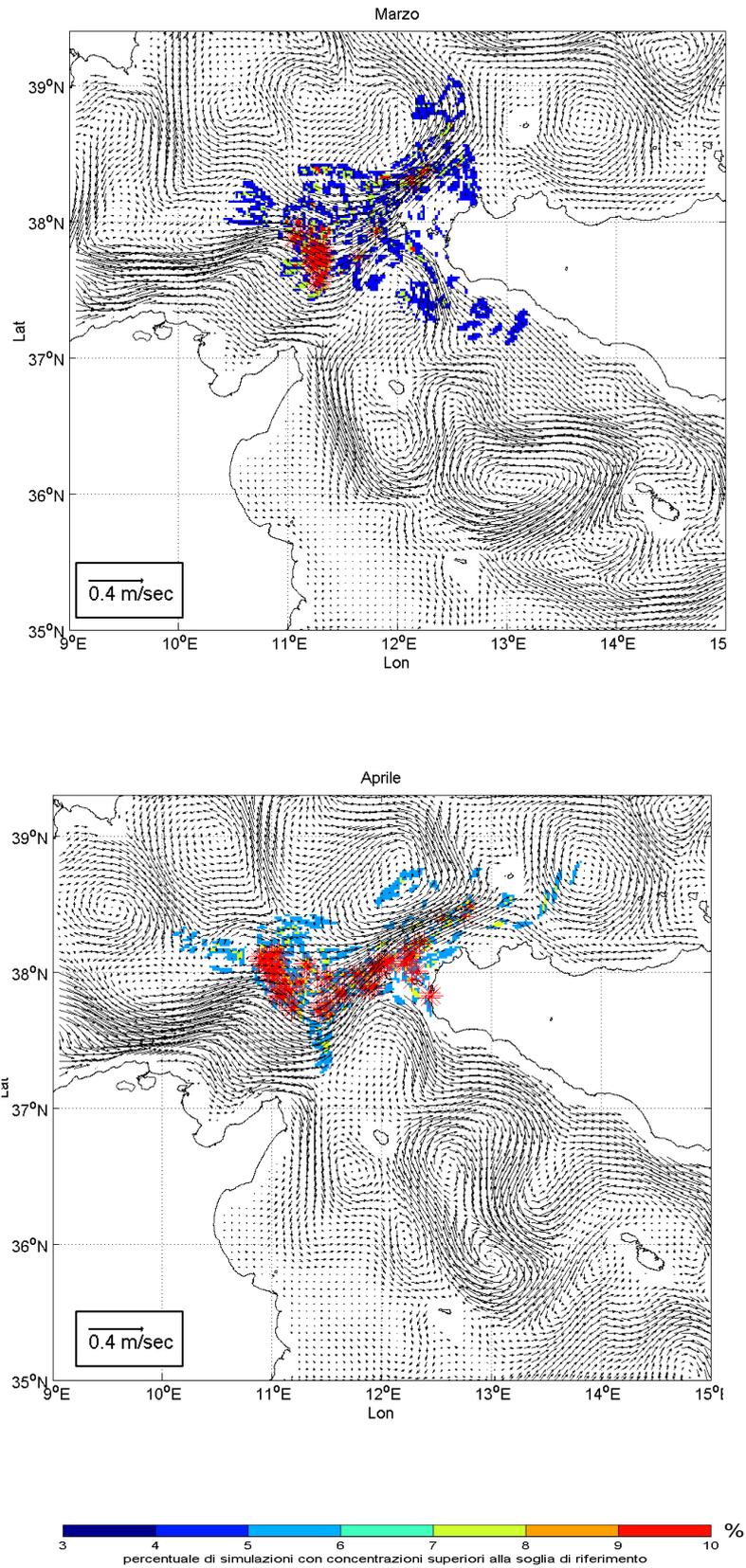


Figura 4.29. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di marzo e aprile del 2005

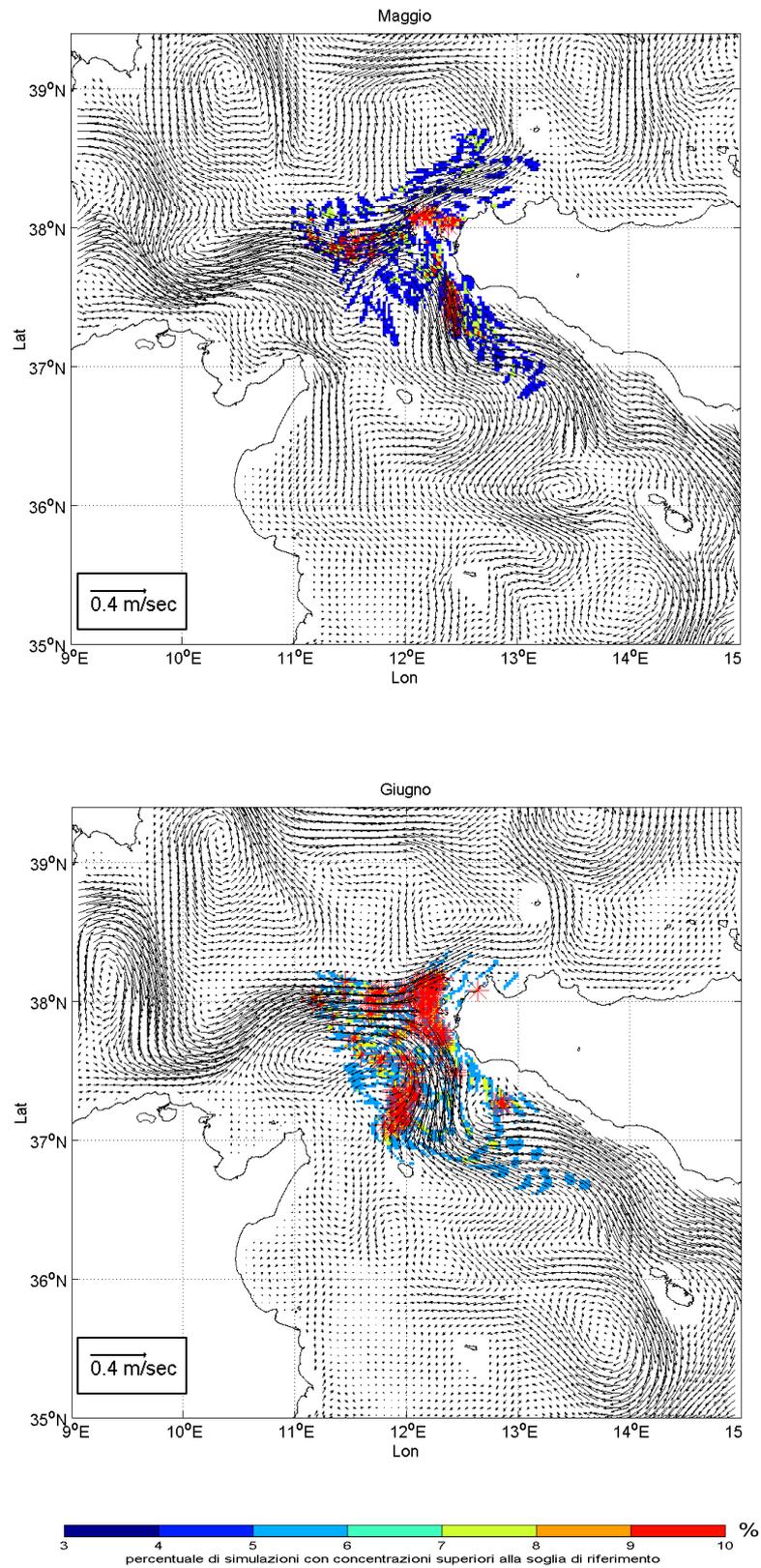


Figura 4.30. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di maggio e giugno del 2005

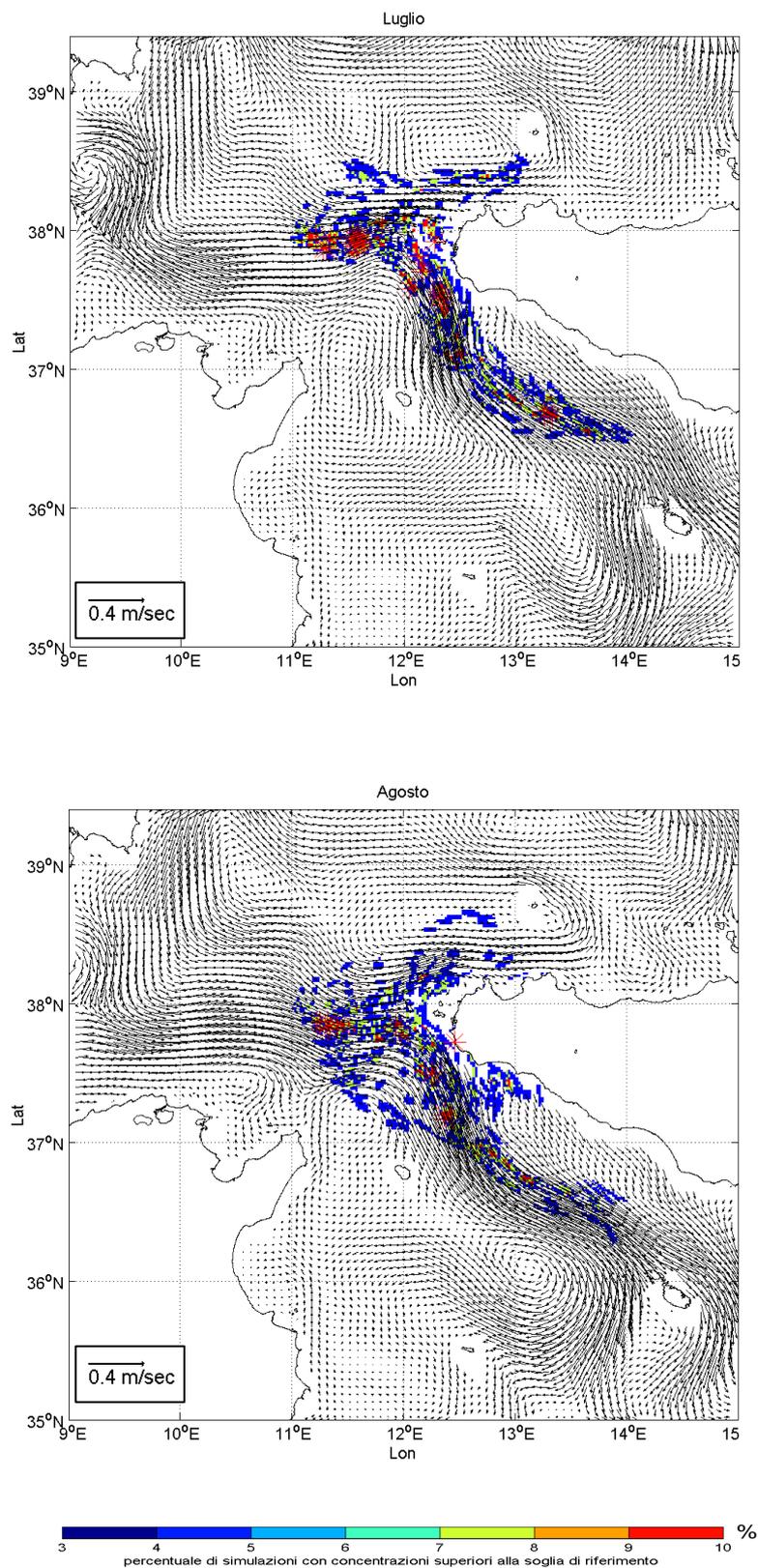


Figura 4.31. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di luglio e agosto del 2005

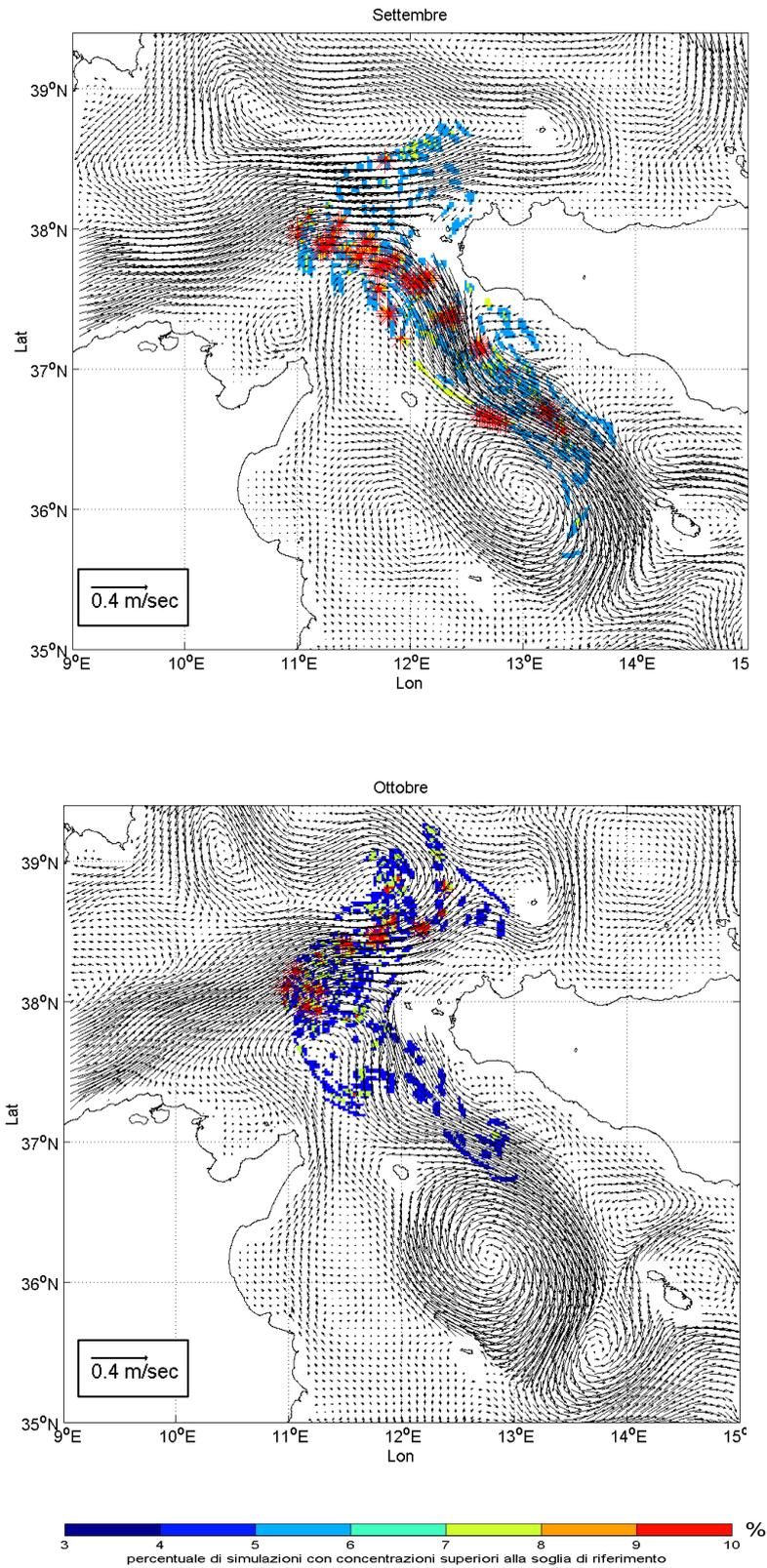


Figura 4.32. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di settembre e ottobre del 2005

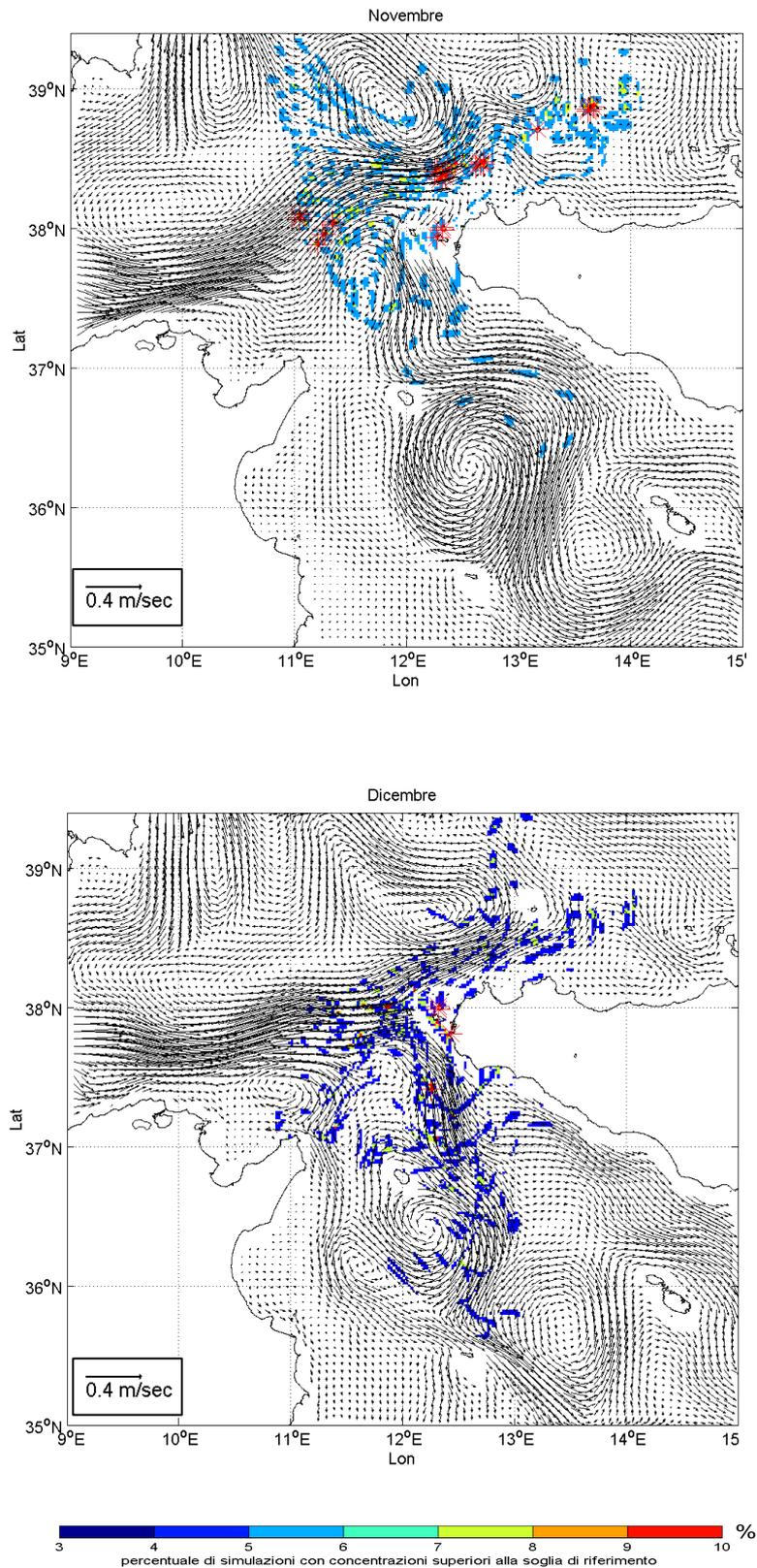


Figura 4.33. Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di novembre e dicembre del 2005.

4.6 Mappe di pericolosità nel Mar Tirreno

Questa sezione presenta le mappe di pericolosità dell'intero Mar Tirreno e Mar Ligure al fine di fornire un quadro d'insieme. La zona ad ovest della Sicilia risulta quella a più alta pericolosità probabilmente a causa dei maggiori quantitativi rilasciati (traffico più intenso). Per lo stesso motivo risulta ad alta pericolosità anche la traccia che dal punto x1 porta ai porti di Genova, Livorno e Savona, nella zona centro occidentale del Mar Tirreno. Il mese di aprile risulta quello con le concentrazioni più alte raccolte però in prossimità delle rotte mentre il mese di dicembre mostra un' ampia distribuzione della pericolosità.

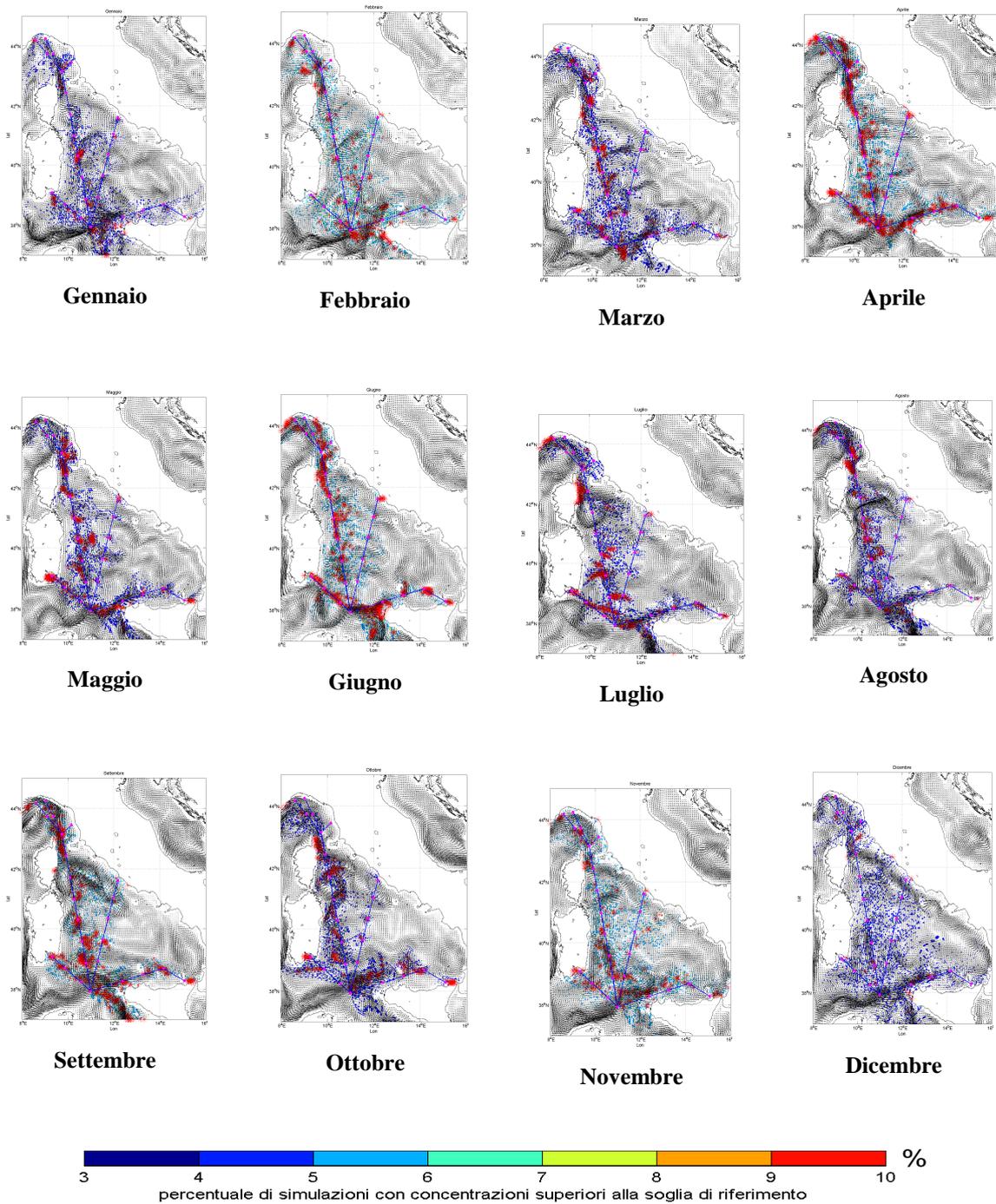


Figura 4.34 Mappe di pericolosità per l'intero Mar Tirreno per i 12 mesi del 2005. Le figure rappresentano le mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento). Le linee blu rappresentano le tracce in esame.

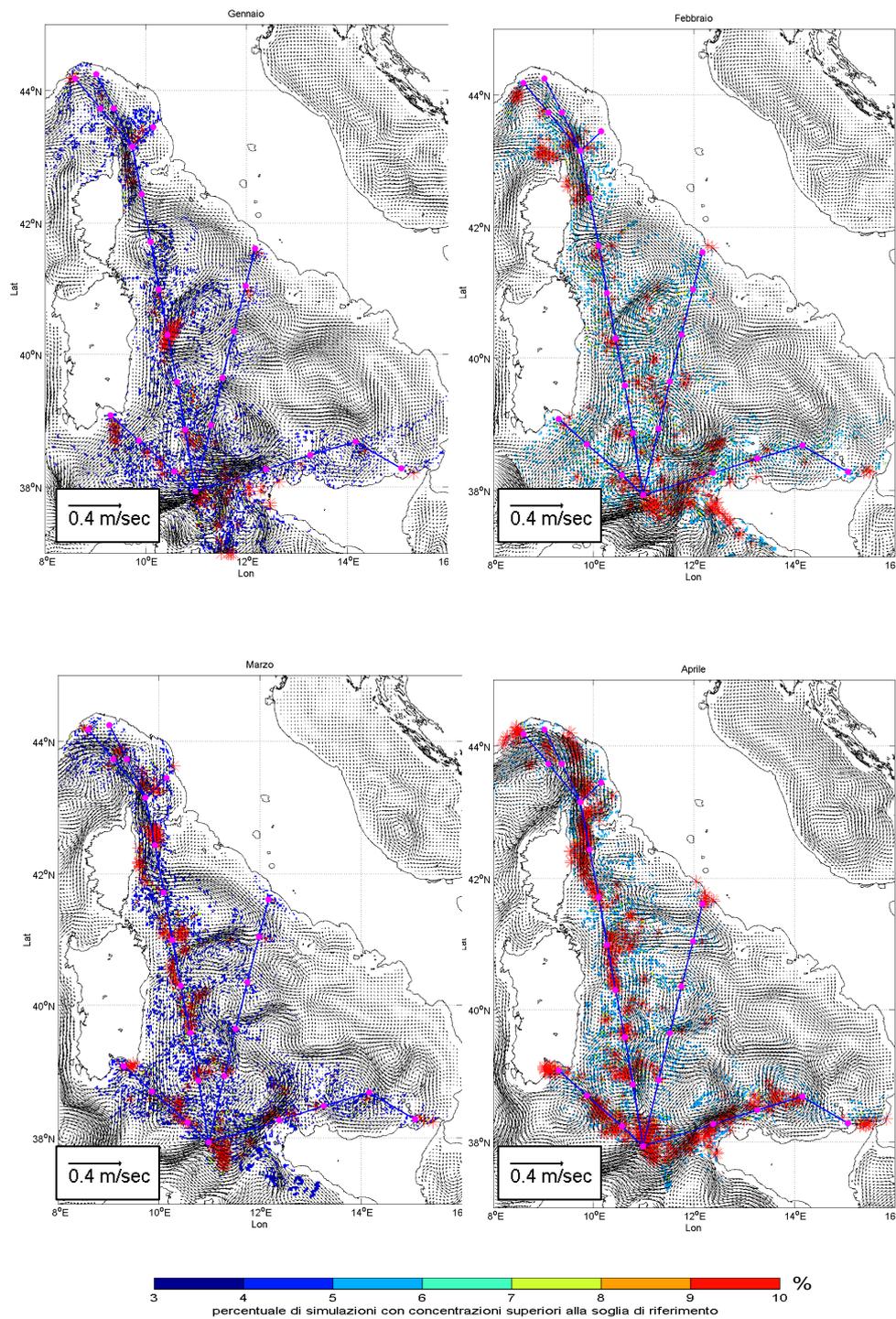


Figura 4.35 Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di gennaio, febbraio, marzo e aprile del 2005.

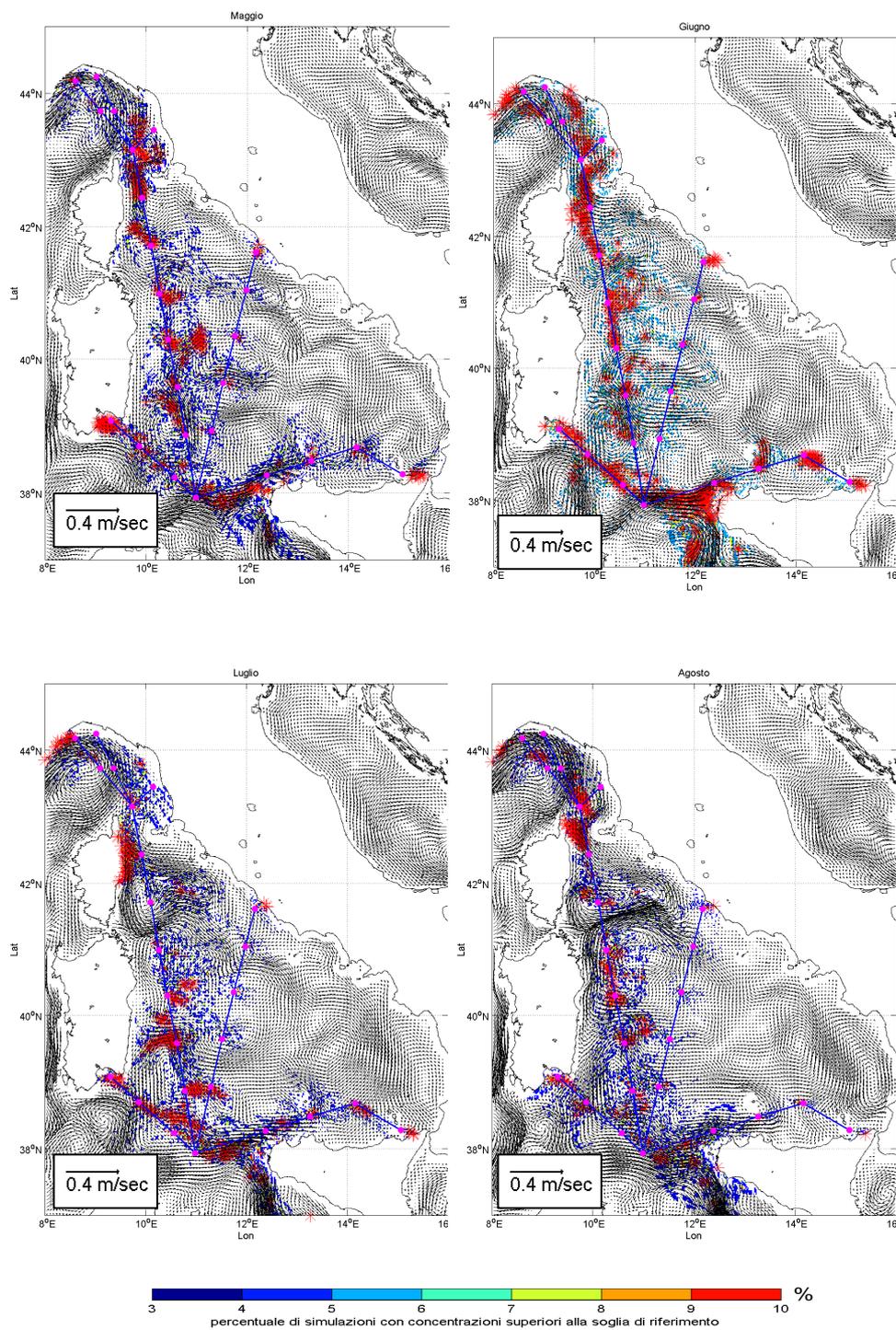


Figura 4.36 Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi di maggio, giugno, luglio e agosto del 2005.

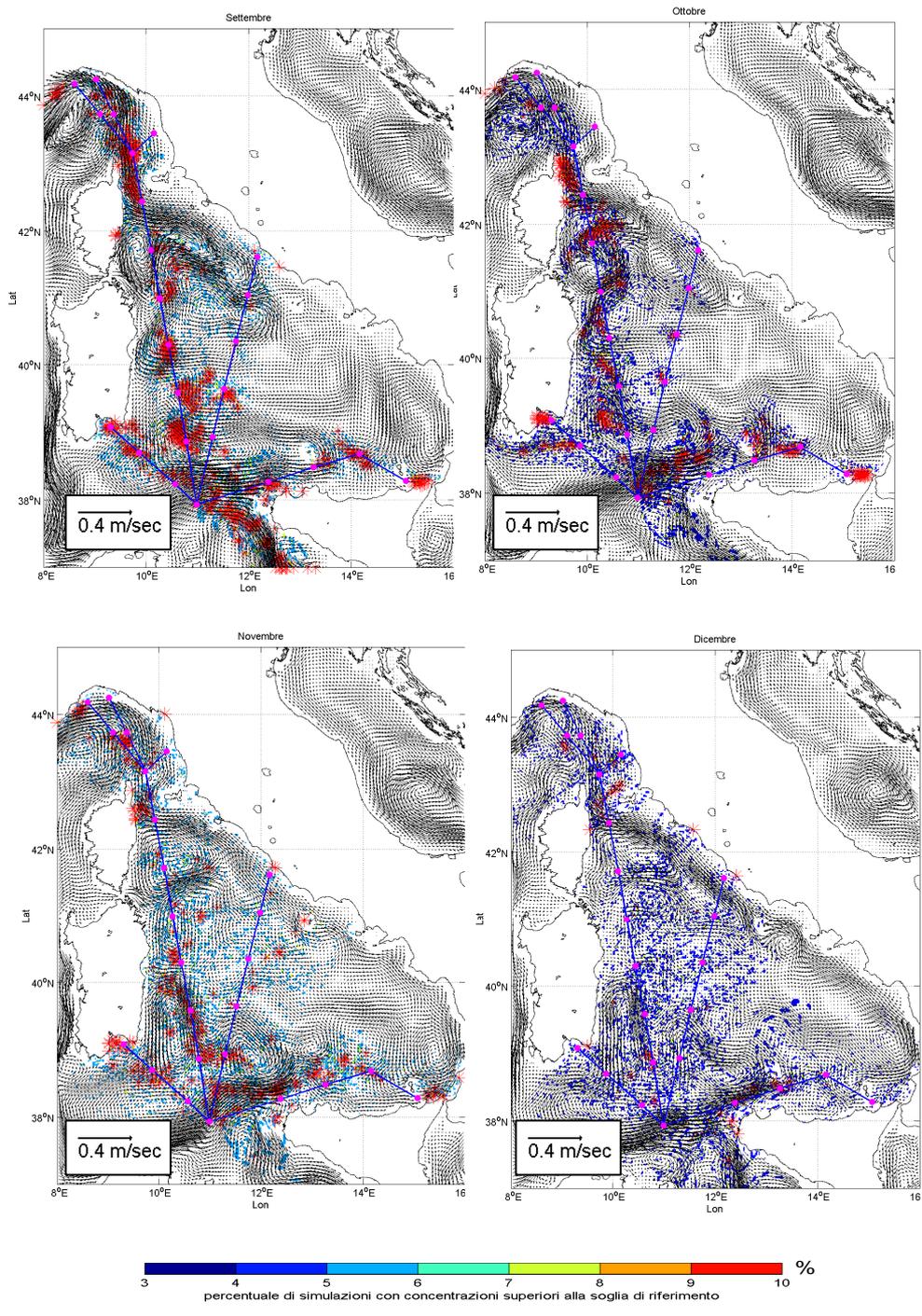


Figura 4.37 Mappe di distribuzione degli eventi con concentrazione di idrocarburi maggiore della soglia di riferimento espressa in termini di frequenza di accadimento (percentuale delle simulazioni con concentrazioni superiori alla soglia di riferimento) per i mesi settembre, ottobre, novembre e dicembre del 2005.

5 Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi mostra innanzitutto l'utilità della modellistica numerica delle correnti accoppiate a quella della dispersione e trasformazione degli idrocarburi a mare. Questa capacità, fino a pochi anni fa non ancora proponibile in quanto il sistema di oceanografia operativa europeo e Mediterraneo non era stato ancora messo a punto, offre ora la possibilità di studiare il potenziale danno o la pericolosità dei versamenti a mare sulla base di una riproduzione realistica dell'ambiente a mare. Il sistema accoppiato correnti e modelli di trasformazione e dispersione degli idrocarburi ci permettono inoltre di fare un numero grande di simulazioni e di controllare le conseguenze delle ipotesi formulate.

Attraverso l'esperimento di simulazione effettuato, emerge una relazione tra la dispersione degli inquinanti a mare, la posizione delle tracce, il quantitativo di idrocarburo versato e l'andamento delle correnti.

Si è giunti a formulare varie conclusioni:

- Il sistema di previsioni ha dimostrato di essere un valido strumento per valutare quanto la variabilità temporale e spaziale delle strutture di circolazioni influenza la dispersione degli idrocarburi in mare e contribuisce a rendere alcune zone in certi periodi dell'anno più a rischio di altre.
- Le mappe di pericolosità mostrano un'alta variabilità spaziale e temporale. Il mese di Aprile risulta caratterizzato dalla pericolosità più alta con maggiori concentrazioni di olio nel bacino Ligure, nella parte orientale della Corsica e nella zona a Nord-Ovest della Sicilia. Il mese di dicembre, invece, mostra

una maggiore dispersione della macchia d'olio attorno ai vari punti di rilascio, con minore dispersione verso le coste.

- L'olio non rimane vicino alle tracce ma si disperde e le zone ad alta concentrazione possono essere dovute alla vicinanza al punto di rilascio (come nel caso della zona di Milazzo a Nord Est della Sicilia), ma anche all'azione delle correnti (ad esempio a Sud della Sardegna l'alta pericolosità si sposta dalla costa in direzione Ovest nel mese di ottobre forse a causa di una maggiore intensità delle correnti o anche l'alta pericolosità della zona a Nord_Ovest dell'estremità occidentale della Sicilia si sposta in direzione Sud_Est probabilmente a causa di variazioni di intensità della Corrente Algerina)..
- L'alto traffico aumenta la pericolosità. Nel punto comune alle varie tracce la concentrazione di idrocarburi è maggiore e quindi la pericolosità è più alta. In questo caso il rischio sarà a detrimento delle specie marine che popolano le acque di queste zone.

Il lavoro successivo a quello di questa tesi potrebbe essere quello di valutare il rischio associato alle risorse, cioè quantificare il rischio per ogni risorsa presente nell'area di studio. E' chiaro che la nozione di rischio per gli idrocarburi a mare sarà un concetto legato ad un certo periodo temporale e si dovranno usare tecniche sofisticate per attribuire anche un valore di incertezza sul rischio calcolato.

Bibliografia

Al Rabeih, A., H., 1994. *Estimating surface oil spill transport due to wind in the Arabian Gulf*. Ocean Engng. 21, 461-465.

Amato E, ICRAM-Central institute for marine applied research, 2003. *An Environmental Resolution Programme 12 Years After: the Haven Wreck*. Les journées d'information du CEDRE.

Bigmani F., Manzella G.M.R., Salusti E., Sparnocchia S., 1996. *Circolazione delle acque*. In: Il Mare del Lazio, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Regione Lazio. Ass. Opere e reti di servizi e mobilità: 331 pp.

Bilardo, U., Mureddu, G., 2004. *Traffico Petrolifero e Sostenibilità Ambientale*. Unione Petrolifera. 350 p.

Budillon G., Pierini S., Sansone E., Spezie G., 1999. *Caratteristiche idrodinamiche lungo la fascia costiera campano-laziale*. Annali della Facoltà di Scienze Nautiche, LXIV: 7-18.

Buist, I., 1979. *An experimental study of the dispersion of oil slick into the water column*. M. A. Sc thesis, Dept Chem. Engng., Univ. of Toronto.

Cerrano C., Ponti M., Silvestri S., 2004. *Guida alla biologia marina del Mediterraneo*. Ananke srl (TO): 319 pp.

De May, P., Benkiran, M., 2002. *A multivariate reduced-order optimal interpolation method and its application Mediterranean basin-scale circulation*.

Delilah Al-Khudhairy H. A., 2002. *Marine oil pollution: technologies and methodologies for detection and early warning*". JRC, Institute for the protection and the security of the citizen I-21020.

Della Croce N., 2000. *Il Mare Tirreno*. Atti Associazione Italiana Oceanologia Limnologia, 13 (2): 363-378.

ENI, 2007. "World Oil and Gas Review 2007".(www.eni.it)

Fresi E., 1992. *V.I.A. per il caso Haven*. VIA, VI, n°24, December, 89-96

Fuda, J. L., Millot, C., Taupier-Letage, I., Send, U., Bocognano, J. M., 2000. *XBT monitoring of a meridian section across the western Mediterranean Sea*. Deep-Sea Res., 47: 2191-2218.

Gazale V., Porceddu A., 1991. *Il Mediterraneo e la sua vita*. Archivio fotografico sardo (NU): 398pp.

Henaidi, A. K., 1984. *Preliminary report on drifting buoy movements*, MEPA, Gulf Area Oil Companies Mutual Aid Organization Doc. GO-86/87 -07.

Hopkins T.S., 1988. *Recent observations on the intermediate and deep water circulation in the Southern Tyrrhenian Sea..* Oceanologica Acta, No. SP, 41-50.

Hopkins T.S., Battilotti M., De Lauro M., Monassi M., Ribera D'alcalà', Saggiomo V., Tramontano M.A., Zagaglia A., 1992. *Lazio shelf experiment (crociera Hopi, agosto, 1991): distribuzione delle masse d'acqua e cenni sulla circolazione*. Atti del 10° congresso A.I.O.L., Alassio, 4-6 novembre 1992: 375-387.

IPIECA, 1999. Serie di rapporti. Volume n.1. *Aspetti biologici dell'inquinamento da petrolio*.

Lardner, R. W., G. Zodiatis, L. Loizides & A. Demetropoulos, 1998. *An operational oil spill model in the Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea)*. International symposium on Marine Pollution, Monaco.

Legambiente, 2007. *L'inquinamento da idrocarburi nel Mar Mediterraneo*. Dossier realizzato nell'ambito di "Clean Up the Med 2007".

LMIU, *LMIU Shipping data*, Lloyd's Marine Intelligence Unit, 2001.

Mackay, D., Buist, I., Mascarenhas, R. and Paterson, S., 1979. *Oil spill processes and models*. Research Report, Arctic Marine Oil spill Program, Environmental Protection Service, Fisheries and Environment Canada.

Mackay, D. and Paterson, S. , 1980. *Calculation of the evaporation rate of volatile liquids*. Proc. 1980 National Conf. on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, Ky.

Madec, G., Imbard, M., 1996. *A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity*. Clim. Dyn., 12, 381-388.

Medugno M., 1992. *L'Italia e l'inquinamento marino da idrocarburi*. Ambiente Risorse Salute, 1, n°1, January, 26-29.

O'Brien, M., 2006. *Oil spills in ports*. ITOPF, Article in Ports & Harbors, pp.34-35.

Ovchinnikov I.M., 1966. *Circulation in the surface and intermediate layers of the Mediterranean*. Oceanology, 6: 48-59.

Pinardi, N., Allen, I., Demirov, E., De Mey, P., Lascaratos, A., Le Traon, P. Y., Maillard, C., Manzella, C., tziavos, C., 2003. *The Mediterranean ocean Forecasting System: first phase of implementation (1998-2001)*. Ann.Geophys., 21, 3-20, 2003.

Pinardi N., Arnieri E., Crise A., Ravaioli M., Zavatarelli M.-2004. *The physical and ecological structure and variability of shelf areas in the Mediterranean Sea*, "The Sea", Vol. 14, Chapter 32, in press.

Pujol M.I -2007. *Analyse de la variabilité de surface en Méditerranée à partir des données altimétriques et comparaison aux simulations MERCATOR et MOG2D*, Thèse de doctorat.

REMPEC brochure 2002. *Protecting the Mediterranean against maritime accidents and illegal discharges from ships*.

Serravall R., Cristofalo G.C., 1999. *On the presence of a coastal current of Levantine intermediate water in the central Tyrrhenian Sea*. Oceanologica Acta, 22 (3): 281-290.

Shen H. T., Yapa, P., D. and Petrosky, M., E., 1987. *A simulation model for oil slick transport in lakes*. Water Resources Res. 23, 1949-1957.

Torgrimson, G. M., 1980. *The on-scene spill model: A user's guide*. Tech. Rep., Hazardous Materials Response Branch, Natl. Oceanic & ATMOS. Admin., Seattle, Louiville, Ky.

Tranfaglia M., Migliaccio M., 2005. *A Physical Approach for the Observation of Oil Spills in SAR Images*. 496 IEEE Journal of Oceanic Engineering, VOL. 30, NO. 3.

Unione Petrolifera. *Notizie statistiche 2006*, notizie n°6, 2006.
(www.unione petrolifera.it)

Unione Petrolifera. *Relazione annuale*, 2007.
(www.unione petrolifera.it)

Volterra L., 1992. *Inquinamento da petrolio. Parte I: danni ed effetti ambientali, rimozione naturale*. Ambiente Risorse Salute, 6, n°6, June, 7-12.

WWF / Legambiente, 2001. *I traffici marittimi petroliferi: regole, strumenti, soluzioni*. Riflessioni a dieci anni dall'incidente Haven. Genova.

Zodiatis, G., R. Lardner, E. Demirov, G. Georgiou & N. Pinardi, 2003. *Cyprus coastal ocean forecasting and observing system*. Building the European Capacity in Operational Oceanography, Elsevier Oceanogr. Ser., 69: 36-45.