AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

**PROJECT FINANCING PER:**

**PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI**

SOCIETÀ DI PROGETTO: APM TERMINALS VADO LIGURE S.p.A.

MAERSK

GLF GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A.

IL RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

# PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATO N° :

TITOLO ELABORATO

## ELABORATI GENERALI

## ANALISI DEGLI EFFETTI SULL'IDRODINAMICA, IL RICAMBIO E LA QUALITA' DELLE ACQUE

MI0102-PV-G-L-R-007-00

| DATA | ELABORATO | CONTROLLATO | APPROVATO |
|---|---|---|---|
| Dicembre 2015 | G. Menel Lemos | G.Menel Lemos | G. Fiorini |

| REVISIONE N° | DATA | DESCRIZIONE |
|---|---|---|
| 00 | Dicembre 2015 | EMISSIONE PER APPROVAZIONE |
| | | |
| | | |
| | | |

NOME FILE

MI0102-PV-G-L-R-007-00.docx

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETO DI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHE PARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE

# AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

## PORTO DI VADO LIGURE

## PROJECT FINANCING PER:

## PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

## PERIZIA DI VARIANTE

## ELABORATI GENERALI
## ANALISI DEGLI EFFETTI SULL'IDRODINAMICA, IL RICAMBIO E LA QUALITA' DELLE ACQUE

# INDICE

1. PREMESSA 7
2. IL METODO ADOTTATO 9
3. IL MODELLO IDRODINAMICO A MAGLIA CURVILINEA DELLA BAIA DI VADO LIGURE 11
   3.1. La schematizzazione dell'area di interesse 14
4. LE FORZANTI DEL SISTEMA 17
   4.1. Le maree 17
   4.2. Il vento 19
   4.3. Le correnti litoranee 22
   4.4. Deflussi dei corsi d'acqua 23
5. GLI SCENARI DA ANALIZZARE 24
6. L'IDRODINAMICA DELLA BAIA DI VADO LIGURE 25
   6.1. L'idrodinamica della baia in condizione di calma di vento 26
   6.2. L'idrodinamica della baia in presenza di vento da Nord-Est 27
   6.3. L'idrodinamica della baia in presenza di vento da Sud-Est 30
   6.4. L'idrodinamica della baia in presenza di vento da Nord-Ovest 33
7. CARATTERISTICHE DISPERSIVE 36
   7.1. Dispersione in condizione di calma di vento 36
   7.2. Dispersione in condizione di vento da Nord-Est 38
   7.3. Dispersione in condizione di vento da Sud-Est 39
   7.4. Dispersione in condizione di vento da Nord-Ovest 40
8. ANALISI DELLA CAPACITÀ DI RICAMBIO 42
   8.1. La "fraction analysis" 42
   8.2. Tempo di ricambio 45
9. ANALISI DELLA DISPERSIONE DI UN TRACCIANTE DI TIPO BATTERICO 48
10. CONCLUSIONI 60
11. APPENDICE A – APPROFONDIMENTI ANALISI DELLA DISPERSIONE DI UN TRACCIANTE DI TIPO BATTERICO 61

## ELENCO FIGURE

Figura 2-1 – Planimetria generale dell'estensione a tutta la piattaforma dell'area in rilevato 9
Figura 2-2 – Planimetria con evidenziate le modifiche proposte al Progetto Esecutivo approvato (estensione a tutta la piattaforma dell'area in rilevato) 10
Figura 3-1- Schematizzazione del dominio di calcolo con una griglia a maglia curvilinea. 14
Figura 3-2- Dettaglio della maglia di calcolo nella zona del porto di Vado Ligure. 15
Figura 3-3- Batimetria applicata alla maglia di calcolo della Figura 3-1. 15
Figura 3-4- Esempio di σ-layer. 16
Figura 4-1 - Statistica dell'ampiezza di marea nel periodo 1987-2008 a Imperia. 18
Figura 4-2 - Statistica dell'ampiezza di marea nel periodo 1987-2008 a Genova. 18
Figura 4-3 - Il clima del vento a Genova. 20
Figura 4-4 - Il clima del vento a Imperia. 20
Figura 4-5 - Il clima del vento a Capo Mele (sopra) e a Vado Ligure (sotto). 20
Figura 4-6 - Il clima del vento Derivato dai dati U.K.M.O. 21
Figura 4-7 - Mar Ligure - Le principali strutture dinamiche e le correnti. 22
Figura 4-8 - Fiumi considerati nel presente studio. 23
Figura 5-1 - Schematizzazione batimetrica (m s.m.m.) per la configurazione di riferimento, Progetto Esecutivo approvato, (Sx) e per la configurazione della Perizia di Variante (Dx). 24
Figura 6-1 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in assenza di vento - condizione di massimo flusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 26
Figura 6-2 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in assenza di vento - condizione di massimo riflusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 27
Figura 6-3– Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da nord est - condizione di massimo flusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 28
Figura 6-4– Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da nord est - condizione di massimo riflusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 29
Figura 6-5 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da nord est, condizione di massimo flusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 29
Figura 6-6 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da nord est, condizione di massimo riflusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 30
Figura 6-7– Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da sud est - condizione di massimo flusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx) . 31
Figura 6-8– Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da sud est - condizione di massimo riflusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 31
Figura 6-9 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da sud est - condizione di massimo flusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 32
Figura 6-10 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da sud est - condizione di massimo riflusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 32
Figura 6-11– Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da nord ovest - condizione di massimo flusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 34
Figura 6-12– Distribuzione delle velocità (m/s) nello strato superficiale in presenza di vento da nord ovest - condizione di massimo riflusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 34
Figura 6-13 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da nord ovest - condizione di massimo flusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 35
Figura 6-14 - Distribuzione delle velocità medie (m/s) sulla profondità in presenza di vento da nord ovest - condizione di massimo riflusso - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 35
Figura 7-1 - Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in condizione di assenza di vento - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 37
Figura 7-2 - Effetto della presenza del pennello alla foce del T. Segno: Mappa delle differenze di concentrazione e Andamento della concentrazione del tracciante rilasciato dal torrente Segno in condizione di assenza di vento. 38
Figura 7-3 - Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in condizione di vento da nord est - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 39
Figura 7-4 - Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in condizione di vento da sud est - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 40

Figura 7-5 - Andamento della concentrazione dei traccianti rilasciati dai torrenti in condizione di vento da nord ovest - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 41
Figura 8-1 – Distribuzione iniziale del tracciante utilizzato per la *fraction analysis*. e posizione dei punti di controllo. 43
Figura 8-2 – Risultati della "fraction analysis" per i punti n° 1, 2, 3 e 4 - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 44
Figura 8-3 – Risultati della "fraction analysis" per i punti n° 5, 6, 7 e 8 - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 44
Figura 8-4 - Distribuzione iniziale del tracciante utilizzato per il tempo di ricambio. 46
Figura 8-5 - distribuzione del tempo di ricambio in ore - scenario di riferimento (Sx) - scenario di perizia di variante (Dx). 47
Figura 9-1 - ubicazione delle stazioni ARPAL per la misura dei parametri di qualità delle acque di balneazione 49
Figura 9-2 – Posizione dei rilasci dei carichi batterici in corrispondenza dei corsi d'acqua e rii sfocianti nella rada di vado. 52
Figura 9-3 - evento del 2 settembre 2013 – concentrazione dell'escherichia coli (UFC/100ml) nello strato superficiale 54
Figura 9-4 - evento del 6 Giugno 2013 – concentrazione dell'escherichia coli (UFC/100ml) nello strato superficiale 55
Figura 9-5 – Rilascio Torrente Quiliano - concentrazione di escherichia coli ($C/C_0$ x 1000) al termine del rilascio, dopo 3 ore e dopo 6 ore – scenario di riferimento (sopra) - scenario di perizia di variante (sotto). 58
Figura 9-6 – Rilascio Rio Lusso - concentrazione di escherichia coli ($C/C_0$ x 1000) al termine del rilascio, dopo 3 ore e dopo 6 ore - scenario di riferimento (sopra) - scenario di perizia di variante (sotto). 58
Figura 9-7 – Rilascio Torrente segno - concentrazione di escherichia coli (C/C0 x 1000) al termine del rilascio, dopo 3 ore e dopo 6 ore - scenario di riferimento (sopra) - scenario di perizia di variante (sotto). 59
Figura 9-8 – Rilascio Rio Sant'Elena - concentrazione di escherichia coli (C/C0 x 1000) al termine del rilascio, dopo 3 ore e dopo 6 ore - scenario di riferimento (sopra) - scenario di perizia di variante (sotto). 59
Figura 11-1 – Istogramma di frequenza delle misure di contaminazione microbiologica tra il 2006 e il 2009 (rif. DPR 470/82) per il litorale di vado ligure. 61
Figura 11-2 - istogramma di frequenza delle misure di contaminazione micro-biologica tra il 2010 e il 2014 (rif. D.Lgs 116/08) per il litorale di vado ligure 62
Figura 11-3 – Distribuzione spaziale dell'andamento dell'escherichia Coli in tre episodi significativi. 64
Figura 11-4 – Distribuzione spaziale dell'andamento dei Coliformi Fecali in tre episodi significativi. 65
Figura 11-5 – Distribuzione spaziale dell'andamento dei Coliformi Totali in tre episodi significativi. 66
Figura 11-6 – Analisi di Correlazione tra la precipitazione cumulata e le concentrazioni di Coliformi totali 68
Figura 11-7 - analisi di correlazione tra la precipitazione cumulata e le concentrazioni di coliformi fecali. 68
Figura 11-8 - analisi di correlazione tra la precipitazione cumulata e le concentrazioni di escherichia coli. 69
Figura 11-9 - evento del 2 settembre 2013 – concentrazione dell'escherichia coli (UFC/100ml) nello strato superficiale 70
Figura 11-10 - evento del 6 Aprile 2013 – concentrazione dei Coliformi totali (UFC/100ml) nello strato superficiale 71
Figura 11-11 - evento del 6 Giugno 2013 – concentrazione dell'escherichia coli (UFC/100ml) nello strato superficiale 71
Figura 11-12 - evento del 2 settembre 2013 – concentrazione Coliformi fecali (UFC/100ml) nello strato superficiale 72
Figura 11-13 evento del 23 Aprile 2013 – concentrazione dell'escherichia coli (UFC/100ml) nello strato superficiale 72

ELENCO TABELLE

## 1. PREMESSA

La piastra multifunzionale è una delle opere previste nel Piano Regolatore Portuale, approvato dalla Regione Liguria con Deliberazione del Consiglio Regionale n° 22 del 10 Agosto 2005.

Il Piano Regolatore Portuale era stato sottoposto a procedura di valutazione di impatto ambientale nazionale, ed aveva ricevuto parere positivo, con prescrizioni, come da Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio n° 371 del 18 Aprile 2005.

Tra le varie prescrizioni riportate, il Ministero ha fatto proprie le indicazioni fornite dalla Regione nella Deliberazione della Giunta Regionale n° 472 del 29 Aprile 2003, ed in particolare la necessità di sottoporre il progetto a procedura di valutazione di impatto ambientale regionale e la stesura di un Accordo di Programma tra gli Enti e le Amministrazioni territorialmente interessate.

A seguito della conclusione della apposita procedura di Project Financing, la Autorità Portuale di Savona, con Deliberazione del Comitato Portuale n° 12 del 16 Febbraio 2007, ha individuato nella Associazione Temporanea di Imprese (ATI) costituita dalla Maersk (capogruppo mandataria), dalla Grandi Lavori Fincosit (mandante e affidataria dell'esecuzione) e dalla Technital S.p.A. (mandante e affidataria della progettazione), il promotore del progetto di realizzazione della piastra e di gestione della parte relativa al terminal contenitori.

La convenzione tra ATI e Autorità Portuale è stata firmata in data 21 Febbraio 2008 (Convenzione n° 272), unitamente ad un verbale accompagnatorio, che costituisce l'Allegato alla convenzione.

Nel suddetto verbale si fa esplicito riferimento alla necessità di procedere alla progettazione della piastra in assoluta armonia con quanto riportato nel testo dell'Accordo di Programma e di cui sopra, approvato dalla Regione Liguria, dalla Provincia di Savona, dal Comune di Vado Ligure e dalla Autorità Portuale.

Tale Accordo, in linea con le finalità di sviluppo del sistema produttivo regionale, è finalizzato alla realizzazione della nuova piastra e di una complessa serie di interventi ad esso collegati, di carattere urbanistico e di riqualificazione della fascia costiera.

Inoltre, sempre in data 21 febbraio 2008 è stato stipulato, nel corso della Conferenza di Servizi tra Regione Liguria, Autorità Portuale di Savona, la Provincia di Savona e il Comune di Vado Ligure, l'Accordo di Programma con gli interventi migliorativi del Piano Regolatore Portuale. Nel verbale della citata Conferenza di Servizi si riporta che Regione, Provincia e Comune hanno sollecitato l'Autorità Portuale affinché il Promotore definisse entro il 31 maggio 2008 gli elementi atti a minimizzare gli impatti relativi all'inquinamento atmosferico, all'inquinamento dal rumore, alla circolazione delle acque ed agli impatti paesistici.

Sulla base delle richieste e degli indicazioni avanzate da vari enti tra cui l'Autorità Portuale, il comune di Vado Ligure, gli enti provinciali e regionali, è stato stabilito con il Decreto Ministeriale n.371 del 2005 citato in precedenza che il progetto della nuova piastra fosse sottoposto a Valutazione di Impatto Ambientale in sede Regionale. Lo "Scoping" è iniziato in data 29 Aprile 2008.

L'intervento proposto, come detto, si inserisce tra quelli previsti nel Piano Regolatore del Porto di Savona – Vado e, sulla base delle specifiche richieste avanzate dalla Commissione Regionale, si è ritenuto che dovessero essere analizzati, tra gli impatti determinati dallo stesso, anche quelli del comparto idrodinamico, con particolare riguardo agli effetti indotti sul moto ondoso, sulla stabilità dei litorali e sull'idrodinamica delle masse d'acqua.

Nell'ambito dello Studio di Impatto Ambientale presentato alla Regione Liguria nell'Aprile del 2009, è stato quindi predisposto un rapporto idrodinamico specialistico per la valutazione (1) della circolazione all'interno del porto di Vado Ligure e lungo la fascia litoranea adiacente attraverso la comprensione dell'andamento dei flussi e delle correnti che si instaurano in condizioni medie e ricorrenti e (2) della valutazione della capacità di ricambio del sistema.

Le analisi idrodinamiche sono state successivamente integrate da un ulteriore "Addendum" allo studio idrodinamico. In questo studio aggiuntivo è stata effettuata la valutazione degli effetti sulla circolazione idrodinamica in caso di eventi meteo marini estremi, potenzialmente in grado di generare delle correnti superficiali a ridosso delle strutture portuali di entità non trascurabile e che costituiscono, quindi, un riferimento utile in ambito progettuale.

La compatibilità ambientale del Progetto Definitivo della nuova Piastra multifunzionale di Vado Ligure è stata infine approvata dalla Commissione VIA della Regione Liguria con il DGR n° 1118 del 6 Agosto 2009.

In data 12 Novembre 2014 è stata avviata la procedura di Valutazione di Impatto Ambientale regionale che si è conclusa con la Deliberazione della Giunta Regionale n°254 del 27 Marzo 2015, che contiene il parere positivo di compatibilità ambientale del Progetto Esecutivo, reso con prescrizioni. Ottemperate le prescrizioni, in data 21/04/2015 il Presidente dell'Autorità Portuale di Savona ha approvato il progetto esecutivo – fase 2 con Decreto presidenziale n°22. In un secondo tempo, con Ordine di Servizio n°8 del 22/04/2015 l'Autorità portuale ha dato disposizione ad APM Terminals di dare luogo ai lavori di completamento relativi alla fase 1 ed alla fase del progetto esecutivo, così come approvati.

Durante il procedimento di approvazione del progetto esecutivo, l'Autorità Portuale ha chiesto a APM Terminals con nota 10287/TEC del 05/12/2014, di considerare "una possibile variante tecnica al progetto esecutivo della piattaforma nel cui ambito, a parità di costo complessivo, ricomprendere detto primo intervento dimostrato indifferibile dallo studio CETENA", ovvero il ricollocamento degli ultimi cassoni dell'attuale diga sull'asse di quella nuova.

Successivamente con Ordine di Servizio n°9 del 10/06/2015 l'Autorità portuale ha dato ordine ad APM Terminals di dare avvio alla progettazione della seconda variante al progetto esecutivo dell'intervento relativo alla piattaforma multipurpose che comprenda la realizzazione dell'opera tutta a terrapieno e l'adeguamento del progetto alle prescrizioni contenute nella DGR 254/2015 di procedura di VIA, formalmente accettate con nota in data 15.04.2015 e di cui si garantiva adempimento in una variante in corso d'opera all'intervento approvato

Nel presente rapporto vengono illustrati gli studi sviluppati ed i risultati ottenuti in merito alla circolazione idrodinamica, la capacità di ricambio del sistema e la qualità delle acque costiere con particolare attenzione ai parametri biologici legati alla balneabilità per la configurazione di Perizia di Variante.

## 2. IL METODO ADOTTATO

Le analisi idrodinamiche eseguite nel presente rapporto hanno l'obiettivo di valutare l'impatto sulla circolazione idrodinamica, sulla capacità di ricambio del porto di Vado Ligure della nuova piattaforma portuale in relazione alla configurazione di Perizia di Variante.

Nell'ambito del presente studio, inoltre, sono presentate le analisi aggiuntive eseguite per la valutazione della qualità delle acque lungo il litorale di Vado con particolare riferimento agli aspetti legati alla balneabilità.

In questo studio, pertanto, le valutazioni degli effetti in termini idrodinamici e di qualità delle acque indotti dalla configurazione di Perizia di Variante della piastra multifunzionale assumono come termine di confronto la configurazione del Progetto Esecutivo della piastra multifunzionale, già approvata dalla Regione Liguria. Nel seguito del rapporto questa verrà anche identificata come "situazione di riferimento".

La modifica della nuova piastra multifunzionale nella configurazione di Perizia di Variante di Vado Ligure che ha un impatto potenziale sulle componenti idrodinamiche e di ricambio, oggetto delle presenti analisi, è l'inserimento di una schiera di cassoni pieni sul perimetro della piattaforma con l'estensione dell'area in rilevato verso mare a differenza della conformazione precedente che prevedeva un'area a giorno confinata sul lato di nord est da una struttura di sostegno continua (cassoni di testata). (vedi Figura 2-1 e Figura 2-2).

È opportuno anche precisare che la conformazione precedente dell'area a giorno costituita da cassoni muniti di colonne e setti a sostegno dell'impalcato, ostacolava comunque la libera circolazione dell'acqua nell'area corrispondente all'avanzamento dell'area a terra; già questa osservazione di tipo geometrico fa quindi pensare ad una scarsa rilevanza dal punto di vista idrodinamico dell'avanzamento dell'area a terra fino in testa alla piattaforma

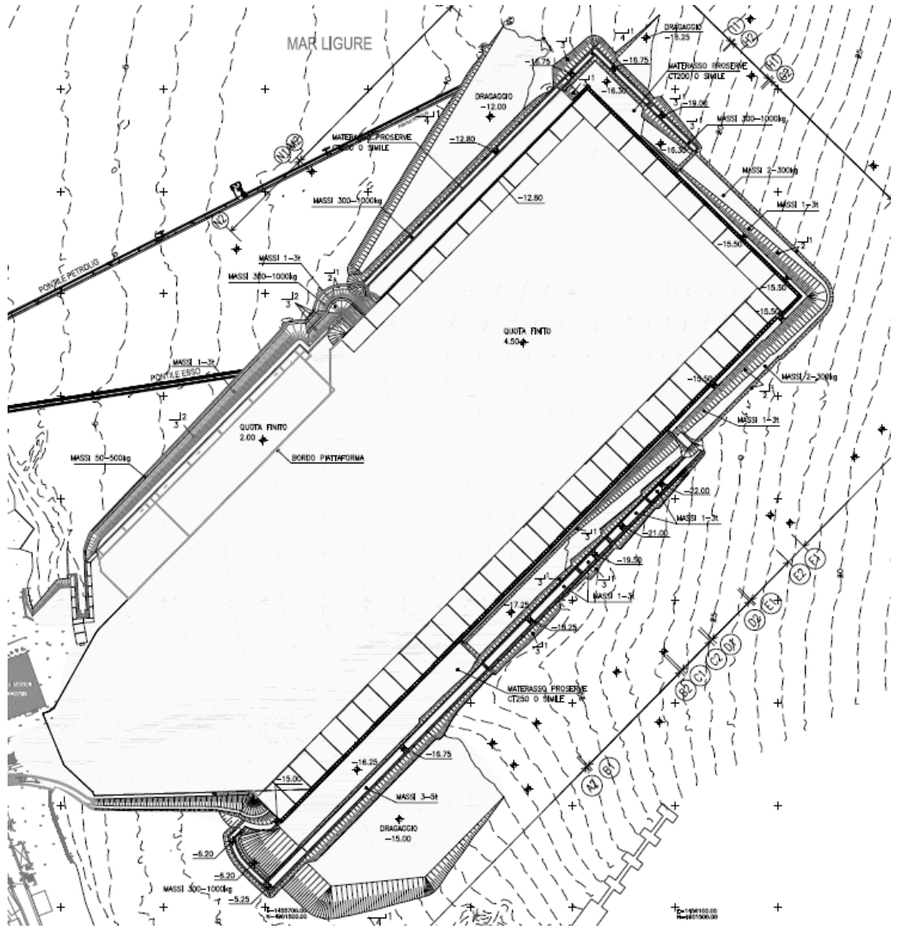



FIGURA 2-1 – PLANIMETRIA GENERALE DELL'ESTENSIONE A TUTTA LA PIATTAFORMA DELL'AREA IN RILEVATO

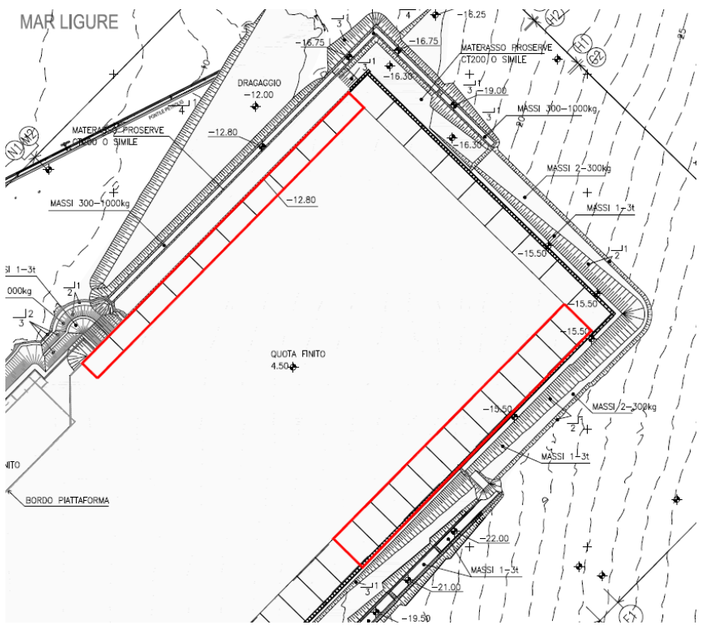



FIGURA 2-2 – PLANIMETRIA CON EVIDENZIATE LE MODIFICHE PROPOSTE AL PROGETTO ESECUTIVO APPROVATO (ESTENSIONE A TUTTA LA PIATTAFORMA DELL'AREA IN RILEVATO)

In modo schematico, il metodo di analisi adottato è consistito in:

- Predisposizione di uno strumento di analisi, in grado di rappresentare con sufficiente dettaglio la zona di studio ed i fenomeni connessi all'idrodinamica locale;
- Definizione più dettagliata possibile, sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, delle forzanti esterne che determinano il comportamento idrodinamico e dispersivo del sito;
- Caratterizzazione del comportamento idrodinamico del sistema nella configurazione di riferimento e nella configurazione con le varianti previste, al fine di valutare gli effetti indotti dalla presenza delle varianti stesse.

Le analisi svolte possono essere riassunte in due attività, una inerente gli aspetti idrodinamici-dispersivi ed un'altra inerente gli aspetti sulla qualità delle acque.

In riferimento agli aspetti sull'idrodinamica/dispersione le analisi sono consistite in:

a) Messa a punto del modello matematico idrodinamico e dispersivo per l'area del porto di Vado Ligure
b) Identificazione e quantificazione delle forzanti esterne:
c) Simulazione dello scenario di riferimento da Progetto Esecutivi approvato dalla Regione Liguria e di quello di Perizia di Variante al fine di identificare gli effetti sull'idrodinamica locale e, eventualmente, identificare e valutare possibili interventi di mitigazione.

Queste analisi parametriche sono state fatte in riferimento a delle condizioni medie ricorrenti rappresentative del clima meteo-marino del paraggio e, quindi, statisticamente rilevanti.

In riferimento agli aspetti sulla qualità delle acque le analisi sono consistite in:

a) Raccolta ed analisi dei dati disponibili per l'identificazione delle potenziali sorgenti di contaminazione batterica
b) Predisposizione e taratura del modello per la dispersione di un contaminante di tipo batterico
c) Identificazione degli scenari di studio
d) esecuzione delle simulazioni per la configurazione di Perizia di Variante e per quella di riferimento (Progetto Esecutivo approvato).

Nei seguenti paragrafi vengono riportati e descritti in modo dettagliato le attività eseguite ed i risultati ottenuti in relazione agli scenari meteo marini al fine di valutare l'impatto delle varianti introdotte con la Perizia di Variante sulla circolazione idrodinamica e sulla capacità di ricambio del sistema.

# 3. IL MODELLO IDRODINAMICO A MAGLIA CURVILINEA DELLA BAIA DI VADO LIGURE

Per le analisi eseguite nel presente studio è stato utilizzato un modello matematico a maglia curvilinea con una risoluzione planimetrica adeguata ai fenomeni oggetto di studio (idrodinamica locale e dispersione di traccianti conservativi).

Il modello adottato, 3D-FLOW, è stato sviluppato dal laboratorio idraulico olandese WL|Delft Hydraulics (ora Deltares) ed è stato testato e continuamente aggiornato per rispondere alle diverse richieste.

Questo modello idrodinamico e dispersivo simula flussi e fenomeni di trasporto indotti dal regime mareale o da particolari situazioni meteorologiche in regime di moto vario sia con schematizzazioni bidimensionali che tridimensionali compresi gli effetti delle differenze di densità dovute a temperature non uniformi o alla distribuzione di salinità.

Le equazioni del moto, risolte con uno schema numerico incondizionatamente implicito alle differenze finite, vengono applicate lungo una griglia curvilinea che permette, per questa sua caratteristica, di seguire bene le variazioni batimetriche del fondale adottando elementi di dimensioni ridotte nelle zone di maggiore interesse, ed elementi di maggiori dimensioni nelle aree in cui non esistano apprezzabili variazioni geometriche.

Il modello include algoritmi che tengono conto dei seguenti fenomeni fisici:

- Gradienti della superficie libera (effetti barotropici)
- Effetti della rotazione terrestre (forza di Coriolis)
- Acqua con densità variabile (equazioni di stato)
- Gradienti orizzontali di densità (effetti baroclinici)
- Turbolenza indotta dai flussi (turbolenza di massa e di quantità di moto - modello di chiusura della turbolenza)
- Trasporto del sale e di altre sostanze conservative - scambio di calore
- Forzante dovuta all'oscillazione mareale al contorno libero
- Sforzo tangenziale sulla superficie liquida dovuto al vento, variabile nello spazio e nel tempo
- Sforzo tangenziale sul fondo variabile nello spazio
- Pressione atmosferica sulla superficie liquida, variabile nello spazio e nel tempo
- Processo di allagamento ed emersione dei bassifondi soggetti a marea
- Scambio di calore attraverso la superficie libera
- Processi di pioggia ed evaporazione
- Forze generate dalla marea
- Effetti di flussi secondari nelle equazioni della quantità di moto nel caso bidimensionale e scabrezza laterale lungo i muri verticali
- Influenza delle onde sulla scabrezza di fondo (2D e 3D), sforzi indotti dalle onde e flussi di massa (solo nel caso bidimensionale) attraverso strutture idrauliche.

Il modello risolve le equazioni di moto vario in due (valori medi sulla profondità) o in tre dimensioni, considerando un sistema costituito dalle equazioni orizzontali del moto, l'equazione di continuità e le equazioni di trasporto.

Per completezza vengono riportate le equazioni fondamentali mentre per ulteriori approfondimenti si rimanda alla descrizione concettuale del modello riportata nella documentazione ufficiale del modello edita a cura del laboratorio di Idraulica di Delft (Olanda).

L'equazione di continuità (mediata sulla profondità) in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale è la seguente:

$$\frac{\partial(\zeta)}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)u\right]}{\partial\xi} + \frac{\partial\left[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)v\right]}{\partial\eta}\right\} = Q$$

con Q = quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua, precipitazione e evaporazione.

Le equazioni della quantità di moto nelle direzioni ξ e η sono le seguenti:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial \eta}+\frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial u}{\partial \sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta}+$$
$$-\frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta}-fv=-\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_\xi+F_\xi+\frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\nu_v\frac{\partial u}{\partial \sigma}\right)+M_\xi$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial v}{\partial \xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial v}{\partial \eta}+\frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial v}{\partial \sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi}+$$
$$-\frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta}-fu=-\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_\eta+F_\eta+\frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\nu_v\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right)+M_\eta$$

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

ξ,η = coordinate curvilinee orizzontali [m]
ζ = livello del pelo libero sopra il piano di riferimento [m]
d = profondità [m]
σ = coordinate verticali scalate, valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero(d,ζ)
u,v = componenti orizzontali della velocità [m/s]
ω = componente nel sistema σ delle velocità nella direzione σ [m/s]
$\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari [m]
$P_\xi$ , $P_\eta$ = gradiente pressione orizzontale nelle direzioni ξ e η
$F_\xi$ , $F_\eta$ = corrispondono alle "tensioni tangenziali" di Reynolds

L'effetto della variazione di densità è considerato solo nel termine del gradiente di pressione orizzontale, $P_\xi$ e $P_\eta$ (approssimazione di Boussinesq).

La profondità è assunta essere molto minore della scala delle lunghezze orizzontali e quindi si può ritenere valida l'approssimazione che usualmente si utilizza per "acque basse" per la quale l'equazione della quantità di moto verticale si riduce alla relazione della pressione idrostatica:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma}=-g\rho H$$

In questo modo si assume che le accelerazioni verticali siano piccole se paragonate all'accelerazione di gravità e possano quindi non essere prese in considerazione.

L'equazione di trasporto è formulata in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale e in un sistema di coordinate **σ** lungo la verticale.

$$\frac{\partial (d+\zeta)c}{\partial t}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc\right]}{\partial \xi}+\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc\right]}{\partial \eta}\right\}+\frac{\partial \omega c}{\partial \sigma}=$$
$$\frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left[D_H\frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial c}{\partial \xi}\right]+\frac{\partial}{\partial \eta}\left[D_H\frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial c}{\partial \eta}\right]\right\}+$$
$$\frac{1}{d+\zeta}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left[D_v\frac{\partial c}{\partial \sigma}\right]-\lambda_d(d+\zeta)c+S$$

con $\lambda_d$ che rappresenta il processo di decadimento del primo ordine e S la quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua.

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

ξ,η = coordinate curvilinee orizzontali [m]

$\sigma$ = coordinate verticali scalate valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero(d,$\zeta$)

u,v = componenti orizzontali della velocità [m/s]

$\omega$ = componente nel sistema $\sigma$ delle velocità nella direzione $\sigma$ [m/s]

$\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari [m]

$D_H$ e $D_V$ = coefficienti di dispersione orizzontale e verticale [$m^2/s$]

Poiché nelle simulazioni prese in esame nel presente studio vengono adottati solo traccianti passivi conservativi, il termine che contiene il parametro $\lambda_d$ non viene considerato.

Il coefficiente di diffusione orizzontale viene usualmente considerato costituito da 3 parti: una parte dovuta alla "turbolenza 2D", una parte dovuta alla "turbolenza 3D" ed una parte dovuta alla diffusione molecolare.

La parte 2D è associata al rimescolamento dovuto a moti e forze orizzontali che non possono essere risolte dalla maglia orizzontale (sub-grid scale turbulence). La parte 3D si riferisce alla turbolenza tridimensionale ed è legata alla viscosità dinamica che è valutata seguendo il modello di chiusura della turbolenza.

Indicando questi 3 termini con $D_{2d}$, $D_{3d}$ e $D_{mol}$ , si può dire che:

$$D_H = D_{2d} + D_{3d} + D_{mol}$$

La somma degli ultimi 2 termini costituisce il coefficiente di diffusione verticale:

$$D_V = D_{3d} + D_{mol}$$

Nel caso di simulazioni strettamente bi-dimensionali, l'unico coefficiente di diffusione che rimane è $\mathbf{D_H}$.

Per le simulazioni, eseguite nel presente studio, sono state fatte alcune assunzioni e semplificazioni di seguito brevemente riportate:

- l'effetto della curvatura terrestre non è stata considerata e il parametro di Coriolis è stato assunto uniforme;
- considerando la scala delle analisi effettuate, per la simulazione degli sforzi tangenziali, la scabrezza laterale lungo i contorni chiusi non è stata presa in considerazione (free slip);
- il flusso attraverso contorni chiusi o attraverso il fondo è pari a zero;
- i gradienti di pressione sulla superficie libera (barotropici) non sono stati considerati.

## 3.1. La schematizzazione dell'area di interesse

La predisposizione del modello matematico idrodinamico richiede, come attività preliminare e indispensabile, la definizione della maglia di calcolo, rispetto alla quale tutte le grandezze di interesse verranno poi definite.

Nella Figura 3-1 viene riportata la griglia a maglia curvilinea definita per schematizzare la zona della baia di Vado Ligure.

Come si può notare la maglia è a risoluzione variabile, con una grande densità di maglie nella zona del porto (Figura 3-2), dove le informazioni devono essere maggiormente dettagliate, e si vanno via via diradando verso il mare aperto dove la morfologia della zona è meno variabile e, quindi, viene richiesta una minore precisione locale nella sua descrizione.

La batimetria associata a tale maglia in riferimento è riportata in Figura 3-3.

I dati batimetrici, interpolati sulla maglia di calcolo, sono stati desunti dalle carte nautiche a diverso dettaglio, integrate, nella zona del porto, dai rilievi batimetrici più recenti fatti condurre dall'Autorità Portuale di Savona.

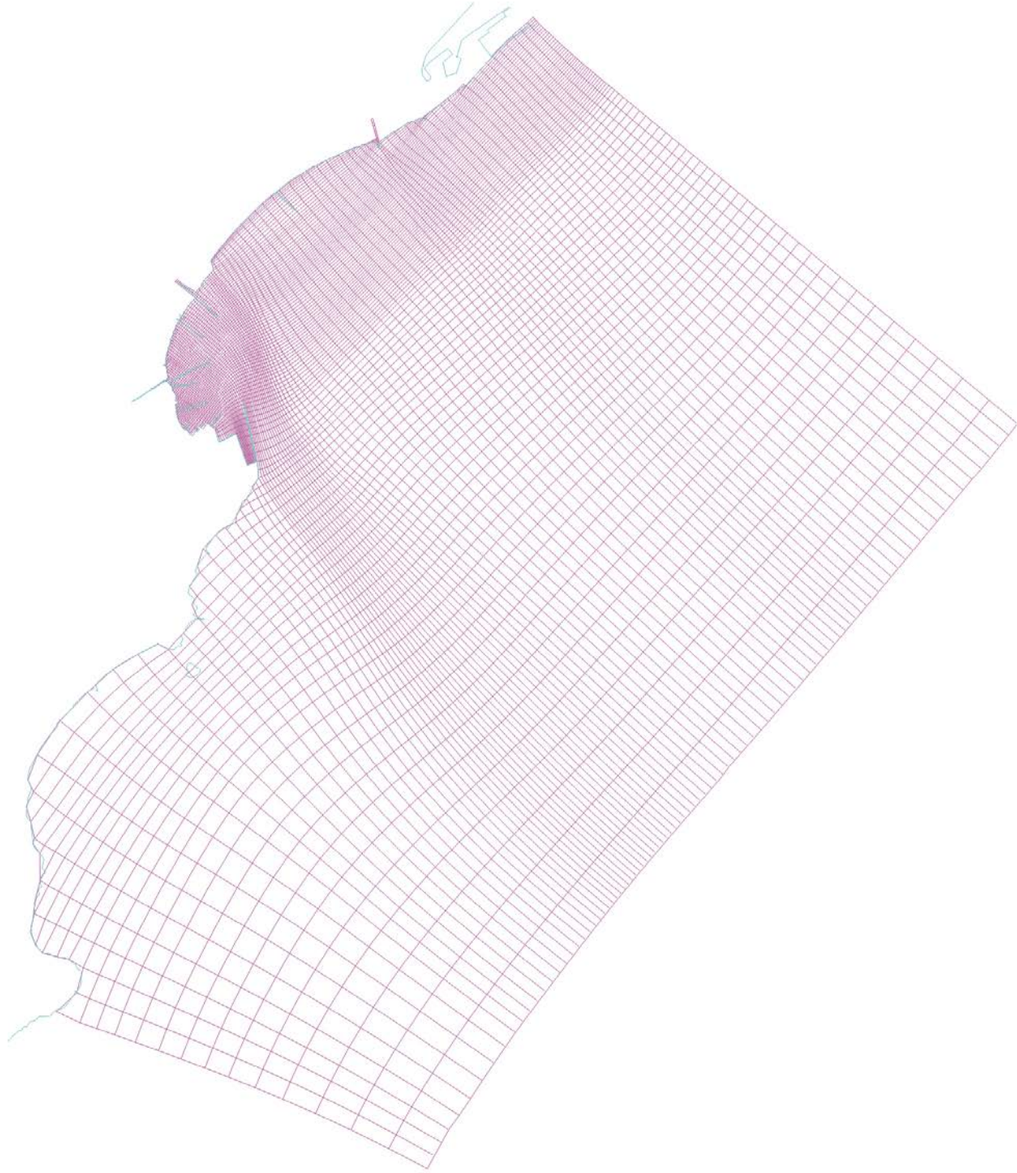


FIGURA 3-1- SCHEMATIZZAZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO CON UNA GRIGLIA A MAGLIA CURVILINEA.



FIGURA 3-2- DETTAGLIO DELLA MAGLIA DI CALCOLO NELLA ZONA DEL PORTO DI VADO LIGURE.

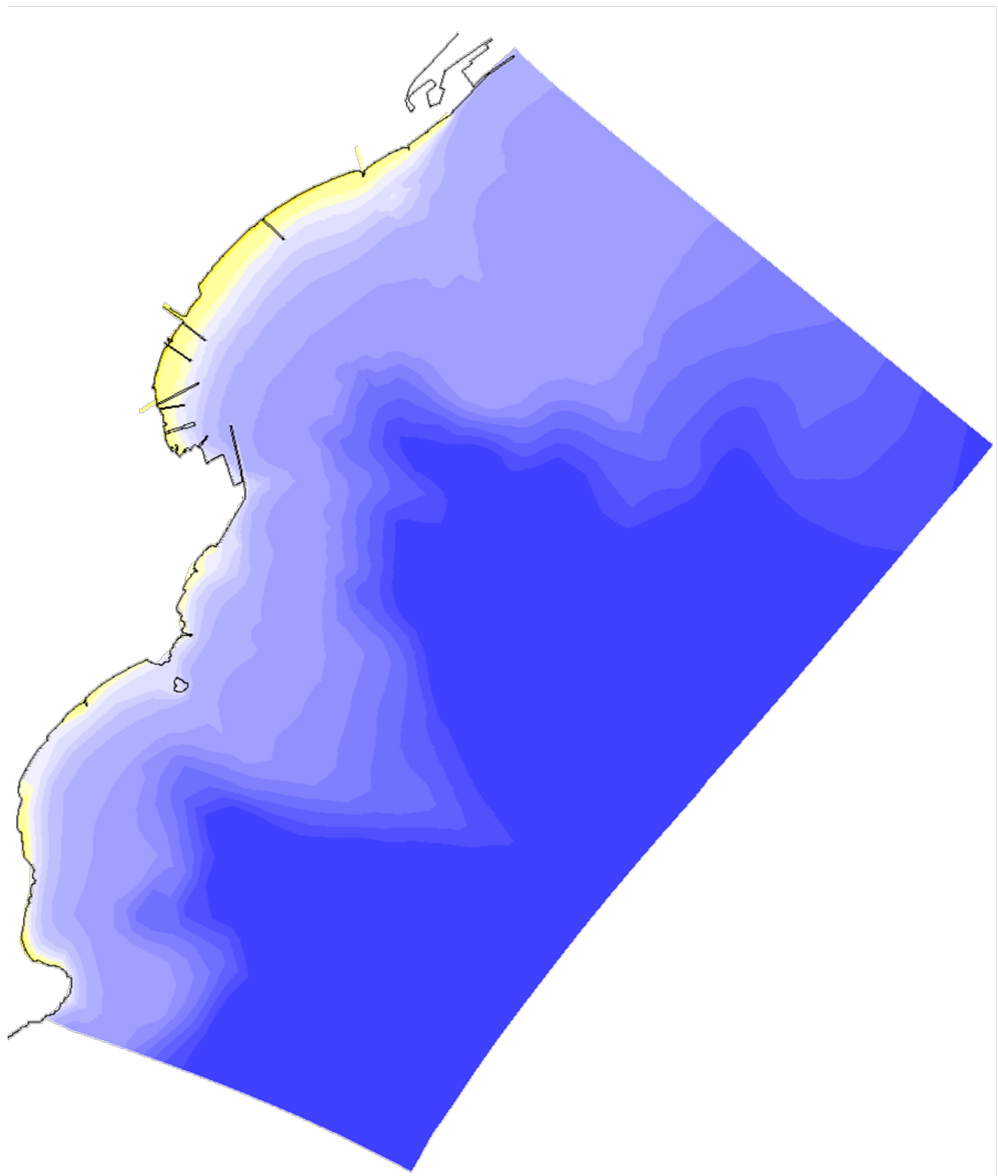


FIGURA 3-3- BATIMETRIA APPLICATA ALLA MAGLIA DI CALCOLO DELLA FIGURA 3-1.

Come è ben noto, il fondale marino degrada rapidamente a profondità elevate raggiungendo, all'interno del dominio di calcolo, i 700 m di profondità. Questa caratteristica ha determinato che, soprattutto per identificare gli effetti idrodinamici indotti dal vento, fosse necessario utilizzare il modello secondo uno schema tridimensionale.

Adottando questa schematizzazione, resa possibile dal modello idrodinamico utilizzato, si è potuto analizzare l'effetto del vento sugli strati superficiali e, di conseguenza, la distribuzione delle velocità in profondità.

Per giungere a tale risultato si è utilizzata una discretizzazione a strati continui (σ-layers) con gli spessori così suddivisi (dal meno profondo al più profondo):

a) Primo strato: 5% della profondità (strato superiore)
b) Secondo strato: 10% della profondità
c) Terzo strato: 20% della profondità
d) Quarto strato: 30% della profondità
e) Quinto strato: 35% della profondità (strato più profondo)

In questo modo si ottiene una rappresentazione sufficientemente accurata della distribuzione verticale della velocità, con maggior dettaglio negli strati superiori, dove i gradienti sono maggiori, mantenendo un adeguato dettaglio anche in quelli inferiori.

Nella Figura 3-4 è riportato un esempio della schematizzazione tridimensionale utilizzata in questo studio.

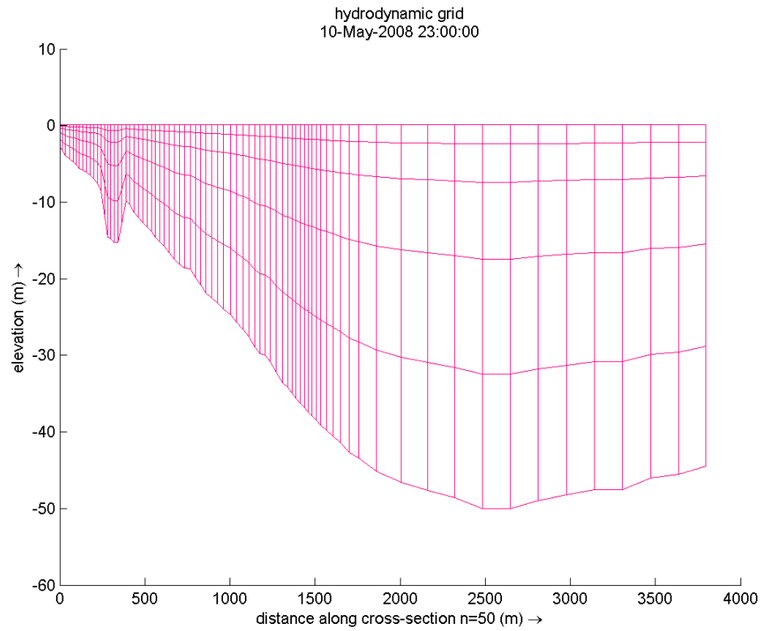



FIGURA 3-4- ESEMPIO DI σ-LAYER.

# 4. LE FORZANTI DEL SISTEMA

Una volta definita la griglia di calcolo del modello matematico, è essenziale, come descritto in precedenza, identificare e quantificare le principali forzanti esterne che condizionano la circolazione idrodinamica della Baia di Vado Ligure e, in particolare, della zona del porto.

Come ricordato nel precedente Capitolo 2, le forzanti prese in considerazione sono:

- onde di marea;
- vento;
- correnti litoranee;
- deflussi dei corsi d'acqua.

## 4.1. Le maree

Per l'analisi delle maree si è fatto riferimento ai dati registrati dai mareografi di Imperia e di Genova. Per Imperia erano disponibili le registrazioni dal 1997 al 2008, mentre per Genova il periodo di osservazione considerato è stato dal 1998 al 2008.

L'obiettivo delle analisi era quello di valutare una marea sintetica sinusoidale che risultasse rappresentativa della marea media, al fine di evidenziare le correnti che si generano nel sito di interesse.

Per identificare questa marea era quindi necessario valutarne l'ampiezza ed il periodo caratteristico.

Per quanto riguarda il periodo si è verificato che a Vado Ligure la marea è di tipo semidiurno, quindi con periodo caratteristico di circa 12 ore.

Per valutare l'ampiezza della marea media sono stati svolti, per entrambe le stazioni di misura, due diversi tipi di analisi: un'analisi sulle frequenze e sulla probabilità di superamento delle ampiezze di marea ed un'analisi sui gradienti medi delle maree registrate.

I risultati di queste analisi sono riportati rispettivamente nei grafici di Figura 4-1 per Imperia e in quelli di Figura 4-2 per Genova.

Nei grafici sono riportati gli istogrammi di frequenza (scala di lettura a sinistra) e la curva di durata (scala di lettura a destra) delle ampiezze di marea.

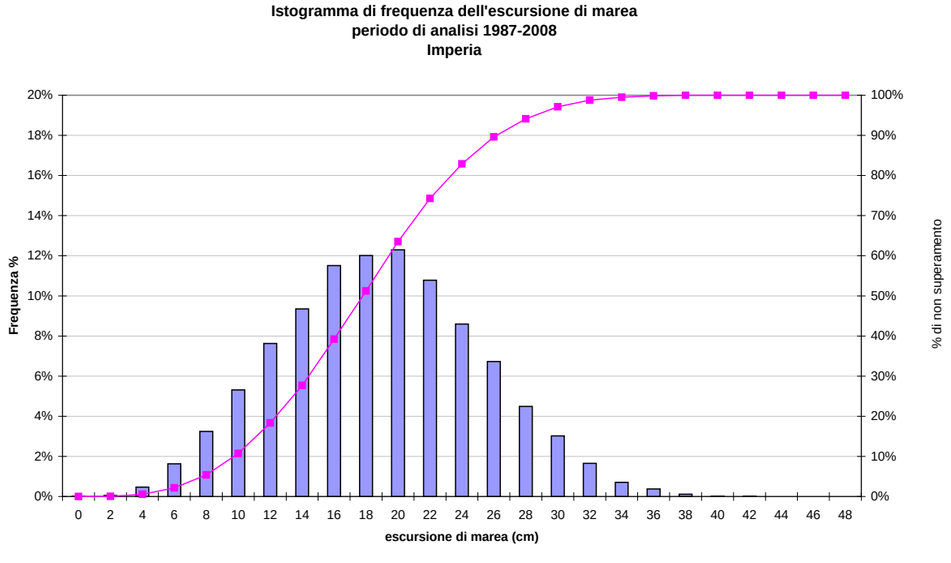
Da questi diagrammi si può verificare che le ampiezze di marea più frequenti sono comprese tra i 18 e i 22 cm, sia per Genova che per Imperia, e che circa il 50% delle onde di marea ha ampiezza inferiore a 20 cm.

Per ottenere una maggiore informazione, si è proceduto anche all'analisi dei gradienti medi; si è considerata cioè, per ogni onda di marea in fase crescente, il gradiente medio di marea:

$$i = \frac{H_{max} - H_{min}}{T}$$

dove:

i = gradiente medio di marea (cm/h)
$H_{max}$ = livello massimo della marea in quel ciclo (cm)
$H_{min}$ = livello minimo di marea precedente al colmo (cm)
T = periodo di tempo intercorso tra $H_{min}$ e $H_{max}$ (ore)



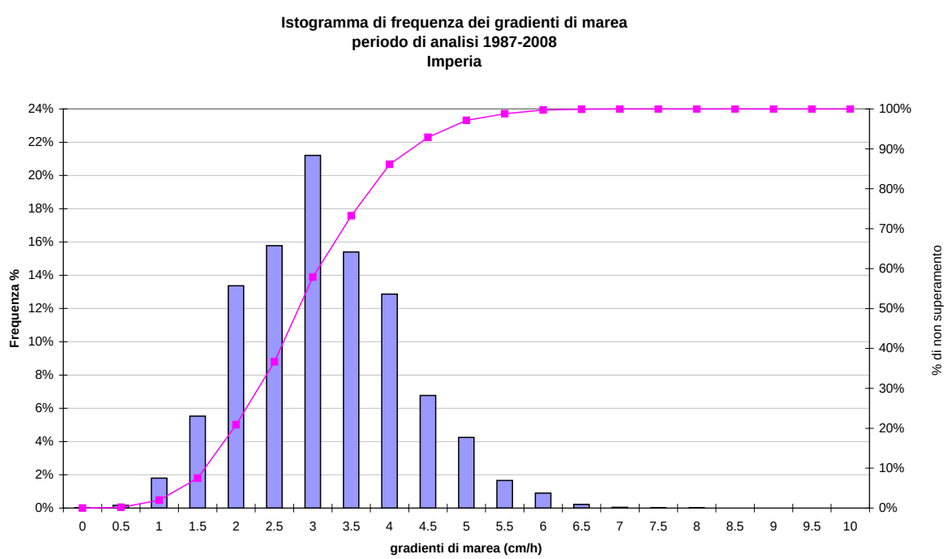
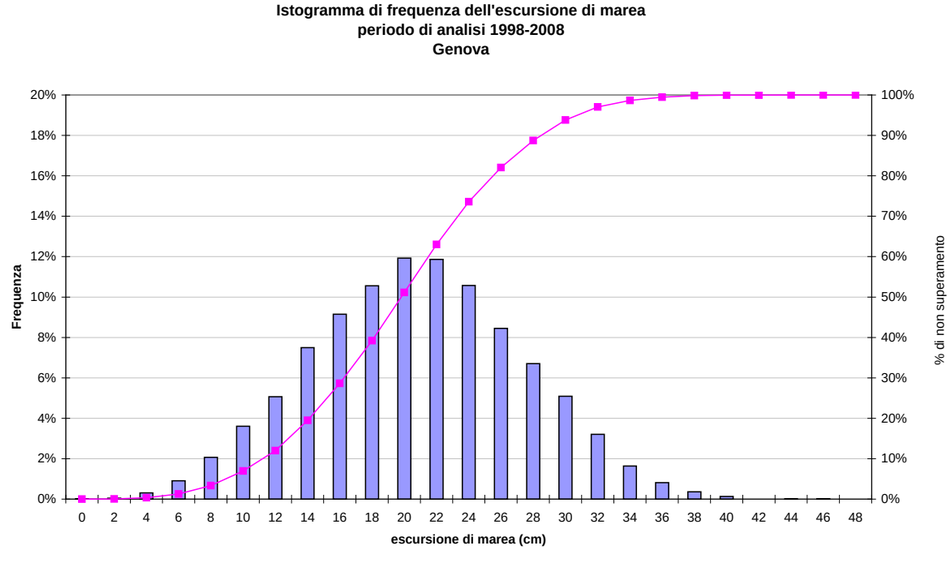




FIGURA 4-1 - STATISTICA DELL'AMPIEZZA DI MAREA NEL PERIODO 1987-2008 A IMPERIA.



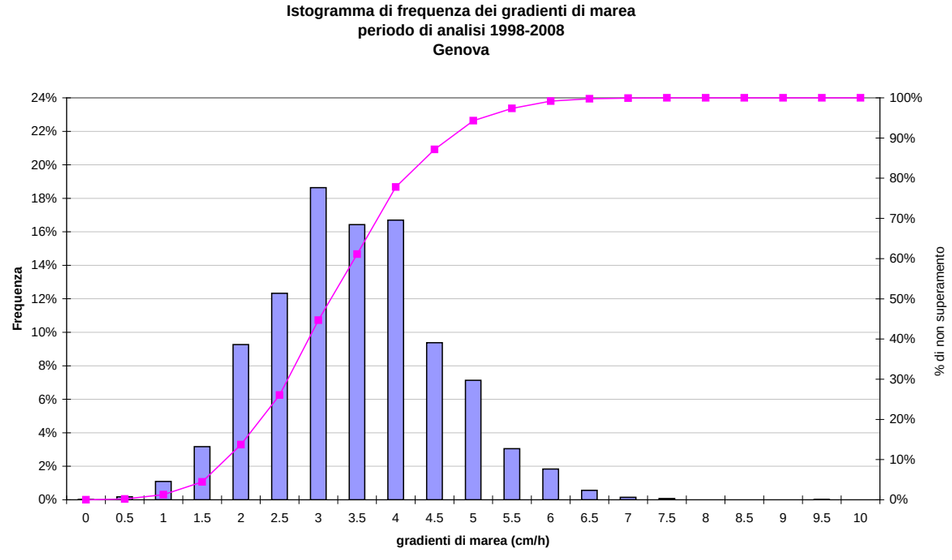




FIGURA 4-2 - STATISTICA DELL'AMPIEZZA DI MAREA NEL PERIODO 1987-2008 A GENOVA.

Questo parametro, che è indice della ripidità dell'onda di marea, una volta analizzato statisticamente consente di valutare, insieme agli altri parametri sopra riportati, la marea media.

L'analisi statistica di questo parametro è riportata sinteticamente nel secondo diagramma sempre di Figura 4-1 per Imperia e di Figura 4-2 per Genova, con analogo riferimento del metodo di lettura rispetto al diagramma precedente.

Questi risultati evidenziano come il gradiente medio di marea più frequente è quello di circa 3 cm/ora (circa 18% di frequenza per Genova e 22% per Imperia), ma con valori significativi anche più elevati (3.5 cm/ora con una frequenza di circa il 16% sia per Genova che per Imperia).

Si è quindi stabilito di utilizzare come marea rappresentativa, per le analisi modellistiche del presente studio, una marea sintetica sinusoidale con ampiezza 20 cm (+/- 10 cm rispetto al medio mare), corrispondente al gradiente medio di 3.33 cm/h ed un periodo di 12 ore.

## 4.2. Il vento

Il vento risulta essere una delle forzanti di maggiore importanza per quanto riguarda la circolazione della baia di Vado Ligure.

È importante sottolineare come il vento, oltre a generare le onde e le correnti ad esse correlate, come riportato nel dettaglio nello studio della propagazione del moto ondoso sviluppato dall'Università di Padova in merito alle analisi relative al Piano Regolatore Portuale del 2003 e successiva integrazione del 2007, induca delle correnti idrodinamiche dovute all'attrito che si sviluppa tra il vento e la superficie del mare.

Di questo fenomeno è possibile tener conto con il modello idrodinamico utilizzato, in special modo grazie alla schematizzazione tridimensionale messa a punto, come indicato nel precedente Capitolo 3, che permette di evidenziare l'effetto delle correnti di trascinamento sugli strati superficiali della colonna d'acqua.

I dati relativi al vento sono risultati complessi da raccogliere ed interpretare, considerato che era necessario riuscire a definire un clima del vento rappresentativo dell'intera area in esame e che fosse influenzato il meno possibile dall'orografia della zona.

Sono quindi state raccolte le statistiche dei venti in diversi punti di misura utilizzando sia stazioni di misura ufficiali dell'Ufficio Meteorologico, sia dati raccolti ed elaborati nel corso di precedenti analisi sviluppate sul territorio Ligure prossime alla zona di interesse.

Sono stati analizzati i dati relativi a:

a) Genova (Figura 4-3)
b) Imperia (Figura 4-4)
c) Capo Mele e Vado Ligure (Figura 4-5)
d) United Kingdom Meteorological Office - U.K.M.O. (Figura 4-6)

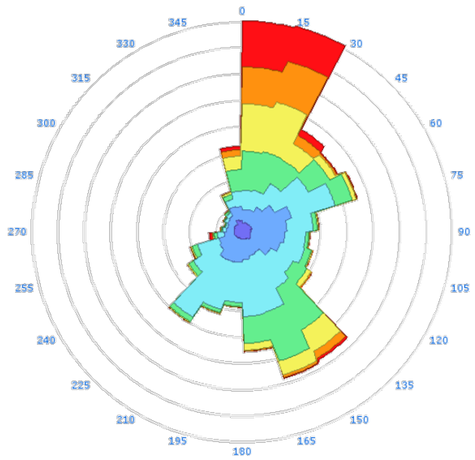



FIGURA 4-3 - IL CLIMA DEL VENTO A GENOVA.

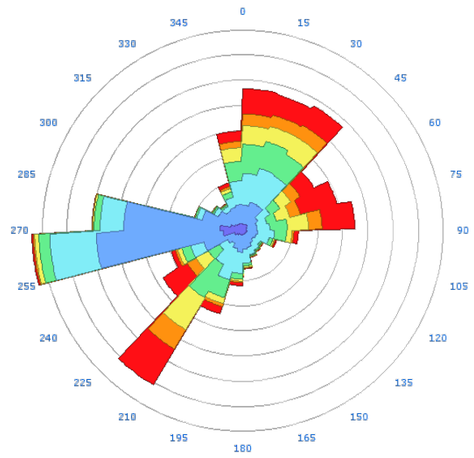



FIGURA 4-4 - IL CLIMA DEL VENTO A IMPERIA.

FIGURA 4-5 - IL CLIMA DEL VENTO A CAPO MELE (SOPRA) E A VADO LIGURE (SOTTO).

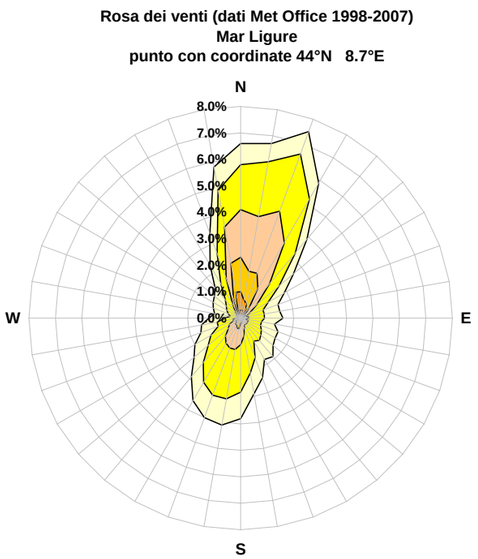



FIGURA 4-6 - IL CLIMA DEL VENTO DERIVATO DAI DATI U.K.M.O.

La differenza sostanziale tra questi dati risiede nel fatto che, per le prime 4 stazioni, si tratta di dati di vento misurati di cui è stata effettuata l'analisi statistica e si sono quindi derivate le frequenze per ogni direzione ed intensità (la cosiddetta rosa dei venti), mentre per la quinta si tratta di dati di vento valutati per mezzo di un modello matematico gestito dall'U.K.M.O. che, suddividendo i mari e gli oceani secondo una griglia regolare, possono, per ogni cella, valutare con notevole precisione la distribuzione della frequenza dei venti.

In particolare, quindi, mentre i primi dati sono misurati a terra e risentono quindi, dell'orografia del terreno, quelli dell'U.K.M.O., pur se ricostruiti in modo indiretto, sono valutati in mare senza interferenza locale delle caratteristiche del territorio.

Analizzando tali dati e considerando che le correnti da vento diventano significative solo se le velocità del vento sono superiori a 5 m/s, si è ritenuto che gli scenari per l'analisi del ricambio nel porto di Vado Ligure dovessero considerare:

a) Vento da Sud-Est (Scirocco) con intensità di 7 m/s
b) Vento da Nord-Est (Grecale) con intensità di 7 m/s
c) Vento da Nord-Ovest (Maestrale) con intensità di 10 m/s

È da sottolineare come le intensità del vento da prendere in considerazione non debbano corrispondere alle velocità massime, che produrrebbero forti correnti con una frequenza estremamente bassa, ma a velocità che siano in grado di determinare un effetto che possa ripetersi con una frequenza significativa e, quindi, essere efficace come forzante per un ricambio medio.

A questo proposito si è poi ritenuto di utilizzare, per l'analisi della dispersione legata al rilascio di traccianti, solo i primi due casi di vento sopra ricordati (Scirocco e Grecale) in quanto costituiscono una forzante peggiorativa per la dispersione rispetto alla situazione senza vento, mentre il vento di Maestrale, pur risultando statisticamente significativo, ha un effetto sull'idrodinamica tale da allontanare le sostanze accumulate nell'area portuale, e quindi favorevoli al ricambio.

## 4.3. Le correnti litoranee

Il Mare Ligure è il bacino più settentrionale del Mediterraneo Occidentale. Si estende per un'area di circa 50.000 km$^2$, circondato dalle coste della Liguria, della Provenza orientale e, a sud, dalla Corsica settentrionale.

Il bacino ligure è allungato nella direzione Nord-Est – Sud-Ovest, e si apre, nella sua parte occidentale, verso il Golfo del Leone ed il bacino Algerino-Provenzale.

Nella sua parte orientale, il Mar Ligure è collegato al Mar Tirreno attraverso il Canale di Corsica, un passaggio ampio in superficie circa 90 km, e circa 30 Km sul fondo posto a 450 m di profondità tra la Corsica e l'isola di Capraia.

Lo sviluppo della piattaforma continentale è molto ridotto (con la sola eccezione della costa Toscana) e ciò pone la fascia costiera sotto l'effetto diretto del mare profondo. La batimetria della scarpata continentale segue l'andamento della costa, degradando rapidamente fino ai 1000 m.

Tra le particolarità più evidenti sono da citare due canyon presenti rispettivamente al largo di Genova e di Punta Mesco ed un promontorio sottomarino che si estende al largo di Nizza. Il centro del bacino è uniformemente profondo degradando progressivamente fino ad una profondità massima di 2700 m.

Il Mar Ligure, per la sua collocazione geografica, risente principalmente dei venti legati alle perturbazioni provenienti dall'Atlantico. Spostandosi da ovest verso est, queste richiamano dapprima venti meridionali mentre quando si allontanano dall'area lasciano il posto a venti nord-occidentali.

Il vento dominante è il Libeccio, che proviene da Sud-Ovest e dà luogo a forti mareggiate che interessano soprattutto la riviera di levante e le coste toscane, mentre lo Scirocco, che proviene dal Golfo della Sirte, interessa maggiormente la riviera di ponente, con aria caldo/umida portatrice di pioggia e temporali.

Senza entrare nel dettaglio delle complesse dinamiche che si sviluppano nel bacino ligure, è da sottolineare come esista, sotto costa, una corrente litoranea con circolazione antioraria, variabile come intensità a livello stagionale ed anche anno per anno, ma comunque persistente in quanto alimentata sia dalla corrente del Mediterraneo Occidentale che dalla corrente Tirrenica (Figura 4-7).

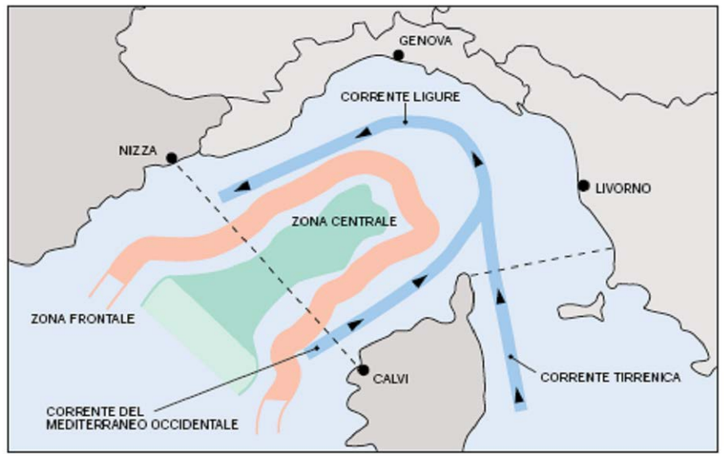



FIGURA 4-7 - MAR LIGURE - LE PRINCIPALI STRUTTURE DINAMICHE E LE CORRENTI.

Sulla base dei dati disponibili in letteratura, l'intensità della corrente che lambisce le coste liguri può essere valutata, al largo, in alcune decine di cm/s (mediamente ~ 20 cm/s).[1]

[1] Astraldi, M., and G. Gasparini, La circolazione costiera nel Mar Ligure orientale, Ist. Biol. Univ. Genova, 1986.
Cerrano C., Ponti M., Silvestri S. Guida alla biologia marina del Mediterraneo, Ananke Edizioni, ISBN 88-7325-050-5, 2004

Al fine di tenerne conto nel presente studio, si è considerata una corrente proveniente da Nord Est, parallela alla costa, con intensità variabile fino a 10 cm/s nella zona più esterna del dominio di calcolo.

## 4.4. Deflussi dei corsi d'acqua

In questo studio sono stati considerati i tre corsi d'acqua che sfociano in prossimità dell'area in esame e che sono nell'ordine: il torrente Segno la cui foce è ubicata immediatamente ad ovest della nuova piattaforma, il torrente Quiliano più ad occidente, ed, infine, il torrente Letimbro.

Tutti i tre corsi d'acqua presentano un regime di tipo torrentizio caratterizzato da intensi e poco frequenti picchi di portata e da lunghi periodi di siccità.

Nella Figura 4-8 viene indicata la posizione della foce e la superficie del bacino dei torrenti considerati.

Considerato che l'obiettivo di questo studio è la valutazione parametrica della dispersione delle acque di origine fluviale e dell'impatto sulla qualità delle acque litoranee, è stato deciso di considerare dei valori di portata rappresentativi di una situazione media e ricorrente, quindi, in grado di influenzare in modo apprezzabile la qualità delle acque litoranee.

In virtù di queste considerazioni sono state ipotizzate le seguenti portate:

- per il torrente Segno Q = 10 m³/s
- per il torrente Quiliano Q = 14 m³/s
- per il torrente Letimbro Q = 15 m³/s

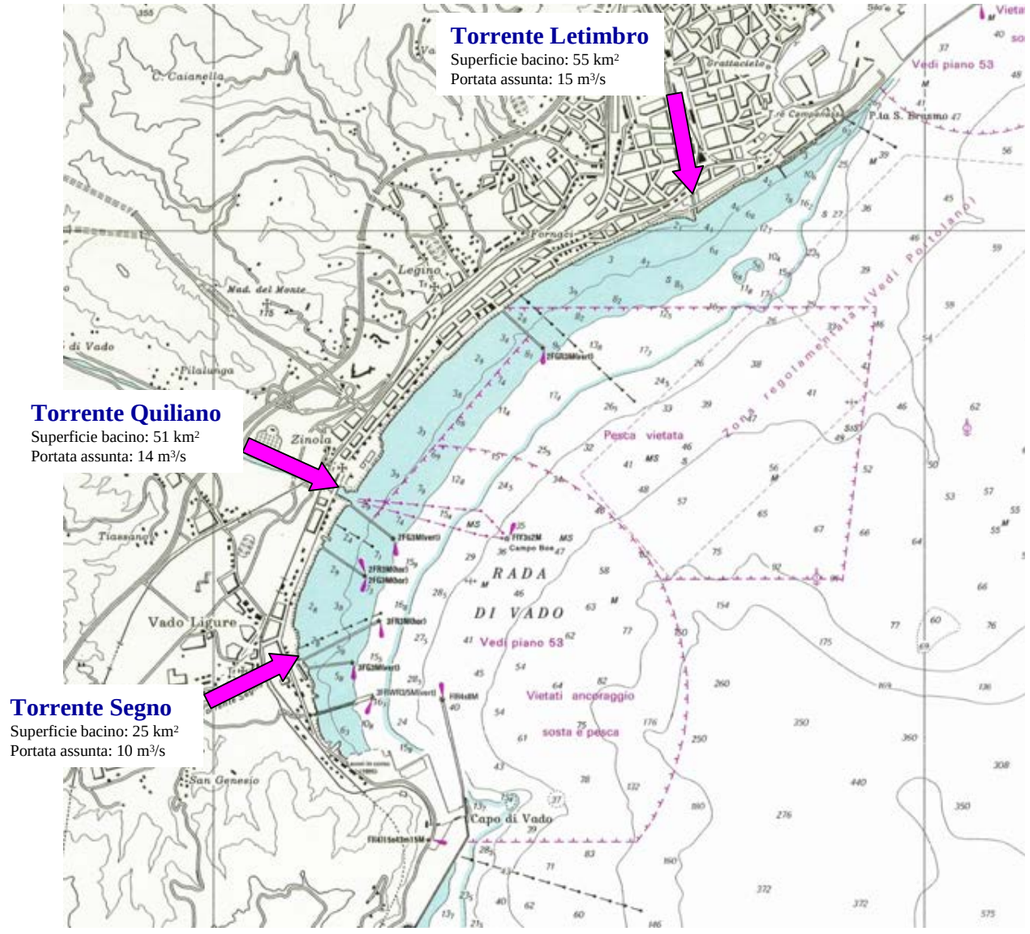



FIGURA 4-8 - FIUMI CONSIDERATI NEL PRESENTE STUDIO.

Relini G., Dominio pelagico - il Santuario dei cetacei Pelagos, Museo Friulano di Storia Naturale, Udine, ISBN 88 88192 30 1, 2007
Laghi, M., Analisi della variabilità della circolazione del Mar Mediterraneo, Tesi di laurea in Oceanografia e Meteorologia - Università di Bologna, 2003

## 5. GLI SCENARI DA ANALIZZARE

Per l'analisi degli effetti sulla circolazione idrodinamica ed il ricambio nella baia di Vado Ligure sono state studiate e messe a confronto la configurazione di Perizia di Variante con la configurazione di riferimento (ossia quella di Progetto Esecutivo approvato).

La configurazione analizzata, comprende i seguenti interventi:

– la piastra multifunzionale così come approvata nel Progetto Esecutivo con l'inserimento di una conterminazione con cassoni pieni sul perimetro più esterno della piastra e relativo riempimento.
– le opere previste dal Piano Regolatore Portuale approvato nel 2003, la rimodellazione della costa secondo quanto previsto dal Comune di Vado Ligure.

Le schematizzazioni batimetriche delle configurazioni analizzate (configurazione di riferimento da Progetto Esecutivo approvato e configurazione di Perizia di Variante) sono rappresentate in Figura 5-1.

Nelle configurazioni studiate, sono stati considerati anche la realizzazione di tutte le opere accessorie quali la nuova diga foranea del porto, prolungata rispetto all'attuale e con la testata posta secondo un allineamento verso nord-est, il porto turistico, sito immediatamente a nord della piattaforma e il pennello prescritto dall'Autorità di Bacino come opera di mitigazione per limitare il trasporto litoraneo verso la zona della foce del Torrente Segno riducendo così la necessità di interventi di manutenzione per garantire l'officiosità della foce stessa.

Il porto turistico, non ancora definito a livello di dettaglio, è stato considerato nelle analisi come ingombro che influenza la circolazione esterna locale.

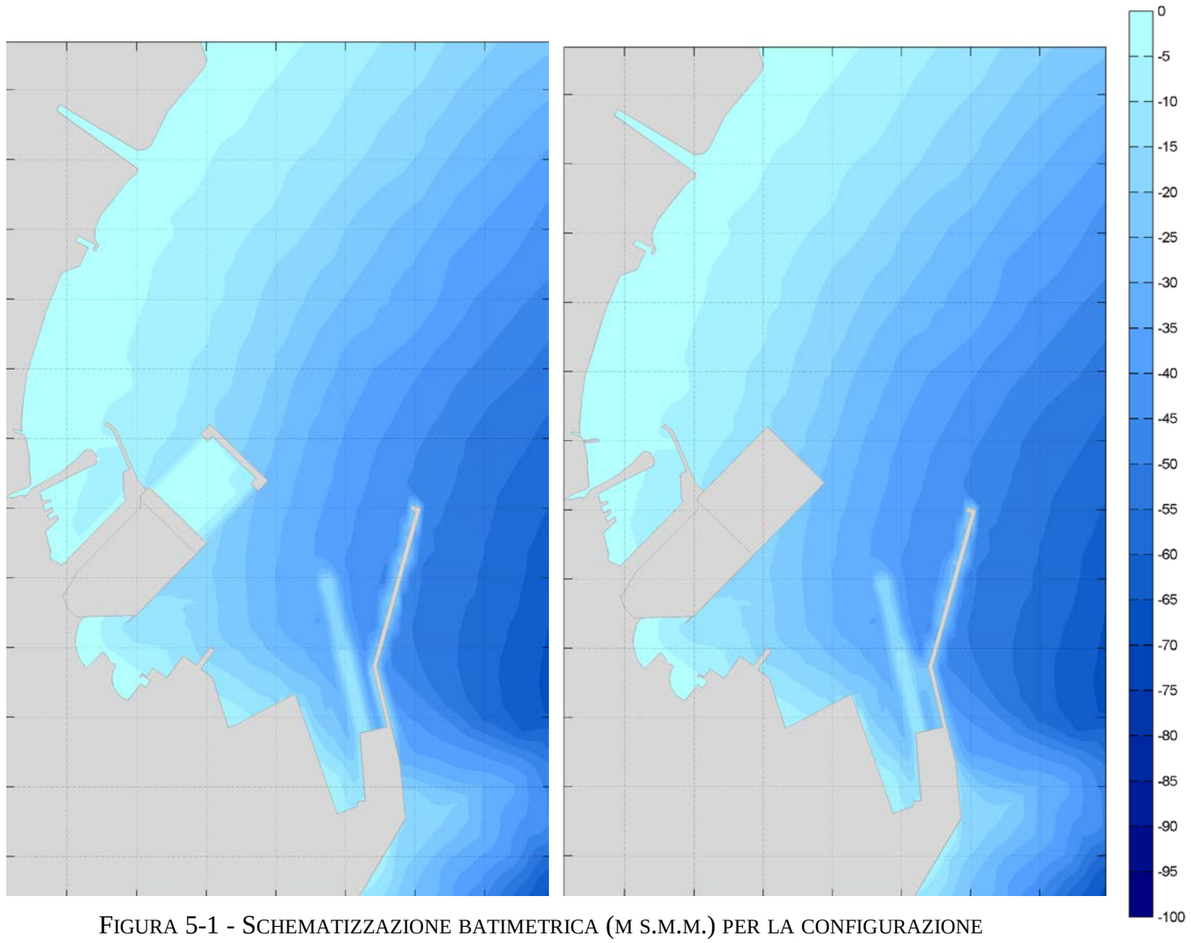



FIGURA 5-1 - SCHEMATIZZAZIONE BATIMETRICA (M S.M.M.) PER LA CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO, PROGETTO ESECUTIVO APPROVATO, (SX) E PER LA CONFIGURAZIONE DELLA PERIZIA DI VARIANTE (DX).

# 6. L'IDRODINAMICA DELLA BAIA DI VADO LIGURE

In questo capitolo vengono riportati i risultati relativi all'analisi di dettaglio che ha consentito, come già anticipato, di analizzare il comportamento idrodinamico del sistema nella configurazioni di Perizia di Variante e, quindi, di confrontarlo con quello relativo alla situazione di Progetto Esecutivo approvato al fine di valutare le principali variazioni indotte dalle modifiche proposte.

Come già evidenziato, le caratteristiche meteorologiche e idrodinamiche sono fondamentali nella valutazione della circolazione idrodinamica nella baia di Vado Ligure e quindi sono state considerate diverse condizioni di marea e meteorologiche nelle simulazioni effettuate.

Sono state eseguite le seguenti simulazioni con il modello idrodinamico:

- Marea + correnti litoranee
- Marea + correnti litoranee + vento da NE
- Marea + correnti litoranee + vento da SE
- Marea + correnti litoranee + vento da NO

Le forzanti meteo-marine applicate per le simulazioni sono state:

- Marea sinusoidale con periodo di 12 ore ed escursione di 20 cm (+/- 10 cm l.m.m.), applicata al limite esterno del dominio di calcolo
- Corrente litoranea parallela alla linea di costa e rivolta in direzione SO con intensità variabile fino a 10 cm/s nella zona più esterna del dominio di calcolo
- Vento: quando richiesto per i diversi scenari, applicato uniforme sul dominio di calcolo e costante nel tempo sia in direzione che in intensità.
  Sono stati considerati i seguenti venti:
  - Vento da Nord-Est: intensità di 7 m/s
  - Vento da Sud-Est: intensità di 7 m/s
  - Vento da Nord-Ovest: intensità di 10 m/s

Nelle pagine seguenti sono presentati i risultati delle simulazioni in termini di campi di velocità tridimensionali e mediati sulla verticale per ciascuno degli scenari analizzati.

In riferimento alle simulazioni caratterizzate dall'assenza di vento, vengono presentati i risultati solo in termini di campi di moto mediati sulla verticale negli istanti corrispondenti al massimo flusso ed al massimo riflusso. In riferimento alle simulazioni caratterizzate dalla presenza di vento, vengono presentati i risultati come campi di moto sia nello strato superficiale che mediati sulla profondità, sempre in riferimento all'istante di massimo flusso ed a quello di massimo riflusso.

Al fine di permettere un confronto più agevole ed immediato tra la situazione di riferimento e quella di Perizia di Variante, è stato predisposto un layout grafico in cui vengono presentate affiancate le immagini dei campi di moto nelle due situazioni oggetto di confronto ottenute nelle medesime condizioni meteomarine.

Dall'esame dei risultati ottenuti appare evidente, infatti, che i campi di moto nell'area in esame presentano un comportamento in termini di intensità sostanzialmente stazionario nel tempo, ed indipendente dalla fase di marea (condizioni di flusso o di riflusso di marea).

La circolazione idrodinamica nella fascia litoranea è in sostanza determinata in modo preponderante dalla presenza di correnti litoranee e/o dai campi di vento, mentre la forzante mareale (che mediamente oscilla nell'intervallo di ±10 cm) non è in grado di generare delle correnti di marea significative.

## 6.1. L'idrodinamica della baia in condizione di calma di vento

Dall'esame dei campi di moto nello scenario con calma di vento, è possibile osservare che, per la situazione della Perizia di Variante, in uno scenario meteo marino caratterizzato dalla sola applicazione di una forzante mareale media (con un'escursione di marea pari a ± 10 cm rispetto al medio mare) e assenza di vento, i campi di velocità risultano estremamente contenuti in tutta l'area in esame e sono del tutto simili a quelli ottenuti considerando la configurazione di Progetto Esecutivo approvato.

In Figura 6-1 si riportano i campi di moto mediati lungo la verticale in condizione di massimo flusso per la configurazione di riferimento (a sinistra) e per la configurazione di Perizia di Variante (a destra). Nella Figura 6-2 vengono presentati i risultati corrispondenti in condizioni di massimo riflusso.

Appare subito evidente che i campi di moto nelle due configurazioni sono sostanzialmente coincidenti sia in ragione delle basse velocità che si manifestano all'interno della rada, sia perché l'inserimento di una schiera di cassoni lungo il bordo esterno della piattaforma non interferisce in modo significativo sulla circolazione locale.

Come si può notare, escludendo le foci dei fiumi dove le velocità sono determinate dall'acqua dolce in fase di scarico, le velocità in tutta la zona si mantengono al di sotto dei 2 cm/s, quindi, molto basse. Nel caso del Torrente Segno, la presenza del molo di sopraflutto del nuovo porto turistico fa sì che le velocità siano orientate verso nord.

Rispetto alla configurazione di riferimento, si può dire che non si registrano differenze significative per quanto riguarda i campi di moto in condizione di calma di vento.

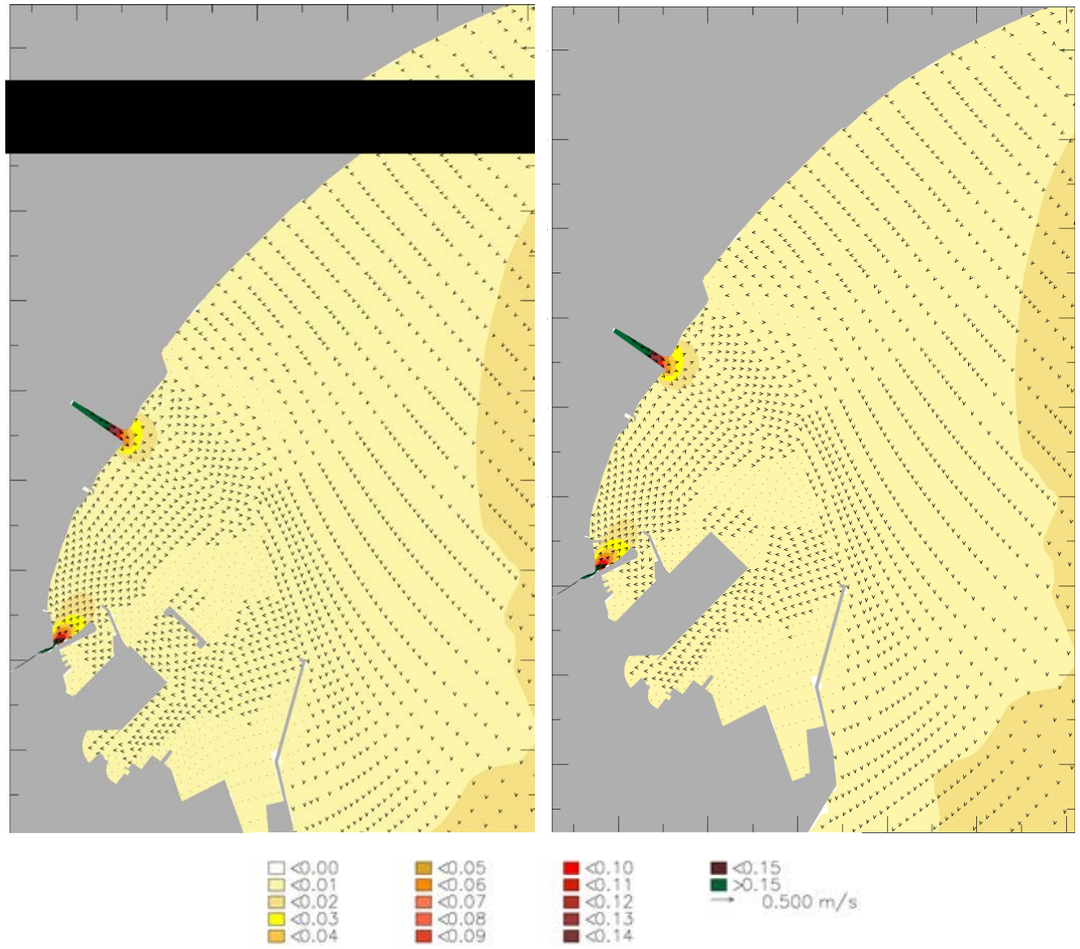



FIGURA 6-1 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN ASSENZA DI VENTO - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

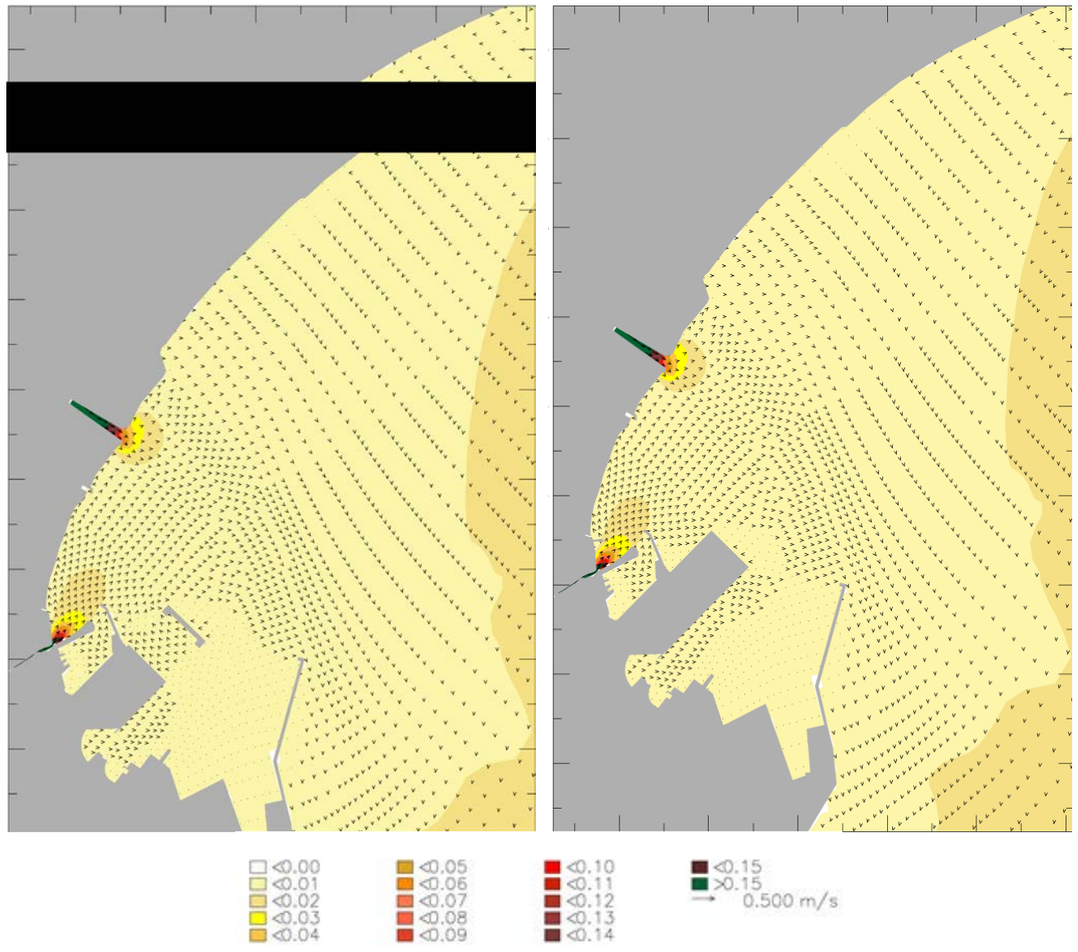



FIGURA 6-2 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN ASSENZA DI VENTO - CONDIZIONE DI MASSIMO RIFLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

## 6.2. L'idrodinamica della baia in presenza di vento da Nord-Est

In questo caso è stato considerato come forzante aggiuntiva rispetto a quelle utilizzate nello scenario precedente, un vento da Nord-Est con intensità di 7 m/s, uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e costante per l'intera durata della simulazione.

La freccia blu presente in ogni mappa indica la direzione di applicazione del campo di vento.

Dall'analisi dei campi di moto in superficie riportati in Figura 6-3 e Figura 6-4, è possibile osservare la formazione di una corrente di superficie che si sviluppa lungo la linea di costa in direzione Sud Ovest e che raggiunge una velocità massima di qualche cm/s. Questa corrente, tuttavia, non interessa l'area portuale, che risulta ben protetta ed è caratterizzata, all'interno del bacino, da velocità di entità del tutto trascurabile. Lo stesso vale per l'area del porto turistico.

È altresì evidente che le velocità permangono estremamente contenute e sempre inferiori a 2 cm/s così come le differenze di velocità. Si nota inoltre, che la presenza della schiera di cassoni pieni agisce come schermo alla propagazione delle correnti superficiali determinando una zona d'ombra idrodinamica nell'area a ridosso della piastra multifunzionale.

Il vento ha un effetto molto modesto se si considera la distribuzione delle velocità mediate sulla profondità, come dimostrato in Figura 6-5 relativa alla fase di massimo flusso e Figura 6-6 relativa alla fase di massimo riflusso. In questi due casi, non si apprezzano sostanziali differenze tra lo scenario con la configurazione di Perizia di Variante e quello di riferimento.

Da un punto di vista generale, la presenza del campo di vento considerato non induce significative alterazioni al regime idrodinamico costiero; il campo delle velocità medie sulla profondità ed il sistema circolatorio costiero valutati in entrambe le configurazioni (Perizia di Variante e Progetto Esecutivo approvato) mantengono sostanzialmente lo stesso andamento caratteristico dello scenario senza vento.

Questo fatto non sorprende ed è coerente con tutte le considerazioni precedenti sul modello e sul sito in esame: la circolazione idrodinamica in questa regione, infatti, è regolata dalle forzanti marine ed in particolar modo dalla presenza di un sistema di correnti anticicloniche aderenti alla costa, mentre gli effetti delle correnti di trascinamento dovute al vento sono apprezzabili solo in presenza di fondali poco profondi ed in zone particolarmente esposte al vento considerato.

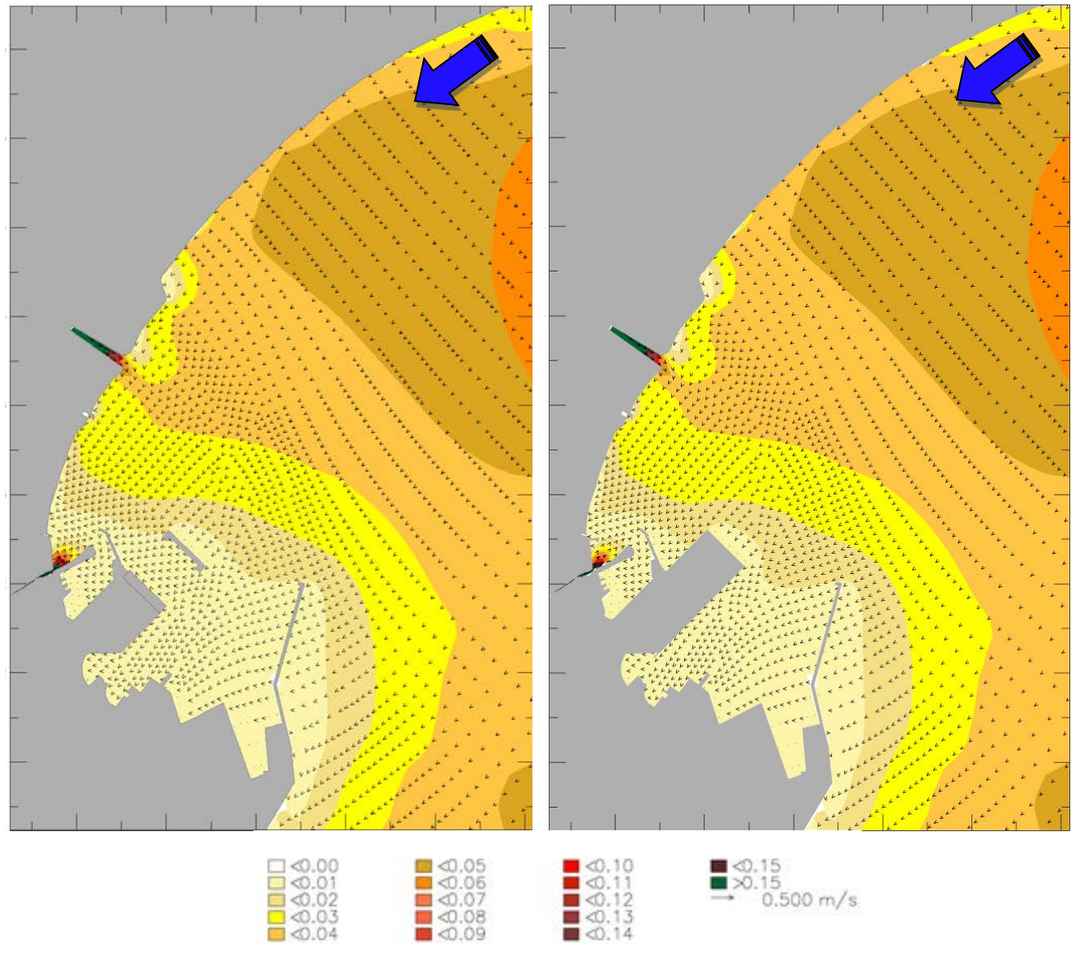



FIGURA 6-3– DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

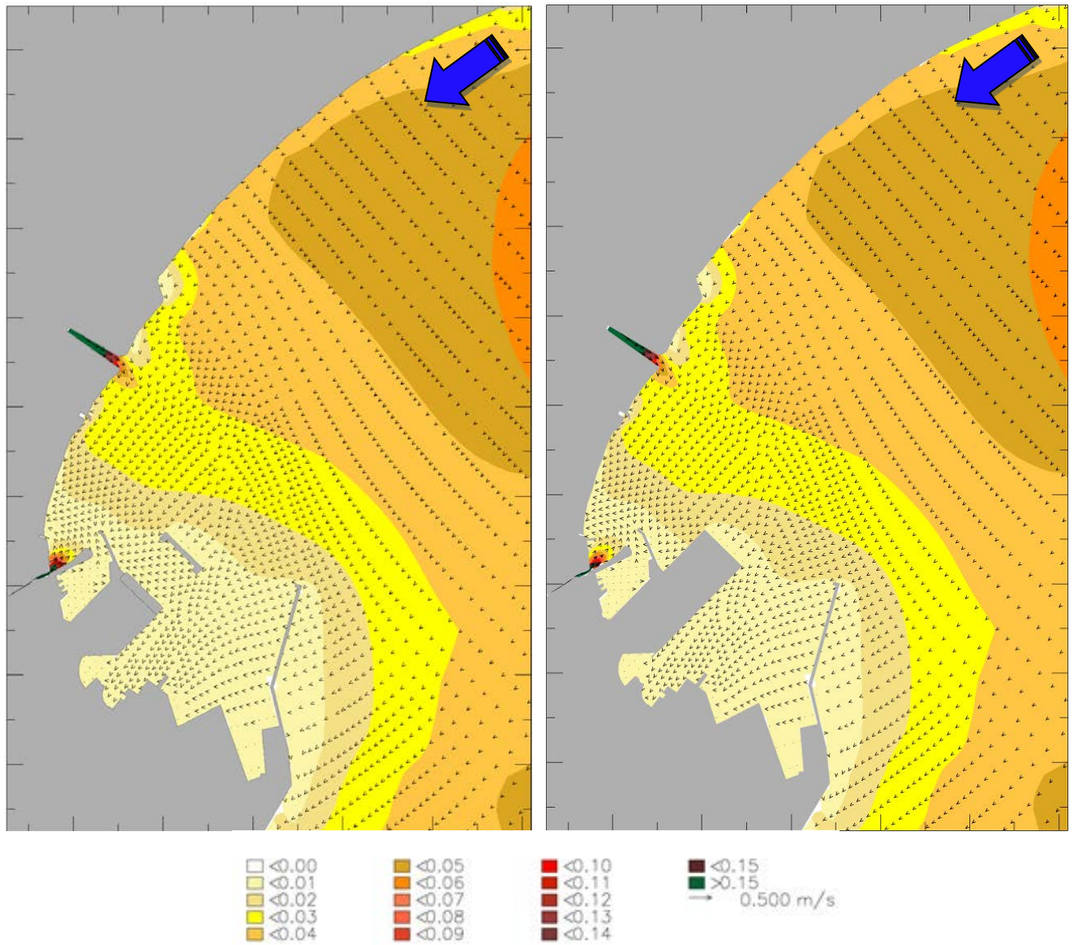



FIGURA 6-4– DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO RIFLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

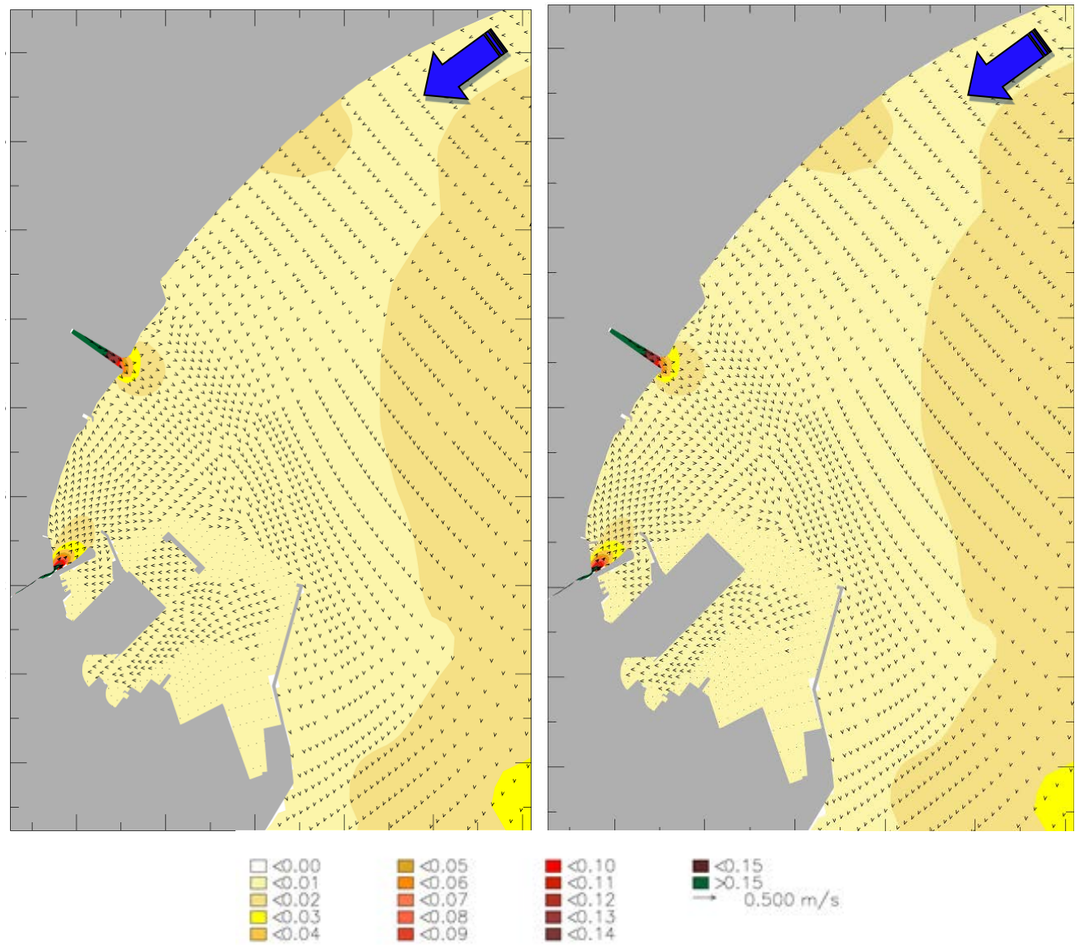



FIGURA 6-5 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST, CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

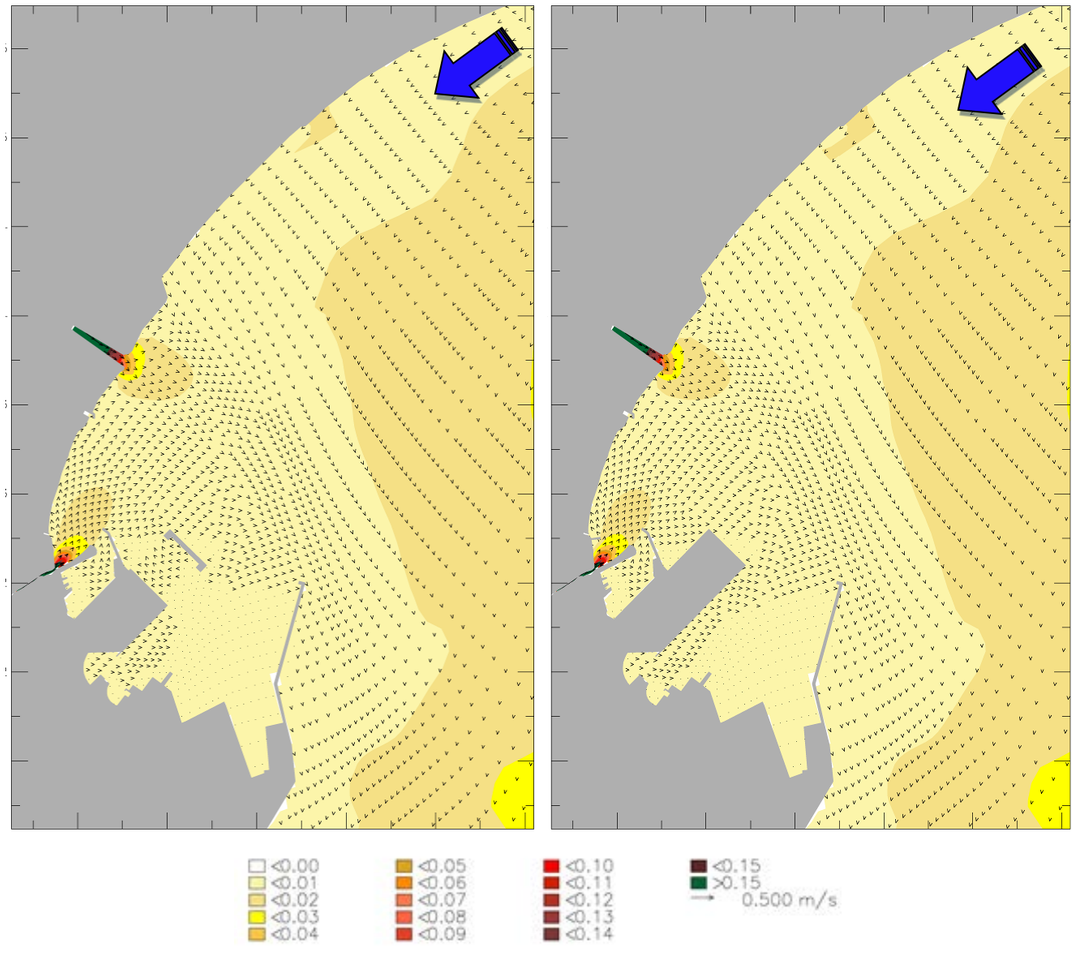



FIGURA 6-6 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD EST, CONDIZIONE DI MASSIMO RIFLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

## 6.3. L'idrodinamica della baia in presenza di vento da Sud-Est

In questo scenario è stato considerato come forzante, oltre alla marea ed alle correnti litoranee, anche un vento da Sud Est con intensità di 7 m/s uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e costante per l'intera durata della simulazione.

In Figura 6-7 e Figura 6-8 sono riportate la distribuzione dei campi di moto nello strato superficiale in condizioni di massimo flusso e massimo riflusso, con le differenze rispetto alla situazione di riferimento.

Le immagini evidenziano l'effetto di schermatura della diga foranea che bloccano lo sviluppo delle correnti superficiali creando così una zona di calma all'interno della rada e in prossimità della piattaforma.

Come si evince dalle figure, in questo caso l'effetto della contermina-zione della piattaforma con i cassoni non determina variazioni sulle correnti superficiali rispetto allo scenario di riferimento, in quanto la zona interessata dalle modifiche è già parzialmente schermata dalla diga foranea e qui erano state stimate velocità molto basse, nell'ordine di qualche cm/s, anche nella situazione di riferimento.

Anche in questo caso, gli effetti del vento apprezzabili sullo strato superficiale non hanno ripercussioni sugli strati sottostanti, dove queste correnti tendono ad annullarsi e, addirittura, a scomparire se si considera la distribuzione delle velocità mediate sulla profondità sia nella condizione di massimo flusso che nella condizione di massimo riflusso (Figura 6-9 e Figura 6-10).

.

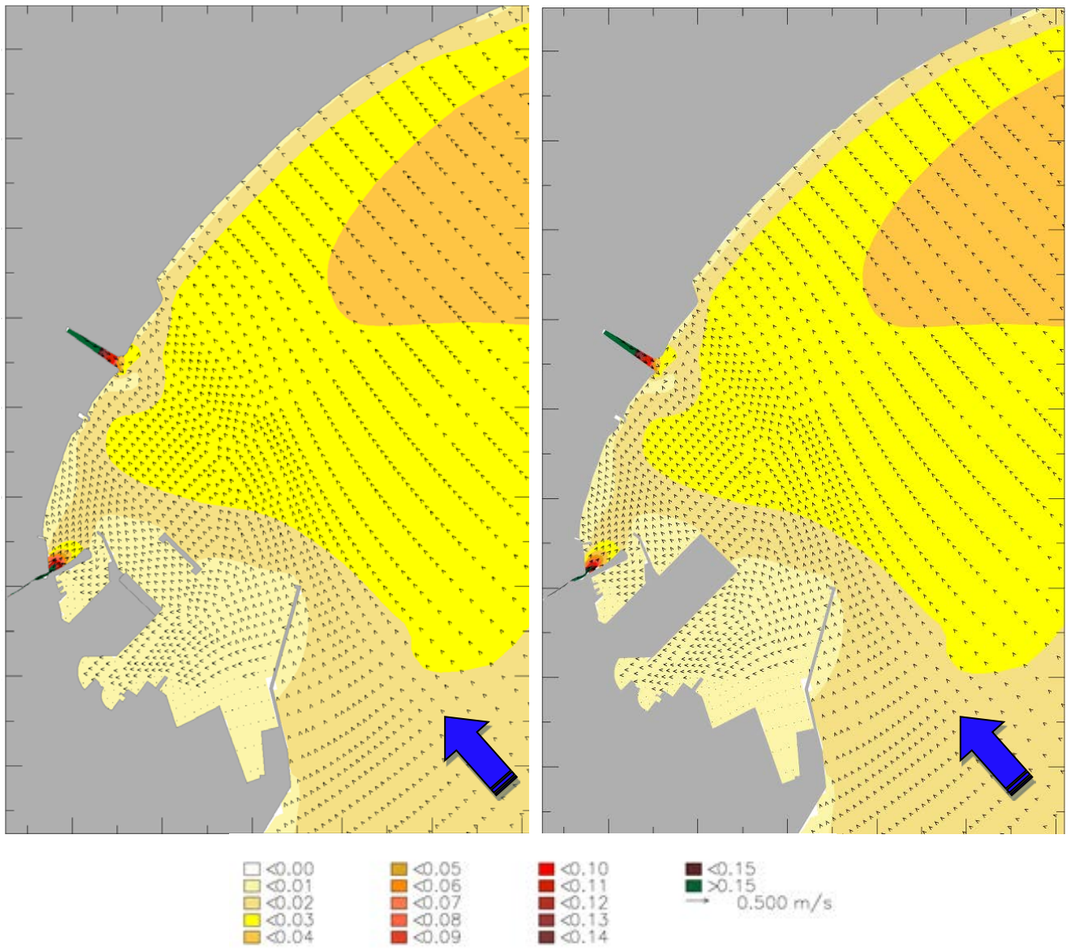



FIGURA 6-7– DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX) .

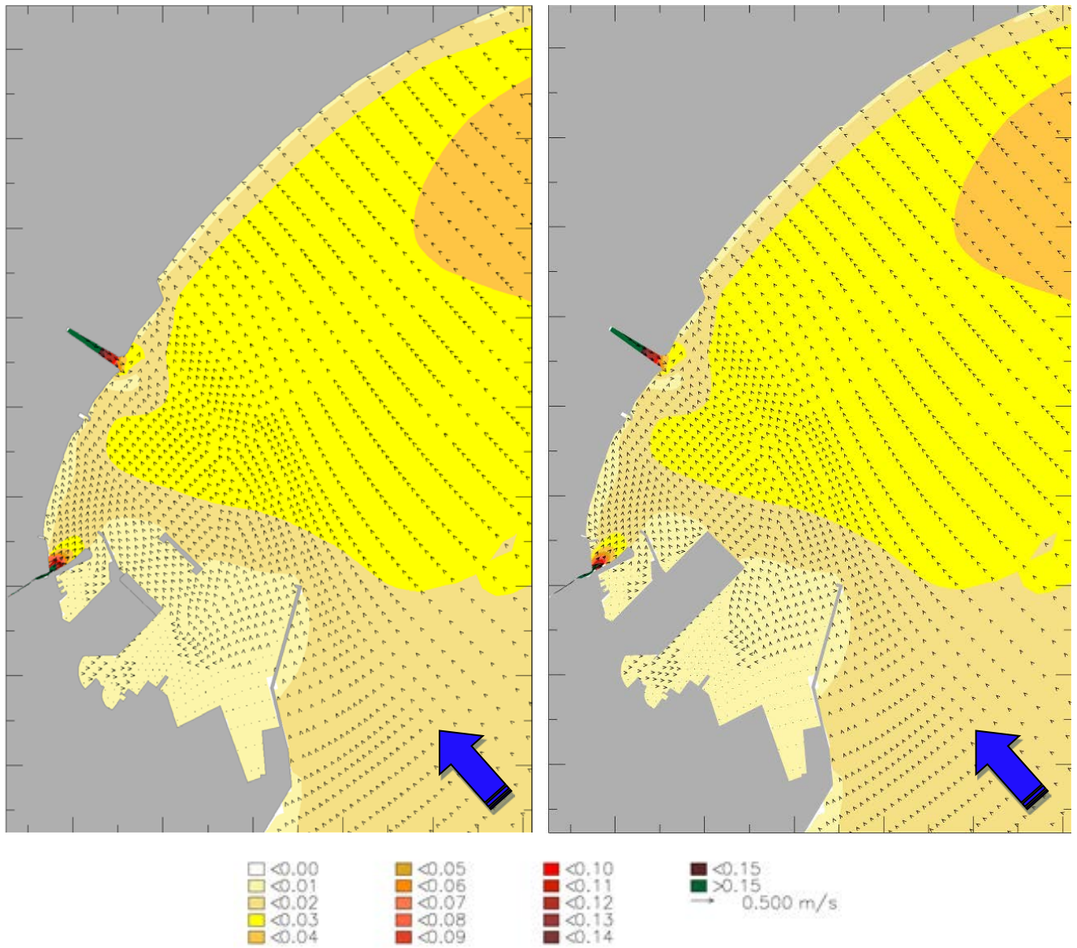



FIGURA 6-8– DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO RIFLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

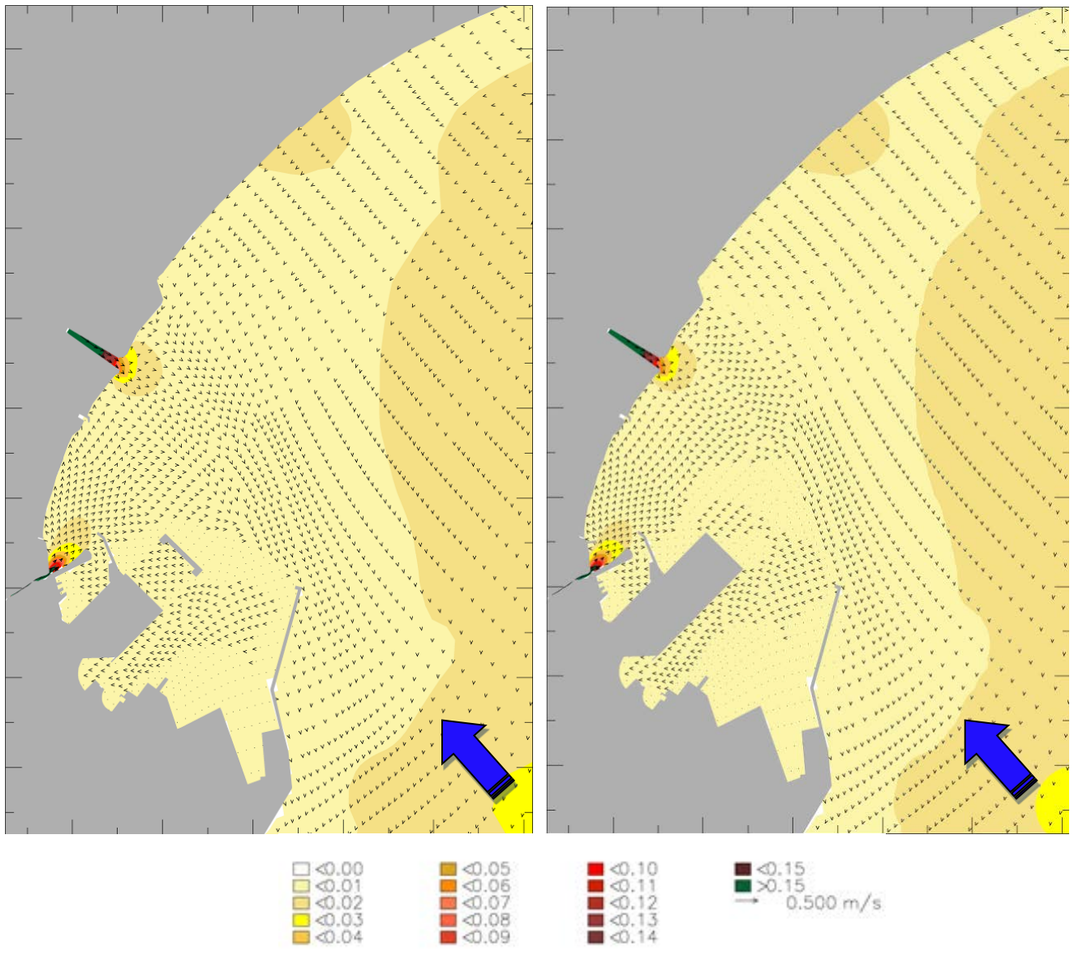



FIGURA 6-9 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

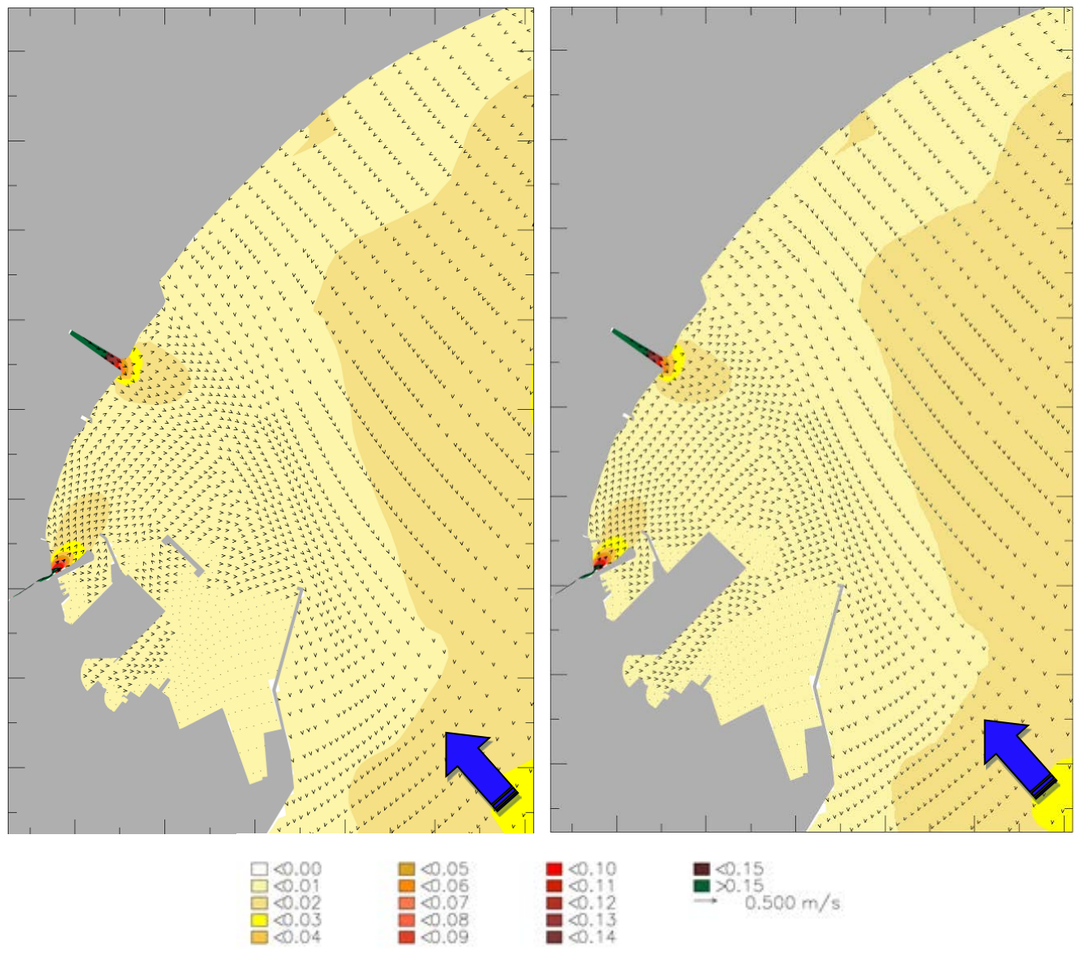



FIGURA 6-10 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA SUD EST - CONDIZIONE DI MASSIMO RIFLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

## 6.4. L'idrodinamica della baia in presenza di vento da Nord-Ovest

In questo scenario per la valutazione degli impatti della configurazione della Perizia di Variante, è stato considerato, oltre alla marea e alle correnti litoranee, anche un vento da Nord-Ovest con intensità di 10 m/s uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e costante per l'intera durata della simulazione.

In Figura 6-11 è riportata la distribuzione delle velocità sullo strato superficiale in condizioni di massimo flusso e in Figura 6-12 le velocità medie in massimo riflusso. In entrambe le figure vengono confrontati i campi di moto tra lo scenario con la configurazione di Perizia di Variante e quello di riferimento.

Da tali figure è possibile osservare come la presenza di un campo di vento più intenso (10 m/s) genera una corrente superficiale diretta secondo la direzione del vento con delle intensità variabili da 0 sotto costa fino a 5-6 cm/s verso il mare aperto o nella fascia adiacente la diga foranea.

Anche in questo caso, le uniche differenze rispetto allo stato di riferimento sono apprezzabili nello strato superficiale dove le velocità subiscono una leggera diminuzione a causa della presenza dei cassoni di chiusura della piattaforma.

Nella rada portuale di Vado, le velocità si mantengono basse nell'ordine di qualche cm/s in ragione dell'effetto schermante della radice della piattaforma stessa che impedisce lo sviluppo di una corrente. Anche nell'area del porto turistico le velocità risultano molto basse, mentre alla foce del Torrente Segno esse sono determinate principalmente dallo scarico del Torrente stesso, ed orientate verso Nord dalla presenza del molo di sopraflutto del nuovo porto turistico.

Le velocità tendono rapidamente a diminuire negli strati immediatamente più profondi, dove la marea e le correnti litoranee non sono preponderanti per la determinazione del campo di velocità (vedi Figura 6-13 e Figura 6-14).

Per questi due campi di moto, non si registrano apprezzabili differenze tra la situazione di Perizia di Variante e la situazione di riferimento (Progetto Esecutivo approvato).

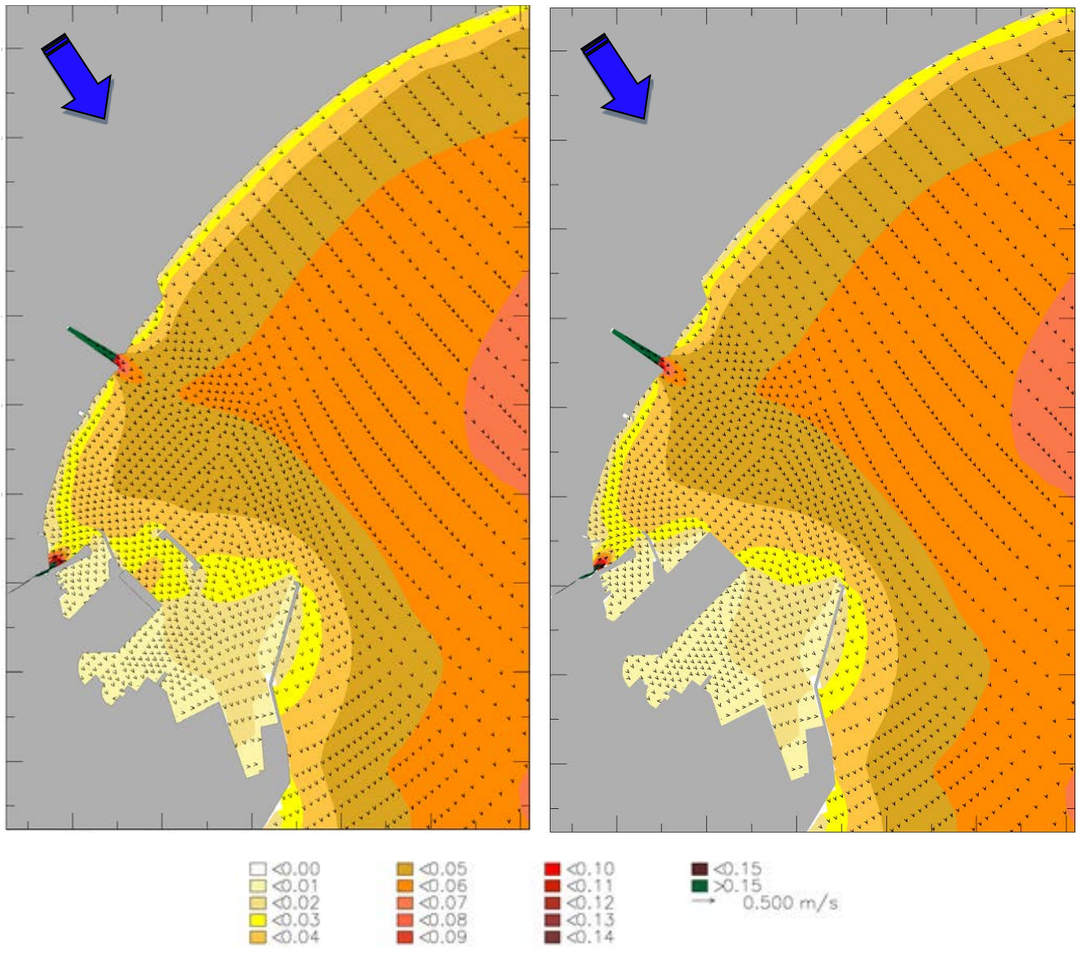



FIGURA 6-11– DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

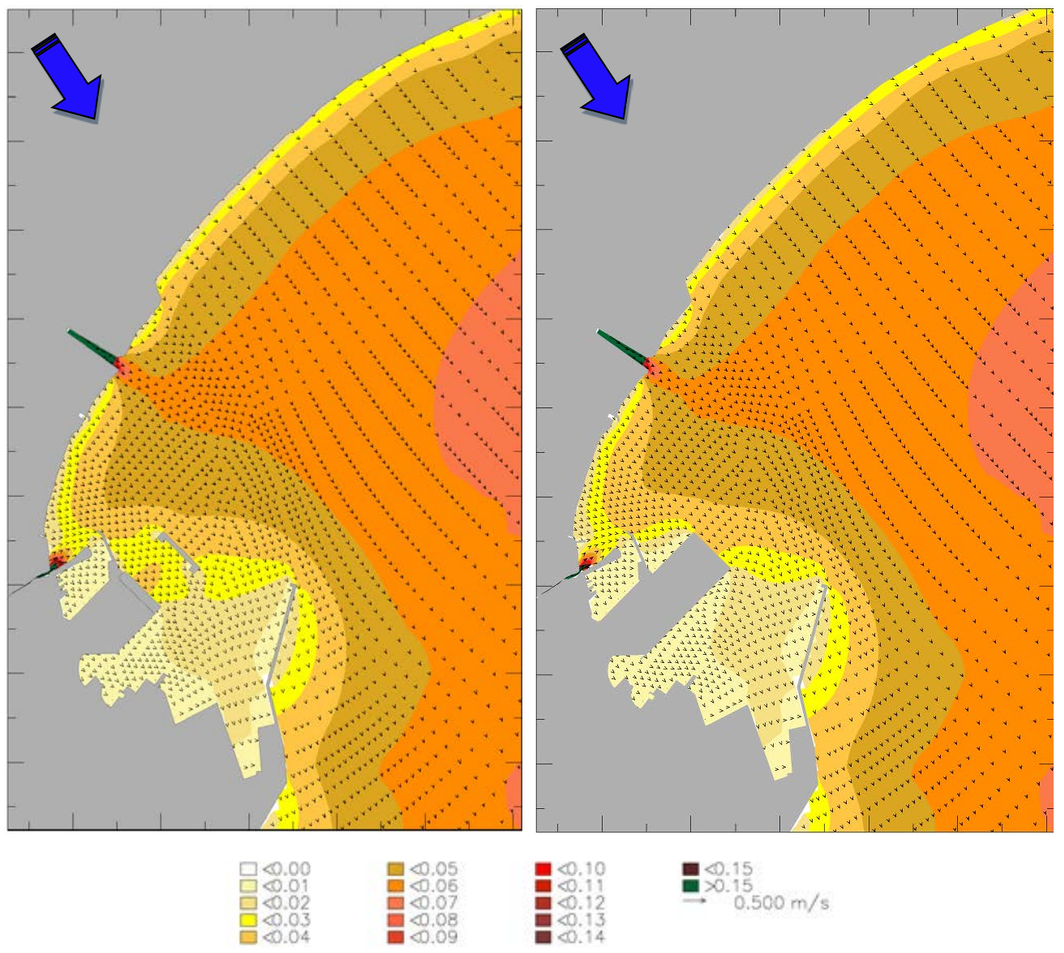



FIGURA 6-12– DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ (M/S) NELLO STRATO SUPERFICIALE IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - CONDIZIONE DI MASSIMO RIFLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

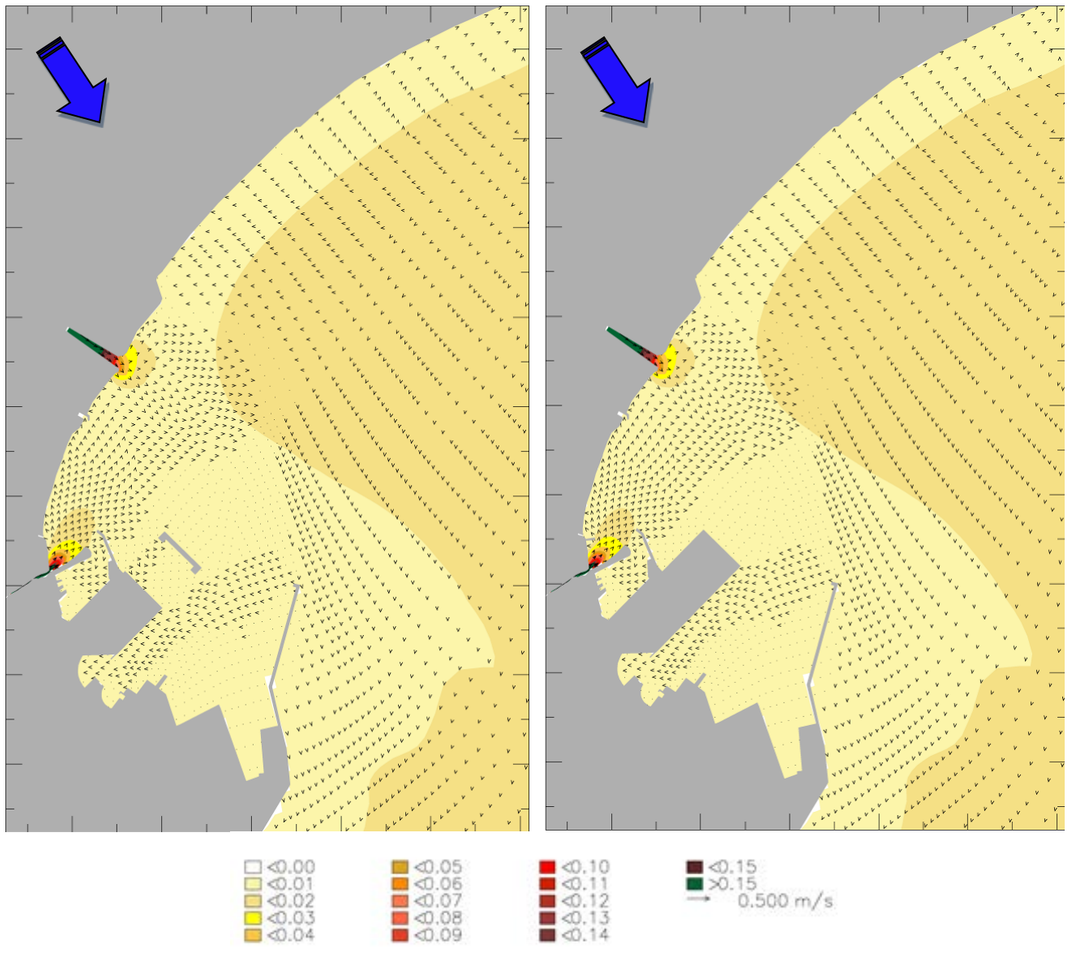



FIGURA 6-13 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - CONDIZIONE DI MASSIMO FLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

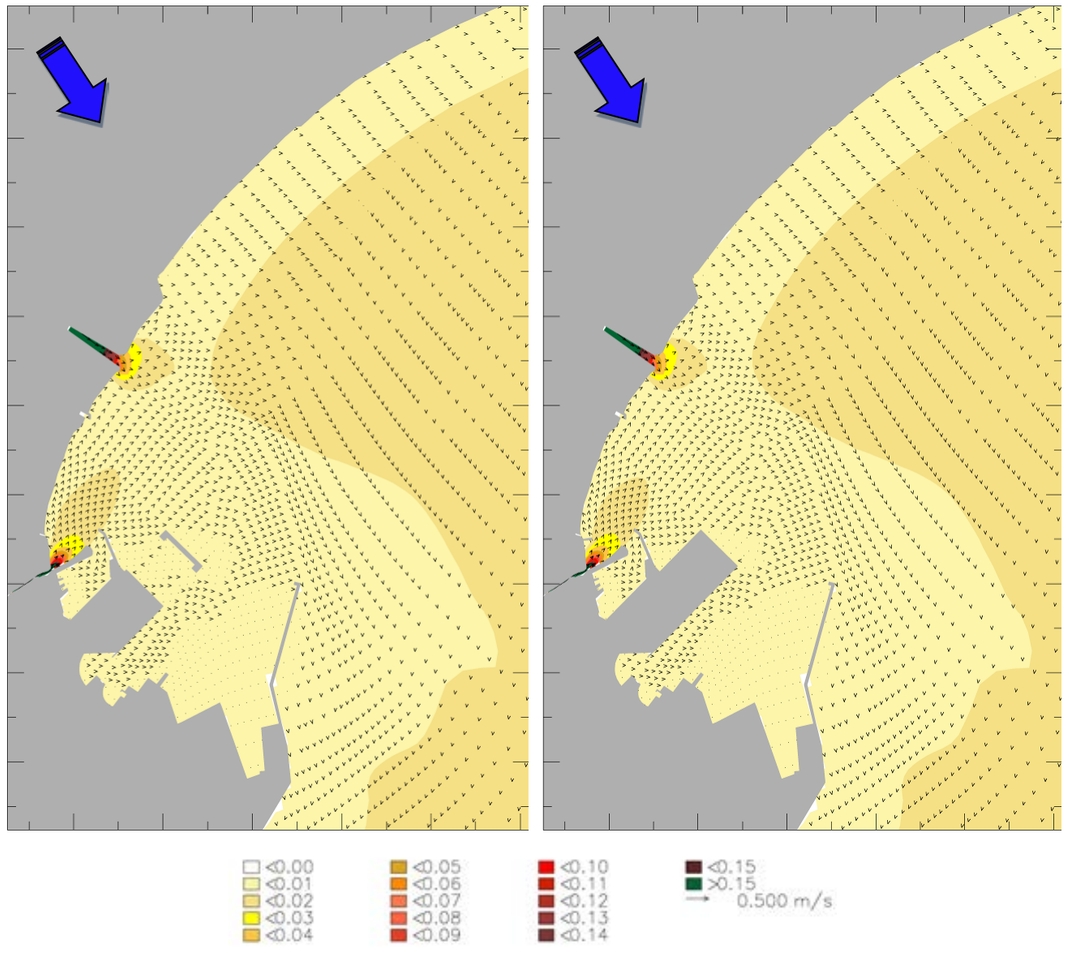



FIGURA 6-14 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ MEDIE (M/S) SULLA PROFONDITÀ IN PRESENZA DI VENTO DA NORD OVEST - CONDIZIONE DI MASSIMO RIFLUSSO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

# 7. CARATTERISTICHE DISPERSIVE

Gli indicatori utilizzati per analizzare le caratteristiche dispersive nel tratto litoraneo compreso tra la rada di Vado Ligure e la foce del torrente Letimbro sono basati sulle analisi della dispersione di un tracciante di origine torrentizia in grado di immettere nel sistema sostanze potenzialmente inquinanti e quindi nocive per le aree litoranee di maggiore pregio e ed interesse turistico.

Al fine di ottenere una valutazione di tipo parametrico sulla dispersione delle acque dei torrenti che sfociano nella baia di Vado Ligure, è stato assunto che ogni torrente recapitasse in mare acqua caratterizzata dalla medesima concentrazione di un tracciante passivo, ovvero di una sostanza perfettamente solubile in acqua che non subisce trasformazioni né chimiche né fisiche mentre si disperde nella zona.

Nelle simulazioni sono stati considerati tre traccianti diversi, per ciascuno dei tre torrenti con le medesime caratteristiche e con una concentrazione allo scarico pari a 1 g/m³. In questo modo, avendo assunto uno scarico unitario alla sorgente, la concentrazione risultante C(x,t) in un determinato punto dello spazio all'istante temporale t rappresenta anche il rapporto di diluizione tra la concentrazione C(x,t) la concentrazione $C_0$ al rilascio ed indica, quindi, l'abbattimento rispetto al carico iniziale immesso nel sistema.

Gli scenari idrodinamici e di deflusso adottati nelle simulazioni, sono quelli già considerati per la definizione delle caratteristiche idrodinamiche.

Nelle pagine seguenti vengono presentati le mappe della distribuzione della concentrazione dei traccianti, considerati nell'analisi del contributo dei tre corsi d'acqua, risultati delle simulazioni.

## 7.1. Dispersione in condizione di calma di vento

Per questo scenario l'idrodinamica dell'area di studio è determinata esclusivamente dall'oscillazione periodica della marea e dalla presenza della corrente litoranea.

L'andamento della distribuzione della concentrazione dei traccianti per lo scenario con assenza di vento, considerando la somma dei contributi di tutti i fiumi, è riportato in Figura 7-1. Sul lato sinistro viene presentata la mappa di concentrazione per la configurazione di riferimento mentre sul lato destro viene presentata la mappa per la configurazione di Perizia di Variante.

Dalla analisi dei campi di concentrazione si evince che:

- Dal confronto dei risultati con la situazione di riferimento si osserva che le uniche differenze apprezzabili sono ravvisabili a ridosso dell'area delimitata dai cassoni a mare e dal molo di sopraflutto del nuovo porto turistico. Qui la differenza di concentrazione tra la situazione modificata e quella di riferimento indicano un aumento di circa 0.05 g/m³. Al di fuori di quest'area non si osservano apprezzabili differenze.
- Questo indica che le nuove opere non sono in grado di interferire in modo apprezzabile sulla dispersione del tracciante originante dai fiumi Letimbro e Quiliano.
- Il Torrente Segno, data la morfologia della zona in cui sfocia e la vicinanza alla zona portuale è quello che risente in modo maggiormente della presenza dei nuovi cassoni.

Complessivamente le variazioni rispetto alla situazione di riferimento sono piccole e l'effetto generale trascurabile. Questa differenza, come dimostrato nel paragrafo seguente, è imputabile alla presenza del pennello posto alla foce del Segno e non alla chiusura della piattaforma.

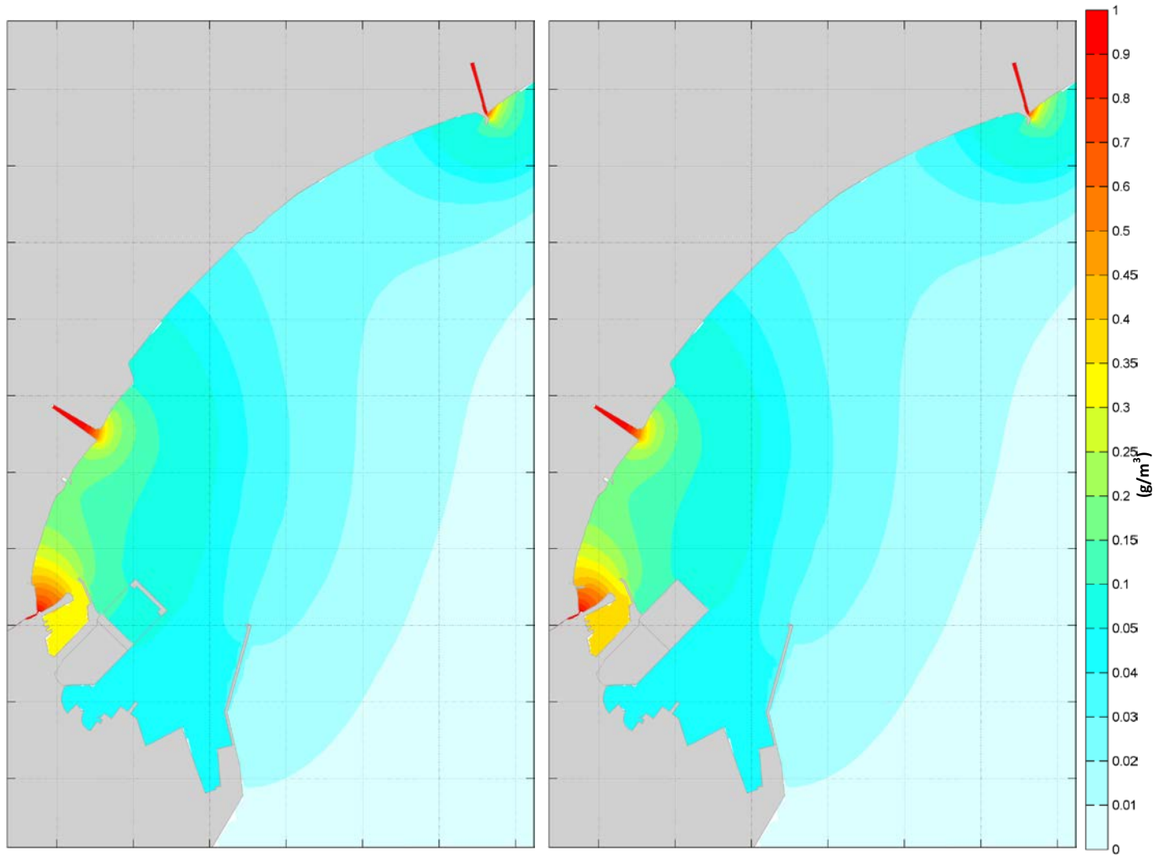



FIGURA 7-1 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI ASSENZA DI VENTO - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

Effetto della presenza del pennello alla foce del Segno

Per valutare l'effetto della presenza del pennello è stato analizzato l'andamento delle concentrazioni di tracciante originato da Torrente Segno considerando la configurazione di riferimento(Progetto Esecutivo approvato) con e senza il pennello.

La mappa delle differenze di concentrazione tra le due configurazioni è riportata in Figura 7-2 e rappresenta, in termini di gradazioni cromatiche, le aree tendenzialmente soggette a una diminuzione delle concentrazioni (valori negativi, blu) e quelle tendenzialmente soggette a un incremento delle stesse (valori positivi, rossi).

Si può facilmente osservare che la presenza del pennello determina l'arresto della dispersione del tracciante oltre la scogliera con una evidente diminuzione delle concentrazioni verso le spiagge a nord del pennello.

Nell'area a sud del pennello si osserva invece un aumento delle concentrazioni variabile tra 0.01 e 0.05 g/m³ a nord del molo di sopraflutto del nuovo porto turistico e di circa 0.005 all'interno del porto turistico stesso. Al di fuori dell'area della foce del Torrente Segno le variazioni non sono apprezzabili.

Nella stessa figura viene riportato anche l'andamento delle concentrazioni di tracciante in due punti significativi, dentro e fuori il porto turistico. Da questi grafici si può osservare come le differenze di concentrazione tra le due situazioni oscillino con l'andamento delle maree ma che la differenza rimanga costante in tutte le condizioni di marea.

Questo locale incremento di concentrazione si osserva in tutti le analisi dispersive effettuate e che verranno presentati nel seguito. Per la valutazione degli effetti è necessario, quindi, non considerare questo locale incremento di concentrazioni nell'area a nord del molo di sopraflutto e all'interno del porto turistico come dovuto alla presenza della piattaforma chiusa ma bensì a quella del pennello alla foce del Segno.

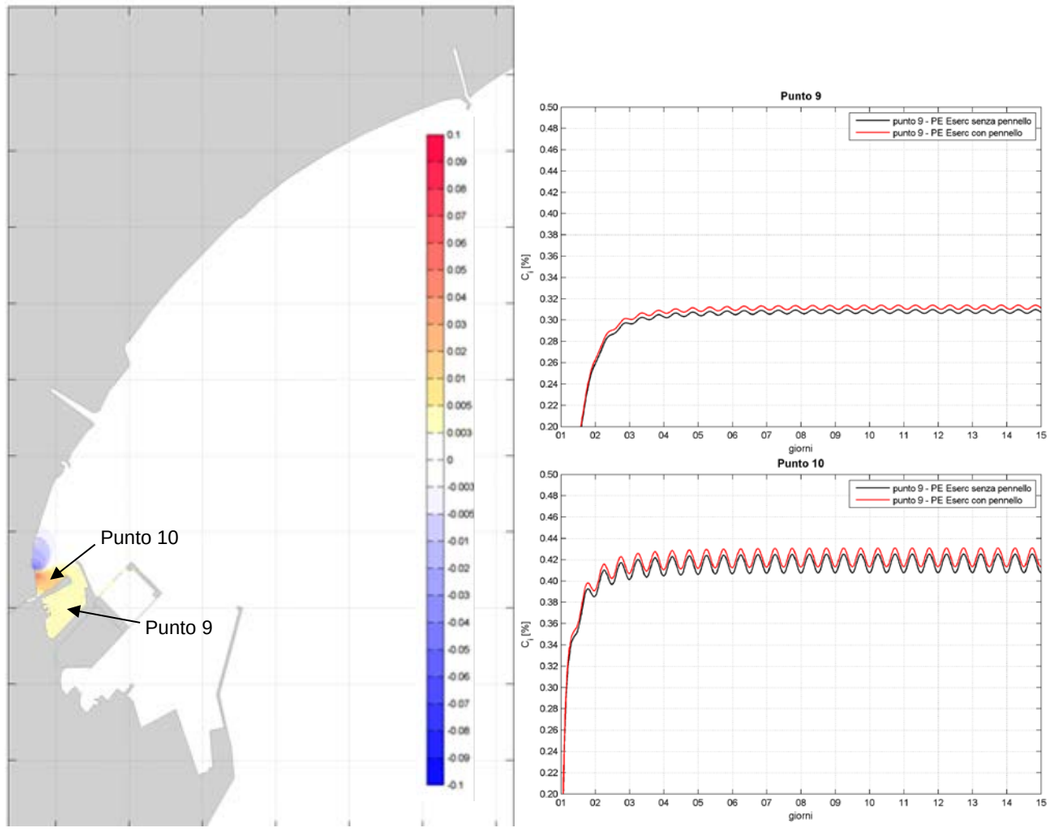



FIGURA 7-2 - EFFETTO DELLA PRESENZA DEL PENNELLO ALLA FOCE DEL T. SEGNO: MAPPA DELLE DIFFERENZE DI CONCENTRAZIONE E ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEL TRACCIANTE RILASCIATO DAL TORRENTE SEGNO IN CONDIZIONE DI ASSENZA DI VENTO.

## 7.2. Dispersione in condizione di vento da Nord-Est

In questo scenario idrodinamico è stato considerato che un vento da Nord-Est con intensità costante di 7 m/s fosse uniformemente distribuito e presente ininterrottamente per tutta la durata della simulazione.

L'andamento della distribuzione della concentrazione dei traccianti per lo scenario con vento da Nord Est, considerando la somma dei contributi di tutti i fiumi, è riportato in Figura 7-3. Sul lato sinistro viene presentata la mappa di concentrazione per la configurazione di riferimento mentre sul lato destro viene presentata la mappa per la configurazione di Perizia di Variante.

Come già osservato nei paragrafi precedenti, l'applicazione di una campo di vento non è in grado di alterare in modo evidente la circolazione idrodinamica nell'area. Gli effetti sono visibili solo sullo strato superficiale dove si instaura una corrente concorde al vento mentre le velocità medie sulla verticale rimangono molto simili a quelle del caso senza vento e sono, quindi, generalmente molto basse.

La dispersione dei traccianti conservativi, di conseguenza, presenta un pattern di diffusione molto simile a quello osservato per il caso senza vento, dal momento che la componente avvettiva del trasporto continua ad avere un peso di secondo ordine rispetto alla componente dispersiva.

Anche per questo scenario valgono le stesse considerazioni svolte al punto precedente; i campi di concentrazione sono del tutto simili a quelli osservati nello scenario senza vento e le uniche differenze apprezzabili sono osservate nell'area compresa tra la schiera di cassoni esterni ed il molo di sopraflutto del nuovo porto turistico.

Questo locale incremento delle concentrazioni è, che come dimostrato nel paragrafo precedente, dovuto non alla presenza della piattaforma

chiusa ma bensì a quella del pennello alla foce del Segno. Al di fuori di quest'area non si osservano apprezzabili differenze.

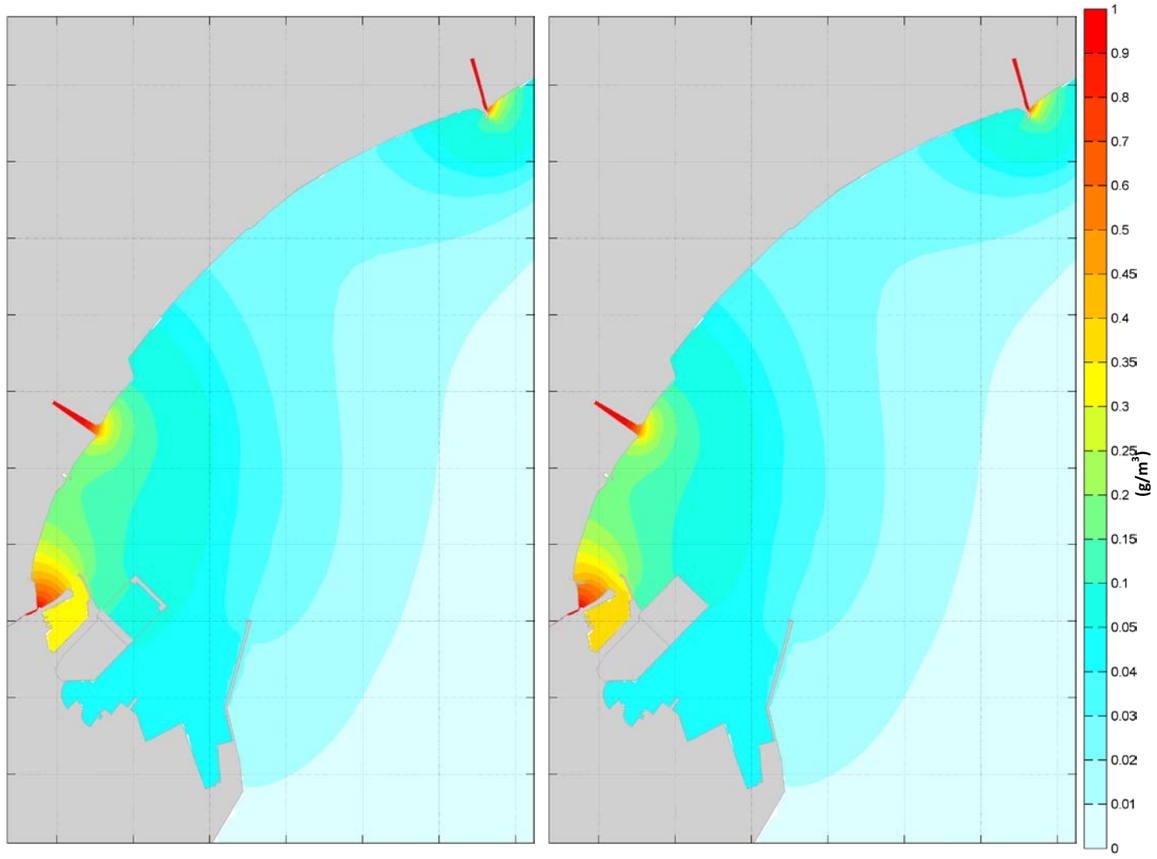



FIGURA 7-3 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD EST - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

### 7.3. Dispersione in condizione di vento da Sud-Est

In questo scenario è stato considerato che un vento da Sud-Est con intensità costante di 7 m/s fosse uniformemente distribuito e presente ininterrottamente per tutta la durata della simulazione.

L'andamento della distribuzione della concentrazione dei traccianti per lo scenario con vento da Sud Est, considerando la somma dei contributi di tutti i fiumi, è riportato in Figura 7-4. Sul lato sinistro viene presentata la mappa di concentrazione per la configurazione di riferimento mentre sul lato destro viene presentata la mappa per la configurazione di Perizia di Variante.

Come osservato nei paragrafi precedenti, l'applicazione di un campo di vento non è in grado di alterare in modo evidente la circolazione idrodinamica nell'area. Gli effetti sono visibili solo sullo strato superficiale dove si instaura una corrente concorde al vento mentre le velocità medie sulla verticale rimangono molto simili a quelle del caso senza vento e sono ,quindi, generalmente molto basse.

La dispersione dei traccianti conservativi, di conseguenza, presenta un pattern di diffusione molto simile a quello osservato per il caso senza vento, dal momento che la componente avvettiva del trasporto continua ad avere un peso di secondo ordine rispetto alla componente dispersiva.

Anche per questo scenario valgono le stesse considerazioni svolte al punto precedente; i campi di concentrazione sono del tutto simili a quelli osservati nello scenario senza vento e le uniche differenze apprezzabili sono osservate nell'area compresa tra la schiera di cassoni esterni ed il molo di sopraflutto del nuovo porto turistico.

Si ricorda che questo incremento non è da dovuto alla presenza della piattaforma chiusa ma bensì a quella del pennello alla foce del Segno Al di fuori di quest'area non si osservano apprezzabili differenze.

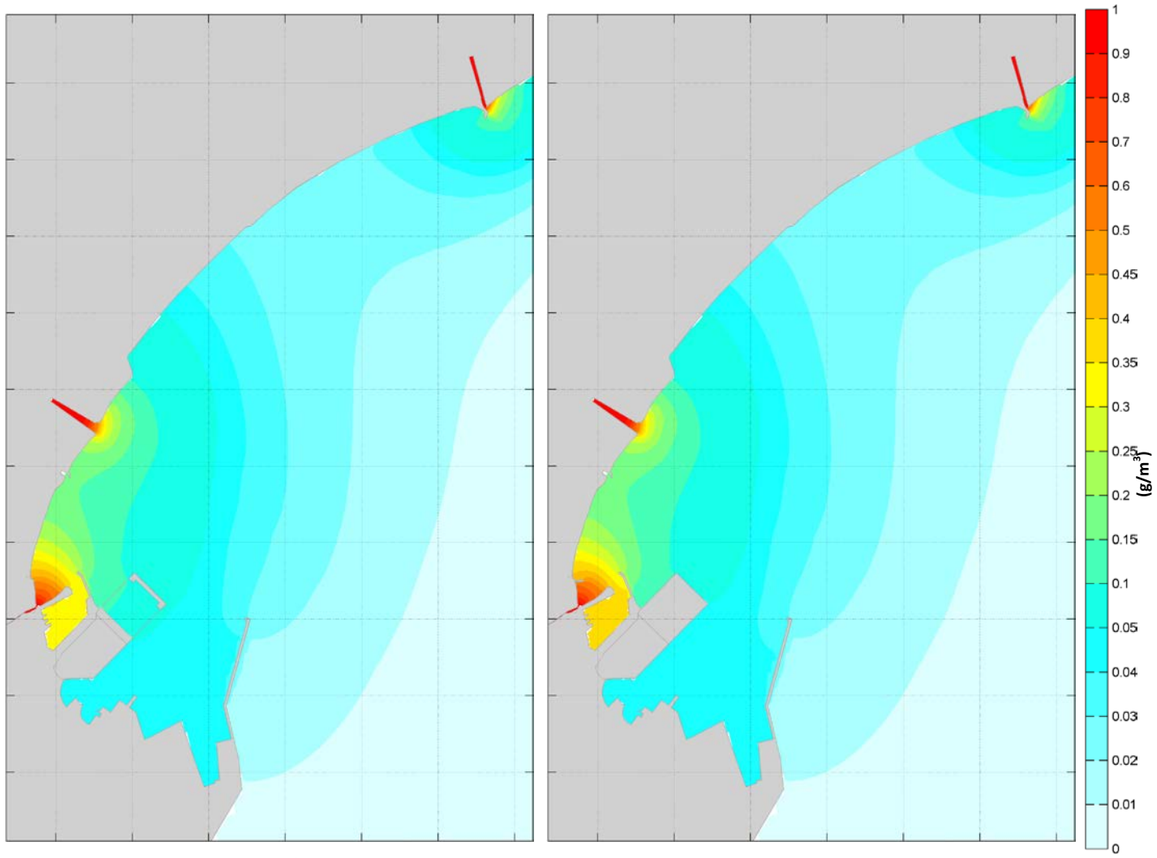



FIGURA 7-4 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA SUD EST - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

## 7.4. Dispersione in condizione di vento da Nord-Ovest

In questo scenario è stato considerato che un vento da Nord-Ovest con intensità costante di 10 m/s fosse uniformemente distribuito e presente ininterrottamente per tutta la durata della simulazione.

L'andamento della distribuzione della concentrazione dei traccianti per lo scenario con vento da Nord Ovest, considerando la somma dei contributi di tutti i fiumi, è riportato in Figura 7-5. Sul lato sinistro viene presentata la mappa di concentrazione per la configurazione di riferimento mentre sul lato destro viene presentata la mappa per la configurazione di Perizia di Variante.

Anche per questo scenario valgono le considerazioni fatte in precedenza e si osserva che le differenze rispetto al caso di riferimento, sono molto marginali e sono apprezzabili sono nell'area adiacente i cassoni esterni.

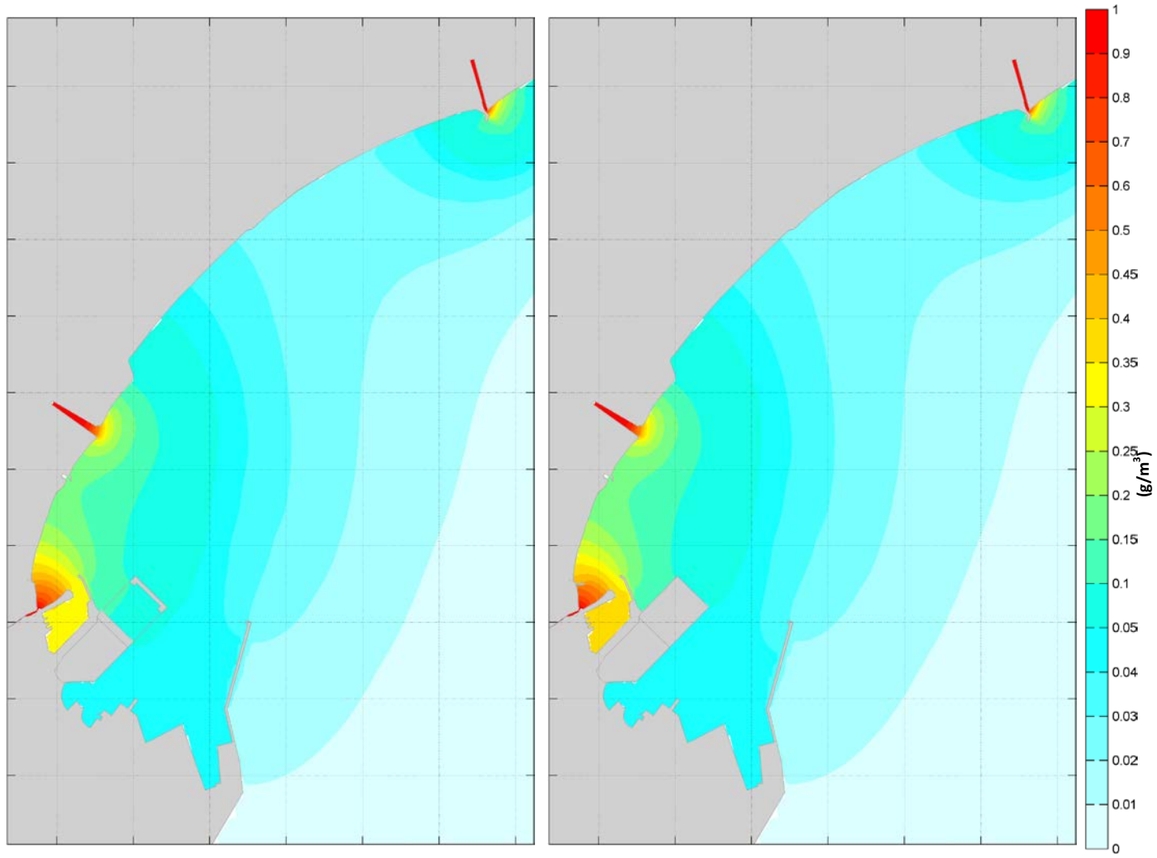



FIGURA 7-5 - ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DEI TRACCIANTI RILASCIATI DAI TORRENTI IN CONDIZIONE DI VENTO DA NORD OVEST - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

# 8. ANALISI DELLA CAPACITÀ DI RICAMBIO

La capacità di ricambio di un sistema fisico è una caratteristica tipica di ciascun ambiente costiero ed esprime la tendenza di un sistema idraulico a ricambiare le acque interne attraverso processi di scambio e trasporto con il mondo esterno.

Nell'ambito del presente studio, la capacità di ricambio viene studiata e quantificata mediante due tipi di analisi: la "fraction analysis" e la valutazione del tempo di ricambio.

## 8.1. La "fraction analysis"

La "fraction analysis" è un indagine eseguita mediante l'utilizzo di modelli numerici che consente di identificare l'andamento della circolazione in una zona ed il contributo delle diverse sorgenti (torrenti, scarichi, ecc.) alla massa totale d'acqua ivi presente.

In altre parole consente di verificare la capacità del sistema di ricambiare una massa d'acqua presente in un istante iniziale sostituendola con acqua proveniente da diverse sorgenti. Essa è, quindi, strettamente collegata alla capacità dispersiva ed alle caratteristiche idrodinamiche del sistema.

Per effetto dell'idrodinamica e della dispersione, l'acqua contenuta nel sistema individuato prima dell'avvio della simulazione, tenderà ad essere sostituita da acqua proveniente dalle altre sorgenti; da quali, in quale quantità e in quanto tempo è il risultato fondamentale della "fraction analysis".

In particolare questa acqua iniziale sarà sostituita rapidamente nelle aree ad alto ricambio (es.: zone di foce) e più lentamente nelle aree a scarso ricambio (es.: zone interne e confinate di bacini lagunari e/o portuali).

La "fraction analysis" si è articolata nei seguenti passi operativi:

- individuazione delle possibili sorgenti che possono fornire acqua al sistema e che, in linea generale, possono essere identificate con gli apporti dei torrenti sfocianti nella baia e gli apporti dal mare.
- identificazione del sistema di cui si vuole analizzare il comportamento. Delimitazione di un'area all'interno del dominio di calcolo e identificazione tramite un codice di ogni sorgente precedentemente individuata;
- simulazione del periodo prescelto e verifica del comportamento di ogni sorgente, analizzando dove e in quale quantità l'acqua proveniente da ogni sorgente si disperde.

Per la "fraction analysis", è stata identificata come zona di interesse nell'ambito del dominio di calcolo (acqua iniziale), la porzione litoranea di mare ottenuta prolungando il segmento esterno della nuova diga foranea fino ad intersecare il litorale a nord della foce del Letimbro. Le altre sorgenti considerate sono: l'acqua del Torrente Segno, l'acqua del Torrente Quiliano e l'acqua del mare, che entra attraverso il contorno "aperto" del modello.

La delimitazione del sistema considerato nelle analisi è presentata in Figura 8-1, dove vengono indicati anche la posizione dei punti di controllo per cui vengono presentati i risultati della "fraction analysis".

Nelle simulazioni eseguite, sono state considerate come forzanti esterne la marea media e le portate dei tre torrenti che sfociano nella baia, come precedentemente definite. Come regime anemometrico, invece, è stata considerata una condizione di calma di vento, in quanto rappresenta una condizione sfavorevole per il ricambio rispetto alla condizione con vento.

Per lo studio della "fraction analysis" è stato seguito lo stesso approccio e sono state considerate le stesse impostazioni precedentemente illustrate; i risultati negli 8 punti di controllo sono riportati da Figura 8-2 a Figura 8-3.

In queste figure l'acqua iniziale è presentata con colore rosso, l'acqua del Torrente Segno con colore giallo, l'acqua del Torrente Quiliano con colore turchese e l'acqua del mare con il colore blu.

Rispetto alla situazione di riferimento, per la configurazione di Perizia di Variante si osserva un andamento molto simile sia nei punti all'interno della rada di Vado che in quelli locati più lontani dall'area portuale.

Dai risultati ottenuti è possibile osservare che:

– alla fine della simulazione rimangono solamente gli apporti esterni, come corretto che sia, che sono costituiti dall'acqua immessa dai torrenti (Segno, Quiliano e Letimbro) e dall'acqua di mare;
– il tempo necessario per la completa sostituzione dell'acqua iniziale è funzione della posizione del punto di controllo rispetto ai punti di immissione degli apporti;
– la percentuale finale dei diversi apporti (cioè il contributo di ciascuna sorgente) è funzione della localizzazione dei punti considerati; all'interno della rada di Vado la frazione dei acqua proveniente dai torrenti Segno e Quiliano è nell'ordine di qualche percentuale, in prossimità delle foci dei torrenti, invece, il contributo del tracciante proveniente dal torrente più vicino vicina tende ad essere la più importante.

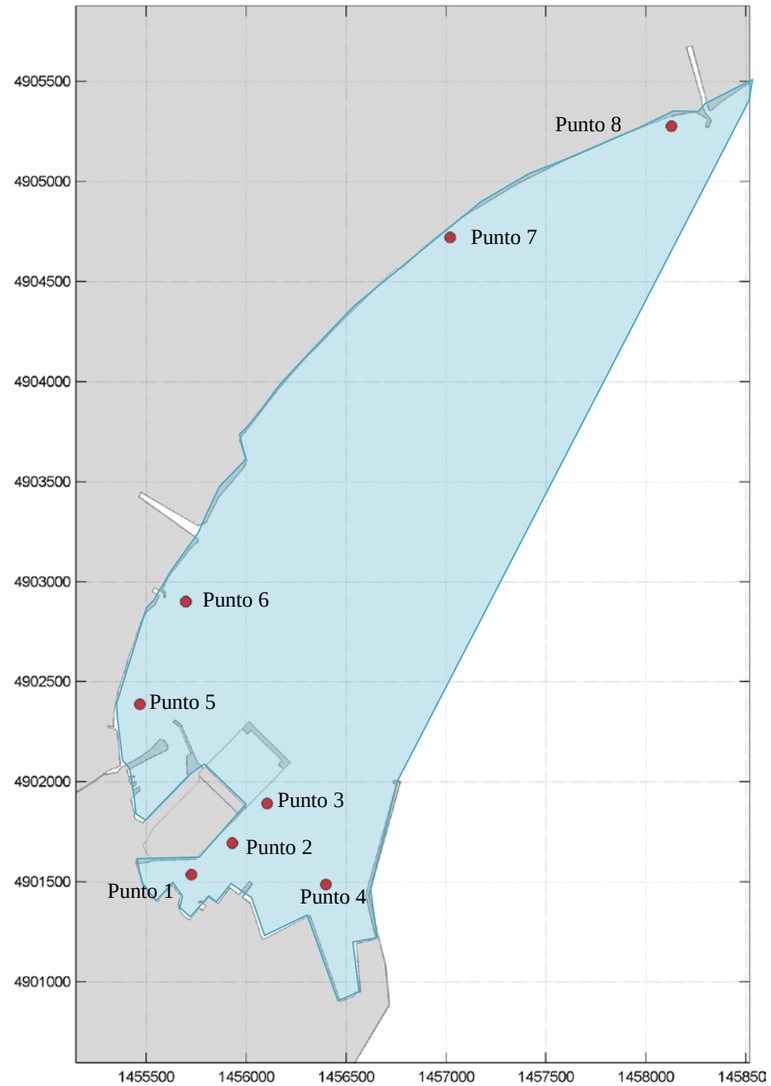



FIGURA 8-1 – DISTRIBUZIONE INIZIALE DEL TRACCIANTE UTILIZZATO PER LA *FRACTION ANALYSIS*. E POSIZIONE DEI PUNTI DI CONTROLLO.

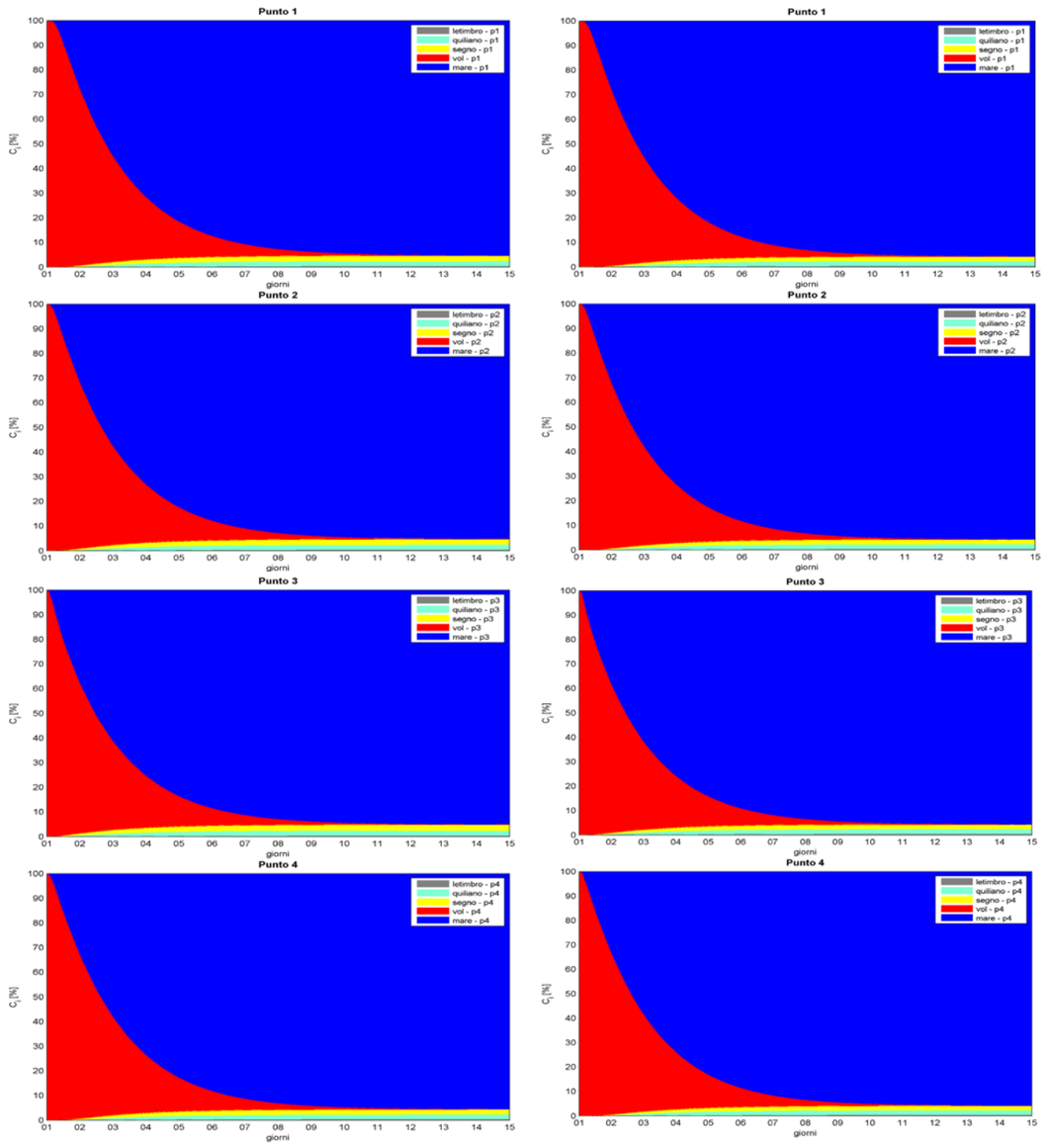



FIGURA 8-2 – RISULTATI DELLA "FRACTION ANALYSIS" PER I PUNTI N° 1, 2, 3 E 4 - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

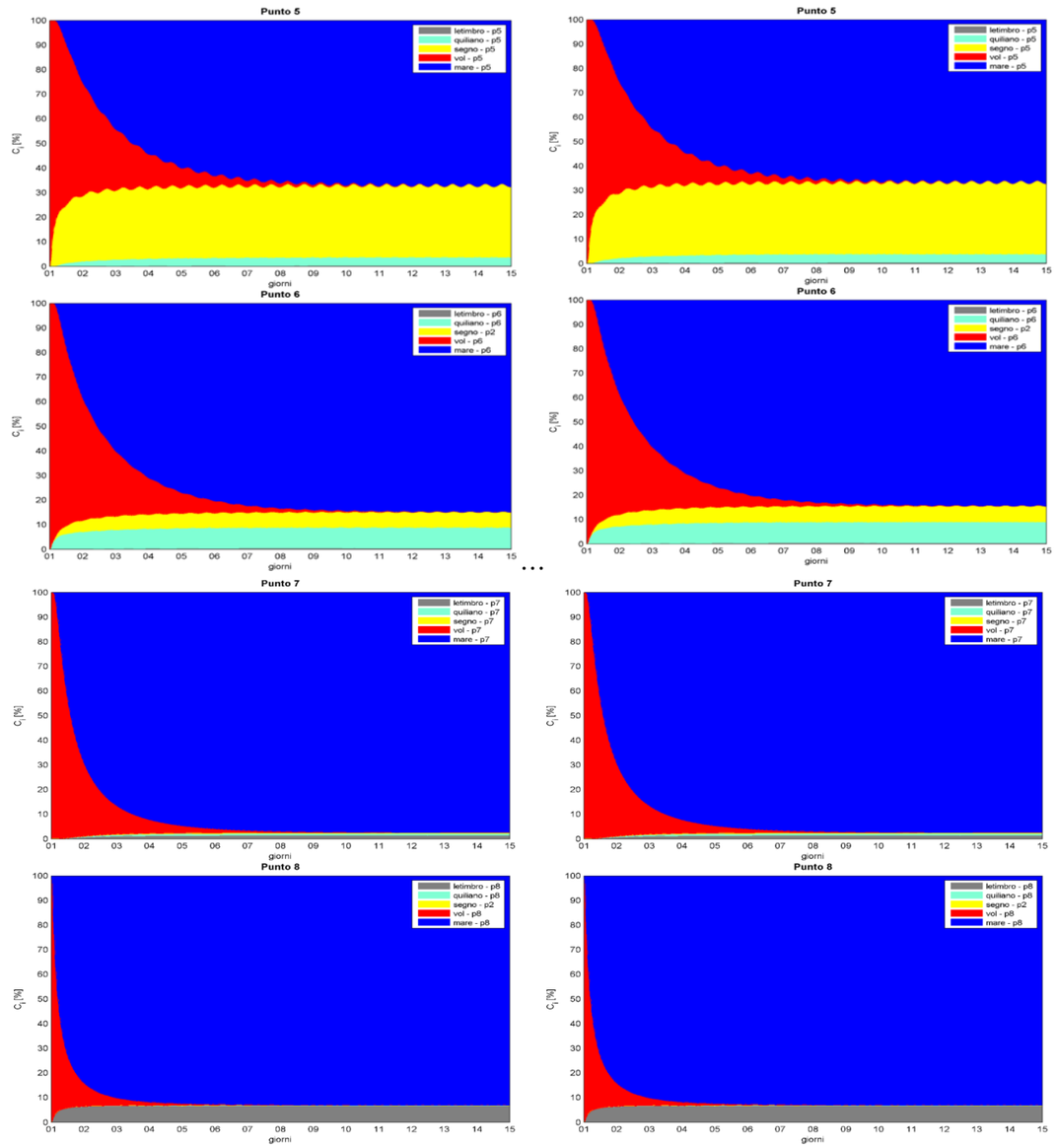



FIGURA 8-3 – RISULTATI DELLA "FRACTION ANALYSIS" PER I PUNTI N° 5, 6, 7 E 8 - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

All'interno della rada di Vado il contributo dei traccianti di origine fluviale, una volta raggiunta la situazione di equilibrio, rimane sempre nell'ordine di qualche percentuale e le acque di origine marina rappresentano la frazione maggiore (oltre il 95%).

Nei punti più lontani, invece, il contributo delle acque di origine torrentizia è tendenzialmente maggiore in funzione della distanza tra il punto di controllo e la foce del torrente considerata.

L'analisi dei dati di concentrazione indica, in altre parole, che le variazioni previste nella configurazione di Variante di Progetto Esecutivo non sono in grado di alterare in modo apprezzabile il comportamento dispersivo dei traccianti conservativi immessi nel sistema.

## 8.2. Tempo di ricambio

Un fenomeno che riveste una particolare importanza nella valutazione degli effetti di opere marittime lungo il litorale è la capacità di ricambio del sistema.

Sono state effettuate analisi modellistiche per la determinazione del "tempo di ricambio" che consiste nel valutare il tempo necessario perché la concentrazione di una sostanza conservativa, inizialmente uniformemente distribuita nell'area di interesse, si riduca di circa il 63% rispetto al valore iniziale.

La simulazione idrodinamica utilizzata per queste analisi è stata eseguita considerando le seguenti condizioni:

- Marea media, come precedentemente definita;
- Assenza di vento;
- Portate dei fiumi sfocianti in mare come precedentemente definite.

Per l'analisi della capacità di ricambio nella baia di Vado Ligure sono state considerate la configurazione di Perizia di Variante e la configurazione di Progetto Esecutivo approvato che costituisce il riferimento per la comparazione dei risultati.

Il "tempo di ricambio" viene definito in letteratura come il tempo necessario affinché il flusso di marea, supposto composto da acqua "pulita", riduca, in un punto, la concentrazione di una sostanza conservativa, inizialmente uniformemente distribuita nell'area (cioè con una concentrazione iniziale uguale in ogni punto della rada portuale), di un fattore pari al numero di Eulero "***e***" (~ 2.718281…).

In termini analitici, si può scrivere che: $C(t) = C_0 e^{-t/\tau}$

Pertanto viene definito come tempo di ricambio, il tempo $\tau$ che è necessario per far diminuire la concentrazione, in quel punto, dalla concentrazione $C_0$ iniziale alla concentrazione $\frac{C_0}{e}$.

Per utilizzare tale parametro è quindi necessario effettuare una simulazione del comportamento di un tracciante passivo che venga immesso inizialmente nel sistema. Viene quindi a determinarsi una situazione iniziale in cui la concentrazione di tale tracciante è uniforme. A partire da tale situazione, viene attivata l'oscillazione di marea, considerata con concentrazione nulla di tracciante entrante, e si seguono le variazioni di concentrazione in diversi punti della area di studio.

L'area corrispondente alla distribuzione iniziale del tracciante conservativo è stata definita in modo da essere sufficientemente estesa per includere l'intera impronta della piattaforma, il bacino della rada di Vado e la fascia litoranea a nord della piattaforma.

In questo modo è possibile, infatti, ottenere delle informazioni sull'effetto della nuova configurazione di perizia di variante del Progetto Esecutivo sia all'interno della rada che lungo il litorale. Il volume iniziale occupato dal tracciante è riportato in Figura 8-4.

Per meglio evidenziare il fenomeno, la concentrazione iniziale uniforme è stata posta pari a 1 unità/$m^3$, anche se si deve tenere conto che, essendo la sostanza considerata conservativa, il tempo di ricambio è invariante rispetto alla concentrazione iniziale.

Nelle simulazioni eseguite non sono stati considerati gli apporti di acqua dolce, in modo da poter ottenere delle valutazioni sulla capacità dispersiva del sistema in relazione alla sola forzante mareale.

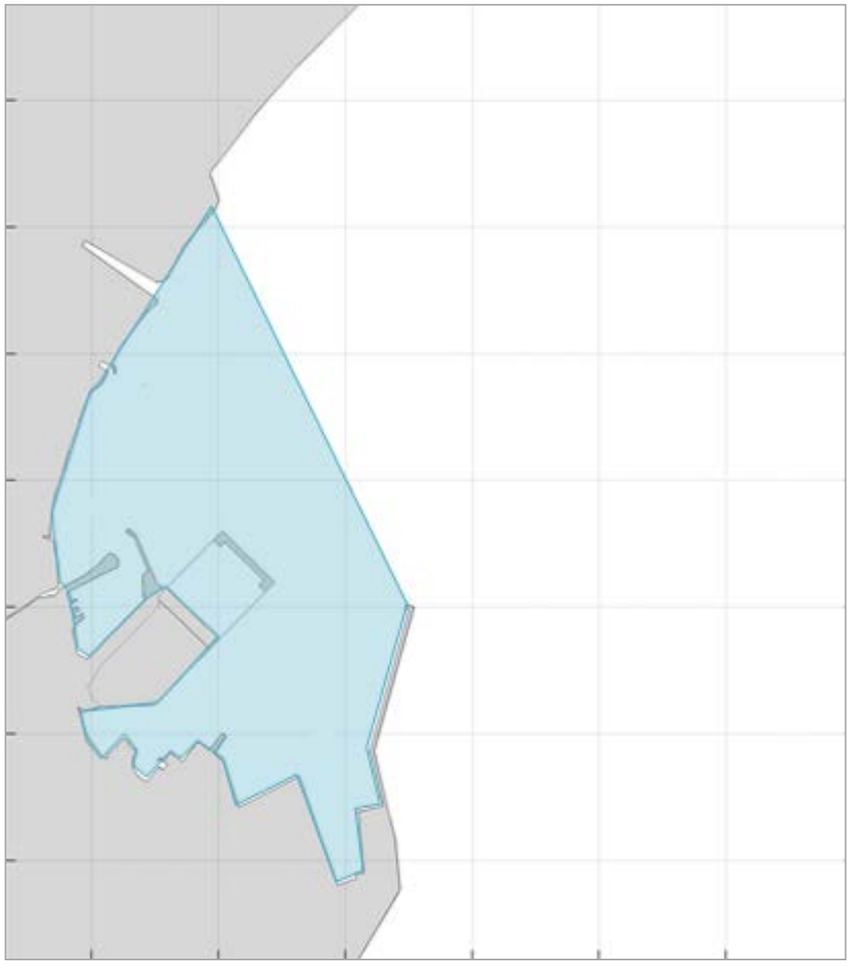


FIGURA 8-4 - DISTRIBUZIONE INIZIALE DEL TRACCIANTE UTILIZZATO PER IL TEMPO DI RICAMBIO.

In Figura 8-5 è riportata la mappa con la distribuzione della durata dei tempi di ricambio (espressi in ore) per la configurazione di riferimento (a sinistra) e per la configurazione di Perizia di Variante (a destra).

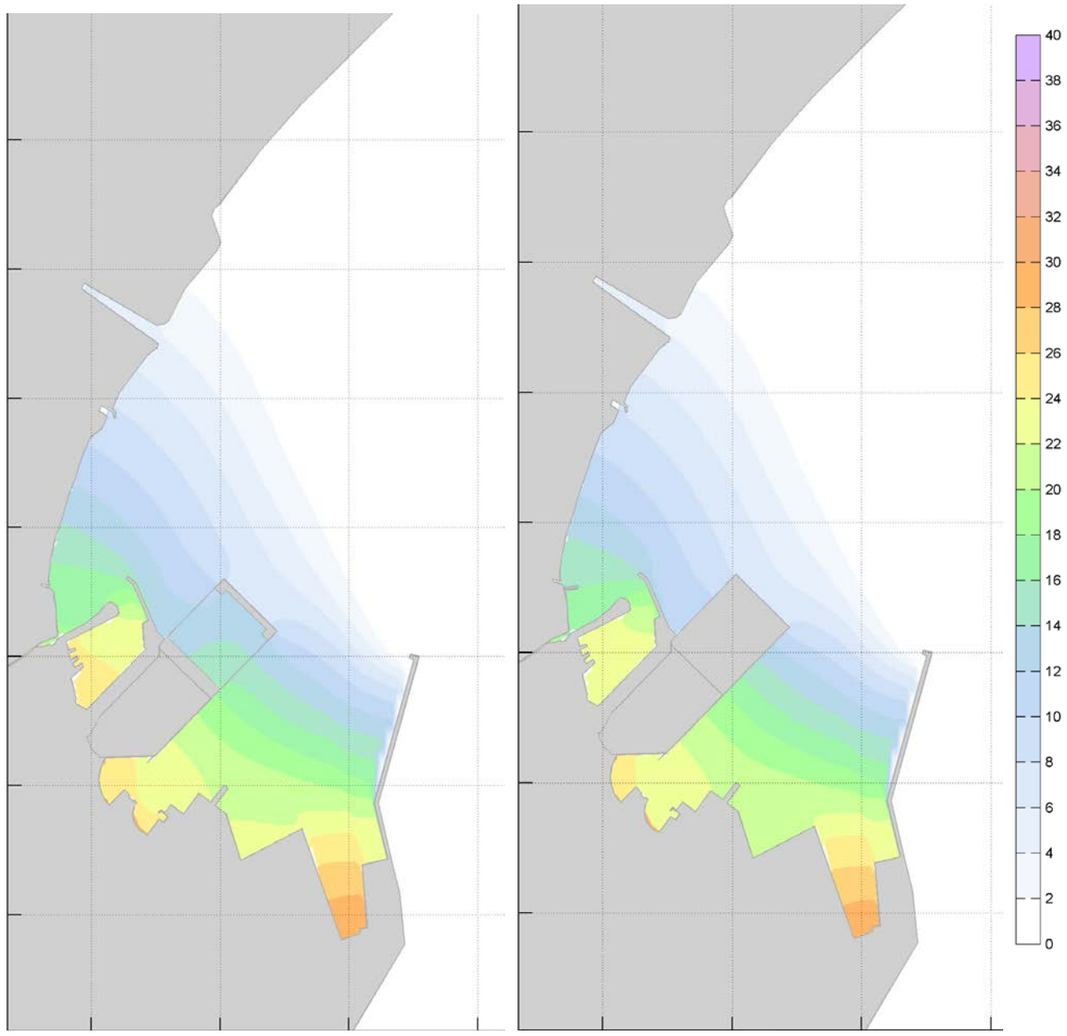



FIGURA 8-5 - DISTRIBUZIONE DEL TEMPO DI RICAMBIO IN ORE - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SX) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (DX).

Dalla figura è possibile notare un pattern della distribuzione molto simile a quello osservato per la relativa configurazione di riferimento. L'intervallo di variabilità del tempo di ricambio varia da poche ore nella fascia più esterna e vicina alla sezione di scambio, fino ad un massimo di circa 28 -30 ore nella zone portuali più interne.

Anche nelle zone costiere adiacenti alle spiagge a nord e a sud della radice della piattaforma, non si osservano apprezzabili cambiamenti rispetto alla situazione di riferimento.

Ad un attento esame si può peraltro notare che la nuova configurazione, con il perimetro della piattaforma completamente chiuso, comporta una leggera tendenza alla diminuzione del tempo di ricambio sia nella rada portuale, a sud-est della piattaforma, così come nel bacino del porto turistico.

Tale riduzione, che si evidenzia con una riduzione dell'ampiezza delle aree colorate più scure, è comunque molto contenuta e dovuta al fatto che la chiusura della piattaforma comporta un minor volume d'acqua che deve essere ricambiato nell'area di controllo.

Viene pertanto confermata la sostanziale equivalenza, in termini di ricambio, delle due configurazioni analizzate.

# 9. ANALISI DELLA DISPERSIONE DI UN TRACCIANTE DI TIPO BATTERICO

L'area litoranea in cui sono previsti in nuovi interventi per la realizzazione della piastra di Vado Ligure, la costruzione del nuovo porto turistico e la risistemazione dei tratti fronte mare, è caratterizzata dalla presenza di lidi balneabili a nord della radice della piattaforma verso i litorali di Zinola e Fornaci e a sud nel tratto compreso tra la piattaforma e porto Vado.

A valle della procedura di screening per le varianti di Progetto Esecutivo, presentata alla Regione Liguria nell'Agosto 2013, era emersa la necessità di indagare ad un livello più approfondito anche il potenziale impatto del progetto sulla qualità delle acque di balneazione.

Una riduzione della capacità di scambio del sistema potrebbe, infatti, determinare un potenziale peggioramento della qualità delle acque litoranee compromettendo così l'uso legittimo delle coste, e la balneazione in prossimità delle spiagge locate a nord ed a sud della piattaforma.

Per rispondere alle richieste della Regione è stato, quindi, predisposto uno studio volto ad analizzare la qualità delle acque costiere con specifico riferimento agli aspetti collegati alla balneazione.

La normativa vigente, il Decreto Legislativo n.116 del 30 maggio 2008 che recepisce la direttiva 2006/7/CE concernente la gestione delle acque di balneazione stabilisce che i principali indicatori utilizzati per valutare la qualità delle acque di balneazione costiere e superficiali sono costituiti dalla concentrazione delle popolazioni batteriche dell'Escherichia Coli e degli Enterococchi Intestinali.

Per la valutazione della qualità delle acque balneazione nel tratto litoraneo di interesse è stato ritenuto di utilizzare come parametro di riferimento per la qualità delle acque, la concentrazione di un inquinante non conservativo rappresentativo una popolazione batterica.

In linea generale il metodo per la valutazione degli impatti di una nuova configurazione presuppone come base di partenza la valutazione del parametro di interesse nella situazione di riferimento di cui sono noti gli andamenti spaziali e temporali e, in una seconda fase, il confronto con la situazione modificata assumendo le stesse forzanti al contorno.

In questo contesto, tuttavia, non essendo possibile esprimere delle valutazioni in termini assoluti sulla qualità delle acque di balneazione data l'insufficienza di dati e la natura occasionale e aleatoria delle contaminazioni batteriche, è stato deciso di utilizzare un approccio di tipo parametrico.

Per valutare l'effetto di una eventuale variazione della capacità di ricambio sulla qualità delle acque di balneazione, in modo del tutto simile a quanto fatto per la diffusione dei traccianti conservativi, sono stati considerati dei rilasci parametrici di un carico batterico per ciascuna potenziale e probabile sorgente di contaminante e sono stati valutati la dinamica nello spazio e nel tempo del carico di inquinante immesso nel sistema.

La procedura seguita nell'ambito di queste analisi si è sviluppata nei seguenti passi:

- raccolta ed analisi dei dati esistenti sulla qualità delle acque
- identificazione delle potenziali sorgenti di inquinamento batterico
- predisposizione del modello per la dispersione di un tracciante di tipo batterico
- identificazione degli scenari di studio
- esecuzione delle simulazioni della dispersione di un tracciante non conservativo di tipo batterico

## I dati disponibili

La prima attività eseguita è stata la raccolta e l'analisi dei dati disponibili di qualità delle acque con particolare riferimento alle misure di concentrazione di contaminanti batterici. Queste analisi hanno avuto un duplice obbiettivo: la caratterizzazione dell'ambiente nella situazione attuale e l'identificazione delle più probabili e potenziali sorgenti di un carico batterico nell'area litoranea in esame.

La base di partenza per le analisi di qualità delle acque è costituita dal set di dati raccolti dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Liguria (ARPAL) nell'ambito della attività per il monitoraggio e classificazione della qualità delle acque di balneazione così come previsto a termine di legge.

ARPA Liguria dispone di una rete di controllo lungo tutto il tratto costiero regionale interessato da attività balneari per un totale di 368 punti, di cui 97 punti nella sola provincia di Savona.

Nell'ambito di questo studio i punti di maggiore interesse sono quelli localizzati in prossimità dell'area di intervento e sono:

- La stazione Foce del Torrente Quiliano immediatamente a nord della foce stessa
- La stazione Aurelia 5 a sud della foce del Quiliano
- La stazione Aurelia 100
- La stazione Foce del Torrente Segno
- La stazione Aurelia 320 in località porto Vado

La mappa con l'ubicazione dei punti di misura di ARPAL è riportata di seguito in Figura 9-1.




FIGURA 9-1 - UBICAZIONE DELLE STAZIONI ARPAL PER LA MISURA DEI PARAMETRI DI QUALITÀ DELLE ACQUE DI BALNEAZIONE

Il set di dati ambientali sulla qualità delle acque reso disponibile da ARPAL non si presenta tuttavia omogeno né in riferimento alla frequenza dei campionamenti eseguiti né ai parametri rilevati. Le modalità di monitoraggio ed acquisizione dei dati sono, infatti, cambiate nel corso del tempo in seguito al recepimento della nuova Direttiva Europea sulle acque di balneazione ed al conseguente aggiornamento della normativa tecnica di riferimento.

La normativa nazionale sulle acque di balneazione in vigore fino al 2009 derivava dalla direttiva comunitaria n. 76/160 dell'8 dicembre 1975 che perseguiva due obbiettivi fondamentali: la tutela della salute pubblica e la salvaguardia dell'ambiente, ed è stata recepita in Italia con il DPR n. 470 dell'8 giugno 1982.

Per definire la balneabilità delle acque il DPR 470/82 considerava 12 parametri: tre erano indicatori di inquinamento fecale (Coliformi totali, Coliformi fecali, Streptococchi fecali); due, facoltativi, erano rivolti alla ricerca di specifici patogeni (Salmonella e Enterovirus); altri quattro parametri erano essenzialmente indicatori di inquinamento di origine industriale (pH, fenoli, sostanze tensioattive, oli minerali); i restanti tre parametri (ossigeno disciolto, colorazione, trasparenza) fornivano indicazioni correlabili ai processi eutrofici e ai problemi estetici delle acque ma potevano anche interessare l'aspetto igienico-sanitario in caso di "fioritura" di alghe produttrici di biotossine. La misura dei parametri di qualità era prevista con una frequenza minima bimensile secondo i metodi previsti in letteratura.

La nuova normativa sulla qualità della acque che è subentrata a partire dal 2010 alla vecchia normativa è riportata nel Decreto Legislativo 30 maggio 2008, n. 116 che recepisce la Direttiva Europea 2006/7/CE relativa alla gestione della qualità delle acque di balneazione e abroga la direttiva 76/160/CEE.

La nuova legge stabilisce i criteri e parametri per la valutazione delle acque di balneazione ed istituisce anche un sistema per la gestione e la classificazione delle acque di balneazione.

In conformità a questa normativa i nuovi parametri di controllo sono:
– la concentrazione degli Enterococchi intestinali espressi in UFC/100 ml
– la concentrazione dell'Escherichia Coli espressi in UFC/100 ml

Oltre a questi, per ciascuna stazione, è previsto anche il monitoraggio di altri parametri di tipo fisico quali: Temperatura aria, Temperatura acqua, Direzione vento, Intensità vento, Stato del mare, Direzione di provenienza onde, Intensità della corrente, Stima visuale altezza onde, Condizioni meteo, Presenza di pioggia e Copertura nuvolosa.

Il Decreto Legge stabilisce anche le norme tecniche che definiscono le distanze minime tra due punti di prelievo, le modalità di prelevamento dei campioni e le metodiche analitiche. La norma stabilisce anche che i campioni devono essere prelevati 30 centimetri sotto la superficie dell'acqua e in acque profonde almeno 1 metro.

Le date di prelievo sono distribuite nell'arco di tutta la stagione balneare, con un intervallo tra le date di prelievo che non supera mai la durata di un mese. Nel caso del superamento dei limiti di legge sono previste delle misure aggiuntive di controllo secondo quanto previsto dalla legge.

Il set di dati di qualità delle acque a disposizione può dunque esser suddiviso in due blocchi: il primo raccoglie dati di qualità dal 2006 al 2009 e contiene le misure sulla concentrazione di Coliformi Totali e Fecali oltre che ad altri parametri fisici/chimici. Il secondo copre il periodo dal 2010 al 2014 e raccoglie i dati sulle concentrazioni

dell'Escherichia Coli e degli Enterococchi intestinali ed altri parametri fisici.

Una volta raccolti e classificati i dati è stato, quindi, possibile effettuare analisi di tipo statistico. In particolare sono state analizzate le correlazione spaziali e temporali tra i dati di concentrazione misurati nelle diverse stazioni e la correlazione tra i dati di concentrazione e le precipitazioni (misurate alle stazioni di Savona e di Capo Vado) per verificare se vi fosse un legame tra eventi di contaminazione batterica le portate dei torrenti. Per dettagli circa l'analisi dei dati si rimanda all'Appendice A.

Dall'analisi dei dati è stato osservato che:

– i livelli di qualità delle acque nella situazione attuale, sulla base dei criteri stabiliti dalla normativa vigente, sono classificati come "eccellenti". Tutto il litorale savonese ha ricevuto negli ultimi anni la certificazione di "bandiera blu";
– gli episodi di superamento dei livelli limite stabiliti dalla legge sono occasionali e si esauriscono nell'arco di 24 ore; in riferimento alla precedente normativa (DPR 470/82) si sono registrati complessivamente 11 superamenti occasionali della concentrazione di Coliformi fecali. In riferimento invece alla nuova normativa (D.Lgs 116/08) si sono registrati 2 superamenti dei limite di legge nell'estate del 2014 sia nei valori di concentrazione all'Escherichia Coli che nei valori degli Enterococchi intestinali. In ogni caso comunque non si sono mai manifestati più superamenti consecutivi giornalieri dei limiti di legge.
– nei casi caratterizzati da episodi di superamento dei limiti di legge o nei quali è visibile un apprezzabile incremento delle concentrazioni batteriche, non si è osservata una correlazione spaziale a larga scala, cioè un aumento dei valori su tutte le stazioni considerate ma in alcune circostanze si osservano valori più alti anche nelle stazioni limitrofe.
– non vi è apparente correlazione tra le precipitazioni misurate e i dati concentrazione.

Sulle base di queste osservazioni è stato possibile concludere che eventuali contaminazioni batteriche nell'area sono molto probabilmente legate a delle immissioni accidentali di un carico batterico che viene quindi recapitato a mare attraverso i rii ed i torrenti che sfociano nell'area.

L'origine di queste immissioni non è definita; potrebbe essere legata a malfunzionamenti delle condotte di adduzione del depuratore civile di Savona oppure a scarichi occasionali di altra natura.

In conclusione, quindi, le principali sorgenti identificate di un carico batterico sono rappresentate dai Torrenti Segno, Quiliano e Letimbro e dai rii minori quali il Rio Fontanazza, il Rio Lusso ed il Rio Sant'Elena.

L'ubicazione delle fonti di contaminazione considerate in questo studio è riportata in Figura 9-2.

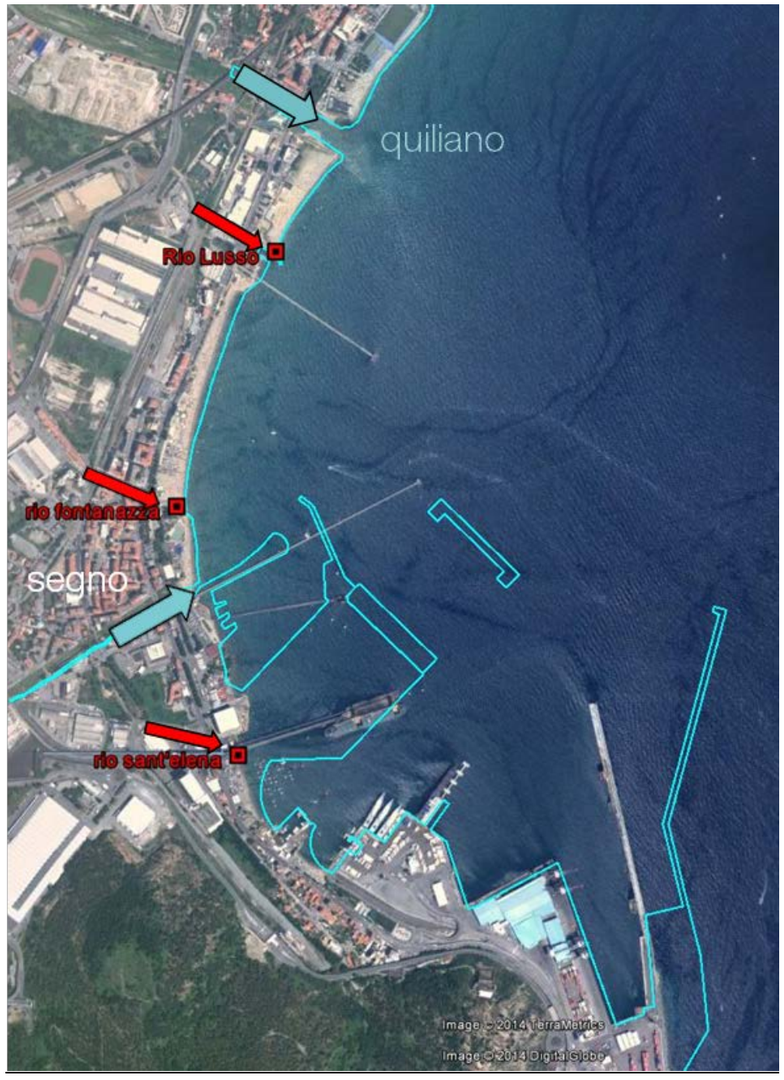



FIGURA 9-2 – POSIZIONE DEI RILASCI DEI CARICHI BATTERICI IN CORRISPONDENZA DEI CORSI D'ACQUA E RII SFOCIANTI NELLA RADA DI VADO.

**Il modello per la dispersione di un tracciante non conservativo di tipo batterico**

Il modello utilizzato per lo studio della dispersione di un inquinante di tipo batterico è il Delft3D-WAQ, il modulo per lo studio della qualità delle acque che fa parte della più ampia suite di software Delft3D, un sistema integrato di modelli numerici sviluppato presso i laboratori dell'istituto di ricerca olandese "Deltares" per la simulazione in una schematizzazione bi e tri dimensionale dei processi che determinano i flussi, il trasporto di sedimenti, la propagazione del moto ondoso, la qualità delle acque e l'ecologia di un ambiente acquatico costiero e fluviale.

Il modello Delft3D-WAQ è in grado di riprodurre tutti i principali processi di tipo fisico, (bio) chimico e biologico che avvengono in un ambiente acquatico marino/fluviale e di determinare, quindi, l'evoluzione sia nello spazio che nel tempo dei principali parametri che descrivono da un punto di vista qualitativo lo stato del corpo idrico.

Il modello utilizza come base di riferimento per il calcolo dei processi, il database idrodinamico generato dal corrispettivo modulo idrodinamico Delft3D-FLOW, in cui sono archiviati, per ciascun cella di calcolo ed in molteplici istanti di tempo, le informazioni idrodinamiche riguardanti i flussi, i livelli del tirante idrico, la temperatura, la salinità, la viscosità e la diffusività.

In particolare, il Delft3D-WAQ utilizza delle librerie di calcolo basate su delle formulazioni matematiche riconosciute in letteratura scientifica, che sono in grado di simulare i processi che regolano la mortalità e la dinamica di una popolazione batterica sottoposta a delle forzanti naturali. In particolare in questo studio è stato fatto riferimento alle formulazioni empiriche sviluppate da Mancini (1978) per la valutazione del $T_{90}$ ovvero il tempo necessario per abbattere del 90% la concentra-

zione iniziale del carico batterico ("*Numerical estimates of Coliform bacteria mortality rates under various conditions*").

Nelle presenti analisi, la dinamica della popolazione batterica è simulata supponendo un tasso di decadimento del primo ordine secondo la formulazione:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -k \times C(x,t)$$

in cui:

| | |
|---|---|
| $C$ | è la concentrazione batterica |
| $t$ | il tempo |
| $x$ | il vettore indicante la posizione spaziale |
| $k$ | il coefficiente di decadimento batterico |

Il coefficiente di decadimento $k$ esprime il tasso di mortalità della popolazione batterica ed è in generale un parametro che dipende dalla intensità della radiazione ultravioletta, il principale agente di inattivazione della carica batterica, dalla salinità, dalla temperatura dell'acqua e dalle caratteristiche peculiari del ceppo batterico.

Il modello matematico utilizza come base di riferimento la medesima schematizzazione tri dimensionale, caratterizzata dalla suddivisione della colonna d'acqua in 5 σ-layers di spessore variabile del modello idrodinamico così come definito nel paragrafo 3.1.

Nel modello utilizzato viene considerata la variazione della salinità dovuta alla dispersione dell'acqua dolce proveniente dai fiumi. La temperatura dell'acqua e l'intensità della radiazione ultravioletta, invece, sono stati considerati costanti ed uniformi assumendo dei valori tipici di uno scenario estivo.

Il tasso di mortalità della popolazione batterica (in questo caso l'Escherichia Coli), risulta, quindi, un parametro variabile nello spazio, nella colonna d'acqua e nel tempo.

**La taratura del modello nella situazione attuale**

Una volta predisposto il modello dispersivo è stato effettuata una taratura, seppur semplificata data l'esiguità dei dati disponibili, confrontando i risultati ottenuti con il modello con i dati misurati nelle diverse stazioni per alcuni eventi considerati significativi.

Per la taratura del modello sono stati identificati, sulla base dei dati raccolti, 5 eventi caratterizzati da livelli significativi di concentrazione batterica.

Non essendo disponibili informazioni sui carichi batterici alla sorgente, per ciascuno di questi casi sono state eseguite delle simulazioni modelistiche variando in modo sistematico sia la concentrazione del carico batterico alla sorgente sia i parametri che regolano la dinamica della mortalità batterica e verificando che il campo di concentrazione calcolato dal modello fosse coerente con i dati misurati

Considerata la quasi totale assenza di vento e corrente rilevate durante le misure è stato deciso di far riferimento come base idrodinamica ad uno scenario meteomarino caratterizzato da una marea media e dall'assenza di vento.

Per una descrizione più accurata della taratura del modello dispersivo batterico e degli scenari di calibrazione si rimanda all'Appendice A.

A titolo di esempio si riportano nelle Figure da Figura 9-3 a Figura 9-4 i risultati ottenuti in riferimento a due eventi misurati, l'evento del 2 settembre 2013 e l'evento del 6 Giugno 2013.

Nelle figure i valori misurati sono rappresentati da cerchietti colorati mentre i valori calcolati dal modello vengono presentati come curve di iso-concentrazione. Entrambi i valori si riferiscono ai livelli di concentrazione misurati nello strato superficiale della colonna d'acqua. Si noti che i limiti superiori delle scale di colore nelle figure sono diversi.

Nell'evento del 2 Settembre 2013 si possono osservare che nelle stazioni in prossimità della foce del Quiliano (Stazione Foce Quiliano) e del Segno (Stazione Foce T. Segno) i valori misurati della concentrazione della Escherichia Coli erano superiori a 250 UFC/100 ml.

La stazione Aurelia 5 immediatamente a sud della foce del Quiliano riportava un valore di 99 UFC/100 ml mentre la stazione Aurelia 100 situata tra le foci dei due torrenti i valori erano più bassi e pari a 64 UFC/100ml.

Considerando che i valori più elevati di concentrazione erano stati misurati vicino alle foci dei torrenti è stata, quindi, eseguita una simulazione ipotizzando un rilascio costante in corrispondenza dei due torrenti. I risultati della simulazione indicano che, con queste condizioni di rilascio, si genera un campo di concentrazione verosimile alla situazione effettivamente misurata.

Nelle stazioni Foce T. Segno e Aurelia 100 si osserva un'ottima corrispondenza dei valori, mentre in prossimità del Torrente Quiliano la corrispondenza appare soddisfacente anche se meno accurata.

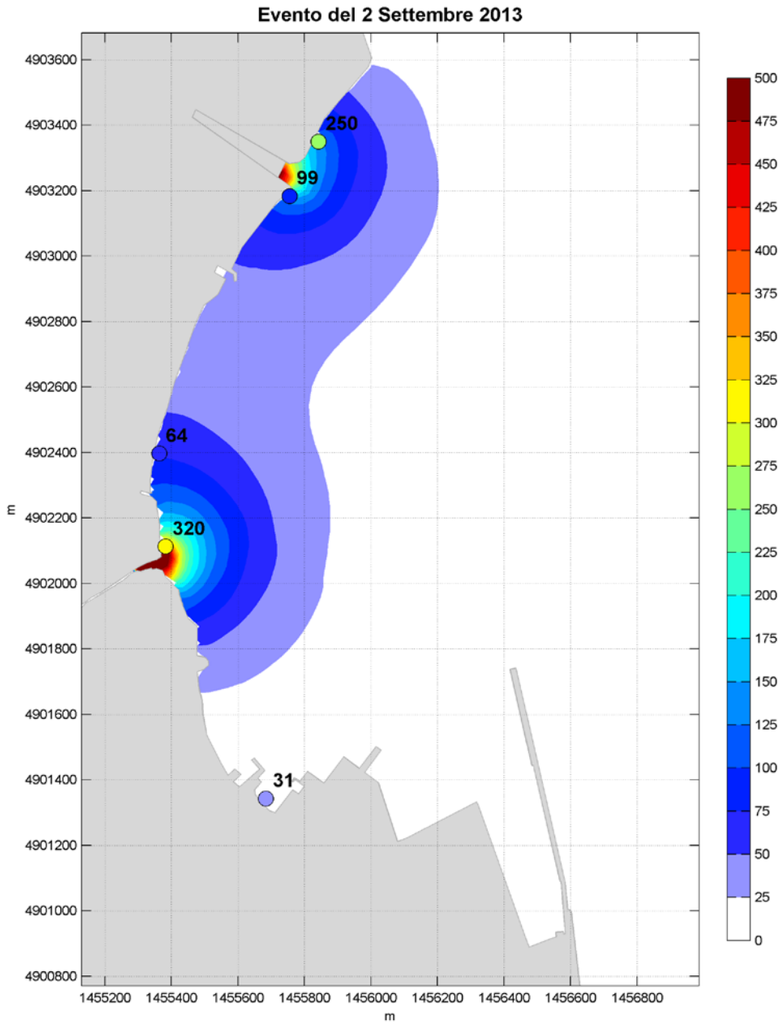



FIGURA 9-3 - EVENTO DEL 2 SETTEMBRE 2013 – CONCENTRAZIONE DELL'ESCHERICHIA COLI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE

Nell'evento del 6 Giugno 2013 è possibile osservare dei valori significativi (ma comunque al di sotto dei limiti di legge) di concentrazione dell'Escherichia Coli nelle stazioni ARPAL Aurelia 100 e Foce T. Segno con dei valori misurati pari rispettivamente a 344 e 65 UFC/100ml. Nelle rimanenti stazioni di misura i valori di Escherichia coli sono risultati assenti o molto bassi.

Considerando che le stazioni più vicine alle foci dei Torrenti Quiliano e Segno presentavano dei valori molto bassi, è stata eseguita una simulazione numerica ipotizzando un solo rilascio in corrispondenza del Rio Lusso, una sorgente posta tra le due stazioni di misura dove era stato misurato un incremento della concentrazione batterica.

I risultati della simulazione denotano una corrispondenza con i valori misurati molto soddisfacente in entrambi i punti di controllo; dalle mappe della concentrazione si osserva anche un rapido decadimento della concentrazione batterica che scende sotto la soglia di 50 UFC/100 ml nel raggio di qualche centinai di metri dal punto sorgente.

Dai risultati del modello si evince che un eventuale immissione di un carico batterico è soggetta ad un rapido decadimento nel raggio di qualche centinaia di metri, come si può notare dall'andamento delle curve di iso-concentrazione.

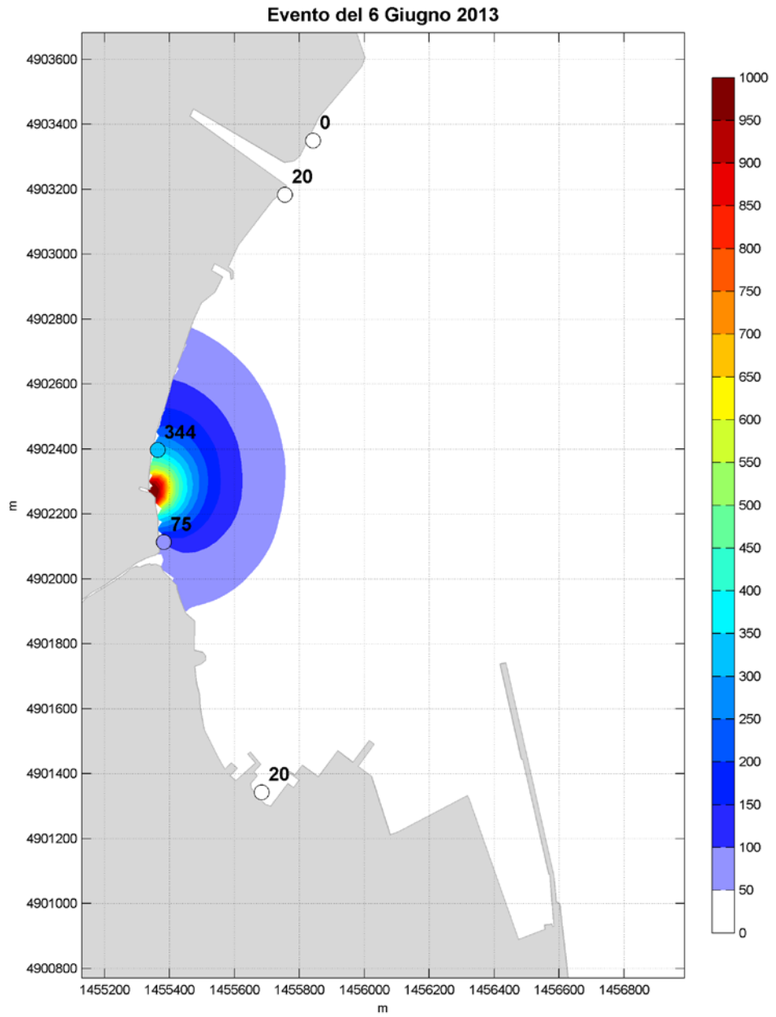



FIGURA 9-4 - EVENTO DEL 6 GIUGNO 2013 – CONCENTRAZIONE DELL'ESCHERICHIA COLI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE

**Le analisi modellistiche**

Una volta verificato che il modello fosse in grado di rappresentare in modo adeguato la dinamica della mortalità della popolazione batterica nella situazione attuale, sono state eseguite delle simulazioni per verificare l'impatto di uno scarico batterico sulle acque del litorale nella configurazione di Progetto Esecutivo approvata (riferimento) e nella configurazione di Perizia di Variante. L'impatto delle varianti introdotte sulla capacità dispersiva del tracciante batterico è stata valutata comparando i risultati ottenuti nelle due configurazioni.

La valutazione è stata effettuata considerando uno scenario meteomarino caratterizzato dall'assenza di vento e da una marea media come riportato nei paragrafi precedenti. La condizione meteo marina senza vento è infatti il caso più critico in quanto caratterizzato da una minore capacità di trasporto e, quindi, di minore dispersione del tracciante batterico.

Nella predisposizione delle simulazioni sono state fatte le seguenti assunzioni:

– è stato considerato un tracciante differente per ciascuna potenziale sorgente precedentemente identificata in modo da valutare l'effetto di ciascuna singola immissione;
– a ciascuna sorgente è stato imposto un rilascio unitario (pari a $1 m^3/s$) costante e continuo con una concentrazione batterica pari a 10000 MPN/100ml per una durata di 72 ore; la simulazione è stata quindi fatta proseguire per altre 48 (quindi per un totale di 120 ore) fino alla completa scomparsa della concentrazione batterica su tutto il dominio di calcolo;
– sono stati considerati i medesimi parametri fisici e biologici per la definizione del $T_{90}$ e del tasso di mortalità batterica, come definiti durante la fase di taratura.

Per ciascuna simulazione eseguita sono stati estratti i campi di concentrazione dell'Escherichia Coli a differenti istanti temporali a partire dall'istante finale dello scarico. I livelli di concentrazione si riferiscono allo strato superficiale della colonna d'acqua, ovvero quello di maggiore interesse ai fini della balneazione.

I risultati delle simulazioni per i 4 differenti rilasci considerati sono riportati da Figura 9-5 a Figura 9-8, in riferimento alla configurazione di riferimento (sopra) e a quella di Perizia di Variante (sotto).

Le mappe spaziali della concentrazione relativa sono riferite al livello superficiale della colonna d'acqua. La concentrazione relativa (in questo caso in per mille) è definita come il rapporto tra la concentrazione $C(x,t)$ in un punto $x$ del dominio di calcolo al tempo $t$ e la concentrazione $C_0$ al rilascio. Questo rapporto indica anche l'abbattimento della concentrazione rispetto al carico iniziale immesso nel sistema.

Le mappe della concentrazione relativa si riferiscono a tre istanti temporali: all'istante finale del rilascio in cui si manifestano i massimi livelli di concentrazione (T = 72 ore), a tre ore dalla fine del rilascio e a 6 ore dalla fine del rilascio.

Dai risultati si può osservare che:

– I campi di concentrazione dei traccianti batterici presentano un pattern molto simile a quello osservato per la situazione di riferimento del Progetto Esecutivo approvato. Il tracciante, infatti, tende a disperdersi molto rapidamente attorno alla sorgente e nel raggio di qualche centinaia di metri il carico batterico viene diluito sotto la soglia di valutazione.
– In termini generali non si osservano significative differenze tra la situazione di Perizia di Variante e quella di riferimento; l'area in cui si notano delle differenze è localizzata principalmente in corrispondenza dell'area a nord della piattaforma e nella porzione di mare di fronte al nuovo molo della darsena turistica.
– In riferimento al T. Segno si nota una maggiore persistenza di concentrazione all'interno del bacino del porto turistico, dovuto però all'effetto deflettente della portata del Segno verso l'imbocco del porticciolo e, quindi al fatto che una maggior quantità di acqua con presenza di tracciante viene indirizzata verso il porto turistico stesso. Le differenze osservate rispetto alla situazione di riferimento sono piccole nell'istante finale della simulazione corrispondente al momento di massima concentrazione del tracciante batterico (t = 72 ore) e tendono ulteriormente a diminuire nelle ore successive. Come già sottolineato precedentemente, questa variazione non è tanto dovuta alla variazione della configurazione della piattaforma, quanto alla presenza del pennello posto a protezione della foce del Segno.
– In riferimento al Rio Sant'Elena si osserva un leggero aumento della concentrazione relativa a ridosso dei cassoni esterni nell'istante finale della simulazione che tende anch'esso a diminuire nelle ore successive. Anche in questo caso il decadimento del carico batterico prima della completa scomparsa è rapido; nell'ordine di 9 ore.
– L'effetto combinato della dispersione e della mortalità naturale batterica fa sì che il carico batterico venga abbattuto sotto la soglia del 1 per mille in un tempo ed in uno spazio molto ridotto. L'inserimento della conterminazione con cassoni della piattaforma a notevole distanza dalla linea di costa non è in grado di interferire sulla dinamica dispersiva del tracciante e l'effetto che ne risulta è pertanto minimo e del tutto trascurabile.

In conclusione, in prossimità della costa, e cioè nelle aree adibite a balneazione, le differenze che si vengono a creare in presenza della configurazione della Perizia di Variante e in quella di riferimento sono da considerare trascurabili. Differenze leggermente più significative, ma pur sempre trascurabili, di evidenziano a ridosso dei cassoni di conterminazione della nuova piattaforma, in area portuale, e comunque di entità tali da non costituire un potenziale problema

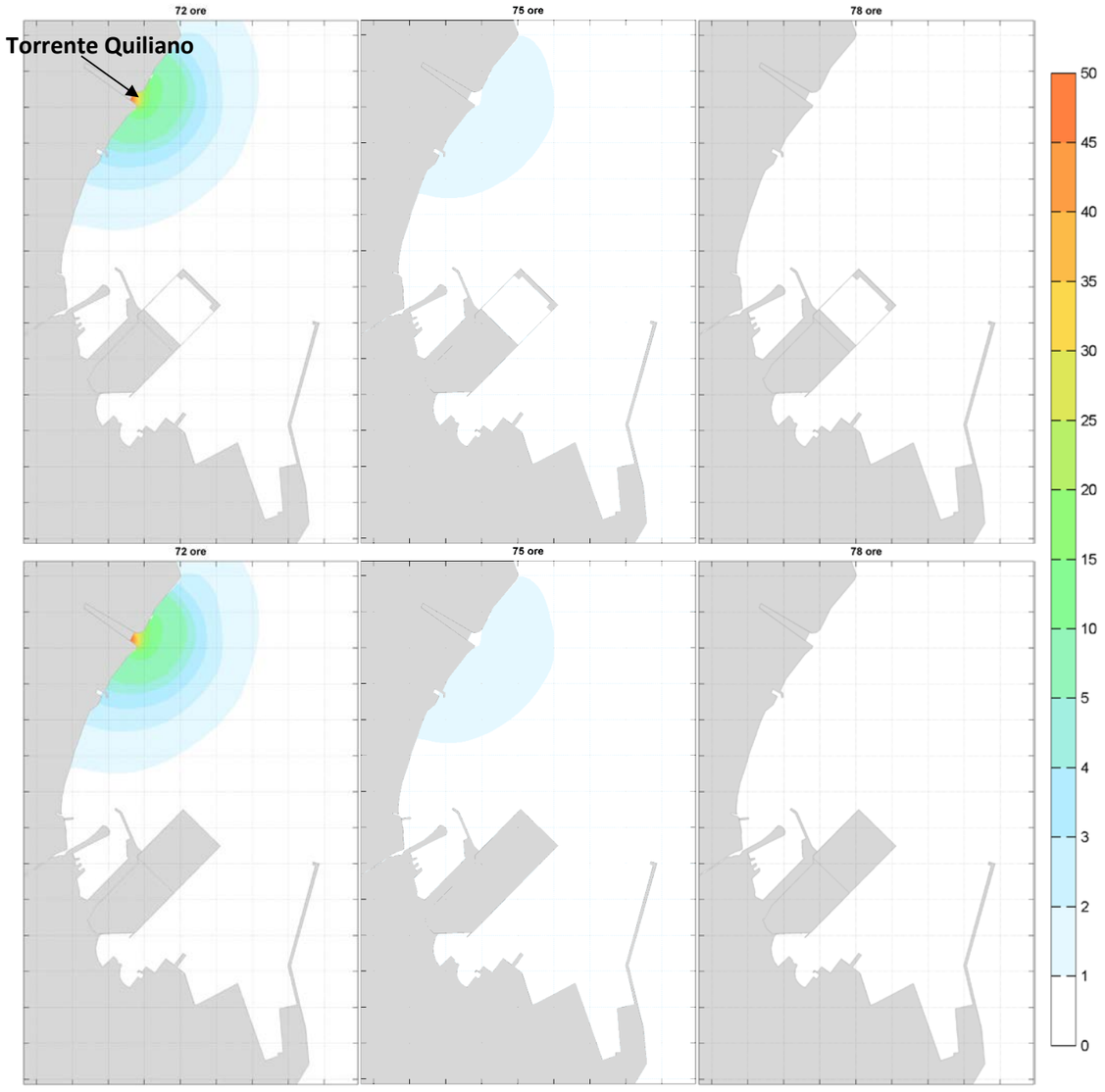



FIGURA 9-5 – RILASCIO TORRENTE QUILIANO - CONCENTRAZIONE DI ESCHERICHIA COLI ($C/C_0$ X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE – SCENARIO DI RIFERIMENTO (SOPRA) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (SOTTO).

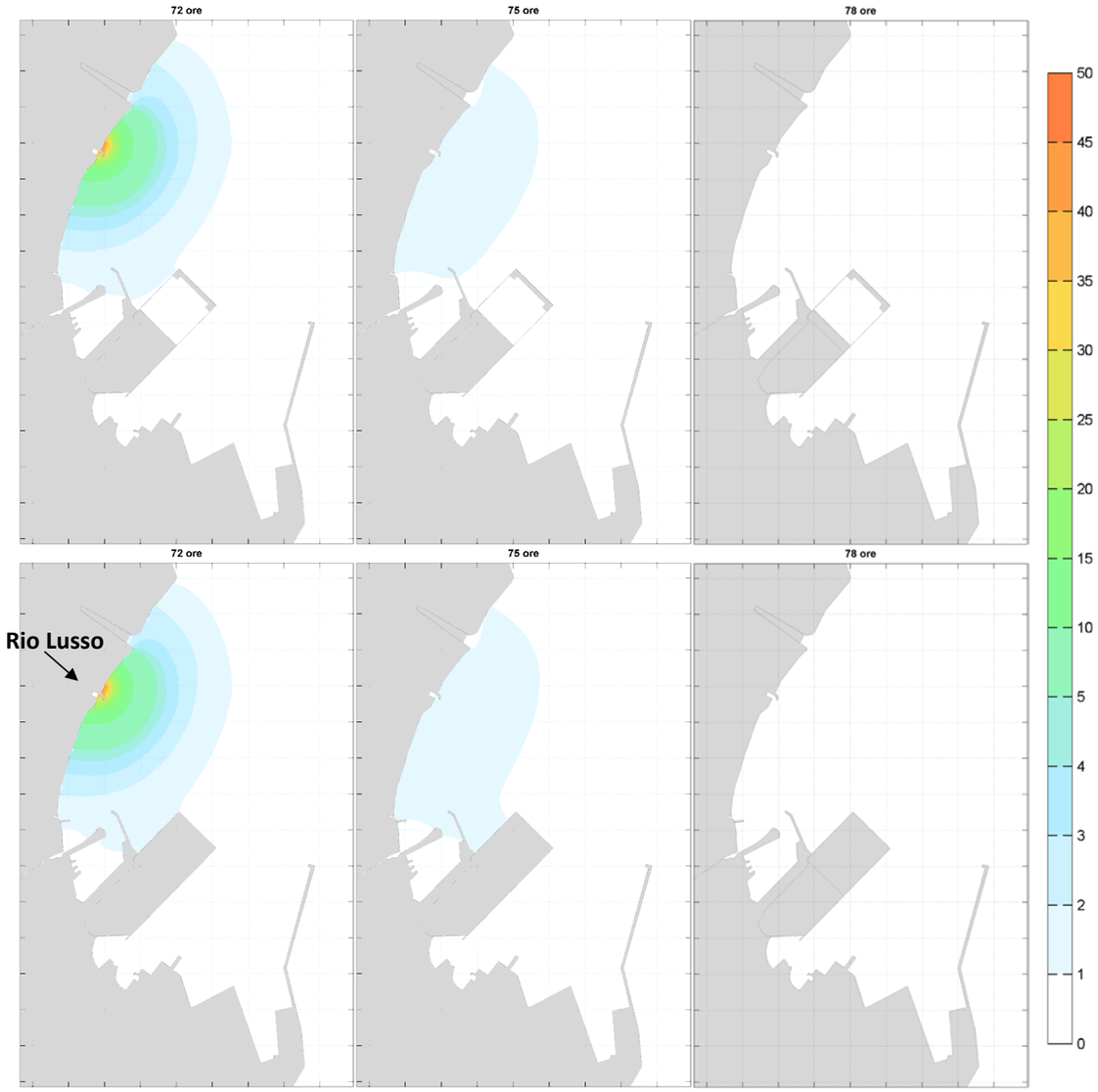



FIGURA 9-6 – RILASCIO RIO LUSSO - CONCENTRAZIONE DI ESCHERICHIA COLI ($C/C_0$ X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SOPRA) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (SOTTO).

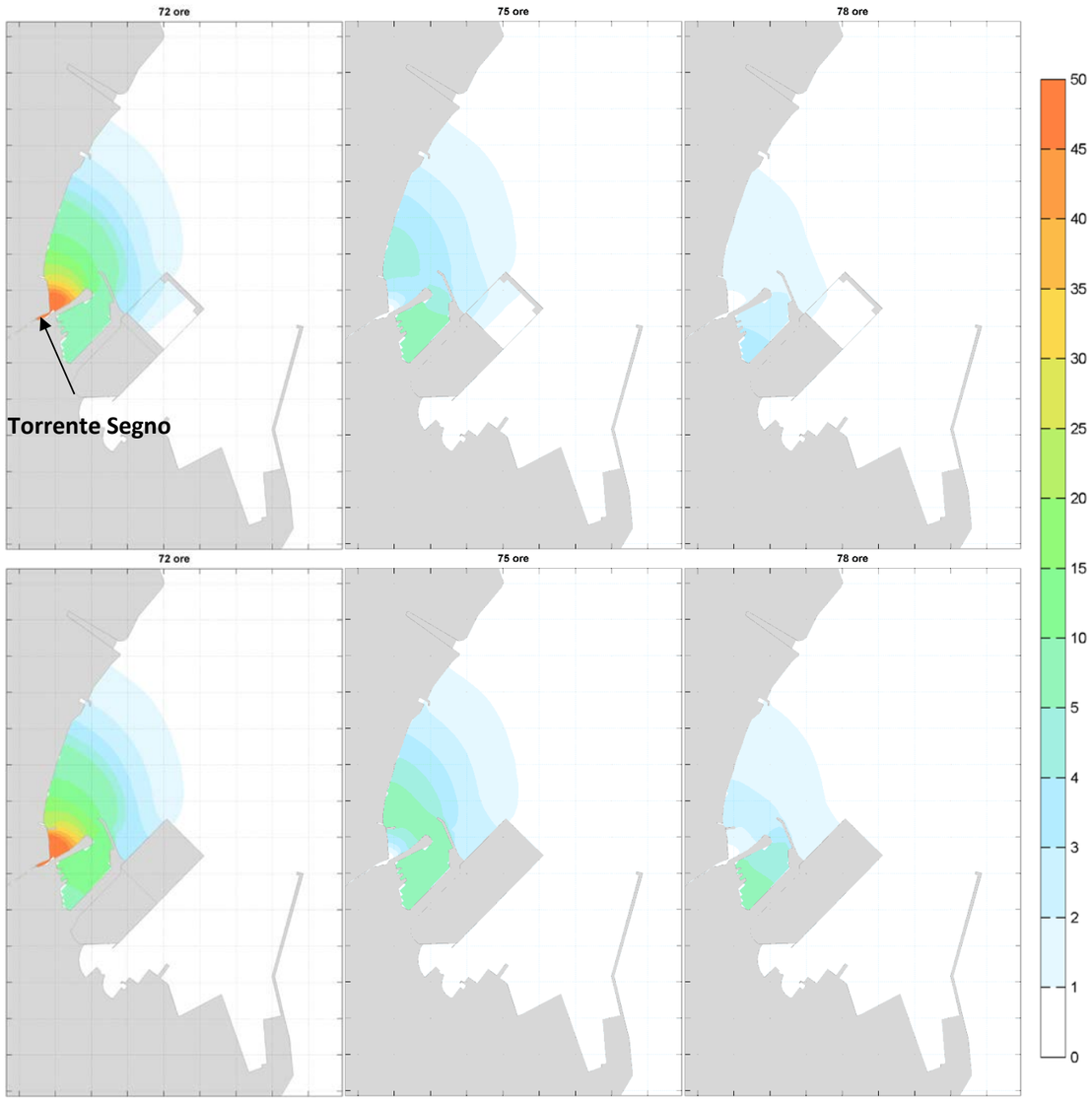



FIGURA 9-7 – RILASCIO TORRENTE SEGNO - CONCENTRAZIONE DI ESCHERICHIA COLI (C/C0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SOPRA) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (SOTTO).

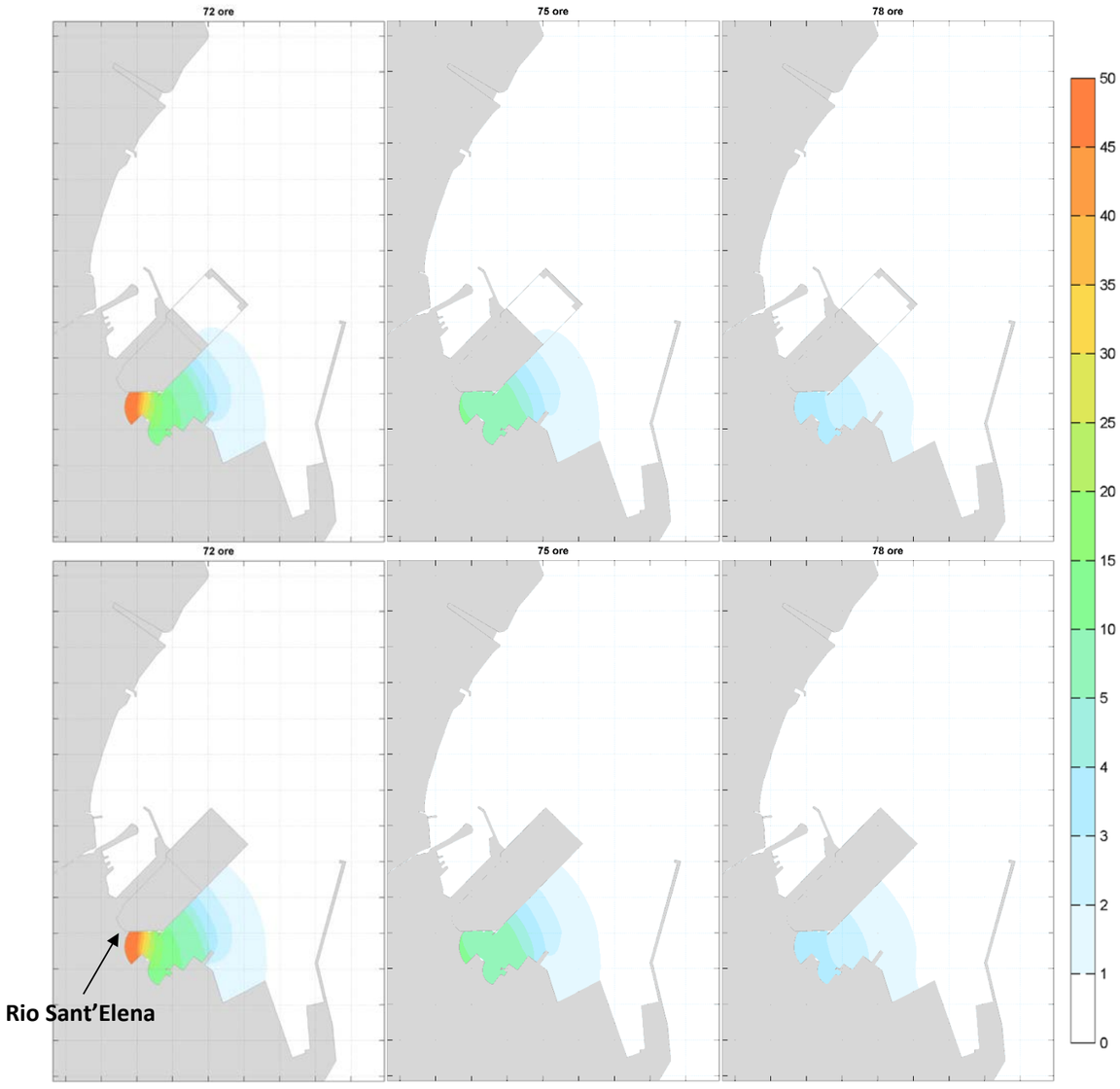



FIGURA 9-8 – RILASCIO RIO SANT'ELENA - CONCENTRAZIONE DI ESCHERICHIA COLI (C/C0 X 1000) AL TERMINE DEL RILASCIO, DOPO 3 ORE E DOPO 6 ORE - SCENARIO DI RIFERIMENTO (SOPRA) - SCENARIO DI PERIZIA DI VARIANTE (SOTTO).

## 10. CONCLUSIONI

L'obiettivo del presente studio è la valutazione della compatibilità ambientale, in riferimento alla componente acque marine della configurazione di Perizia di Variante della nuova piastra multifunzionale di Vado Ligure.

Le analisi eseguite hanno preso in considerazione gli aspetti riguardanti la circolazione idrodinamica in diverse condizioni meteo climatiche e la capacità di ricambio del sistema portuale al fine di valutare l'impatto della nuova configurazione rispetto alla configurazione di Progetto Esecutivo già approvato.

Per conseguire questo obbiettivo è stato, quindi, messo a punto un modello matematico idrodinamico tridimensionale e sono stati definiti degli scenari meteo marini di studio in modo coerente con le assunzioni fatte nell'ambito dello Studio di Impatto Ambientale della nuova piastra multifunzionale.

Dalle analisi eseguite con il modello matematico è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

L'impatto sull'**idrodinamica** e la circolazione nella baia di Vado Ligure delle nuove opere previste nella Perizia di Variante è poco significativo. I campi di moto all'interno del bacino portuale ben protetto dalla nuova diga foranea, rimangono molto contenuti in ogni scenario meteo marino e le massime differenze di velocità tra la configurazione di variante e la configurazione di Progetto Esecutivo approvato che si manifestano solo in presenza di venti spiranti dal settore Nord Ovest sono dell'ordine di qualche cm/s.

Per quanto concerne la **capacità di ricambio** delle masse idriche nell'area portuale, si osserva che la presenza della schiera di cassoni di conterminazione lungo il perimetro della piattaforma comporta variazioni di modesto rilievo. I cambiamenti apprezzabili sono comunque esclusivamente di tipo locale, ed al di fuori dell'impronta della piattaforma non sono stati evidenziati significativi cambiamenti del tempo di ricambio. Questo indica, in altre parole, che il sistema è caratterizzato da una buona capacità di scambio e che gli interventi proposti non modificano in modo rilevante il comportamento del sistema e la sua capacità di ricambio.

L'impatto sulla **capacità dispersiva** del sistema e sulla dispersione di un tracciante non conservativo di tipo batterico risulta anch'esso poco apprezzabile. Le uniche differenze visibili tra le due configurazioni esaminate sono osservabili nell'area del porto turistico dove si nota una maggiore persistenza di concentrazione, dovuto però all'effetto deflettente della portata del Segno verso l'imbocco del porticciolo e, quindi al fatto che una maggior quantità di acqua con presenza di tracciante viene indirizzata verso il porto turistico stesso. Come già sottolineato precedentemente, questa variazione non è tanto dovuta alla variazione della configurazione della piattaforma, quanto alla presenza del pennello posto a protezione della foce del Segno.
Lungo i litorali, ed in particolar modo in prossimità delle aree ove è prevista anche la balneazione, non si osservano differenze degne di nota.

Questo fatto indica, in conclusione che l'inserimento della schiera di cassoni sul lato esterno della piattaforma non è in grado di modificare in modo apprezzabile la capacità dispersiva del sistema e non è in grado di incidere sui processi di qualità delle acque.

# 11. APPENDICE A – APPROFONDIMENTI ANALISI DELLA DISPERSIONE DI UN TRACCIANTE DI TIPO BATTERICO

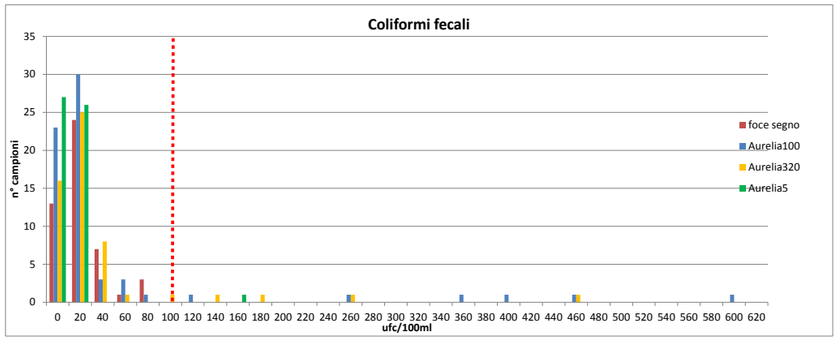
## Le analisi dei dati

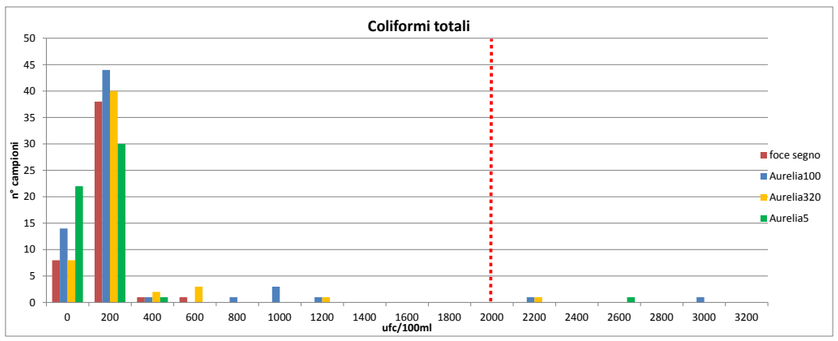
L'attività svolta dopo avere raccolto e classificati il set di dati di qualità a disposizione è stata l'esecuzione delle analisi statistica dei dati temporali in ciascun punto di controllo, e le analisi sulla correlazione spaziale dei dati e la correlazione con i dati di precipitazione locali.

### Le analisi statistiche

Le analisi statistiche dei dati sono state condotte in riferimento a ciascuno dei parametri di contaminazione batterica (Coliformi totali, Coliformi Fecali e Streptococchi in riferimento al DPR 470/82 e L'Escherichia Coli ed Enterococchi intestinali per il D.Lgs 116/08) e per ciascuna stazione di misura.

Nei grafici seguenti sono riportati, per ciascun parametro microbiologico considerato, gli istogrammi di frequenza dei valori campionati. In rosso tratteggiato è riportato anche il valore limite di legge per un singolo campione così come previsto dalla normativa.



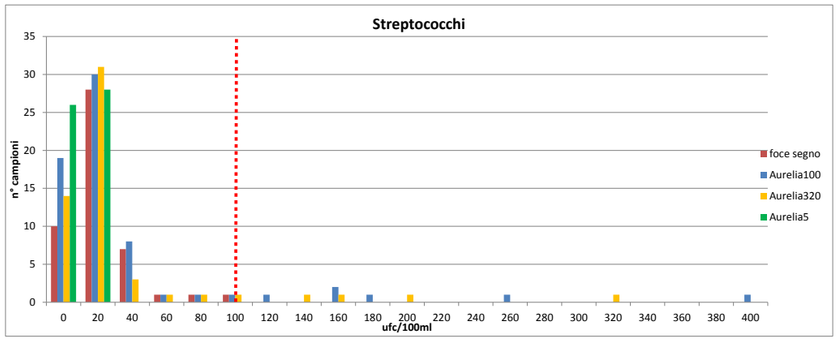
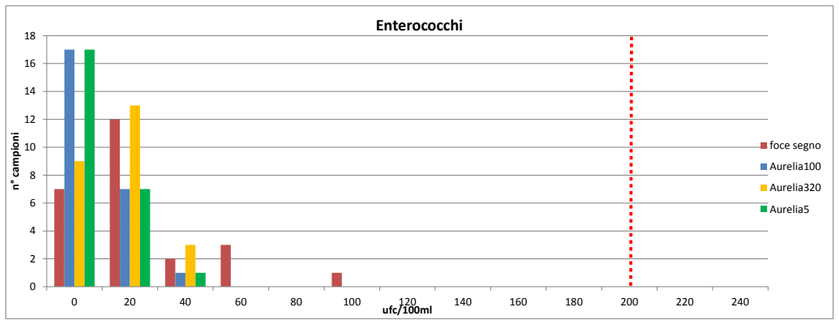




FIGURA 11-1 – ISTOGRAMMA DI FREQUENZA DELLE MISURE DI CONTAMINAZIONE MICROBIOLOGICA TRA IL 2006 E IL 2009 (RIF. DPR 470/82) PER IL LITORALE DI VADO LIGURE.



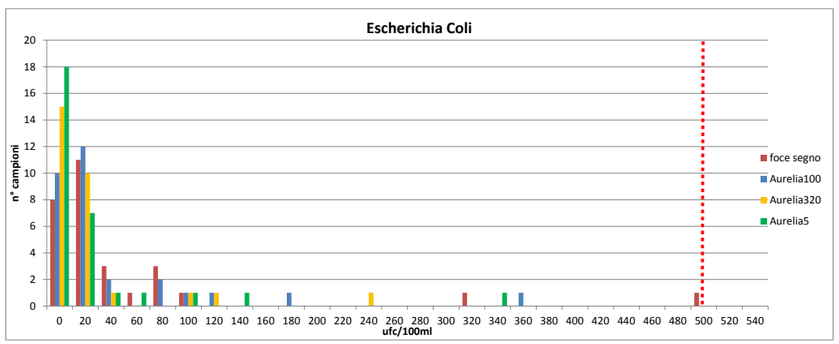




FIGURA 11-2 - ISTOGRAMMA DI FREQUENZA DELLE MISURE DI CONTAMINAZIONE MICRO-BIOLOGICA TRA IL 2010 E IL 2014 (RIF. D.LGS 116/08) PER IL LITORALE DI VADO LIGURE

Dall'analisi dei dati si osserva che lo stato generale delle acque di balneazione lungo il litorale di Vado presenta una di qualità "eccellente" e tutto il tratto costiero ha ricevuto la certificazione di bandiera blu nel corso degli ultimi anni.

Gli episodi di superamento dei limiti di legge sono stati sporadici ed occasionali; in riferimento alla normativa precedente tra il 2006 ed il 2009 si sono registrati complessivamente 11 superamenti dei limiti di concentrazione dei Coliformi fecali, 10 degli Streptococchi fecali mentre i Coliformi totali hanno ecceduto i limiti di legge solo in 4 occasioni. In riferimento alla nuova normativa entrata in vigore nel 2010, si sono verificati due superamenti nell'Aprile-Maggio 2014 sia nei valori dell'Escherichia Coli che degli Enterococchi Intestinali. In ogni caso, gli episodi di superamento sono stati isolati e non si sono verificati dei superamenti in giorni consecutivi, segno che l'abbattimento del carico batterico è stato molto rapido.

Dalle analisi di frequenza si osserva, inoltre, che in tutte le stazioni i limite di legge vengono rispettati nella misura del 90-100% in funzione del parametro considerato.

Le correlazioni spaziali

Le analisi dell'andamento nello spazio dei valori misurati di concentrazione batteriche hanno un duplice obiettivo:

– verificare una possibile correlazione spaziale tra gli episodi di inquinamento o di incremento delle concentrazioni batteriche rilevati lungo il litorale di Vado;
– verificare il trend di dispersione del tracciante, analizzando i valori in stazioni vicine.

Un incremento simultaneo dei valori di concentrazione in punti situati a grande distanza indica che l'origine dell'episodio di contaminazione è determinato da fattori naturali esterni che interessano tutta l'area investigata (come ad esempio le precipitazioni). Viceversa, una assenza di correlazione spaziale a larga scala indica che gli episodi di contaminazione sono probabilmente legati a delle immissioni puntuali e locali dovute presumibilmente a malfunzionamenti delle condotte di adduzione del depuratore civile di Savona oppure a scarichi occasionali di altra natura.

Per le analisi delle correlazioni spaziali si sono inizialmente identificati tutti gli episodi caratterizzati da dei livelli significativi di concentrazione batterica, considerando le popolazioni batteriche più importanti come Coliformi e l'Escherichia Coli.

Successivamente si è proceduto ad una analisi visiva dei dati riportando su una mappa i valori misurati riferiti alla stessa campagna di misura. Le mappe della distribuzione spaziale delle concertazioni batteriche sono riportate nelle seguenti figure. Per facilità di lettura a fianco del valore misurato è stata anche inserito un pallino pieno con un diametro proporzionale al relativo valore in modo da enfatizzare l'importanza della misura.

L'analisi visiva dei dati rivela che gli episodi in cui è visibile un significativo incremento dei valori di concentrazione presentano una scarsa correlazione spaziale. I picchi di concentrazione sono generalmente localizzati nell'intorno di un punto e nella stazione vicina ma non si osservano incrementi di concentrazione nei punti più distanti. Questo indica che i fenomeni di contaminazione hanno un carattere locale e che l'abbattimento del carico batterico è di fatto rapido.

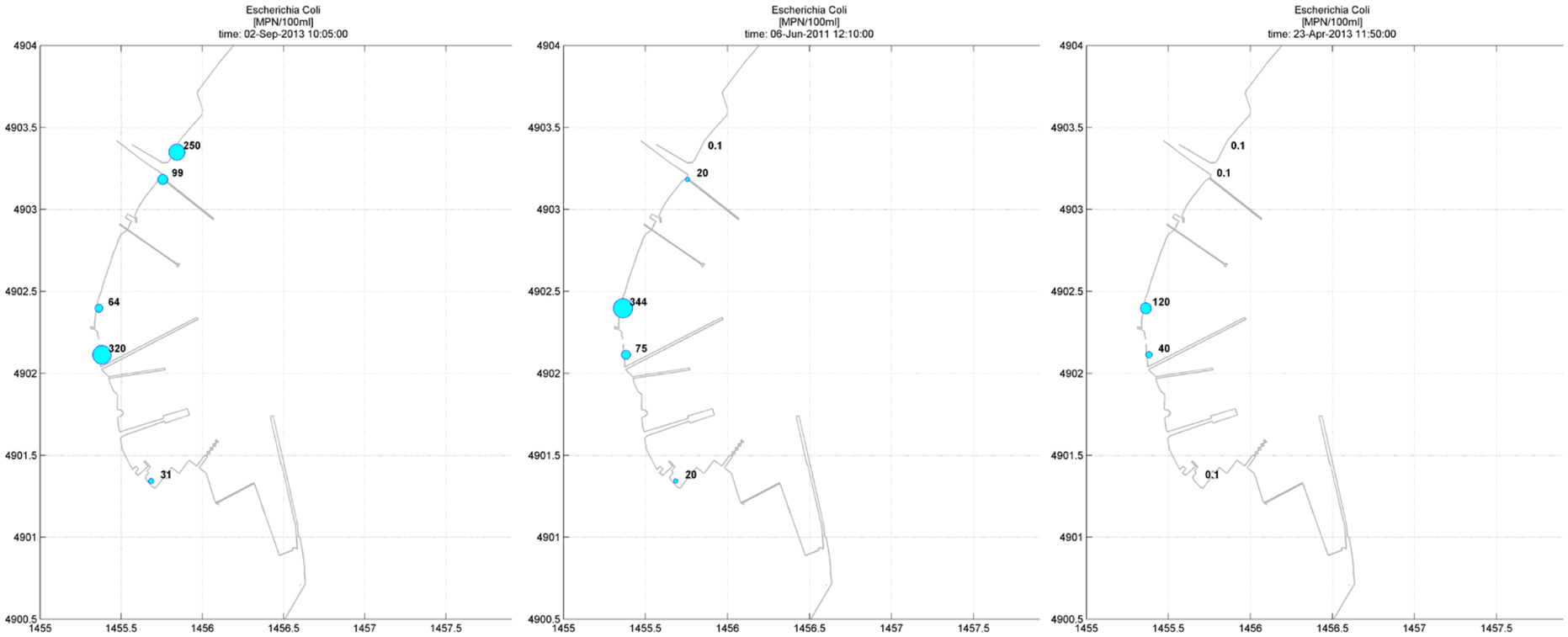



FIGURA 11-3 – DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DELL'ESCHERICHIA COLI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI.

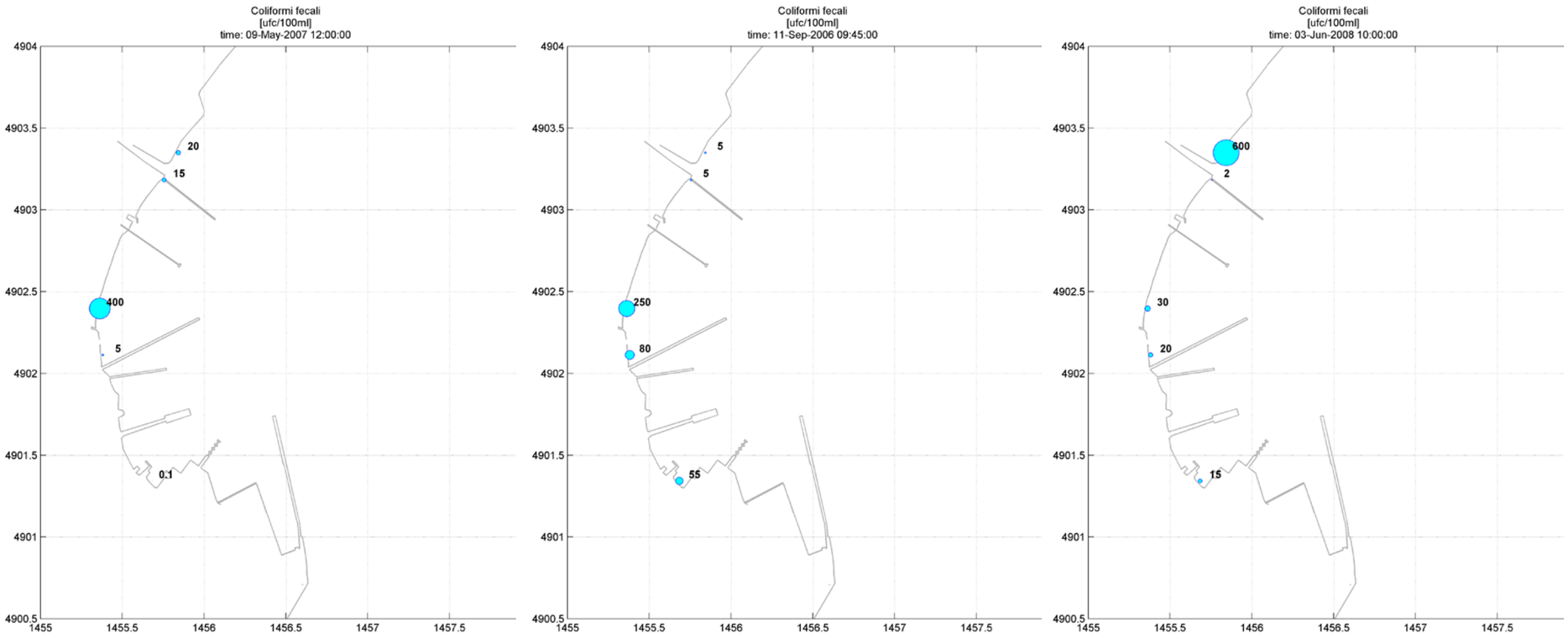



FIGURA 11-4 – DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DEI COLIFORMI FECALI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI.

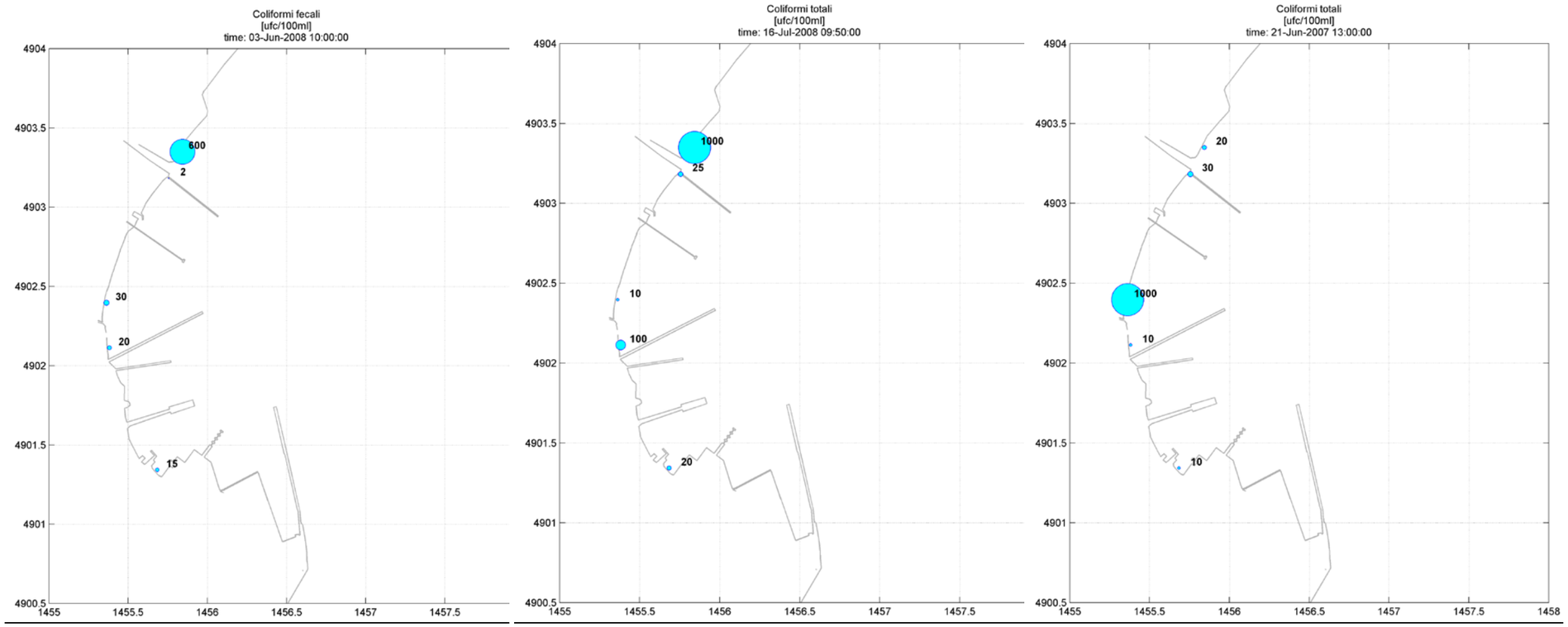



FIGURA 11-5 – DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'ANDAMENTO DEI COLIFORMI TOTALI IN TRE EPISODI SIGNIFICATIVI.

Le correlazioni con le precipitazioni

Un' ulteriore analisi dei dati disponibili è consistita nella correlazione tra i dati di precipitazione ed i valori di concentrazione batterica per capire se le fonti di contaminazione potessero essere legate al deflusso dei corsi d'acqua conseguente ad un evento piovoso.

Per l'analisi sulla correlazione sono stati assunti come riferimento i dati di concentrazione batterica riportati in precedenza in tutte le stazioni di misura e le precipitazioni misurate alle stazioni meteorologiche di Capo Vado e all'Istituto Nautico di Savona.

La correlazione è stata fatta considerando i valori di concentrazione batterica (dei Coliformi, degli Streptococchi e dell'Escherichia Coli) e i valori di precipitazione cumulata nelle 36 ore antecedenti l'evento considerato.

I risultati per tipologia batterica sono presentati da Figura 11-6 a Figura 11-8.

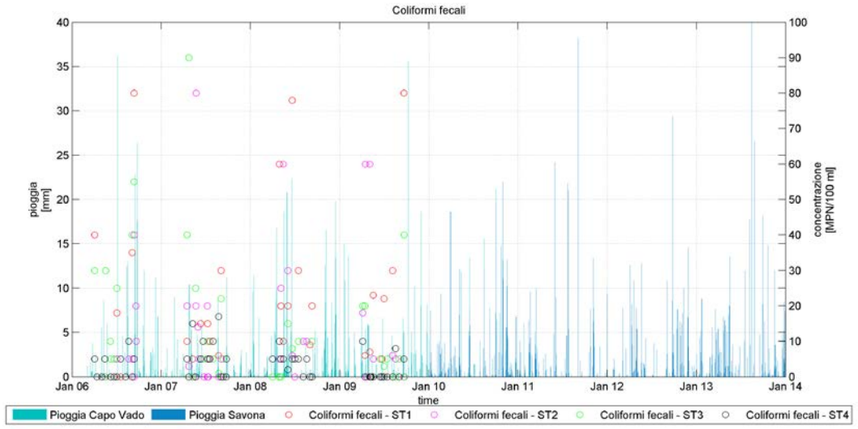
Dalle analisi dei dati si nota come non vi sia un'apparente correlazione tra i dati di precipitazione e quelli di concentrazione.

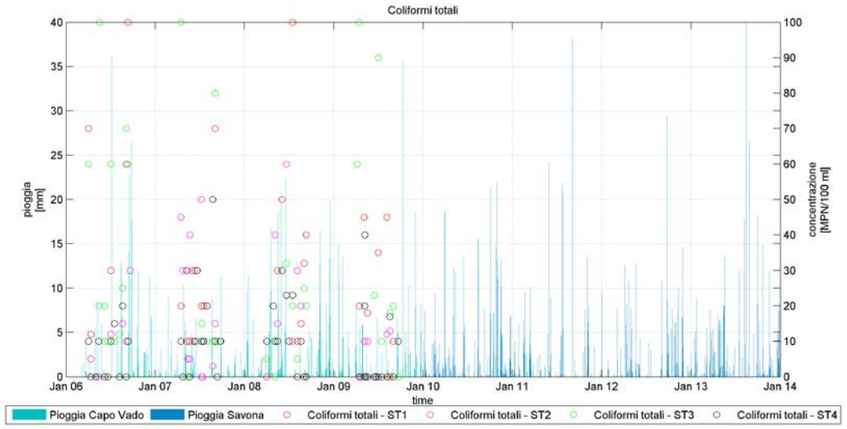
Dalle analisi eseguite è quindi possibile concludere che eventuali contaminazioni batteriche nell'area sono molto probabilmente legate a delle immissioni accidentali di un carico batterico che viene quindi recapitato a mare attraverso i rii ed i torrenti che sfociano nell'area.

L'origine di queste immissioni non è definita; potrebbe essere legata a malfunzionamenti delle condotte di adduzione del depuratore civile di Savona oppure a scarichi occasionali di altra natura.

Le principali sorgenti identificate di un carico batterico sono rappresentate dai Torrenti Segno, Quiliano e Letimbro e dai rii minori quali il Rio Fontanazza, il Rio Lusso ed il Rio Sant'Elena.

L'ubicazione delle fonti di contaminazione considerate in questo studio è riportata in Figura 9-2.



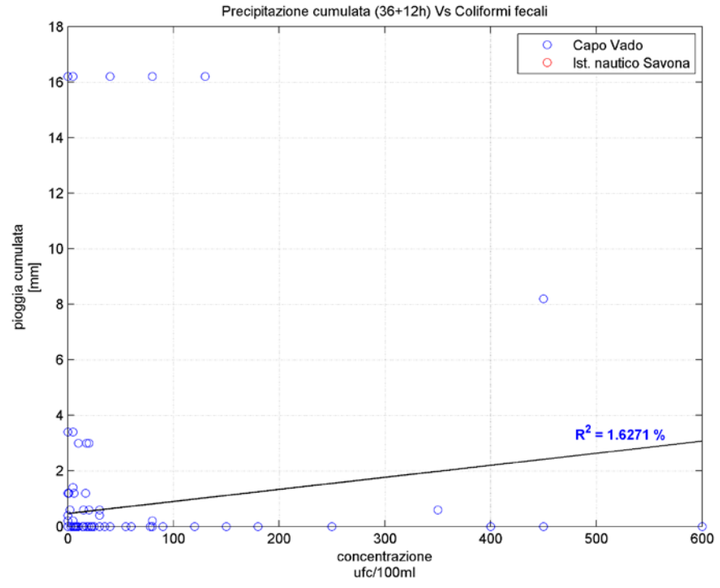




FIGURA 11-6 – ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI COLIFORMI TOTALI

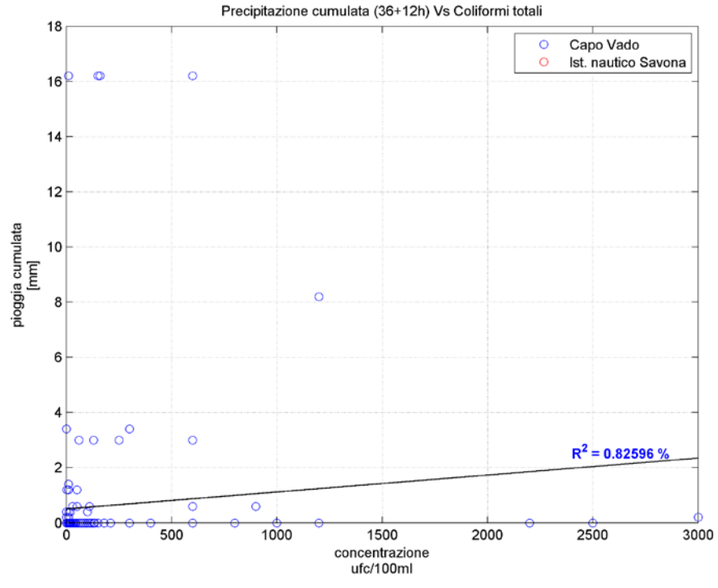
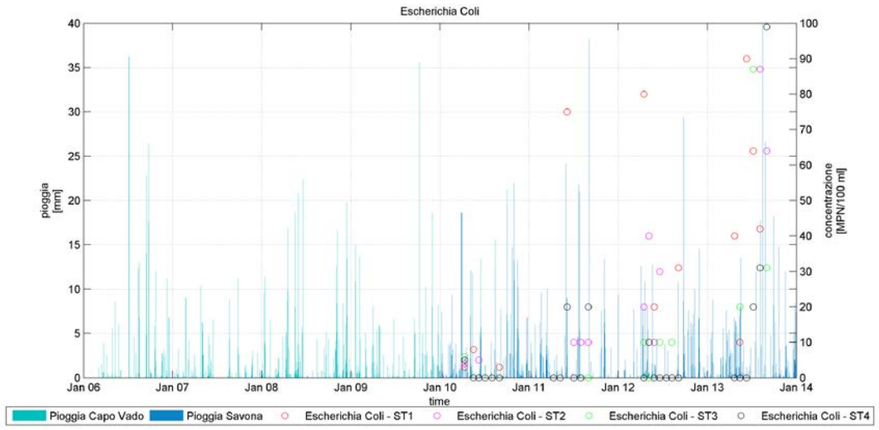



FIGURA 11-7 - ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI COLIFORMI FECALI.



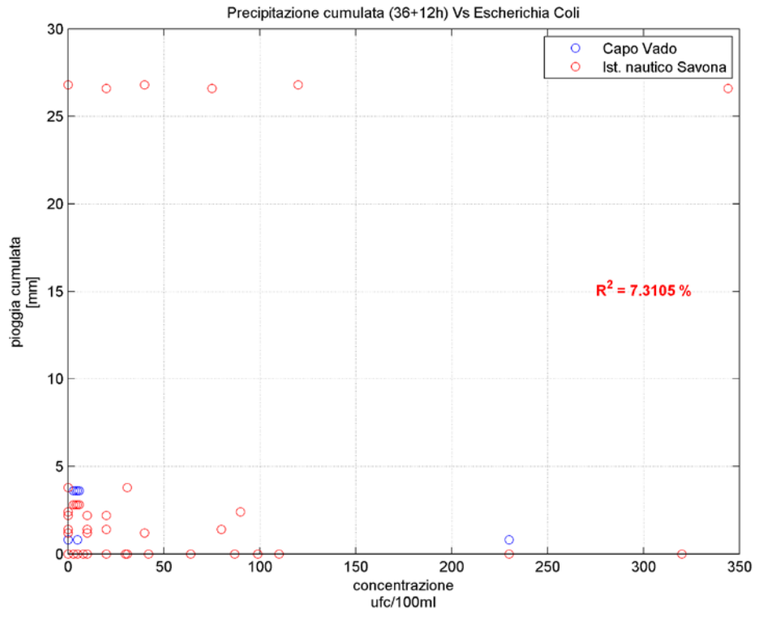




FIGURA 11-8 - ANALISI DI CORRELAZIONE TRA LA PRECIPITAZIONE CUMULATA E LE CONCENTRAZIONI DI ESCHERICHIA COLI.

## La taratura del modello

La taratura del modello per la dispersione di un tracciante batterico ha riguardato essenzialmente la definizione dei parametri fisici che definiscono il coefficiente di decadimento nel tempo della popolazione batterica. Il tasso di mortalità batterica dipende infatti sostanzialmente da 4 fattori:

- La radiazione solare il principale agente di inattivazione batterica
- La temperatura dell'acqua
- La salinità
- La mortalità intrinseca del ceppo batterico considerato

Per la taratura del modello dispersivo è stata seguita la seguente procedura:

- inizialmente sono stati identificati degli eventi caratterizzati da valori significativi di contaminazione batterica che sono risultati essere 5, idonei ad essere utilizzati come termine di confronto
- per ciascuno degli eventi considerati è stata predisposta una simulazione applicando come forzanti al contorno una marea media e uno scenario senza vento considerato che in tutti i casi esaminati le condizioni meteomarine erano caratterizzate da uno stato di agitazione da onda molto basso o assente e come condizione di rilascio una immissione costante nel tempo in modo da ottenere una condizione stazionaria
- è stata eseguita un'analisi di sensitività del modello variando in modo sistematico i parametri relativi alla concentrazione di immissione e alle grandezze che determinano il coefficiente di mortalità batterica k

Sulla base dei test effettuati è stato infine appurato che i valori che consentivano di ottenere la migliore corrispondenza tra i risultati misurati e quelli calcolati sono caratterizzati da valori tipici di uno scenario estivo con dei valori di circa 200 W/m$^2$ per la radiazione solare incidente ed di 26 °C per la temperatura dell'acqua di mare.

Riguardo la salinità è stata considerata una concentrazione salina al boundary del mare aperto pari a 38 ppt ed una concentrazione salina pari a zero in corrispondenza delle immissioni fluviali.
Questo ha determinato un campo di salinità non uniforme nell'area litoranea sia nello spazio che lungo la colonna d'acqua. Le zone più vicine alle foci, caratterizzate da una frazione maggiore di acqua di origine torrentizia presentano valori di salinità minori rispetto alle zone poste in mare aperto vicino al boundary esterno.

Applicando questi parametri si ottengono dei valori del $T_{90}$, ovvero il tempo necessario per abbattere la concentrazione iniziale del 90%, variabile tra le 15 e le 35 ore in funzione della posizione spaziale e lungo la colonna d'acqua. In questo particolare contesto, infine, le variazioni temporali dei valori del k di decadimento sono risultate minime e sostanzialmente stazionarie.

Le forzanti meteo-marine nell'area, come ampiamente discusso precedentemente, non sono in grado di determinare significativi cambiamenti nella circolazione idrodinamica locale e quello che ne risulta è di fatto una situazione di quasi stazionarietà sia in relazione alla circolazione idrodinamica che ai livelli di salinità.

I risultati delle simulazioni per la taratura del modello dispersivo-batterico sono presentati da Figura 11-9 a Figura 11-13 per ciascuno dei casi simulati.

Nelle figure i valori misurati sono rappresentati da cerchietti colorati mentre i valori calcolati dal modello vengono presentati come curve di isoconcentrazione. Entrambi i valori si riferiscono ai livelli di concentrazione misurati nello strato superficiale della colonna d'acqua nell'istante finale della simulazione, quando è stato raggiunto la condizioni di equilibrio stazionario. Si noti che i limiti superiori delle scale di colore nelle figure sono diversi.

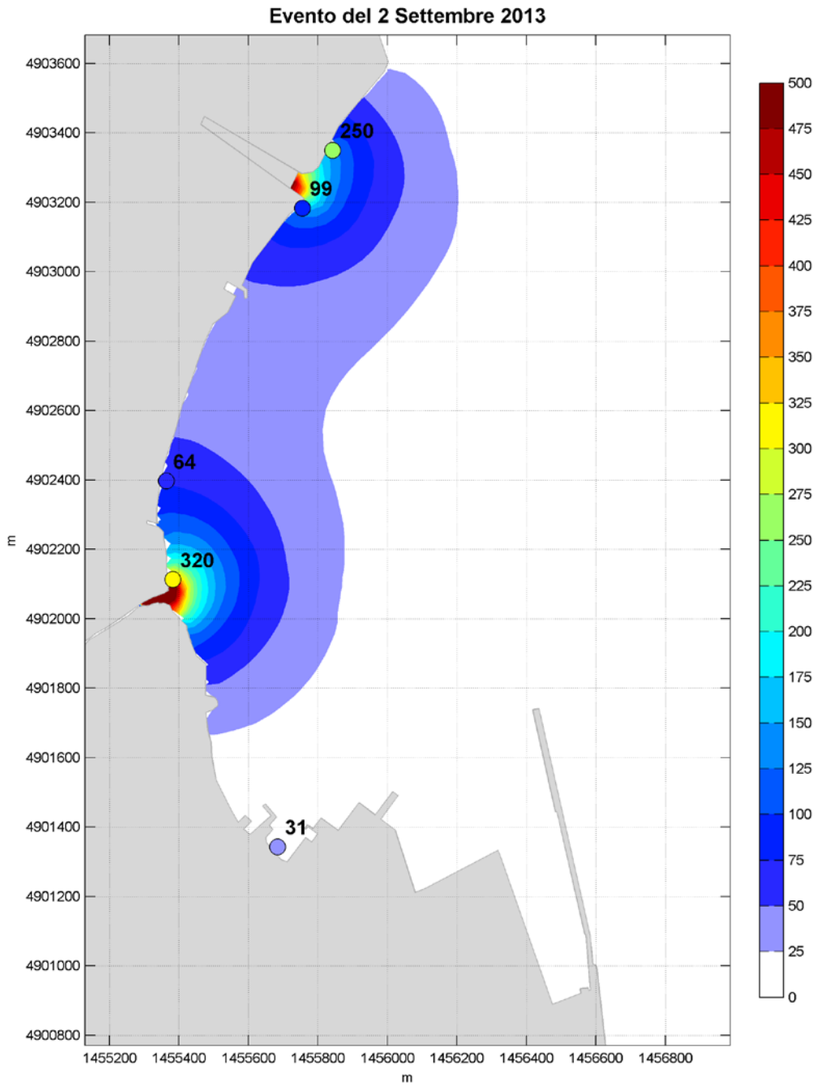



FIGURA 11-9 - EVENTO DEL 2 SETTEMBRE 2013 – CONCENTRAZIONE DELL'ESCHERICHIA COLI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE

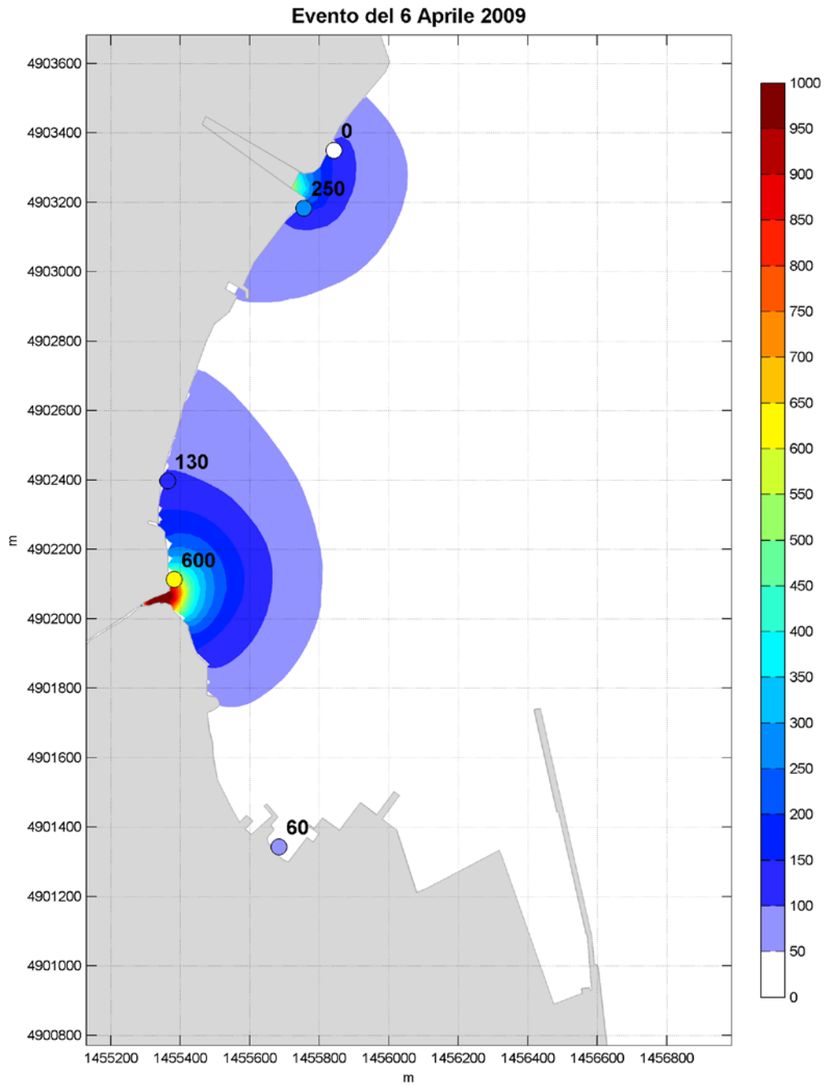



FIGURA 11-10 - EVENTO DEL 6 APRILE 2013 – CONCENTRAZIONE DEI COLIFORMI TOTALI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE

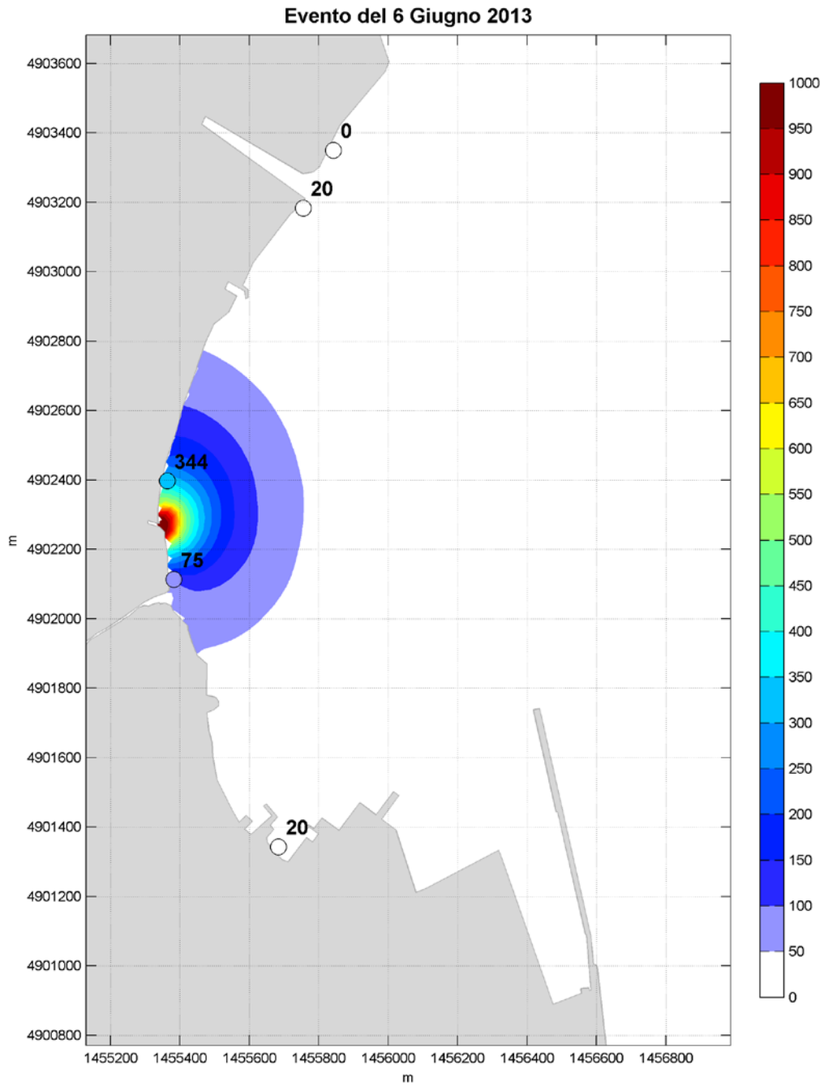



FIGURA 11-11 - EVENTO DEL 6 GIUGNO 2013 – CONCENTRAZIONE DELL'ESCHERICHIA COLI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE

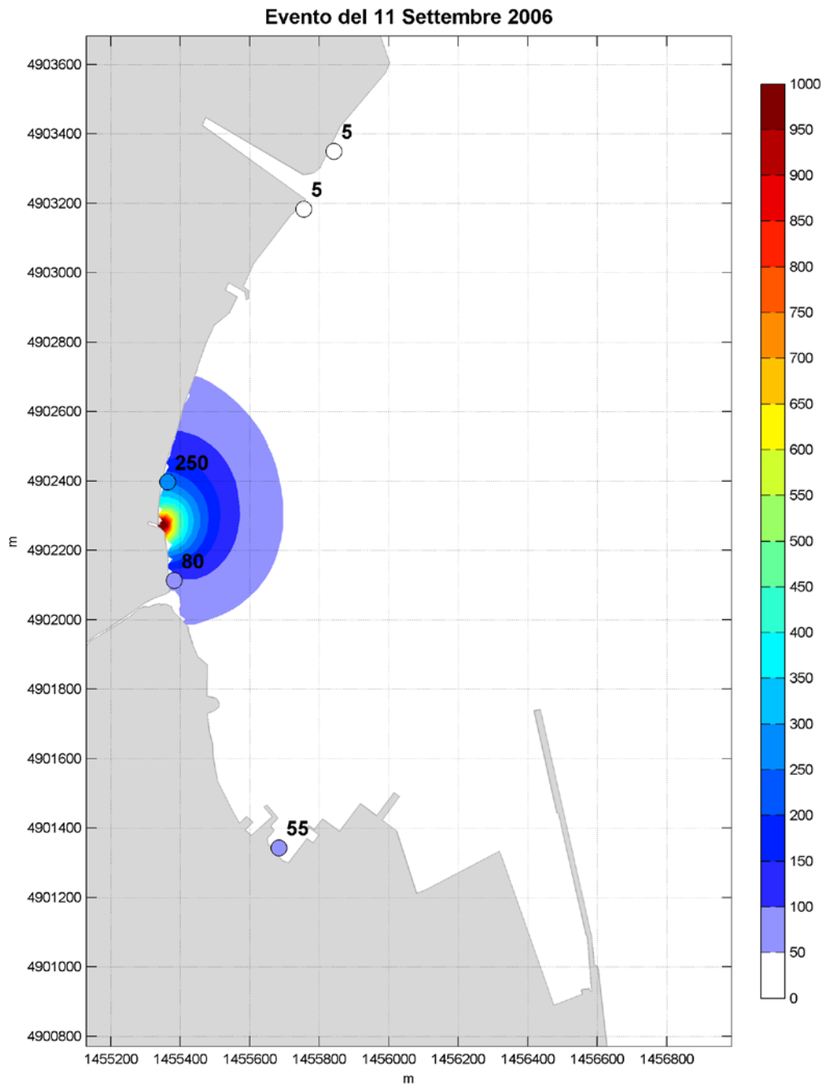



FIGURA 11-12 - EVENTO DEL 2 SETTEMBRE 2013 – CONCENTRAZIONE COLIFORMI FECALI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE

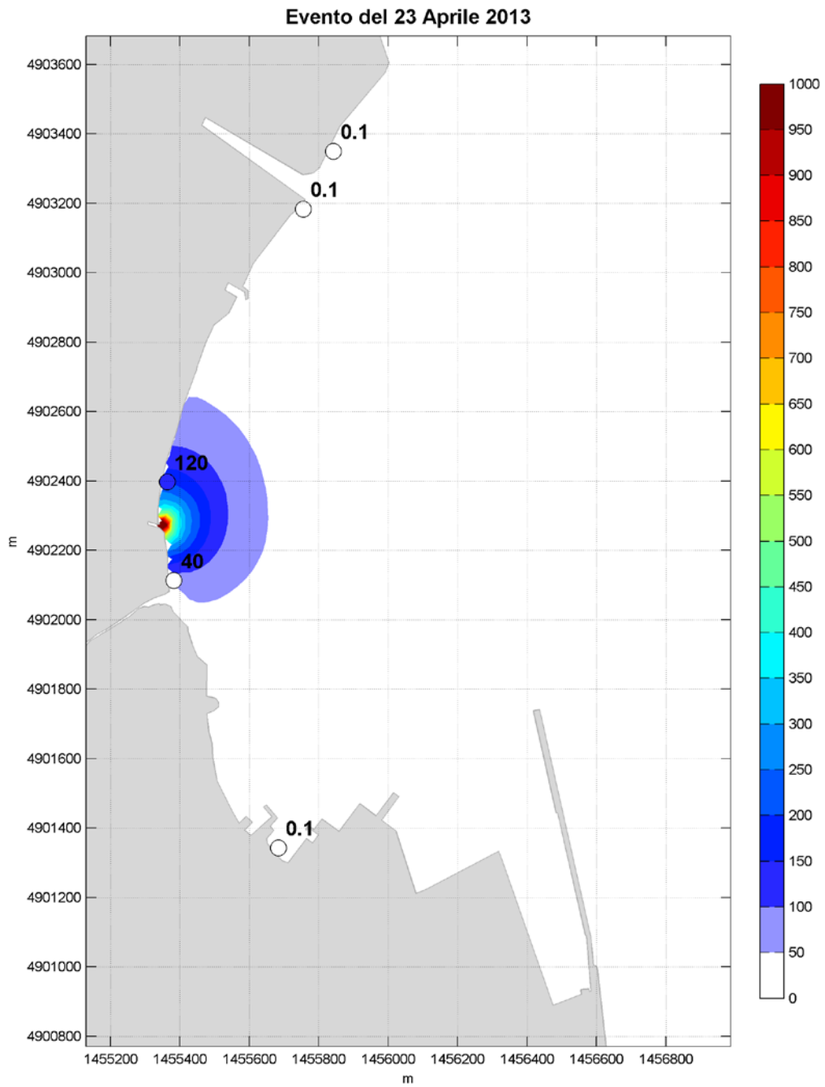



FIGURA 11-13 EVENTO DEL 23 APRILE 2013 – CONCENTRAZIONE DELL'ESCHERICHIA COLI (UFC/100ML) NELLO STRATO SUPERFICIALE

Nell'evento del 2 Settembre 2013 si osserva che nelle stazioni in prossimità della foce del Quiliano (Stazione Foce Quiliano) e del Segno (Stazione Foce T. Segno) i valori misurati della concentrazione della Escherichia Coli erano superiori a 250 UFC/100 ml. La stazione Aurelia 5 immediatamente a sud della foce del Quiliano riportava un valore di 99 UFC/100 ml mentre la stazione Aurelia 100 situata tra le foci dei due torrenti i valori erano più bassi e pari a 64 UFC/100ml.

Considerando che i valori più elevati di concentrazione erano stati misurati vicino alle foci dei torrenti è stata, quindi, eseguita una simulazione ipotizzando un rilascio costante in corrispondenza dei due torrenti. I risultati della simulazione indicano che con queste condizioni di rilascio si genera un campo di concentrazione verosimile alla situazione effettivamente misurata. Nelle stazioni Foce T. Segno e Aurelia 100 si osserva un'ottima corrispondenza dei valori, mentre in prossimità del Torrente Quiliano la corrispondenza appare soddisfacente anche se meno accurata.

Nell'evento del 6 Aprile 2013 si nota una situazione simile a quella del caso precedente; i valori di concentrazione più alti sono osservati in prossimità delle foci del Segno e del Quiliano con i valori maggiori (600 UFC/100 ml) in prossimità della foce del T. Segno. Anche in questo caso sono stati considerati due rilasci in corrispondenza dei due torrenti con un carico all'immissione differente.

I risultati delle simulazioni evidenziano un'ottima corrispondenza per le stazioni T.Segno e Aurelia 100. Per le stazioni in prossimità del Quiliano la corrispondenza appare meno accurata ma valori misurati sono probabilmente troppo bassi e quindi non completamente idonei per una taratura del modello.

Nell'evento del 6 Giugno 2013 è possibile osservare dei valori significativi (ma comunque al di sotto dei limiti di legge) di concentrazione dell'Escherichia Coli nelle stazioni ARPAL Aurelia 100 e Foce T. Segno con dei valori misurati pari rispettivamente a 344 e 65 UFC/100ml.

Nelle rimanenti stazioni di misura i valori di Escherichia Coli sono risultati assenti o molto bassi. Considerando che le stazioni più vicine alle foci dei Torrenti Quiliano e Segno presentavano dei valori molto bassi è stata eseguita una simulazione numerica ipotizzando un solo rilascio in corrispondenza del Rio Lusso, una sorgente posta tra le due stazioni di misura, dove era stato misurato un incremento della concentrazione batterica. I risultati della simulazione denotano una corrispondenza con i valori misurati molto soddisfacente in entrambi i punti di controllo; dalle mappe della concentrazione si osserva anche un rapido decadimento della concentrazione batterica che scende sotto la soglia di 50 UFC/100 ml nel raggio di qualche centinai di metri dal punto sorgente.

Negli evento dell'11 Settembre 2006 e del 23 Aprile 2013 è stato considerato un unico rilascio in corrispondenza del Rio Fontanazza. In entrambi gli eventi, infatti, le concentrazioni maggiori sono state misurate alla stazione Aurelia 100 locata a nord della foce del Rio Fontanazza mentre nella Stazione T.Segno i valori erano visibilmente inferiori, indice del fatto che la contaminazione batterica era originata verosimilmente in un punto tra le due stazioni. Anche in questo caso i risultati del modello hanno evidenziato un'ottima corrispondenza con i valori misurati in entrambi gli scenari simulati ed un rapido decadimento del carico batterico a distanza di poche centinaia di metri dalla sorgente.