

**MODELLIZZAZIONE DELLA DIFFUSIONE DEL MATERIALE  
SEDIMENTARIO RISOSPESO DURANTE I LAVORI DI  
ESCAVO E DI SVERSAMENTO IN MARE APERTO**



**LAVORI DI ESCAVO PER ADEGUAMENTO DEI FONDALI  
ANTISTANTI IL PRIMO TRATTO DELLA BANCHINA 26 DEL  
PORTO DI ANCONA  
e  
SIMULAZIONI SU TUTTE LE CELLE DELL'AREA DI  
SVERSAMENTO**

**COORDINATORE:** Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, ANCONA)

**RESPONSABILE SCIENTIFICO:** Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, ANCONA)

**Rapporto a cura di :** Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, ANCONA)  
Dott. Christian Ferrarin (CNR-ISMAR, Venezia)  
Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, ANCONA)

**Preparato per:** AUTORITÀ PORTUALE DI ANCONA

**AGOSTO 2015**

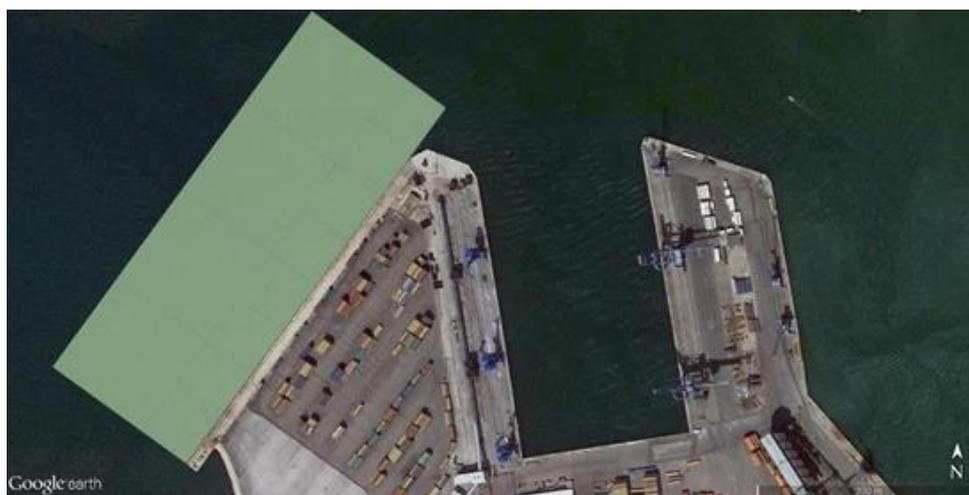
## INDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>1. PREMESSA</b> .....   | 1  |
| 1.1. FENOMENOLOGIA GENERALE DEL MARE ADRIATICO .....   | 2  |
| <b>2. DESCRIZIONE DEL MODELLO</b> .....  | 4  |
| 2.1. IL MODELLO IDRODINAMICO SHYFEM .....  | 4  |
| 2.2. IL MODELLO DI TRASPORTO E DIFFUSIONE PER SALINITÀ E<br>TEMPERATURA.....                               | 6  |
| 2.2.1 Modulo di calore .....   | 7  |
| 2.3. I MODELLI DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI .....  | 8  |
| 2.3.1 Modello lagrangiano di trasporto dei sedimenti .....   | 9  |
| 2.3.2 Modello euleriano di trasporto dei sedimenti .....   | 10 |
| <b>3. APPLICAZIONE DEL MODELLO</b> .....   | 11 |
| 3.1. LA GRIGLIA DI CALCOLO .....   | 11 |
| 3.2. SET-UP DELLE SIMULAZIONI .....  | 12 |
| 3.3. VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO .....  | 13 |
| <b>4. DESCRIZIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E<br/>INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI METEOMARINI</b> ..... | 15 |
| <b>5. SCENARI DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI</b> .....   | 18 |
| 5.1. SCENARIO 1 - CALMA DI VENTO.....  | 20 |
| 5.2. SCENARIO 2 - VENTO DI BORA .....  | 22 |
| 5.3. SCENARIO 3 - VENTO DI SCIROCCO.....   | 24 |
| 5.4. SCENARIO 4 - VENTO DI MAESTRALE .....   | 26 |
| <b>6. CONCLUSIONI</b> .....  | 28 |
| <b>7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....  | 31 |
| <b>ALLEGATO A - SIMULAZIONI CELLE DI SVERSAMENTO</b> .....   | 33 |
| I. DESCRIZIONE DEI SITI DI SVERSAMENTO E DEGLI<br>SCENARI.....   | 34 |
| II. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI .....  | 35 |
| III. CONCLUSIONI.....  | 45 |

## 1. PREMESSA

L'attività di ricerca svolta da CNR-ISMAR sede di Venezia si inserisce nella convenzione tra Autorità Portuale di Ancona (APA) e CNR-ISMAR ai fini dell'esecuzione di studi di carattere ambientale volti a valutare le dinamiche e gli effetti dei sedimenti marini provenienti dall'escavo effettuato per adeguare i fondali antistanti il primo tratto della banchina 26 del porto (Fig. 1).

Tali attività hanno previsto lo sviluppo di un modello di trasporto idrodinamico volto a valutare la potenziale dispersione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo nell'area portuale e di sversamento in mare aperto. Scopo di tale modello è verificare se, in quali condizioni meteomarine, e in quale entità, tale materiale potrebbe raggiungere i fondali costieri della costa del Monte Conero e quindi produrre eventuali impatti sulle biocenosi ivi esistenti.



**Fig. 1** – Ubicazione area di escavo.

L'obiettivo principale di questo studio è l'indagine delle dinamiche di trasporto di sedimenti marini provenienti da escavi portuali. L'approccio metodologico proposto in questo progetto si basa sull'integrazione delle acquisizioni sperimentali con strumenti modellistici.

Le aree esterne di sversamento sono influenzate direttamente dall'area più settentrionale del Mar Adriatico a causa della corrente costiera adriatica che, fluendo verso Sud-Est lungo la costa italiana, trasporta con sé le acque scaricate in mare dai fiumi del Nord Adriatico, mescolate alle acque marine costiere (Franco *et al.*, 1982). E' chiaro che un problema così complesso come il trasporto dei sedimenti è intimamente collegato con lo stato idrodinamico della zona di interesse.

Un'indagine dei sedimenti deve perciò partire da un approfondito esame e dalla descrizione dell'idrodinamica costiera.

La simulazione della circolazione delle acque dei principali processi fisici che interessano le aree costiere necessita l'utilizzo sia di modelli numerici ad alta risoluzione spazio-temporale sia di procedure di *downscaling* in grado di riprodurre le interazioni e gli scambi di massa che avvengono tra l'ambiente di mare aperto e l'ambiente costiero. Tale obiettivo può essere raggiunto sia mediante l'implementazione di procedure di *nesting* tra modelli numerici basati su griglie di calcolo regolari (Kim *et al.*, 2008; Brown *et al.*, 2010), sia mediante l'utilizzo di modelli numerici basati su griglie non strutturate in grado di riprodurre i processi di interesse con una risoluzione spaziale variabile (Bellafiore *et al.*, 2008; Roland *et al.*, 2009). Il primo approccio è comunemente utilizzato all'interno di diversi sistemi operazionali per effettuare procedure di *nesting* da sistemi di previsione a scala di bacino a scala regionale. Tali procedure di accoppiamento sono generalmente robuste e ben testate, tuttavia non prevedono la possibilità di riprodurre le interazioni tra le diverse scale spaziali in modo biunivoco (*downscaling* e *upscaling*). Il secondo approccio basato sull'utilizzo di modelli a griglia non-strutturata, quali quelli basati sul metodo degli elementi finiti o dei volumi finiti, permette, variando la risoluzione spaziale del dominio di calcolo, di riprodurre facilmente le interazioni biunivoche (*downscaling* e *upscaling*) tra gli ambienti di costieri e quelli di mare aperto.

Molti sono i modelli utilizzati per studiare la circolazione del mare Adriatico (Bellafiore, 2009). Quattro di queste applicazioni sono basate sul modello *Princeton Ocean Model (POM)* (Blumberg e Mellor, 1987): il sistema *AIM- NASM* sviluppato da Zavatarelli *et al.* (2002), lo studio effettuato da Oddo *et al.* (2005); Oddo e Pinardi (2008), l'implementazione di Bergamasco *et al.* (1999) e il sistema *NCOM* (Pullen *et al.*, 2003). Altri modelli applicati sono il *DieCAST*, descritto in Cushman-Roisin *et al.* (2005), il modello *ROMS* (Sherwood *et al.*, 2004) e il modello *MITgcm* applicato al Golfo di Trieste (Crise *et al.*, 2003).

## **1.1. FENOMENOLOGIA GENERALE DEL MARE ADRIATICO**

Il mare Adriatico è un bacino allungato e relativamente stretto, caratterizzato da un'ampia porzione di coste di varie tipologie. A tratti litoranei regolari come quelli del Centro Italia si contrappongono aree più frastagliate e, quindi, più complesse da

studiare, quali le coste della Croazia. Il bacino si può dividere topograficamente in tre aree principali (Orlić *et al.*, 1992):

- la parte Nord, caratterizzata da profondità inferiori ai 40 m;
- la parte centrale, avente una profondità massima di 280 m (*Jabuka Pit*);
- la parte Sud, che nella fossa più profonda raggiunge i 1200 m.

Il comportamento del bacino va considerato alla luce delle forzanti che maggiormente influiscono sullo stesso. Primario è il ruolo della forza gravitazionale, del vento e della pressione atmosferica. Si possono osservare tre tipologie di fenomeni prodotti da queste forzanti: marea, sesse e *storm surge*. La forza gravitazionale e quella centrifuga attorno ai centri di massa nei sistemi Terra-Luna e Terra-Sole producono il fenomeno di marea astronomica. Essa viene calcolata mediante il cosiddetto *metodo armonico* e in Adriatico, da vari studi condotti nello scorso secolo (Polli, 1960; Tomasin e Pirazzoli, 1999), si può dedurre il comportamento, quasi totalmente, tramite l'azione di sette componenti principali, calcolate sul livello del mare, quattro semidiurne, M 2, S2, K 2, N 2, e tre diurne, K1, O1, P 1.

Importanti sono anche gli apporti prodotti da fattori atmosferici, variazioni della pressione atmosferica e del vento. La variabilità è alla base di oscillazioni di lungo periodo, mentre il vento agisce, direttamente, nella formazione della *storm surge* e, indirettamente, come risposta del bacino, nella produzione di sesse.

I gradienti di temperatura e salinità, cause della variazione di densità, sono invece alla base delle correnti barocline e della circolazione termoalina. In Nord Adriatico la circolazione invernale di natura termoalina è guidata dai gradienti di densità tra l'acqua densa al centro del bacino e quella più leggera lungo le coste, di origine fluviale. Osservando la colonna d'acqua si riscontra una struttura omogenea in inverno, mentre tende a prevalere una struttura stratificata in estate a causa dei termo-allo-picno cicli stagionali (Franco *et al.*, 1982).

Per una completa descrizione della fenomenologia dell'Alto Adriatico si rimanda a Bellafiore (2009).

## **2. DESCRIZIONE DEL MODELLO**

Data la complessità dei fenomeni da studiare e da monitorare, si propone una gerarchia di modelli agli elementi finiti che riescono a descrivere la dinamica della dispersione e del trasporto dei sedimenti. I modelli numerici sviluppati vengono di seguito elencati:

- modello 3D idrodinamico;
- modello di dispersione e diffusione per salinità e temperatura;
- modelli di trasporto dei sedimenti (euleriano e lagrangiano).

I moduli sono integrati e accoppiati tra loro in modo sequenziale e utilizzano la stessa griglia di calcolo agli elementi finiti. Per prima cosa viene risolta l'idrodinamica, calcolando per ogni punto il livello della marea e le velocità. Il modello di trasporto dei sedimenti utilizza le forzanti idrodinamiche per calcolare il trasporto del sedimento in sospensione.

Di seguito vengono descritti i singoli modelli.

### **2.1. IL MODELLO IDRODINAMICO SHYFEM**

Per questo studio è stato utilizzato il modello matematico SHYFEM, sviluppato negli ultimi anni al ISMAR-CNR di Venezia (Umgiesser e Bergamasco, 1995; Umgiesser, 1997; Umgiesser *et al.*, 2004; Bellafiore e Umgiesser, 2010).

Il modello utilizza il metodo degli elementi finiti per la discretizzazione nello spazio e uno schema semi-implicito per l'integrazione nel tempo. Il metodo degli elementi finiti è altamente flessibile grazie alla suddivisione del dominio numerico in triangoli di varia forma e dimensione. È particolarmente adatto a riprodurre la geometria e l'idrodinamica di sistemi complessi, come la zona portuale di Ancona.

Il modello risolve le equazioni primitive, integrate verticalmente su ogni livello. La diffusione orizzontale, il gradiente di pressione e l'avvezione baroclina nell'equazione del momento sono trattati in modo esplicito. La forza di Coriolis e il gradiente di pressione barotropica nell'equazione del momento e il termine divergenza nella equazione di continuità sono trattati in modo semi-implicito. I termini di stress verticale e il termine di attrito al fondo sono trattati in implicito per ragioni di stabilità. La caratteristica fondamentale del metodo semi-implicito è che unisce i vantaggi di uno schema implicito, incondizionata stabilità per ogni passo

temporale scelto, con quelli dello schema esplicito, quali la riduzione della matrice di risoluzione.

Per il calcolo della diffusività verticale e viscosità è stato utilizzato uno schema di chiusura turbolenza. Questo schema è un adattamento del modulo k- $\mathcal{E}$  del modello *GOTM (General Ocean Turbulence Model)* descritto in Burchard e Petersen (1999). Le velocità sono calcolate al centro di ogni elemento, mentre il livello temperatura e salinità è calcolato nei nodi della griglia. Verticalmente il modello descrive la colonna d'acqua tramite livelli Z di diverso spessore. La maggior parte delle variabili sono calcolate al centro di ogni strato, mentre i termini di stress e le velocità verticali sono risolti alle interfacce tra gli strati.

Le equazioni, integrate in ogni livello, sono:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial U_l}{\partial y} - fV_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \\ - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^{top(l)} - \tau_x^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 U_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial V_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial V_l}{\partial y} + fU_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \\ - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^{top(l)} - \tau_y^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 V_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_l}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + \sum_l \frac{\partial V_l}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

dove:

$l$  = livello verticale,

$(U_l, V_l)$  = trasporti orizzontali in ogni livello (velocità integrate),

$f$  = parametro di Coriolis,

$p_a$  = pressione atmosferica,

$g$  = accelerazione gravitazionale,

$\zeta$  = livello del mare,

$\rho_0$  = densità media del mare,

$\rho = \rho_0 + \rho$  = densità del mare,

$\tau$  = stress interni alla superficie e al fondo di ogni strato,

$h_l$  = spessore dello strato

$H_l$  = profondità del fondo dello strato  $l$ ,

$A_H$  = viscosità orizzontale.

Le condizioni al contorno per i termini di stress sono:

$$\tau_x^{surface} = c_D \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad \tau_y^{surface} = c_D \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_x^{bottom} = c_B \rho_0 u_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad \tau_y^{bottom} = c_B \rho_0 v_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad (5)$$

dove:

$c_D$  = coefficiente di attrito del vento,

$c_B$  = coefficiente di attrito al fondo,

$\rho_a$  = densità dell'aria,

$(w_x, w_y)$  = componenti del vento,

$(u_L, v_L)$  = velocità dell'acqua nell'ultimo livello.

Le condizioni al contorno prevedono la suddivisione dei bordi del dominio spaziale in bordi aperti e chiusi. Al contorno di mare aperto viene imposto il livello dell'acqua, mentre per i fiumi viene prescritta la portata. Ai bordi chiusi la componente normale della velocità è uguale a zero, mentre la componente tangenziale della velocità è un parametro libero.

La discretizzazione nello spazio delle incognite è stata attuata con il metodo degli elementi finiti parzialmente modificato rispetto alla formulazione classica. Questo approccio si è rivelato necessario per evitare fenomeni di *numerical damping* e *non conservazione della massa* dovuti alla combinazione di uno schema di tipo semi-implicito per la discretizzazione del tempo con il metodo standard degli elementi finiti conosciuto come *Galerkin method*. La differenza fondamentale rispetto alla formulazione originale consiste nel suddividere lo spazio in triangoli (elementi) e nel descrivere i livelli d'acqua  $\zeta$ , i trasporti  $U, V$ , utilizzando funzioni di forma di diverso ordine, lineari nel caso dei livelli mentre, per i trasporti, costanti a ogni passo spaziale (Umgiesser, 2000; Umgiesser *et al.*, 2004).

## **2.2. IL MODELLO DI TRASPORTO E DIFFUSIONE PER SALINITÀ E TEMPERATURA**

Per comprendere la capacità di rimescolamento del sistema e l'evoluzione della salinità, della temperatura dell'acqua o di un qualsivoglia tracciante, è stato studiato il comportamento di una sostanza conservativa disciolta in acqua. In un punto qualsiasi del sistema l'evoluzione della concentrazione  $S$  di un tracciante

conservativo è calcolabile applicando il principio di conservazione della massa (Umgiesser, 1997):

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} + \frac{\partial u_l S_l}{\partial x} + \frac{\partial v_l S_l}{\partial y} + \frac{\partial w_l S_l}{\partial z} = \nu_h \left( \frac{\partial^2 S_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_l}{\partial y^2} \right) + \nu_{v,l} \frac{\partial^2 S_l}{\partial z^2} + F \quad (6)$$

dove:

$S_l$  = concentrazione nello strato  $l$ ,

$\nu_h$  e  $\nu_{v,l}$  = coefficienti di diffusione orizzontale e verticale (calcolati dal modello k-E di chiusura della turbolenza),

$F$  = sorgenti esterne

### 2.2.1 Modulo di calore

La temperatura dell'acqua di un bacino varia nello spazio e nel tempo; questo indica che il calore fornito dalla radiazione solare viene assorbito, trasportato dalle correnti e scambiato con l'atmosfera per mezzo di diversi processi, come evaporazione e convezione.

La variazione della temperatura dell'acqua nel tempo è data dall'equazione 6 e gli scambi di calore con l'atmosfera sono contenuti nel termine sorgente  $\varphi = Q/C$  (Zampato *et al.*, 1998).  $C$  è la capacità termica del volume  $V$  di fluido considerato con

$$C = c\rho V$$

$c=4183$  [J/kg K] calore specifico e  $\rho=1000.52$  [kg/m<sup>3</sup>] densità dell'acqua.  $Q$  è il flusso di calore per unità di tempo in W/m<sup>2</sup> scambiato tra l'atmosfera e mare attraverso la superficie marina, che si può scindere nella somma di quattro termini:

$$Q = Q_s + Q_b + Q_e + Q_h \quad (7)$$

I quattro contributi rappresentano altrettanti processi fisici:

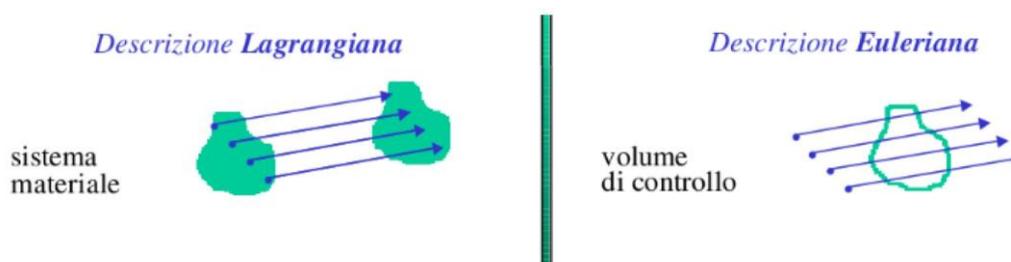
- $Q_s$  è il flusso di energia solare attraverso la superficie del mare (short-wave radiation).  $Q_s$  presenta un'elevata variabilità giornaliera e stagionale: i suoi valori dipendono da lunghezza del giorno, elevazione del sole, assorbimento da parte dell'atmosfera, copertura nuvolosa, riflessione alla superficie;
- $Q_b$  è il flusso netto di calore tra atmosfera e mare, in base alla legge di Stefan-Boltzmann (long-wave radiation): è dato dalla differenza tra il flusso di energia

irraggiato dalla superficie, a temperatura  $T_s$ , proporzionale a  $T_s^4$  dalla legge di Stefan, e il flusso ricevuto dall'atmosfera, a temperatura  $T_a$ , proporzionale a  $T_a^4$ .  $Q_b$  non presenta notevoli variazioni giornaliere o stagionali, né forti variazioni con la latitudine;

- $Q_e$  è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera attraverso i processi di evaporazione e condensazione: è proporzionale al gradiente della concentrazione di vapore acqueo sopra la superficie del mare alla velocità del vento  $W$ ;
- $Q_h$  è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera per conduzione e convezione. Questo termine è proporzionale al gradiente di temperatura nello strato atmosferico sopra la superficie del mare e come  $Q_e$  dipende dalla velocità del vento  $W$ , che è intesa come scala per l'effetto della turbolenza.

### 2.3. I MODELLI DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI

Per lo studio della dispersione del materiale sedimentario sono stati implementati due approcci, uno euleriano e uno lagrangiano. L'approccio lagrangiano identifica un sistema materiale (particella, insieme di particelle, corpo rigido, ecc.) e ne segue gli spostamenti nello spazio; in ogni istante e per ogni punto materiale sono descritti i valori delle grandezze di interesse e la posizione del punto medesimo, ottenendo una completa descrizione spazio-temporale del campo. Nella descrizione Euleriana, viceversa, si identifica un riferimento geometrico (punto, volume) fisso nello spazio, e se ne descrive i valori delle grandezze di interesse in ogni istante; a causa del movimento, però, i diversi valori per i diversi tempi sono riferiti a punti materiali (particelle fluide) diverse (Fig. 2).



**Fig. 2** – Rappresentazione grafica dell'approccio lagrangiano ed euleriano (<http://www.diiar.polimi.it/fanz/MdF/dispense/MdFparteB.pfd>).

Questi due metodi sono complementari: il modello lagrangiano ben si presta alla descrizione della dispersione spaziale dei materiali in sospensione, mentre quello euleriano può fornire indicazioni sia sulla dispersione che sull'accumulo del sedimento depositato nell'area di sversamento.

### 2.3.1 Modello lagrangiano di trasporto dei sedimenti

Il modello idrodinamico SHYFEM è corredato di un modulo lagrangiano che permette di seguire nello spazio i movimenti di singole particelle.

Il moto della singola particella  $k$  viene descritto attraverso la variazione della sua posizione nello spazio. Gli spostamenti  $dX$ ,  $dY$  e  $dZ$  sono quindi dovuti alle velocità di corrente  $u$ ,  $v$ ,  $w$  nelle tre direzioni, alle fluttuazioni turbolente  $u^i$ ,  $v^i$ ,  $w^i$  e ai moti verticali generati dai processi di sprofondamento  $w^b$ :

$$\frac{\partial X_k}{\partial t} = u + u^i \quad (8)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} = v + v^i \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_k}{\partial t} = w + w^i + w^b \quad (10)$$

I campi di corrente  $u$ ,  $v$  e  $w$  vengono forniti dal modello idrodinamico ad ogni intervallo temporale. Le fluttuazioni turbolente,  $u^i$ ,  $v^i$ ,  $w^i$ , vengono calcolate con il metodo Random Walk in funzione del coefficiente di diffusione orizzontale che viene calcolato mediante lo schema di Smagorinsky (1963) secondo la seguente equazione:

$$K_H = K \Delta x^2 \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

dove  $K$  è un parametro che varia tra 0,2 e 0,4.

In questo studio, dovendo simulare materiale sedimentario, ad ogni particella è stata assegnata una dimensione granulometrica a cui è stata associata una velocità di sprofondamento  $w^b$  appropriata.

### 2.3.2 Modello euleriano di trasporto dei sedimenti

In questo caso la dinamica del materiale in sospensione viene descritto dall'equazione 6. Alla superficie e al fondo le condizioni di contorno dell'equazione 6 per i sedimenti sono:

$$+\nu_{v,top} \frac{\partial S_{top}}{\partial z} + w_s S_{top} = FS \quad z=\text{superficie del primo livello} \quad (12)$$

$$-\nu_{v,bot} \frac{\partial S_{bot}}{\partial z} + w_s S_{bot} = ED \quad z=\text{fondo dell'ultimo livello}$$

dove  $FS$  è la quantità di sedimento sversata in superficie ed  $ED$  è il flusso netto di sedimento tra fondale marino e colonna d'acqua, calcolato come differenza tra deposizione e risospensione. Tale termine viene calcolato dal modello Sed-trans05 (Neumeier *et al.*, 2008).

Sedtrans05 non solo calcola i parametri dello strato limite, ma predice anche lo sviluppo delle forme di fondo e i tassi di trasporto solido, sia come carico di fondo sia in sospensione, per sabbie e sedimenti coesivi. Il modello matematico Sedtrans05 può essere usato per predire il tasso di trasporto e la direzione di sabbia o fango in condizioni di corrente stazionaria oppure onde e correnti combinate, al di fuori della zona di frangenza delle onde. Sedtrans05 adotta la teoria di Grant e Madsen (1986) dello strato limite al fondo per calcolare la velocità di taglio al fondo e il profilo di velocità.

### **3. APPLICAZIONE DEL MODELLO**

#### **3.1. LA GRIGLIA DI CALCOLO**

Il modello ad elementi finiti deve essere supportato da una griglia a struttura irregolare su cui far avvenire la simulazione. I file di griglia sono strutturati in modo da poter rappresentare in un piano cartesiano la struttura geometrica e la batimetria di un dato bacino attraverso punti, detti nodi, linee ed elementi triangolari variabili per dimensioni e forma. Il file di griglia è composto da due matrici consecutive, una che definisce i nodi e l'altra gli elementi tramite numero, coordinate e tipologia.

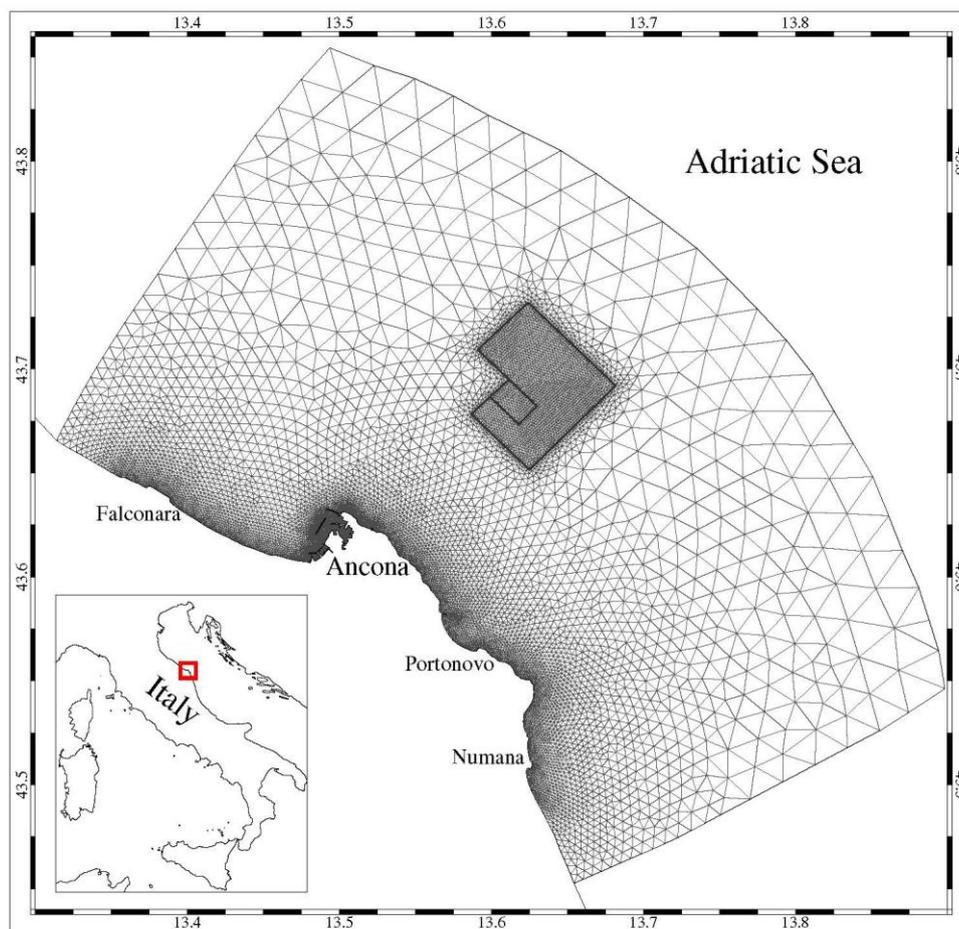
La griglia di calcolo utilizzata in questo studio rappresenta una parte della costa marchigiana (circa da Senigallia a Civitanova Marche) che comprende il porto di Ancona e si estende verso mare fino alla batimetria dei 55 m (circa 20-25 km dalla costa). La griglia di calcolo è stata ottenuta suddividendo l'area di interesse in 27036 elementi triangolari per descrivere la geometria della costa e nel dettaglio la zona portuale. Grazie alla differente dimensione degli elementi è stato possibile aumentare la risoluzione nella zona portuale fino a poche decine di metri. Nella zona di sversamento la risoluzione della griglia è di circa 150 m.

La griglia numerica di calcolo è mostrata in Fig. 3.

Sugli elementi della griglia di calcolo è stata interpolata la batimetria della zona ottenuta dall'unione dei seguenti dataset:

- rilievo del fondale della zona del porto di Ancona eseguita dall'Istituto Idrografico della marina nel 2011;
- rilievo del fondale della Baia di Mezzavalle eseguito dal CNR-ISMAR UOS Ancona nel 2003;
- batimetria del mare Adriatico tramite il portale EMODnet (European Marine Observation and Data Network) e di proprietà del CNR-ISMAR (Trincardi *et al.*, 2013).

La batimetria così ottenuta è mostrata in Fig. 4 con sovrapposta la griglia di calcolo.



**Fig. 3** - Griglia computazionale agli elementi finiti utilizzata in questo studio. Il poligono grigio nella zona a mare indica la zona predisposta allo sversamento dei sedimenti dragati.

### **3.2. SET-UP DELLE SIMULAZIONI**

Al fine di descrivere la circolazione idrodinamica la dispersione dei sedimenti nella zona costiera antistante la zona portuale di Ancona è stata effettuata una simulazione annuale per l'anno 2014.

E' stato applicato il modello SHYFEM nella versione tridimensionale con il contributo dei termini baroclini al fine di descrivere il campo di corrente, di salinità e temperatura dell'acqua. La colonna d'acqua è stata suddivisa in 18 livelli verticali aventi spessore variabile (da 1 m in superficie a 10 m nella parte più profonda). Le condizioni al contorno sono fornite da una applicazione del modello SHYFEM a tutto l'Adriatico. Tale modello a scala maggiore fornisce le informazioni relative al livello del mare, alla struttura tridimensionale delle velocità della corrente, della salinità e della temperatura del mare. Il modello viene forzato alla superficie del mare dai campi di vento, pressione atmosferica, pioggia e flussi di calore ottenuti dal modello meteorologico MOLOCH del CNR-ISAC avente una risoluzione spaziale di 1,55 km.

In questo studio il coefficiente di attrito è stato considerato costante su tutto il bacino e uguale a un valore di  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Il coefficiente di attrito per il vento è stato settato a un valore di  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Tali valori sono conformi a quelli adottati in simili studi (Bellafiore *et al.*, 2008; Ferrarin *et al.*, 2010).

La composizione granulometrica dei sedimenti risospesi considerata in questo studio è:

- argilla, 7,5%;
- silt, 66,5%;
- sabbie fini: 26,0%.

### 3.3. VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO

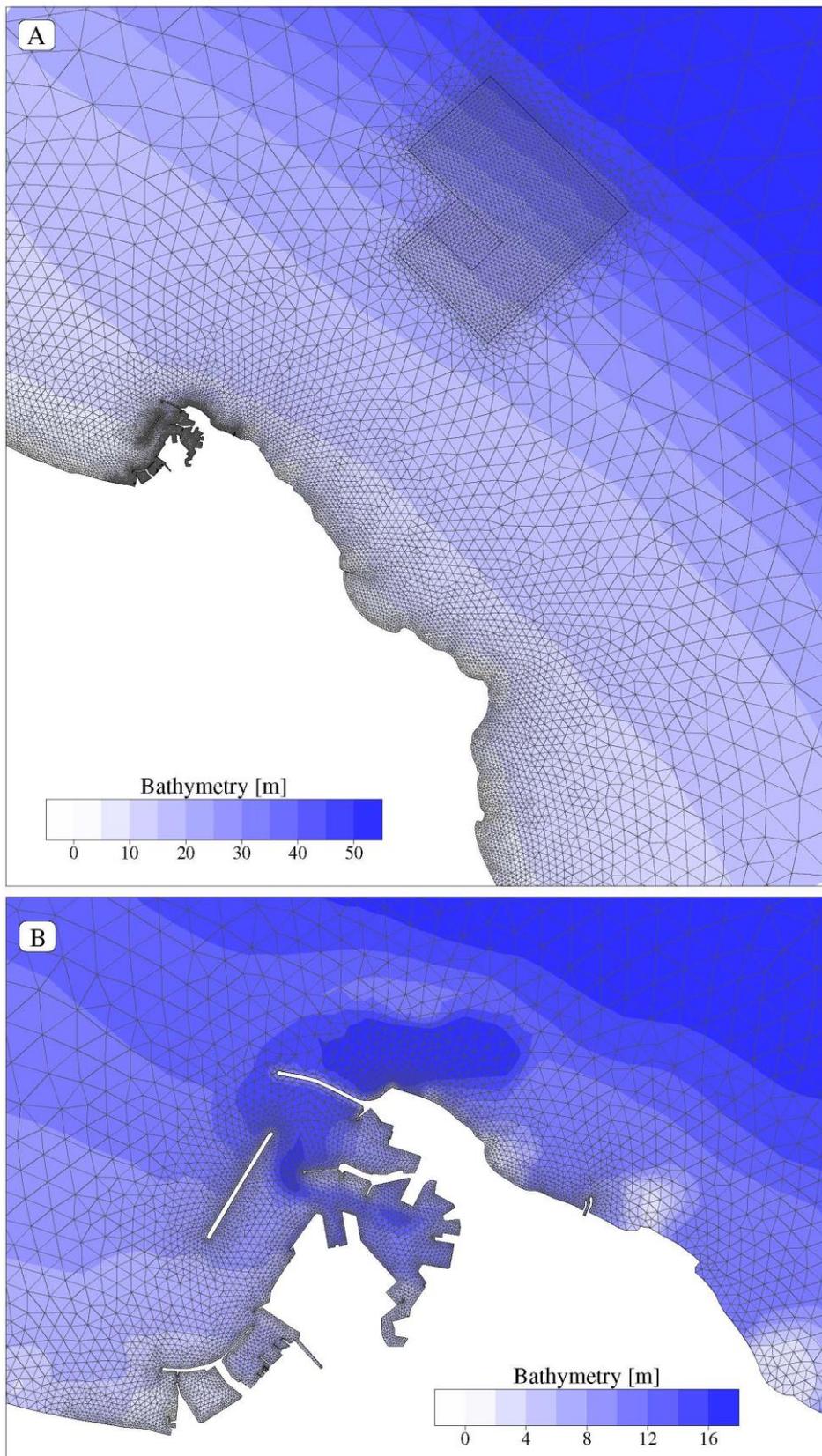
Allo stato attuale le uniche misure disponibili per la validazione del modello idrodinamico sono le osservazioni del livello del mare registrate nel porto di Ancona dal mareografo delle Rete Mareografica Nazionale. In corrispondenza del mareografo sono stati estratti i valori di livello del mare simulati dal modello matematico.

Al fine di valutare la capacità del modello nel riprodurre la dinamica mareale è stata effettuata l'analisi armonica sia dalle misure che dai risultati del modello. Dai risultati dell'analisi armonica riportati in Tab. 1 si evidenzia che il modello ben riproduce il segnale mareale nella zona di interesse e che sovrastima le componenti semidiurne e sottostima quelle diurne.

Una più accurata validazione del modello idrodinamico verrà effettuata utilizzando i dati sperimentali acquisiti nel corso del progetto.

Tab. 1 - Ampiezze delle principali componenti armoniche semi-diurne della marea ottenute dalle misure e dalle simulazioni numeriche per l'anno 2014 ad Ancona. Vengono anche riportate le differenze tra modello e misure. I valori sono espressi in cm.

| Costante armonica | Obs   | Mod   | Diff  |
|-------------------|-------|-------|-------|
| M2                | 6.55  | 7.07  | 0.52  |
| S2                | 3.56  | 3.92  | 0.36  |
| N2                | 1.20  | 1.30  | 0.10  |
| K2                | 1.06  | 1.26  | 0.18  |
| K1                | 12.45 | 12.40 | -0.05 |
| O1                | 4.26  | 3.84  | -0.42 |
| P1                | 4.29  | 4.10  | -0.19 |



**Fig. 4** - Batimetria della zona di interesse (A) e particolare della zona portuale di Ancona (B). La batimetria è sovrapposta alla griglia di calcolo.

#### **4. DESCRIZIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI METEOMARINI**

I risultati della simulazione idrodinamica sono stati analizzati al fine di caratterizzare la circolazione nella zona di interesse. Come prima analisi sono stati estratti i valori di velocità della corrente in due punti del dominio di calcolo:

- **A** - all'interno dell'area di sversamento;
- **B** - nella zona di escavo a ridosso del molo.

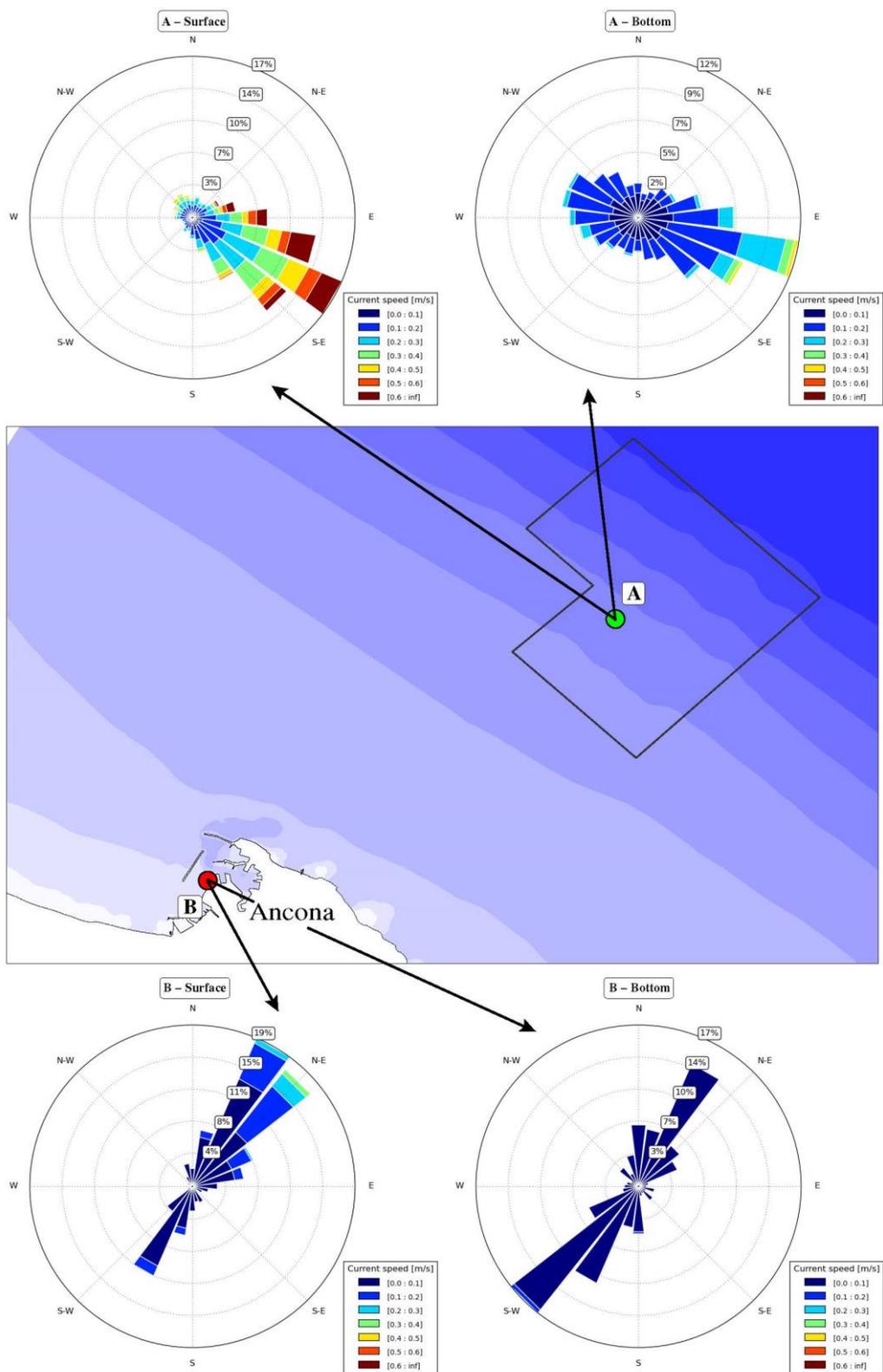
L'ubicazione dei due siti selezionati assieme ai grafici della velocità della corrente (sia in superficie che al fondo) sono mostrati in Fig. 5.

La corrente nella zona di sversamento è chiaramente caratterizzata da direzione di propagazione verso est-sud-est con intensità che superano i  $60 \text{ cm s}^{-1}$ . Tali risultati corrispondono alle osservazioni di Budillon *et al.* (2002) e confermano il ruolo predominante della corrente proveniente da nord-ovest alimentata dalle acque dolci del Po e degli altri fiumi del Nord Adriatico. Ne consegue che l'intensità di questa corrente è funzione della quantità di acqua dolce sversata in Nord Adriatico e dalle condizioni di stratificazione della colonna d'acqua.

Anche al fondo si riscontra una corrente prevalente avente direzione di propagazione est-sud-est, sebbene con intensità inferiore a quella in superficie. Da notare inoltre l'effetto più marcato al fondo della corrente, di modesta intensità, generata dalla marea identificabile da una circolazione anche in direzioni ovest-nord-ovest. L'orientamento di questi due regimi di corrente generati dalla marea corrisponde alle ellissi mareali delle principali costanti armoniche presentate da Budillon *et al.* (2002).

Nella zona di escavo la corrente in superficie è caratterizzata da una direzione di propagazione prevalente verso nord-est e risulta ovviamente allineata alla morfologia dei moli del porto. In superficie la corrente raggiunge raramente intensità superiori a  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Al fondo è evidente l'effetto della corrente di marea che genera una circolazione anche verso sud-ovest.

Rispetto a questi andamenti predominanti bisogna tenere presente che l'effetto locale del vento può modificare in modo significativo la dinamica della corrente superficiale. Al fine di identificare un insieme di scenari meteo-marini caratteristici è stato quindi analizzato il vento utilizzato per forzare il modello idrodinamico. Il diagramma del vento del modello meteorologico MOLOCH estratto in un sito a circa 10 km al largo del Porto di Ancona viene mostrato in Fig. 6.



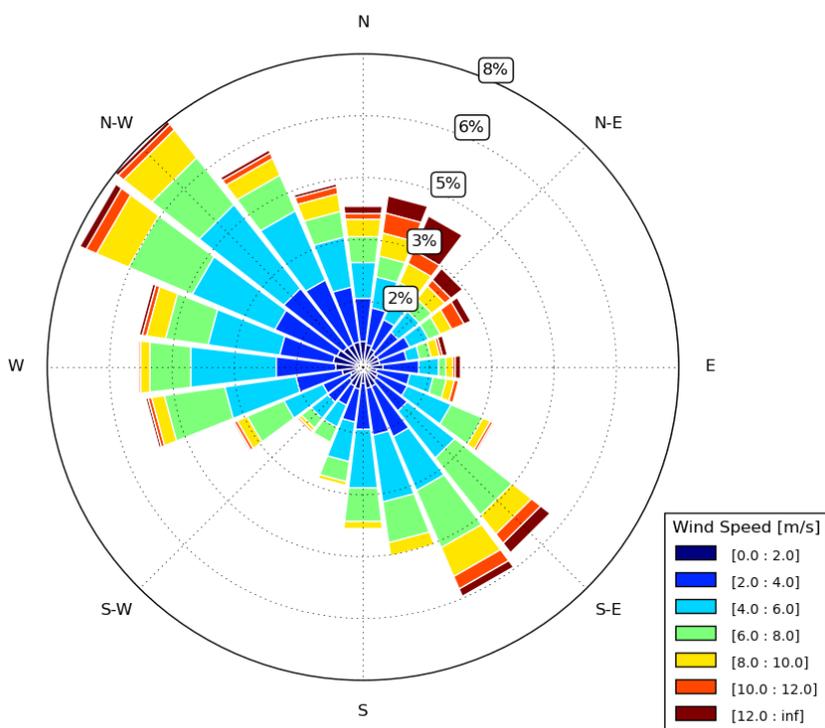
**Fig. 5** - Diagrammi della direzione e intensità della corrente estratta dai risultati modellistici alla superficie e al fondo in due punti del dominio di calcolo: A = nell'area di sversamento, B = nella zona di escavo.

Dalla

Si possono identificare tre regimi di vento predominanti e quindi determinare quattro scenari meteo-marini:

- S1 - calma di vento;
- S2 - vento di Bora (da nord-nord-est);
- S3 - vento di Scirocco (da sud-est);
- S4 - vento di Maestrale (da nord-ovest).

Non essendo possibile creare degli scenari sintetici, data la complessità della circolazione nella zona di indagine, per ognuno di questi regimi di vento è stato individuato un evento caratteristico nel 2014 per cui viene investigata la dispersione del materiale sedimentario.



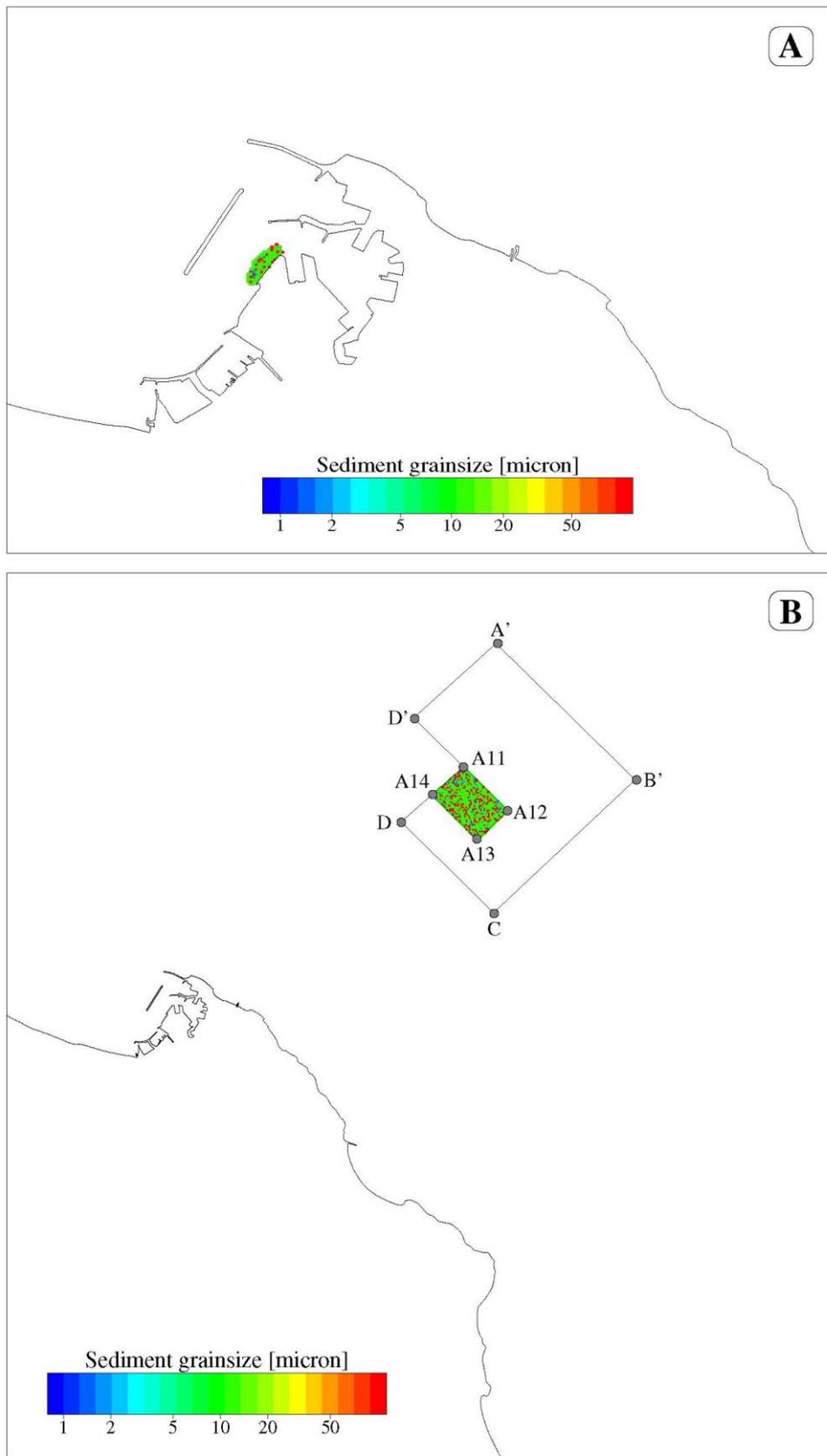
**Fig. 6** - Rosa dei venti estratti dal modello meteorologico MOLOCH in un sito a circa 10 km al largo del porto di Ancona. I dati sono rappresentati per direzione di provenienza.

## **5. SCENARI DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI**

Il modello lagrangiano è stato utilizzato per descrivere la possibile dispersione dei sedimenti marini sia nella zona di escavo che nell'area di sversamento a mare.

Si fa notare che viene qui simulata solo la plume di dispersione dei sedimenti messi in sospensione durante i lavori. Per quanto riguarda le operazioni di sversamento non viene quindi rappresentata la dinamica dei sedimenti che dalla nave depositano compatti al fondo, ma solo la dispersione di quella parte di granuli di sedimenti che vengono messi in sospensione. Tale quantità di materiale, che forma la plume di dispersione, può avere concentrazioni varie che dipendono dalla tipologia del materiale stesso e dalle modalità di sversamento. Non essendo presenti dati sito-specifici relativi alla concentrazione dei sedimenti nelle vicinanze dello sversamento, non è stato possibile associare alle particelle lagrangiane una quantità di massa di sedimento corrispondente. Comunque la metodologia utilizzata, tramite la simulazione di particelle lagrangiane, ben si presta a descrivere la dinamica del materiale in sospensione, indipendentemente dalla quantità di sedimento effettivamente sospeso.

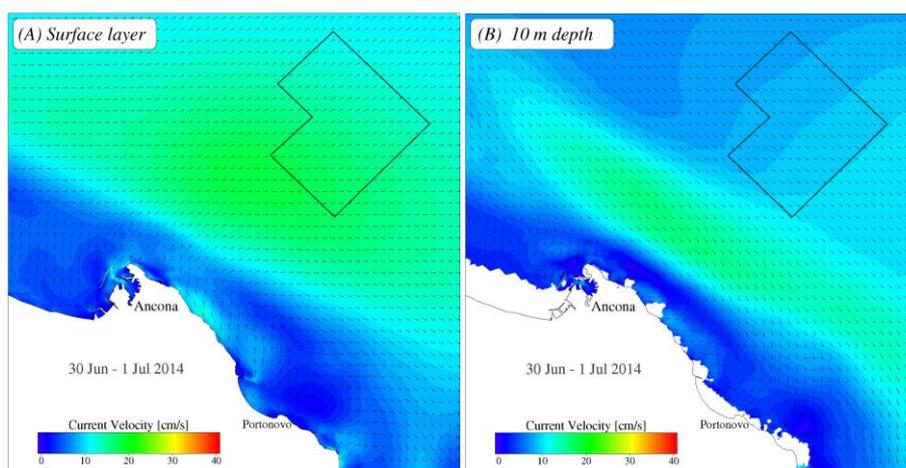
La distribuzione delle particelle rilasciate viene mostrata in Fig. 7. Il colore dei traccianti lagrangiani rappresenta la dimensione delle particelle di sedimento. Per simulare la dispersione del sedimento durante la fase di escavo vengono rilasciate le particelle in un'area del porto a ridosso del molo (Fig. 7A). Per simulare la dispersione del sedimento durante la fase di sversamento vengono rilasciate le particelle nell'area identificata dai punti A11, A12, A13 e A14 in Fig. 7B. Nella zona di escavo il modello rilascia 1000 particelle all'ora dalle ore 7 alle ore 19 del giorno selezionato lungo tutta la colonna d'acqua. Nell'area di sversamento vengono rilasciate 1000 particelle ogni 4 ore dalle ore 9 alle ore 18 del giorno selezionato solamente nello strato superficiale (3 sversamenti al giorno).



**Fig. 7** - Distribuzione delle particelle lagrangiane rilasciate nella zona di escavo (A) e nell'area di sversamento (B). Il colore indica la dimensione granulometrica delle particelle di sedimento.

### 5.1. SCENARIO 1 - CALMA DI VENTO

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 30/06 - 02/07/2014. La dinamica della circolazione è rappresentata in Fig. 8 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 8** - Scenario S1. Correnti medie nel periodo 30/06 - 01/07/2014 in superficie (A) e sul fondo (B).

In assenza di vento la circolazione è dominata dalla corrente costiera e modulata dalla marea. In media, la circolazione nella zona di sversamento in superficie (Fig. 8A) ha direzione est nord-est con intensità di circa  $20 \text{ cm s}^{-1}$ . Al fondo la corrente ha direzione da nord-ovest a sud-est con intensità di circa  $10 \text{ cm s}^{-1}$ .

La dispersione dei sedimenti in questo scenario viene presentata in Fig. 9 a diversi istanti temporali: dopo 2, 11, e 41 ore dall'inizio delle operazioni di escavo e sversamento. In generale si osserva che, ovviamente, i sedimenti più grossolani depositano in prossimità della zona di lavoro, mentre sedimenti più fini vengono trasportati dalle correnti marine. La maggior parte dei sedimenti siltosi risospesi durante le operazioni di dragaggio rimangono nella zona portuale, e una parte di essi viene trasportata al di fuori del porto verso sud. I sedimenti argillosi vengono facilmente tenuti in sospensione dalle correnti e trasportati verso sud.

Per quanto riguarda la zona di sversamento si può notare che la predominante corrente verso est sud-est fa sì che i sedimenti siltosi depositino leggermente a sud-est dell'area designata allo scarico. I sedimenti argillosi risospesi durante le fasi di sversamento vengono facilmente trasportati verso sud parallelamente alla costa e depositano oltre la batimetrica dei 15 m.

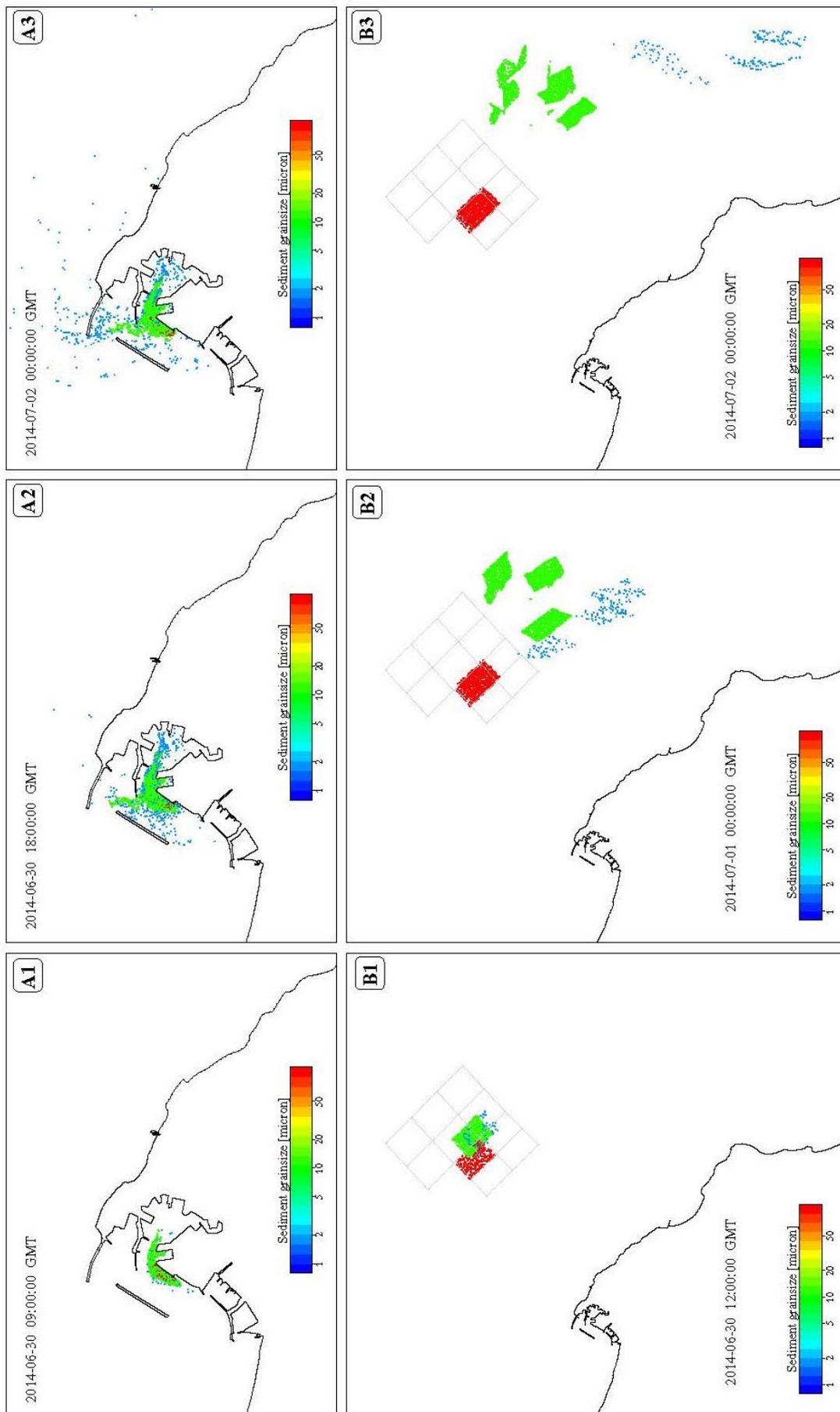
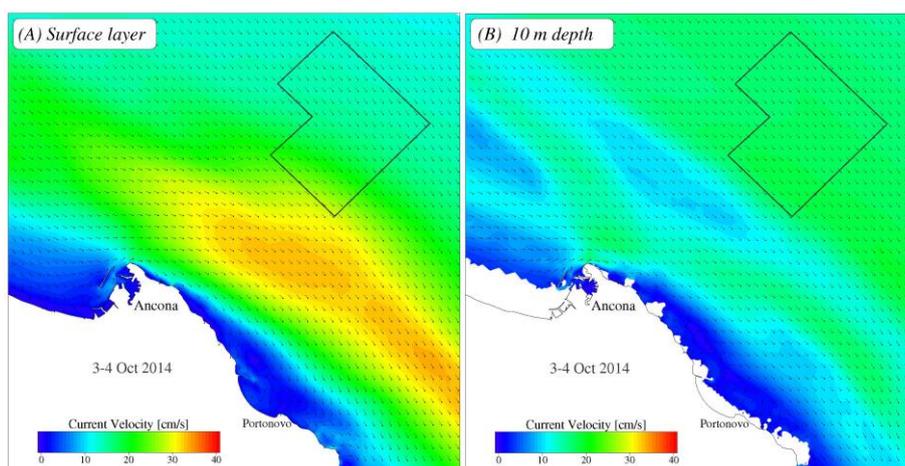


Fig. 9 - Scenario S1. Mappe di distribuzione delle particelle lagrangiane nella zona portuale (A1-A3) e nell'area di sversamento (B1-B3) a diversi istanti temporali.

## 5.2. SCENARIO 2 - VENTO DI BORA

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 03-04/10/2014. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 10 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 10** - Come la Fig. 8 ma per lo scenario S2. Correnti medie sul periodo 03-04/10/2014.

Durante questo scenario le correnti superficiali hanno in media direzione verso sud-est e intensità che raggiungono i  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Anche a 10 m di profondità le correnti hanno direzione prevalente verso sud-est.

Tale struttura di circolazione fa sì che i sedimenti risospesi siano trasportati con maggiore dinamismo rispetto lo scenari S1 (Fig. 11). I sedimenti sabbiosi e siltosi depositano quasi esclusivamente nella zona di escavo, mentre parte dei sedimenti fini vengono trasportati fuori dal porto verso sud in mare aperto.

Nell'area di sversamento si può notare che i sedimenti siltosi creano una plume che si estende verso sud-est e depositano al di fuori della zona di rilascio. I sedimenti argillosi vengono totalmente trasportati verso sud-est al di fuori del dominio di calcolo.

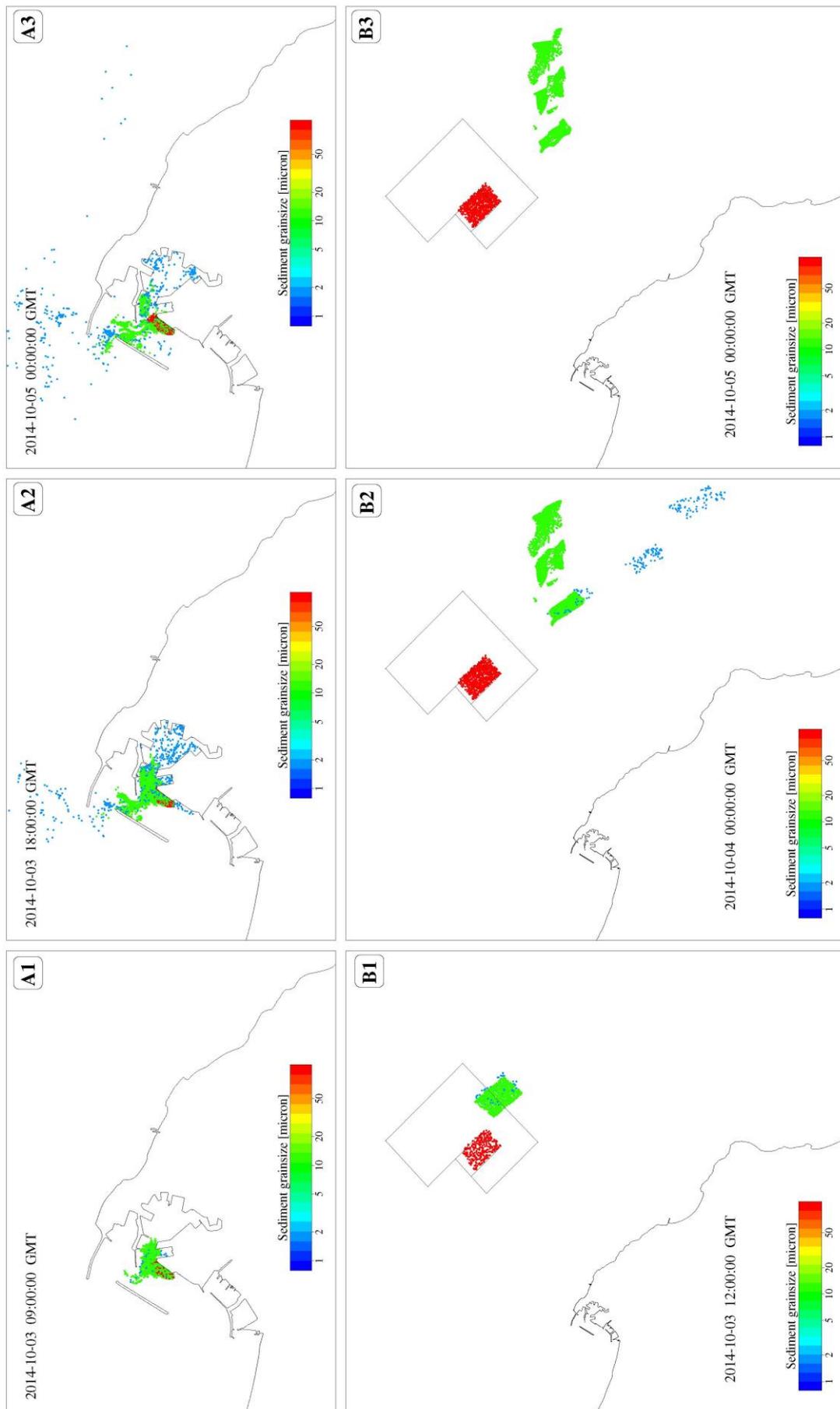
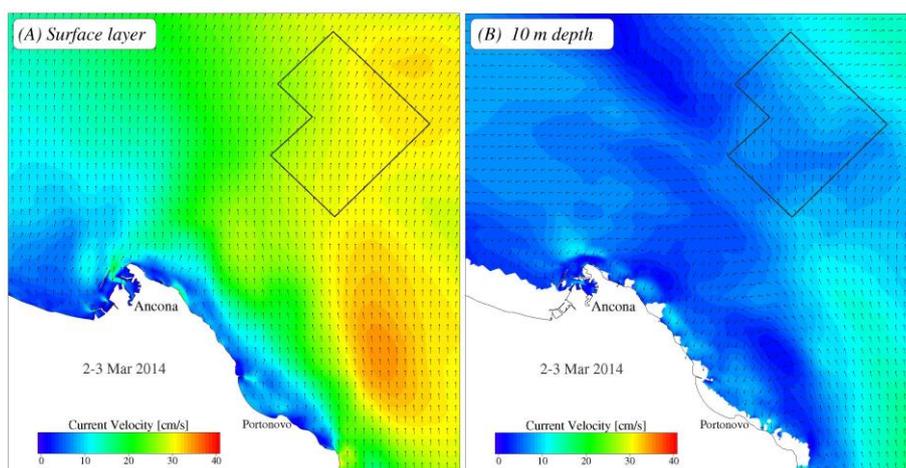


Fig. 11 - Come la Fig. 9 ma per lo scenario S2.

### 5.3. SCENARIO 3 - VENTO DI SCIROCCO

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 02-03/03/2014. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 12 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 12** - Come la Fig. 8 ma per lo scenario S3. Correnti medie sul periodo 02-03/03/2014.

Le correnti medie superficiali create dal vento di Scirocco sono generalmente dirette verso nord, con intensità nell'ordine dei  $15-25 \text{ cm s}^{-1}$ . Al fondo sono presenti correnti medie deboli con una non ben definita struttura e nella zona di sversamento sono dirette verso ovest-sud-ovest.

La dispersione dei sedimenti in questo scenario viene mostrata in Fig. 13.

Parte dei sedimenti fini risospesi nella zona di escavo vengono trasportati al di fuori dell'area portuale e tendono a depositare nella zona di mare aperto tra la città di Ancona e l'area di sversamento. I sedimenti fini in sospensione nella zona di sversamento tendono a formare una plume direzionata verso nord-est e quindi a essere trasportati verso il mare aperto.

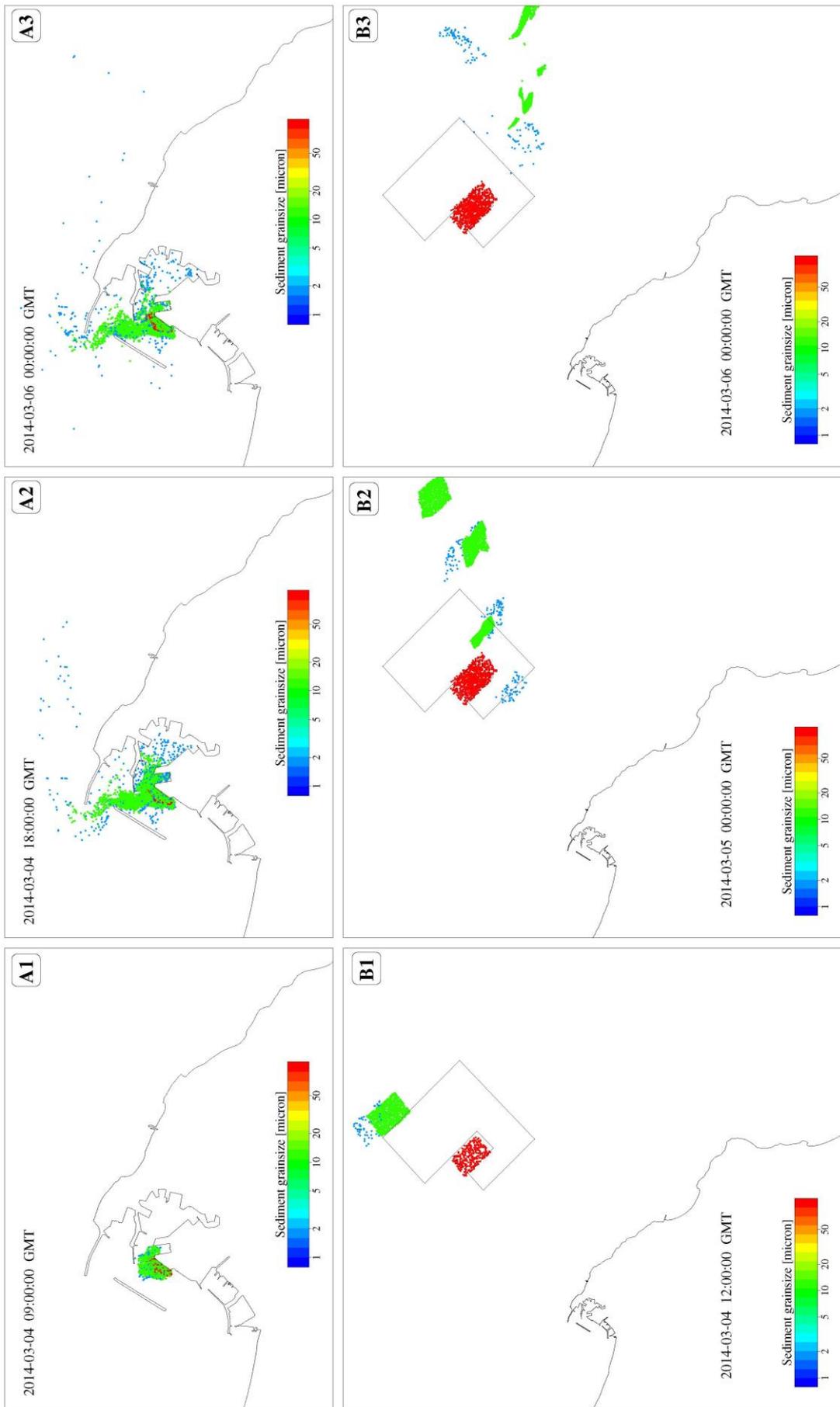
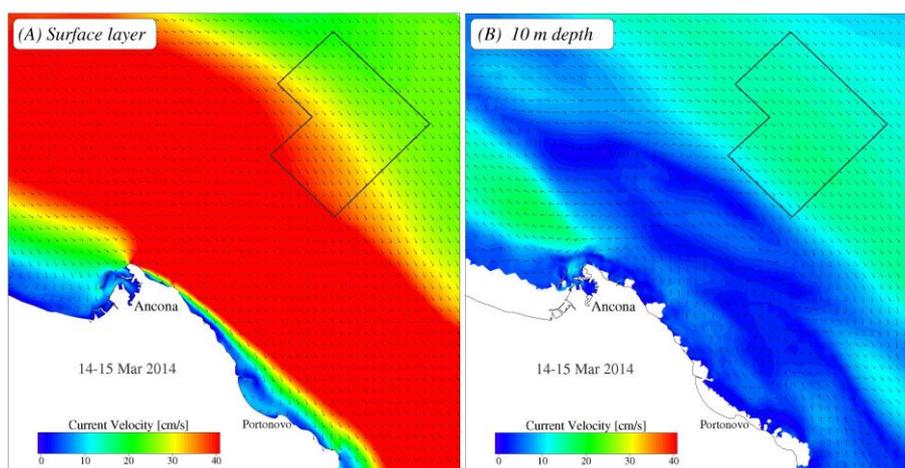


Fig. 13 - Come la Fig. 9 ma per lo scenario S3.

#### 5.4. SCENARIO 4 - VENTO DI MAESTRALE

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 14-15/03/2014. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 14 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 14** - Come la Fig. 8 ma per lo scenario S4. Correnti medie sul periodo 14-15/03/2014.

Nel periodo selezionato di evidenzia una forte corrente superficiale che interessa tutta la zona costiera con direzione media di propagazione verso sud-est e intensità di circa  $40 \text{ cm s}^{-1}$ . Nella zona a ridosso dei moli portuali la corrente media è orientata verso sud. A 10 m di profondità la struttura della corrente è più complessa, presentando direzione nord-ovest nella parte più prossima alla costa e sud-est in mare aperto. Nella zona intermedia sono evidenti alcune strutture di ricircolazione.

In questo scenario i sedimenti fini risospesi durante le operazioni di escavo rimangono principalmente nell'area portuale, ma parte di essi viene trasportata fuori dal porto sia verso sud che verso nord (Fig. 15 A1-A3).

Nella zona di sversamento i sedimenti vengono trasportati verso sud-est negli strati superficiali e in direzione contraria dalle correnti più profonde. Ne risulta che i sedimenti sabbiosi e siltosi tendono a depositare nei pressi della zona di sversamento (Fig. 15 B1-B3). I sedimenti argillosi vengono trasportati generalmente verso sud-est rimanendo comunque distanti dalla costa.

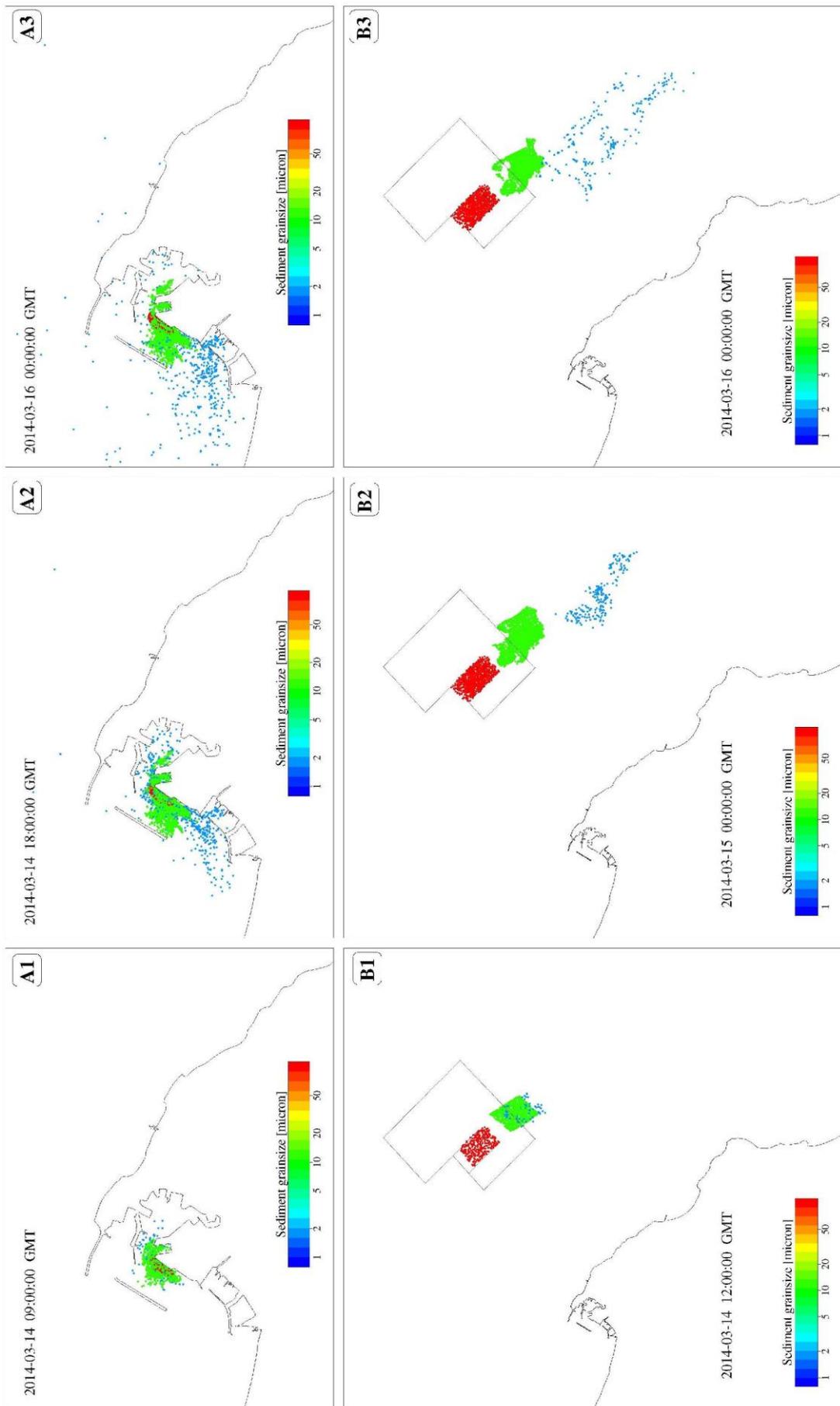


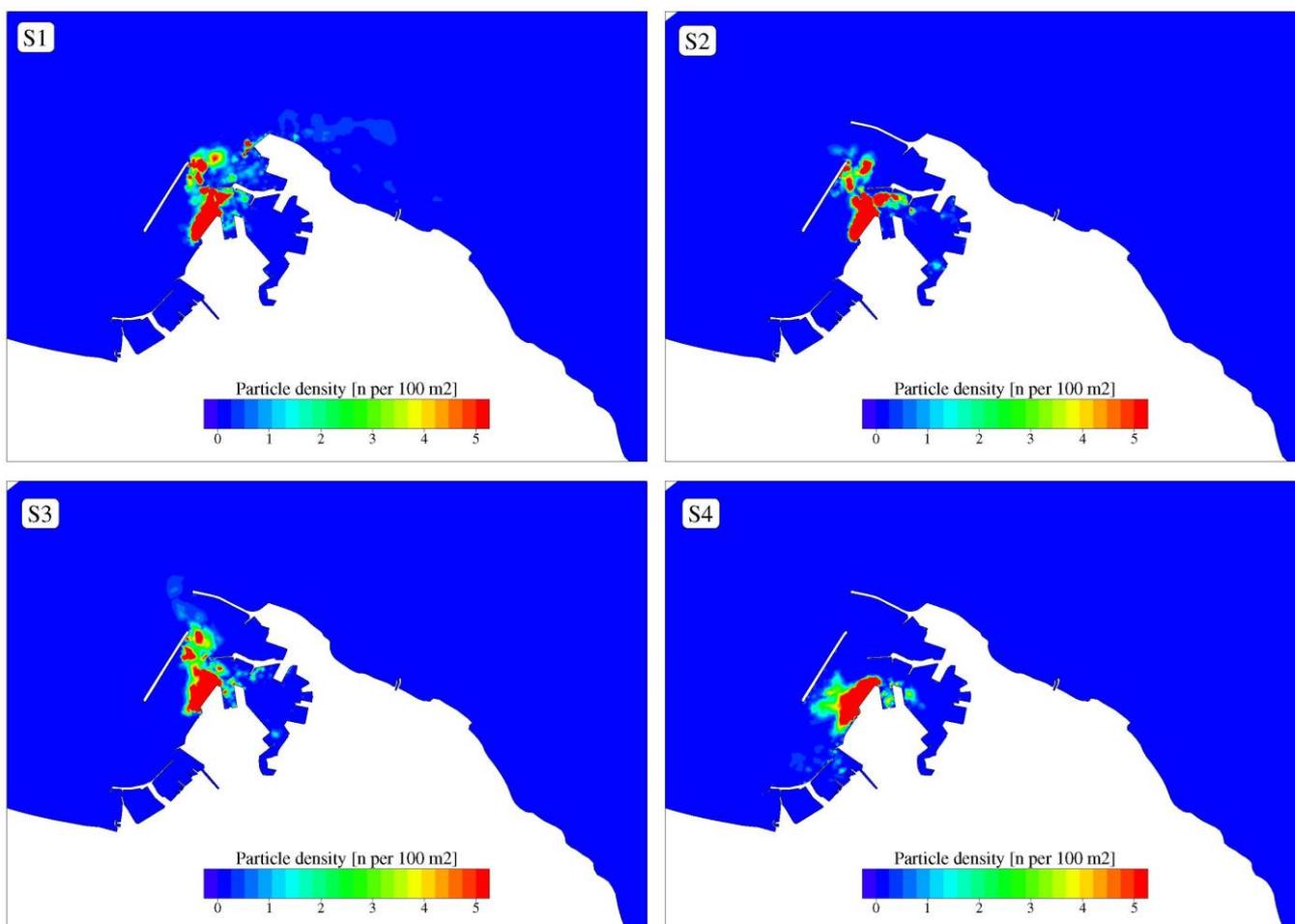
Fig. 15 - Come la Fig. 9 ma per lo scenario S4.

## 6. CONCLUSIONI

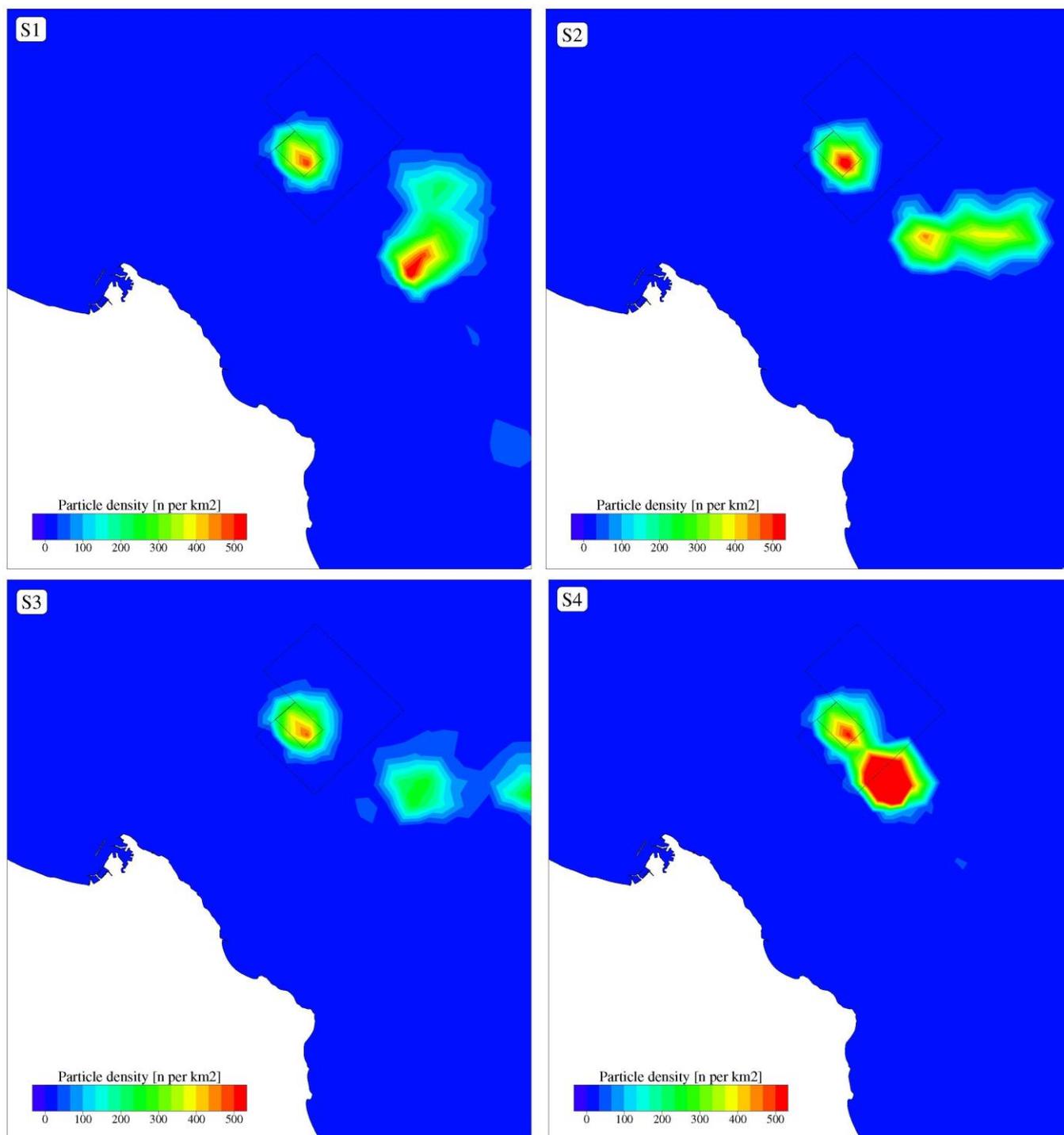
In questo primo rapporto tecnico abbiamo dimostrato che gli strumenti modellistici applicati sono idonei per descrivere la potenziale dispersione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo nel porto di Ancona e di sversamento in mare aperto.

In tutti gli scenari analizzati non è stata evidenziata la deposizione del materiale sedimentario lungo la costa del Promontorio del Conero.

Per una più chiara descrizione della distribuzione spaziale del materiale sedimentario depositato sono state calcolate le concentrazioni di particelle presenti in ogni punto della griglia di calcolo (Figg. 16 e 17).



**Fig. 16** - Densità di particelle lagrangiane (esprese come numero di particelle su 100 m<sup>2</sup>) risospese nella zona di escavo. La mappa mostra la situazione alla fine della simulazione, quando le particelle erano tutte depositate al fondo.



**Fig. 17** - Come la Fig. 16 ma per la zona di sversamento. La densità è espressa come numero di particelle su km<sup>2</sup>.

Le particelle di sedimento tendono in gran parte a depositare nelle vicinanze della zona di escavo (Fig. 16). Nella zona di sversamento una parte delle particelle tende a depositare all'interno della zona selezionata e parte deposita a sud-est della

stessa (Fig. 17).

Il modello idrodinamico verrà nei prossimi mesi ulteriormente calibrato e validato con le misure raccolte in situ. Conseguentemente i risultati presentati in questo primo rapporto tecnico sono da considerare preliminari e verranno perfezionati nel corso dello studio.

Tramite l'utilizzo del modello euleriano di trasporto di sedimenti, validato con le misure acquisite, nelle prossime fasi dello studio modellistico si cercherà inoltre di stimare lo spessore del materiale sedimentato al fondo.

## 7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bellafiore, D., 2009. *Study of the circulation processes in the northern Adriatic sea - coastal area and Venice lagoon inlets*. Ph.D. thesis. University of Bologna, Department of Geophysics. Bologna, IT.
- Bellafiore, D., Umgiesser, G., 2010. Hydrodynamic coastal processes in the North Adriatic investigated with a 3D finite element model. *Ocean Dyn.* 60, 255–273.
- Bellafiore, D., Umgiesser, G., Cucco, A., 2008. Modelling the water exchanges between the Venice Lagoon and the Adriatic Sea. *Ocean Dyn.* 58, 397–413.
- Bergamasco, A., Oguz, T., Malanotte-Rizzoli, P., 1999. Modeling dense water formation and winter circulation in the northern and central Adriatic Sea. *J. Mar. Syst.* 20, 279–300.
- Blumberg, A., Mellor, G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Pages 1–16, in: Heaps N.S. (Ed.), *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. AGU, Washington, DC.
- Brown, J.M., Souza, A.J., Wolf, J., 2010. An 11-year validation of wave- surge modelling in the Irish Sea, using a nested POLCOMS-WAM modelling system. *Ocean Model.* 33, 118–128.
- Budillon, G., Grilli, F., Ortona, A., Russo, A., Tramontin, M., 2002. An Assessment of Surface Dynamics Observed Offshore Ancona with HF Radar. *Mar. Ecol.* 23, 21–37.
- Burchard, H., Petersen, O., 1999. Models of turbulence in the marine environment - a comparative study of two equation turbulence models. *J. Mar. Syst.* 21, 29–53.
- Crise, A., Cavazzon, F., Malačić, V., Querin, S., 2003. Circolazione Indotta dal Vento di Bora nel Golfo di Trieste: Studio Numerico in Condizioni di Stratificazione. in: *La difesa idraulica del territorio 2003*.
- Cushman-Roisin, B., Korotenko, K., Dietrich, D.E., 2005. Simulation and Characterization of the Adriatic Sea Mesoscale Variability. *J. Geoph. Res. - Oceans Special Adriatic Sea Issue*.
- Ferrarin, C., Cucco, A., Umgiesser, G., Bellafiore, D., Amos, C.L., 2010. Modelling fluxes of water and sediment between the Venice Lagoon and the sea. *Cont. Shelf Res.* 30, 904–914.
- Franco, P., Jeftic, L., Rizzoli, P.M., Michelato, A., Orlic, M., 1982. Descriptive model of the northern adriatic. *Oceanol. Acta* 5.
- Grant, W.D., Madsen, O.S., 1986. The continental shelf bottom boundary layer. *Annual Review of Fluid Mechanics* 18, 265–305.
- Kim, S.Y., Yasuda, T., Mase, H., 2008. Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves. *App. Oc. Res.* 30, 311–322.
- Neumeier, U., Ferrarin, C., Amos, C.L., Umgiesser, G., Li, M.Z., 2008. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters. *Comput. Geosci.* 34, 1223–1242.
- Oddo, P., Pinardi, N., 2008. Lateral open boundary conditions for nested limited area models: A scale selective approach. *Ocean Mod.* 20, 134–156.
- Oddo, P., Pinardi, N., Zavatarelli, M., 2005. A numerical study of the inter- annual variability of the Adriatic Sea. *Sci. Total Environ.* 353, 39–56.
- Orlic, M., Gacic, M., Violette, P.E.L., 1992. The currents and circulation of the Adriatic Sea. *Oceanol. Acta* 15, 109–124.
- Polli, S., 1960. *La propagazione delle maree nell'Alto adriatico*. Istituto Sperimentale Talassografico di Trieste 370.
- Pullen, J., Doyle, J.D., Hodur, R., Ogston, A., Book, J.W., 2003. Coupled ocean-atmosphere and nested modeling of the Adriatic Sea during winter and spring 2001. *J. Geoph. Res. - Oceans* 108.
- Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T.W., Liau, J.M., Ou, S.H., Umgiesser, G., Zanke, U., 2009. On the development and verification of a 2d coupled wave-current model on unstructured meshes. *J. Mar. Syst.* 78, S244–S254.
- Sherwood, C.R., Carnie, S., Cavaleri, L., Chiggiato, J., Das, H., Doyle, J.D., Harris, C.K., Niedoroda, A.W., Pullen, J., Reed, C.W., Russo, A., Sclavo, M., Signell, R.P., Traykowski, P., Warner, J.C., 2004. Sediment Dynamics in the Adriatic Sea Investigated with Coupled Models. *Oceanography* 17, 58–69.

- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.* 91, 99–152.
- Tomasin, A., Pirazzoli, P.A., 1999. The Seiches in the Adriatic Sea. *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti* CLVII, 299–316.
- Trincardi, F., Campiani, E., Correggiari, A., Fogliani, V.M., Remia, A., 2013. Bathymetry of the Adriatic Sea: The legacy of the last eustatic cycle and the impact of modern sediment dispersal. *Journal of Maps* 10, 151 – 158.
- Umgiesser, G., 1997. Modelling the Venice Lagoon. *Inter. J. Salt Lake Res.* 6, 175–199.
- Umgiesser, G., 2000. SHYFEM Finite Element Model for Coastal Seas - User Manual - version 4.56. Pp. 26.
- Umgiesser, G., Bergamasco, A., 1995. Outline of a Primitive Equations Finite Element Model. *Rapporto e Studi, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, XII*, 291–320.
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *J. Mar. Syst.* 51, 123–145.
- Zampato, L., Umgiesser, G., Peron, F., 1998. *Sviluppo di un modello di scambio termico all'interfaccia acqua-aria nella Laguna di Venezia*. Technical Report 221. ISDGM/CNR. Venice. Pp. 33.
- Zavatarelli, M., Pinardi, N., Kourafalou, V.H., Maggiore, A., 2002. Diagnostic and prognostic model studies of the Adriatic Sea general circulation: Seasonal variability. *J. Geoph. Res. - Oceans* 107.

## **ALLEGATO A**

### **SIMULAZIONI CELLE DI SVERSAMENTO**

Questo allegato riporta i risultati delle simulazioni effettuate per studiare la dispersione dei sedimenti sversati in tutte le celle di sversamento selezionate.

La metodologia utilizzata, comprendente la descrizione dei modelli matematici e gli scenari, è descritta nel Capp. 2 e 3 del presente rapporto.

## I. DESCRIZIONE DEI SITI DI SVERSAMENTO E DEGLI SCENARI

La zona di sversamento a mare è divisa in celle numerate da C1 a C10 secondo lo schema riportato in Fig. 1.

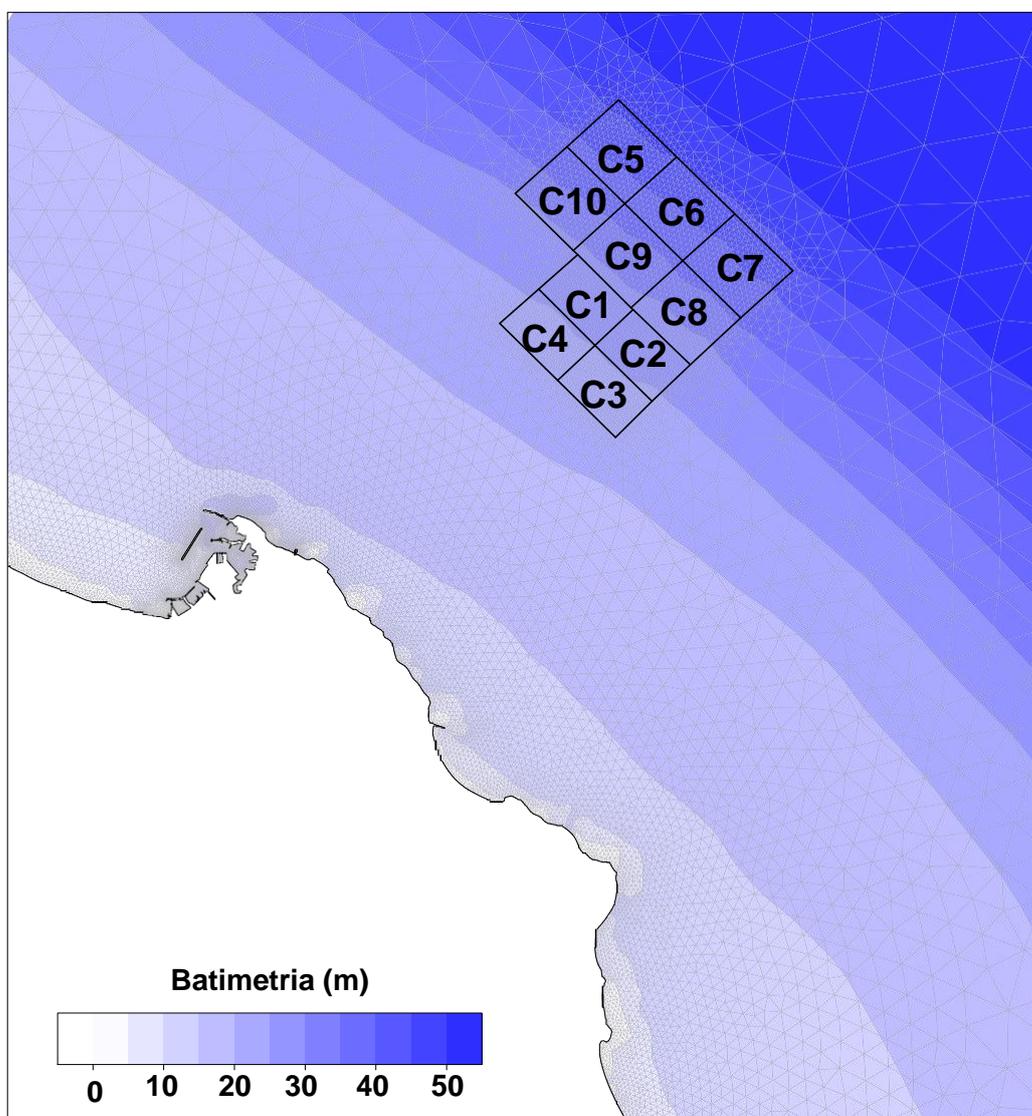


Fig. 1 - Mappa delle celle di sversamento dei sedimenti dragati.

La dispersione dei sedimenti è stata analizzata per ogni cella di sversamento separatamente. Per ogni cella sono state effettuate 4 simulazioni corrispondenti agli scenari meteomarini selezionati:

- S1 - calma di vento;
- S2 - vento di Bora (da nord-nord-est);
- S3 - vento di Scirocco (da sud-est);

- S4 - vento di Maestrale (da nord-ovest);

Le particelle simulate in questo studio sono caratterizzate da una distribuzione granulometrica corrispondente a quella dei sedimenti lavorati nella zona del porto di Ancona che nello specifico comprende:

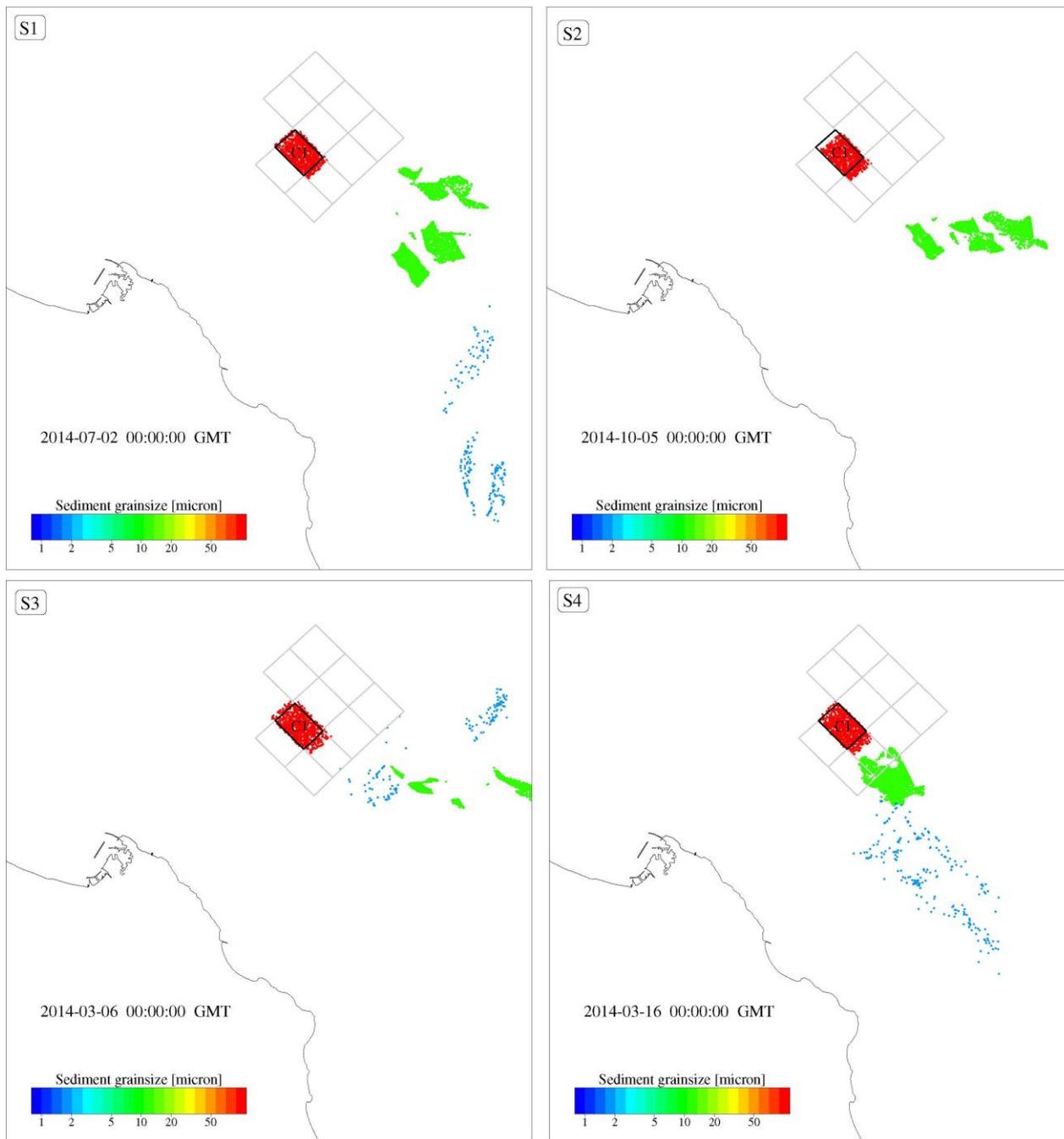
- argilla, 7,5 %;
- silt, 66,5 %;
- sabbie fini, 26,0 %.

## **II. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI**

In questa sezione vengono riportati i risultati della dispersione delle particelle lagrangiane rilasciate nelle diverse celle di sversamento. Per ognuna delle celle di sversamento (C1 - C10) viene mostrato, per ogni scenario meteomarinò, la situazione dopo due giorni dallo sversamento, quando le particelle sono depositate al fondo.

Per ogni cella sono riportate le distanze minime delle particelle dalla costa per gli scenari in cui sembrerebbe verificarsi una situazione critica.

**CELLA 1**

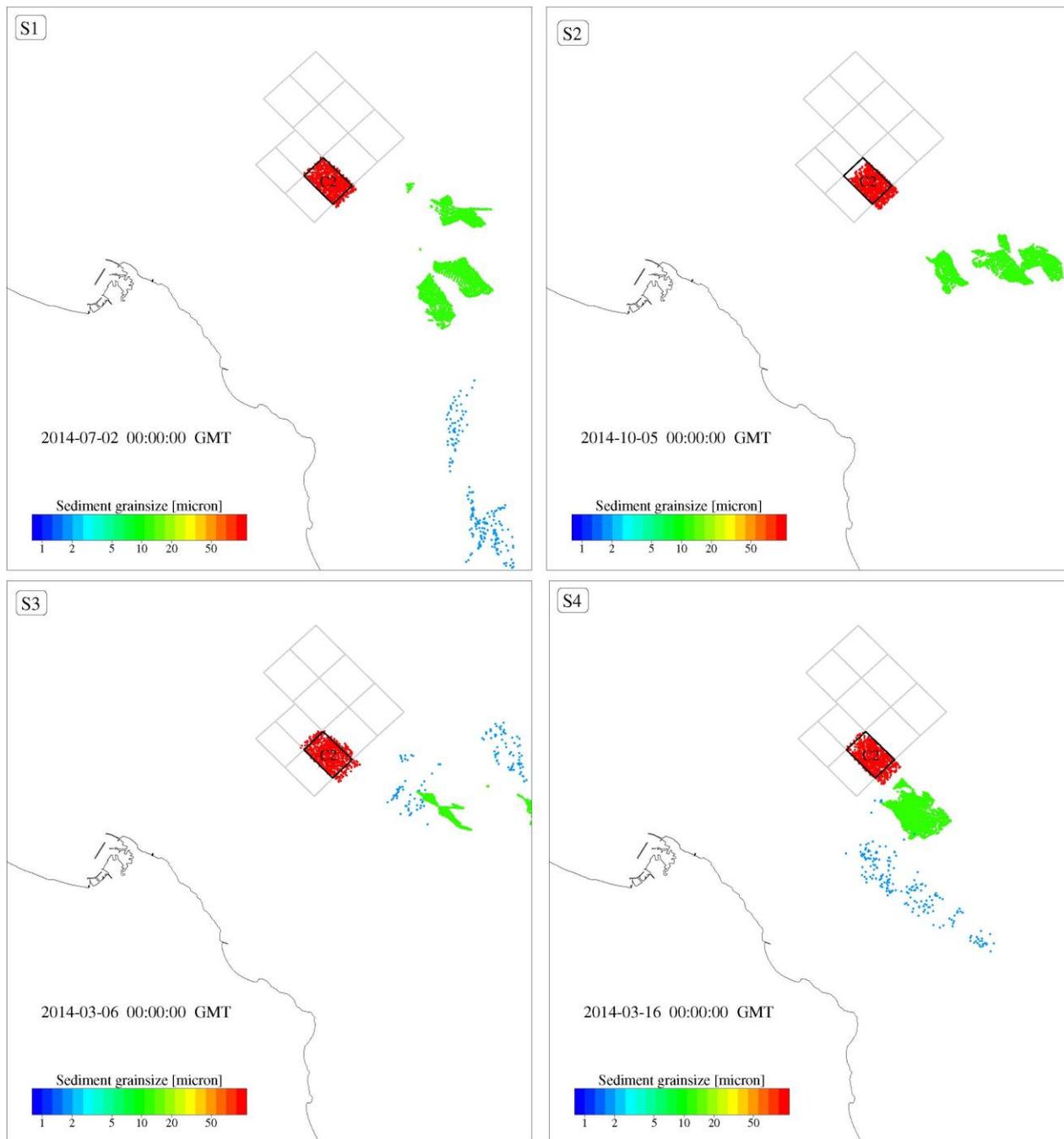


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 3,6 miglia nautiche;

Scenario S4: 3,2 miglia nautiche.

**CELLA 2**

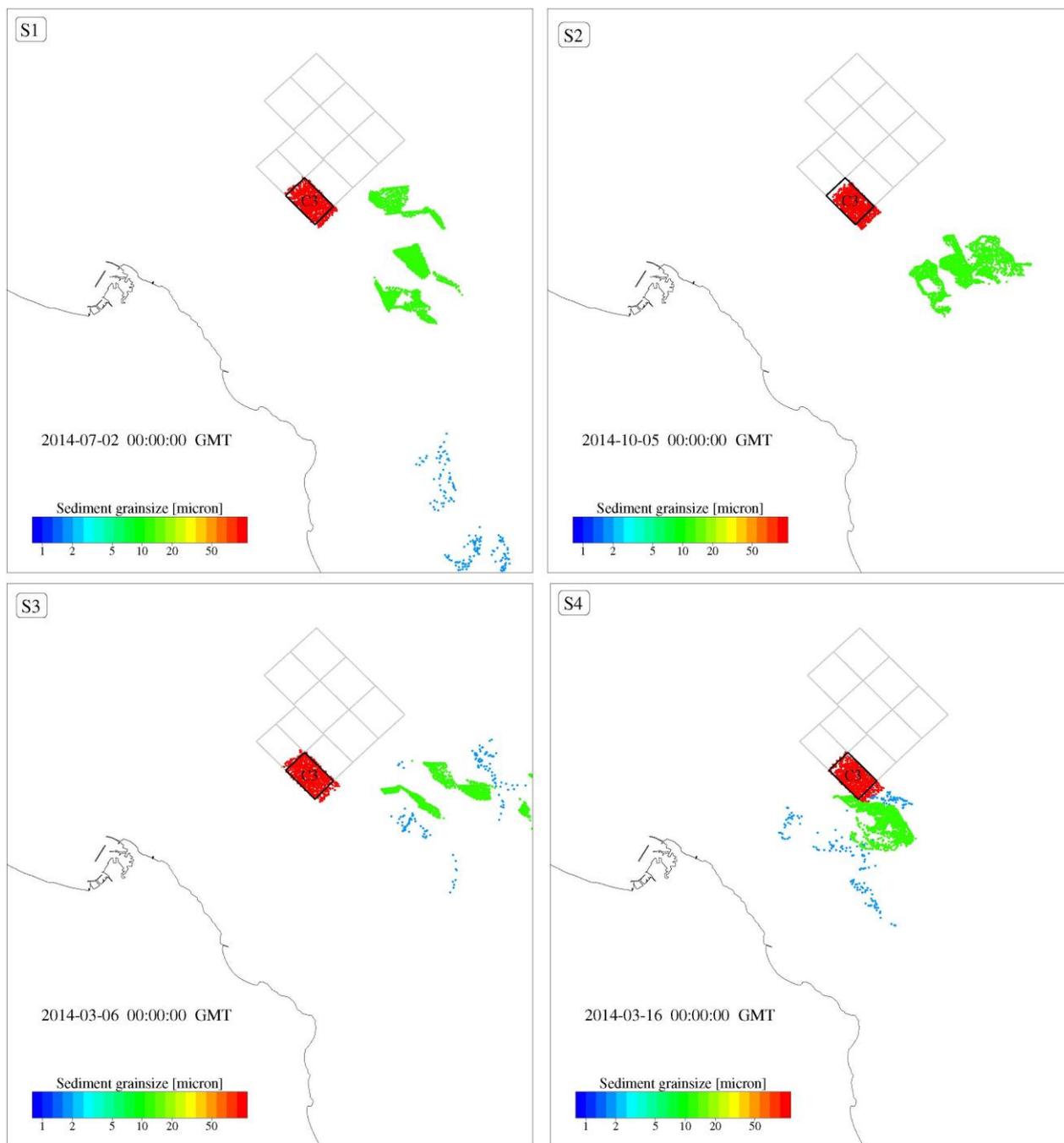


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 3,69 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,97 miglia nautiche.

**CELLA 3**

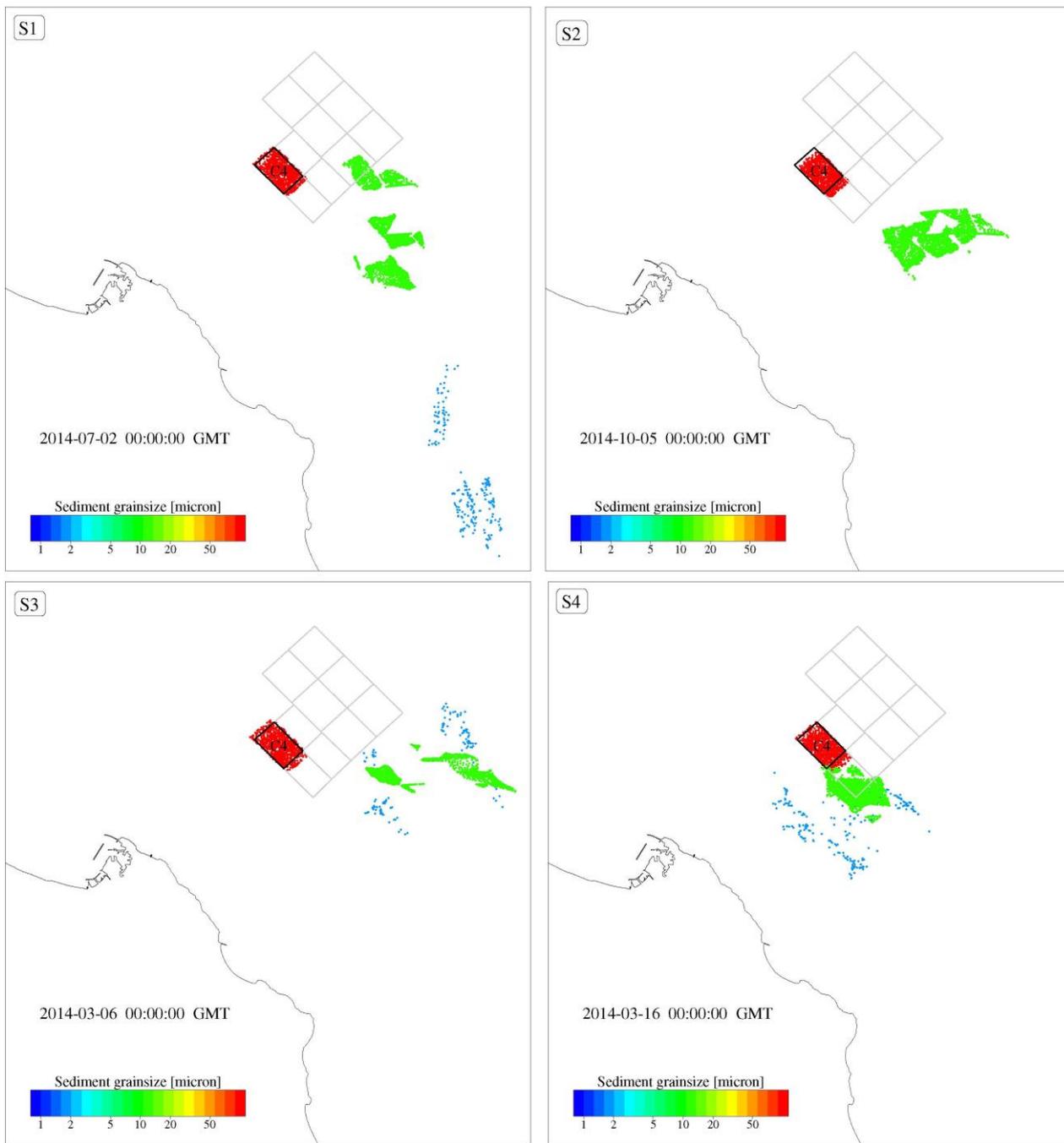


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 2,81 miglia nautiche;

Scenario S4: 1,92 miglia nautiche.

**CELLA 4**

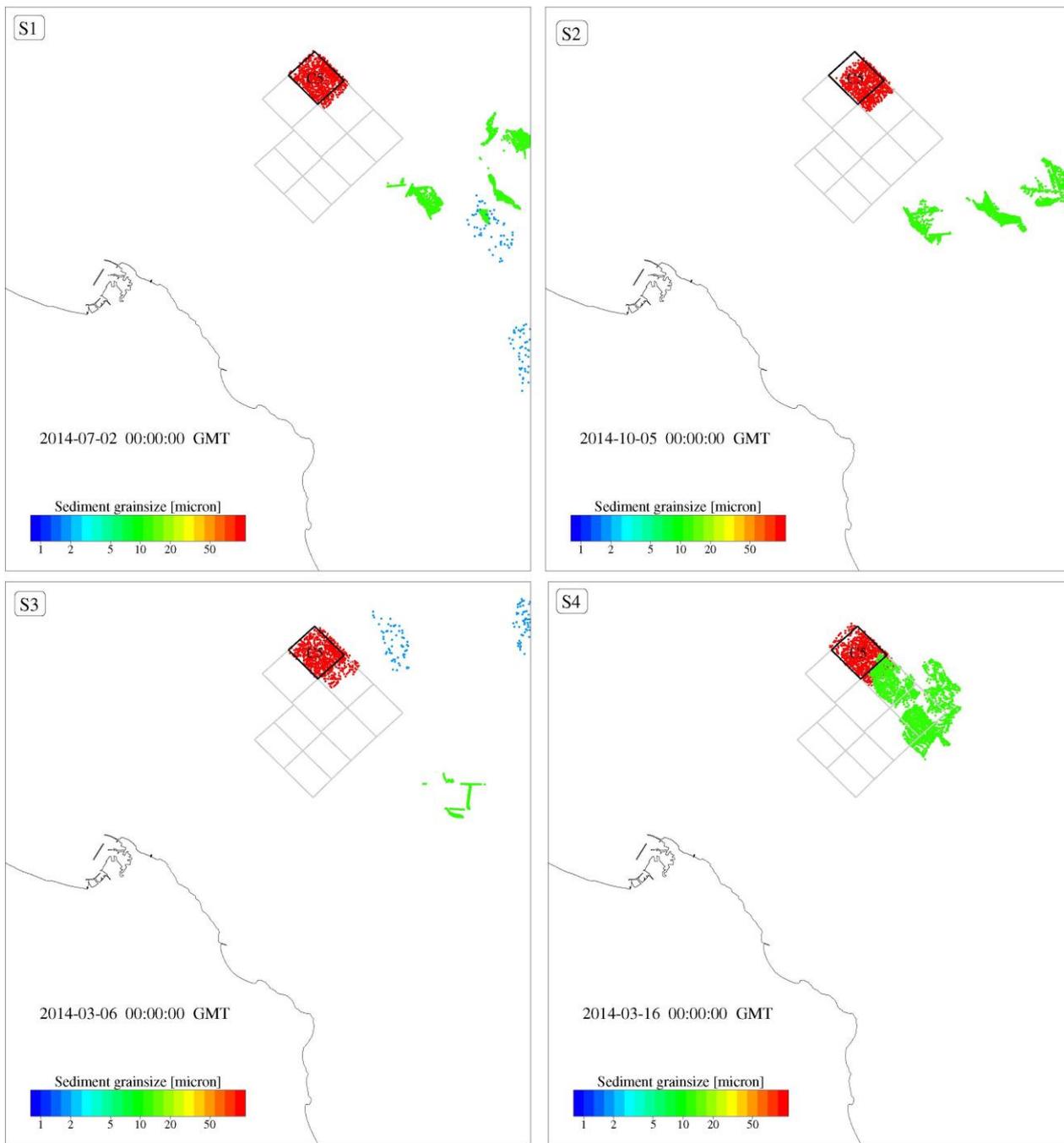


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 3,19 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,13 miglia nautiche.

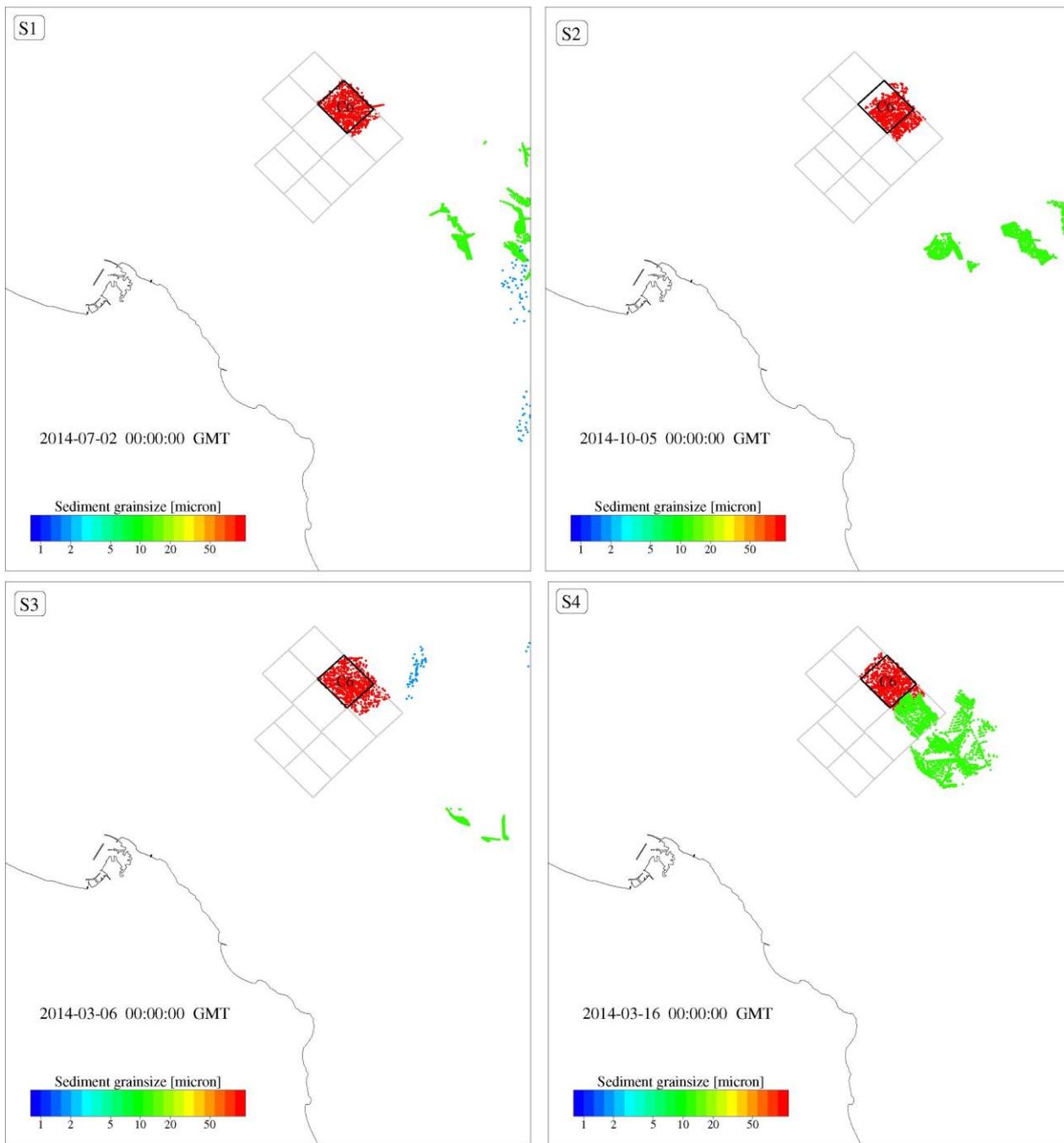
**CELLA 5**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 5,9 miglia nautiche.

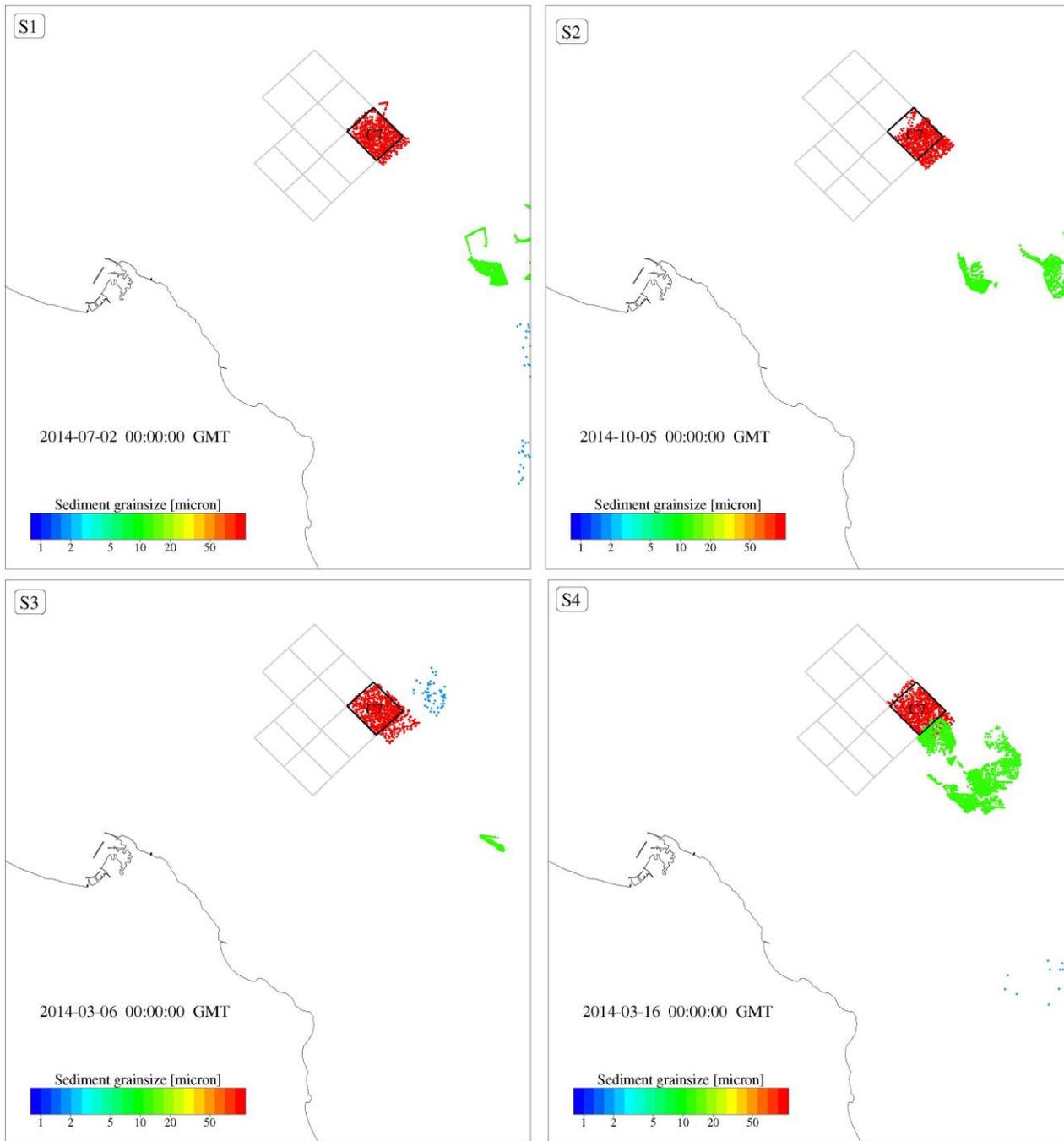
**CELLA 6**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 5,6 miglia nautiche.

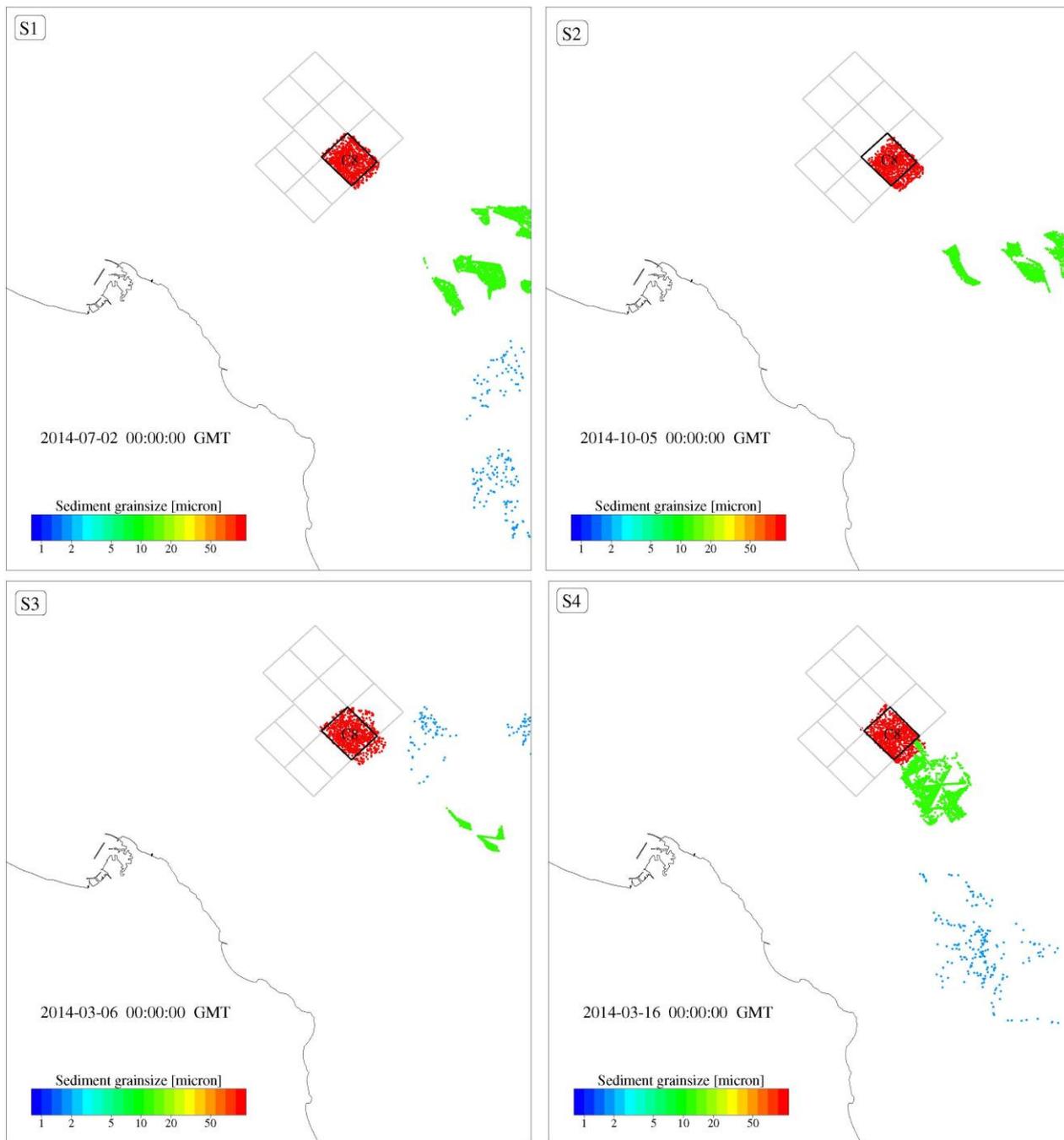
**CELLA 7**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 5,8 miglia nautiche.

**CELLA 8**

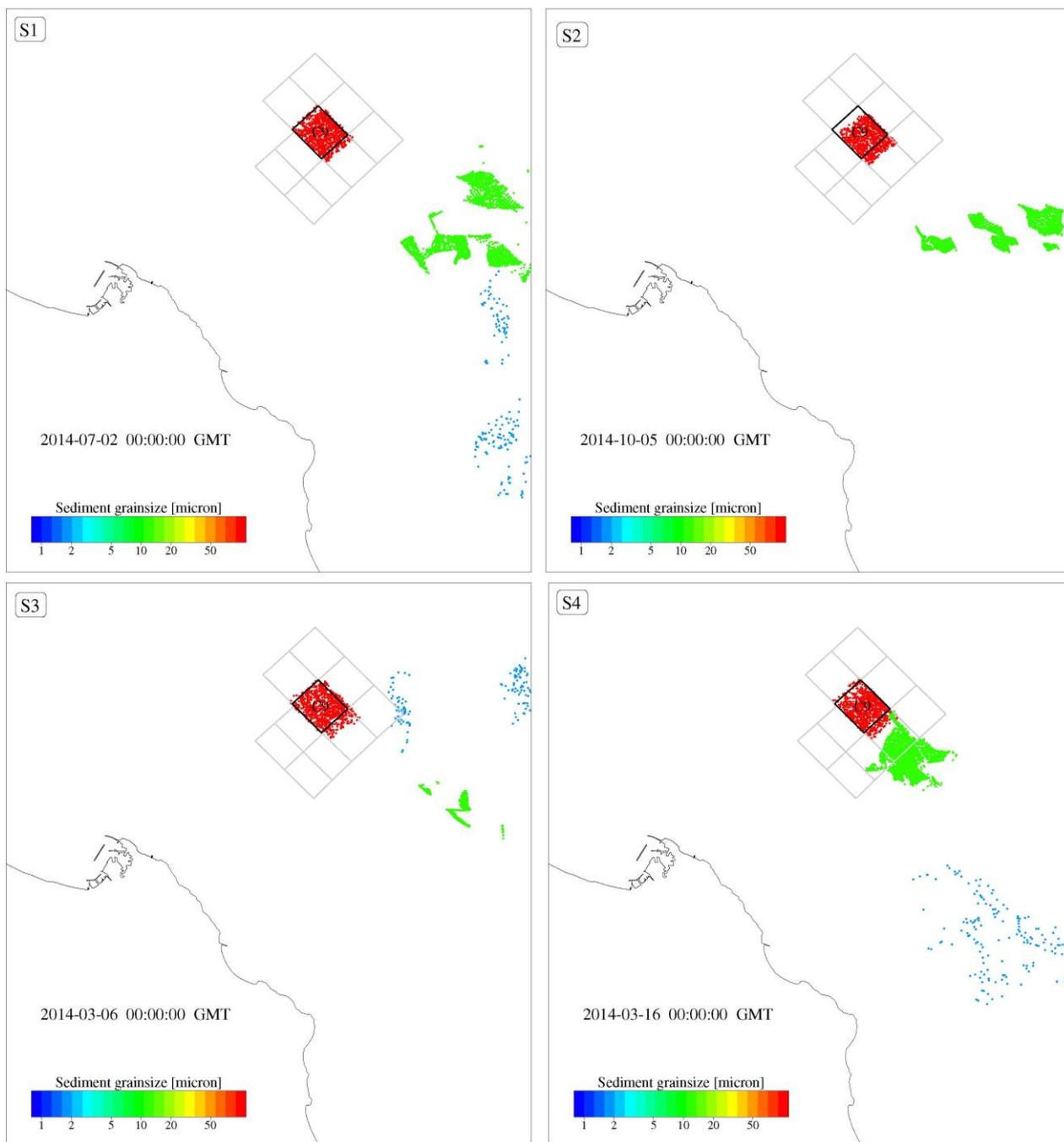


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 4,20 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,51 miglia nautiche.

**CELLA 9**

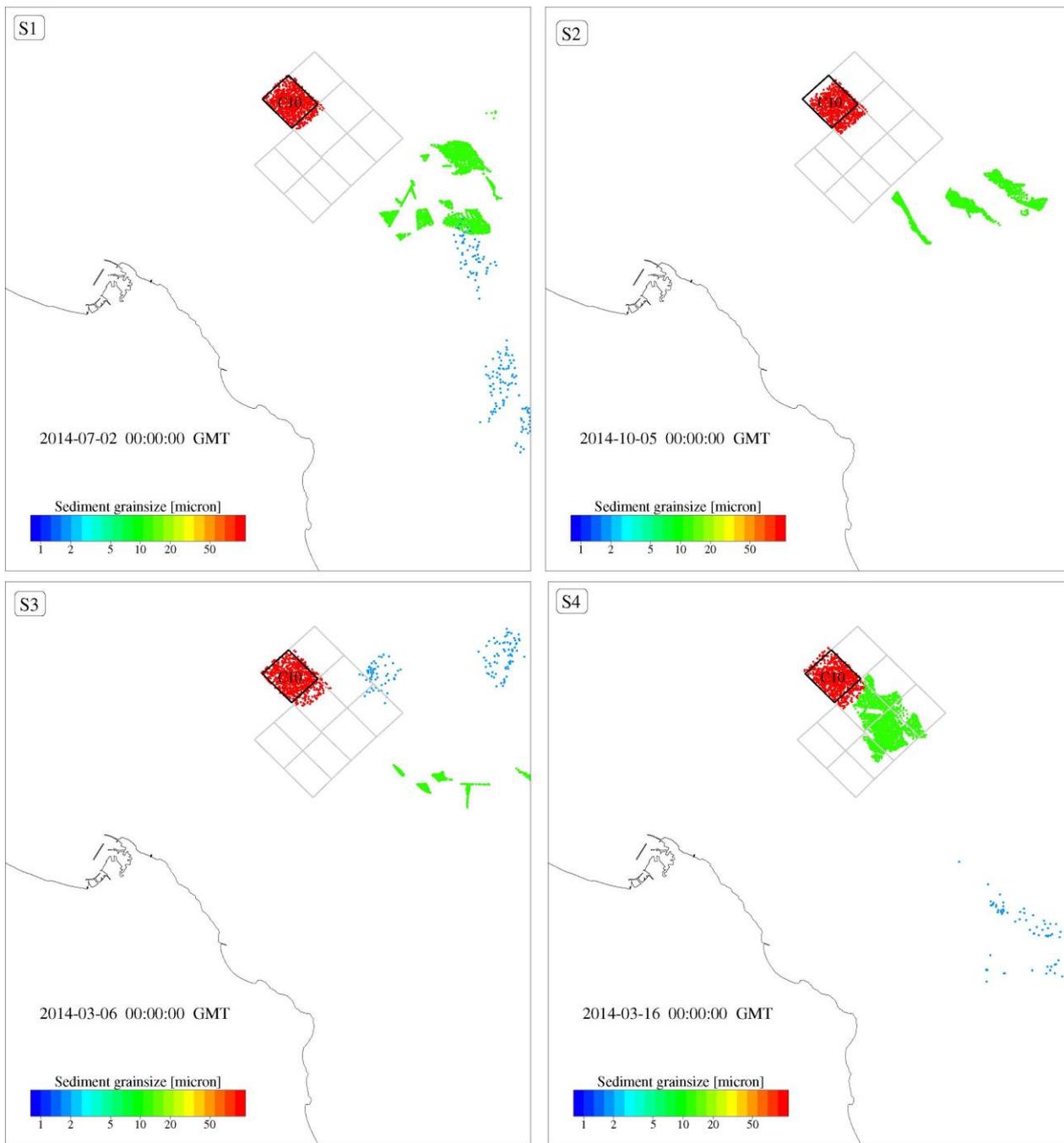


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 4,50 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,78 miglia nautiche.

**CELLA 10**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 4,65 miglia nautiche;

Scenario S4: 3,76 miglia nautiche.

### **III. CONCLUSIONI**

In tutte le simulazioni effettuate non risulta che le particelle rilasciate nelle diverse celle di sversamento vengano trasportate sotto costa.

Non si evidenzia alcuna deposizione di particelle lungo la costa del Promontorio del Conero.



**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

ISMAR - Istituto di Scienze Marine

U.O.S. di Ancona

Largo Fiera della Pesca, 1 – 60125 Ancona, Italy

Tel +39 071 207881 Fax +39 071 55313

[segreteria@an.ismar.cnr.it](mailto:segreteria@an.ismar.cnr.it) - [www.ismar.cnr.it](http://www.ismar.cnr.it)

C.F. 80054330586 - P.IVA 02118311006



## **STUDI DI CARATTERE AMBIENTALE VOLTI A VALUTARE LE DINAMICHE E GLI EFFETTI AMBIENTALI DEI SEDIMENTI MARINI PROVENIENTI DA ESCAVI PORTUALI**



### **II RAPPORTO**

### **DATI CORRENTOMETRICI, METEOROLOGICI E DI MAREA (PRE-SURVEY)**

**COORDINATORE:** Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, Ancona)

*Gianna Fabi*

**RESPONSABILE SCIENTIFICO:** Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, Ancona)

*Alessandra Spagnolo*

**Rapporto a cura di :** Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, ANCONA)

Dott. ssa Federica Grilli (CNR-ISMAR, Ancona)

Dott. Elio Paschini (CNR-ISMAR, Ancona)

Dott. Pierluigi Penna (CNR-ISMAR, Ancona)

Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, Ancona)

**Preparato per:** **AUTORITÀ PORTUALE DI ANCONA**

**Febbraio 2016**

## **INDICE**

|   |    |
|---|----|
| <b>1. PREMESSA</b> .....  | 1  |
| <b>2. MATERIALI E METODI</b> .....                                  | 1  |
| 2.1. ACQUISIZIONE DATI METEOROLOGICI, DI MAREA E ONDAMETRICI.....   | 1  |
| 2.1.1 Analisi dei dati .....  | 1  |
| 2.2. DATI CORRENTOMETRICI .....                                     | 2  |
| 2.2.1 Analisi dei dati .....  | 4  |
| <b>3. RISULTATI</b> .....   | 5  |
| 3.1. ACQUISIZIONE DATI METEOROLOGICI E DI MAREA .....               | 5  |
| 3.2. DATI CORRENTOMETRICI .....                                     | 6  |
| 3.2.1 Correntometro a Nord di Ancona (Senigallia) .....             | 6  |
| 3.2.2 Correntometro nella Baia di Mezzavalle (Portonovo) .....      | 6  |
| 3.2.3 Correntometro presso la diga foranea del Porto di Ancona..... | 10 |

## **PARTECIPANTI AL PROGRAMMA**

|               |                      |  |
|---------------|----------------------|--|
| G. Fabi       | CNR-ISMAR UOS Ancona | Coordinatore   |
| A. Spagnolo   | CNR-ISMAR UOS Ancona | Responsabile Scientifico   |
| E. Paschini   | CNR-ISMAR UOS Ancona | Responsabile dati oceanografici  |
| F. Grilli     | CNR-ISMAR UOS Ancona | Elaborazione dati correntometrici  |
| S. Guicciardi | CNR-ISMAR UOS Ancona | Elaborazione dati meteo  |
| P. Penna      | CNR-ISMAR UOS Ancona | Raccolta ed elaborazione dati correntometrici e dati meteo, realizzazione database |

Hanno inoltre collaborato allo svolgimento dei campionamenti in mare i Sigg.ri G. Gaetani e A. Marziali imbarcati sulla M/R TecnoPesca II del CNR – ISMAR di Ancona utilizzata per le indagini.

## **1. PREMESSA**

Nel presente rapporto vengono sintetizzati i risultati relativi alla fase di pre-survey degli studi di carattere ambientale condotti dal CNR-ISMAR UOS Ancona nell'ambito dell'Accordo tra codesto Istituto e l'Autorità Portuale di Ancona (Prot. 0021161 del 27/03/2015) e riguardano in particolare i dati correntometrici, meteorologici e di marea necessari per ottimizzare il modello idrodinamico di trasporto volto a valutare la dispersione sia dei sedimenti escavati all'interno dell'area portuale sia dei sedimenti sversati nell'area di immersione in mare aperto.

## **2. MATERIALI E METODI**

### **2.1. ACQUISIZIONE DATI METEOROLOGICI, DI MAREA E ONDAMETRICI**

Dal 1997 è in funzione una centralina meteo posizionata sopra il tetto del CNR-ISMAR UOS Ancona e gestita dall'istituto. La stazione acquisisce in continuo, in tempo reale, dati di velocità e direzione del vento. Nella presente relazione sono riportati i dati della velocità e della direzione del vento acquisiti dal 01 maggio al 22 giugno 2015 (il giorno 23 giugno 2015 sono iniziati i lavori di escavo presso la banchina 26).

I dati del livello di marea sono stati acquisiti dal sensore di livello posizionato all'interno del porto di Ancona nel periodo 01/05/2015 - 22/06/2015. Tali dati sono stati forniti dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA. I valori di altezza/direzione dell'onda della Boa Ondametrica Nazionale (RON/ISPRA) posta al largo di Ancona non sono disponibili in quanto il sistema è inattivo dal 2006.

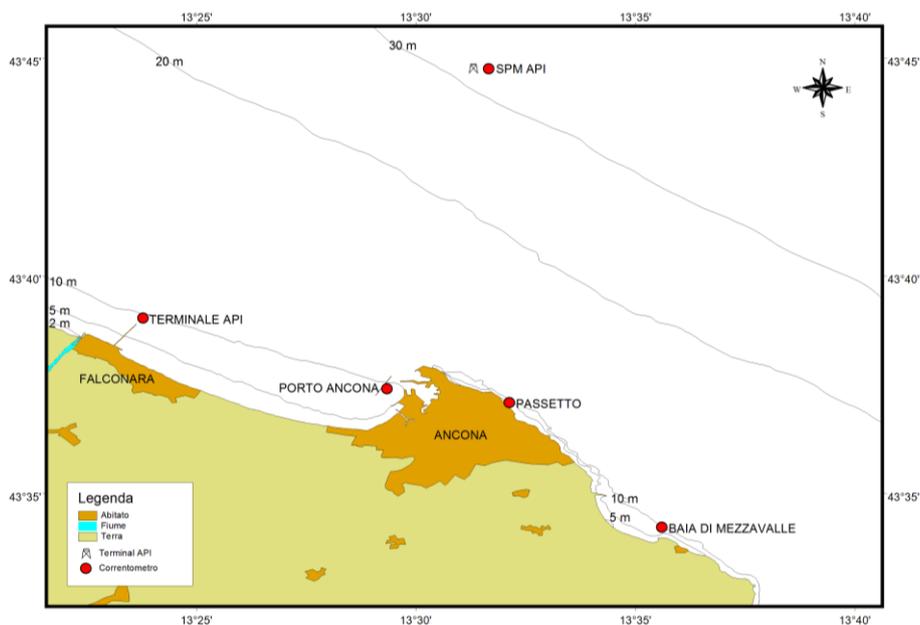
#### **2.1.1 Analisi dei dati**

Dopo una fase di standardizzazione e post processing è stato realizzato, ed è disponibile per l'Autorità Portuale, un database in MySQL per il periodo in esame. A richiesta è anche possibile fornire i dati in formato testo (ascii) leggibile da qualsiasi software (tipo Excel). Il Database contiene tutti i dati meteo della stazione CNR-ISMAR UOS Ancona e tutti i dati di marea (livello) messi a disposizione dalla stazione mareografica dell'ISPRA. I dati sono memorizzati con valori giornalieri ogni 10 minuti anziché ogni 60 minuti come riportato nella specifica tecnica.

.

## 2.2. DATI CORRENTOMETRICI

In base alla Specifica Tecnica nella fase di pre-survey era stata prevista l'immersione di n. 4 correntometri, di cui uno a Nord di Ancona da considerare come controllo (bianco), uno presso il Terminale API (subordinato ad autorizzazione da parte di API), uno nella zona del Passetto di Ancona e uno più a Sud, nella Baia di Mezzavalle (fig. 1).



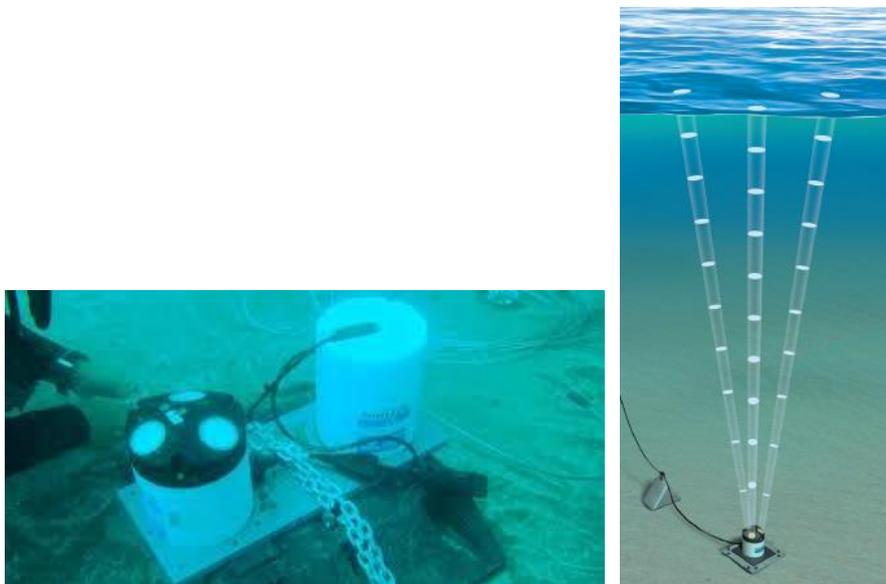
**Fig. 1** - Ubicazione dei correntometri prevista nella Specifica Tecnica.

Di questi, non è stato possibile installare il correntometro presso il Terminale API né quello al Passetto di Ancona per la difficoltà di individuare dei punti di immersione tali da garantire l'incolumità degli strumenti.

Il correntometro a Nord di Ancona (ADCP Sontex; fig. 2) è stato installato presso la Meda della barriera artificiale di Cesano-Senigallia il giorno 19/03/2015 e ha acquisito dati correntometrici sino al 22/06/2015. Sono state programmate 3 celle dello spessore di 4 m ciascuna a partire da 1 m dal fondo. La cella più superficiale è stata scartata perché presentava un forte rumore di fondo dovuto all'azione delle onde superficiali. Quindi sono state considerate solo 2 celle (inferiore e superiore) i cui baricentri erano rispettivamente a 3 m e 7 m dal fondo.

Per quanto riguarda la baia di Mezzavalle, il giorno 09/04/2015 a Portonovo, presso la barriera artificiale del CNR-ISMAR di Ancona, a circa 11 m di profondità è stato posizionato un correntometro AAnderaa dotato di un torbidimetro per l'acquisizione

dei dati a circa 5 m dal fondo. Lo strumento ha registrato sia dati correntometrici che di torbidità sino al 03/06/2015.



**Fig. 3** - Correntometro ADCP della Sontex installato presso la barriera artificiale di Cesano - Senigallia.

Al fine di ottenere informazioni utili alla definizione del modello idrodinamico, sebbene non previsto nella Specifica Tecnica per questa fase di studio, è stato installato un ulteriore correntometro (mod. Aanderaa RCM7; fig. 3) presso la diga foranea di Ancona, di fronte all'area del futuro escavo. Tale strumento è stato posizionato a circa 1 m dal fondo all'interno di una struttura metallica a forma di tetraedro regolare con il lato di 150 cm (fig. 4). L'intera struttura è stata immersa lungo la direzione della diga foranea, poiché lo strumento misura la velocità in una sola direzione (fig. 3). I dati correntometrici sono stati registrati dal 24/04/2015 al 18/05/2015.



**Fig. 3** - Correntometro RCM7 collocato all'interno della struttura metallica durante l'immersione presso la diga foranea di Ancona.



**Fig. 4** – Posizione del correntometro RCM7 presso la diga foranea nel porto di Ancona. Le frecce indicano le possibili direzioni delle correnti registrate dal correntometro unidirezionale.

### 2.1.1 Analisi dei dati

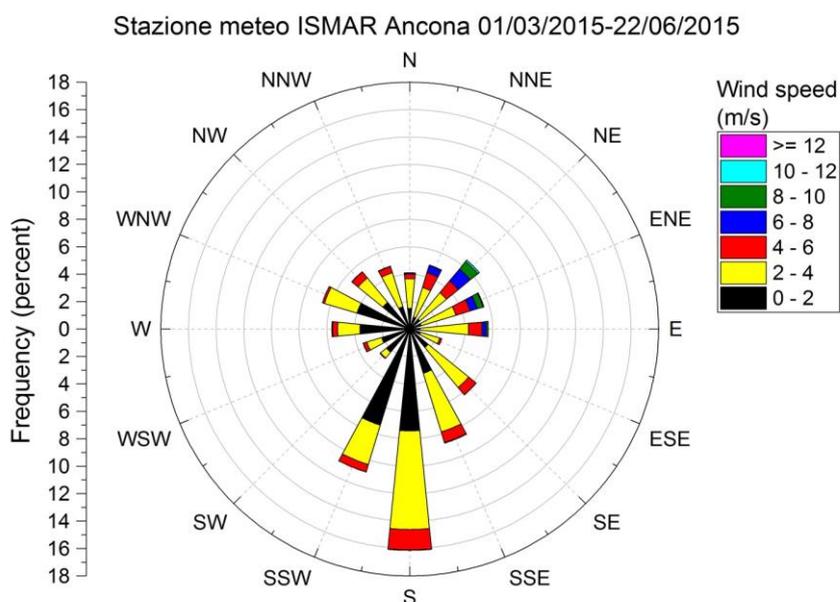
Tutti i dati registrati dai tre correntometri sono stati processati, validati e visualizzati mediante l'utilizzo del software MATLAB.

### 3. RISULTATI

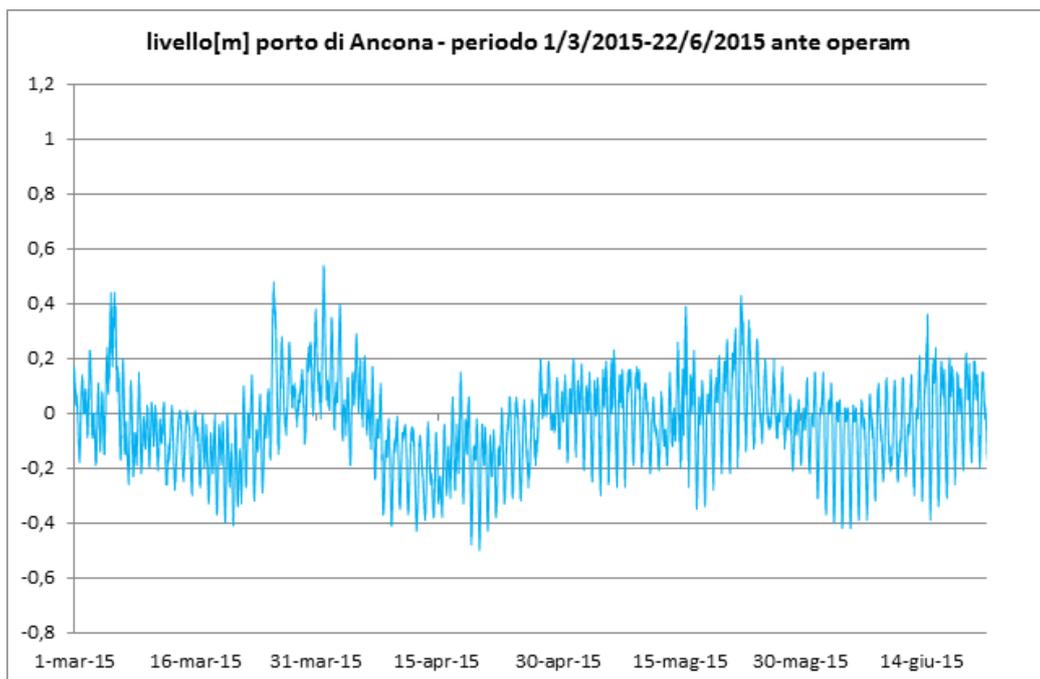
#### 3.1. ACQUISIZIONE DATI METEOROLOGICI E DI MAREA

Nel periodo 01/03 - 22/06/2015 è stata registrata una netta prevalenza del vento di provenienza S e S-SW (vento da terra) con bassa intensità, per lo più inferiore a 2-4 m/s. Velocità del vento più elevate (inferiore a 8-10 m/s) sono state registrate nei settori NE-ENE, ma con minore frequenza (fig. 4).

L'andamento del livello idrometrico è risultato compreso fra -0,4m e +0,4m con tre picchi superiori registrati precisamente il 5, 25 e 31 marzo (fig. 5). Il picco di fine marzo (0,52 m) è probabilmente corrispondente a una consistente mareggiata.



**Fig. 4** – Diagramma a rosa della velocità e frequenza della direzione del vento (dati ogni 10 minuti) della stazione meteo di Ancona dal 01/03/2015 al 22/06/2015 (pre-survey).



**Fig. 5** – Variazione del livello idrometrico (m) all'interno del porto di Ancona dal 01/03/2015 al 22/06/2015 (pre-survey) (dati ogni 10 minuti, fonte ISPRA).

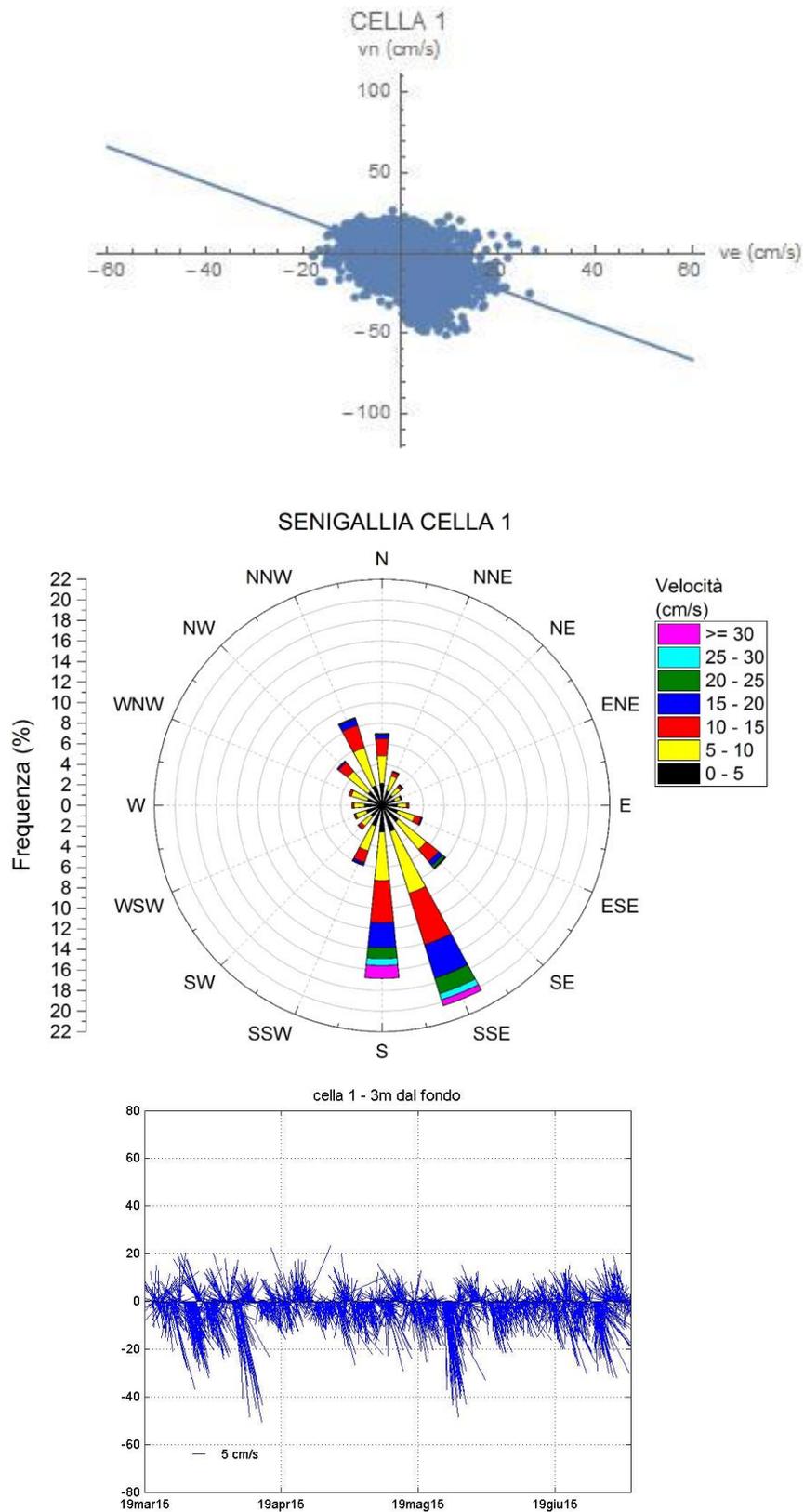
## **3.2. DATI CORRENTOMETRICI**

### **3.2.1 Correntometro a Nord di Ancona (Senigallia)**

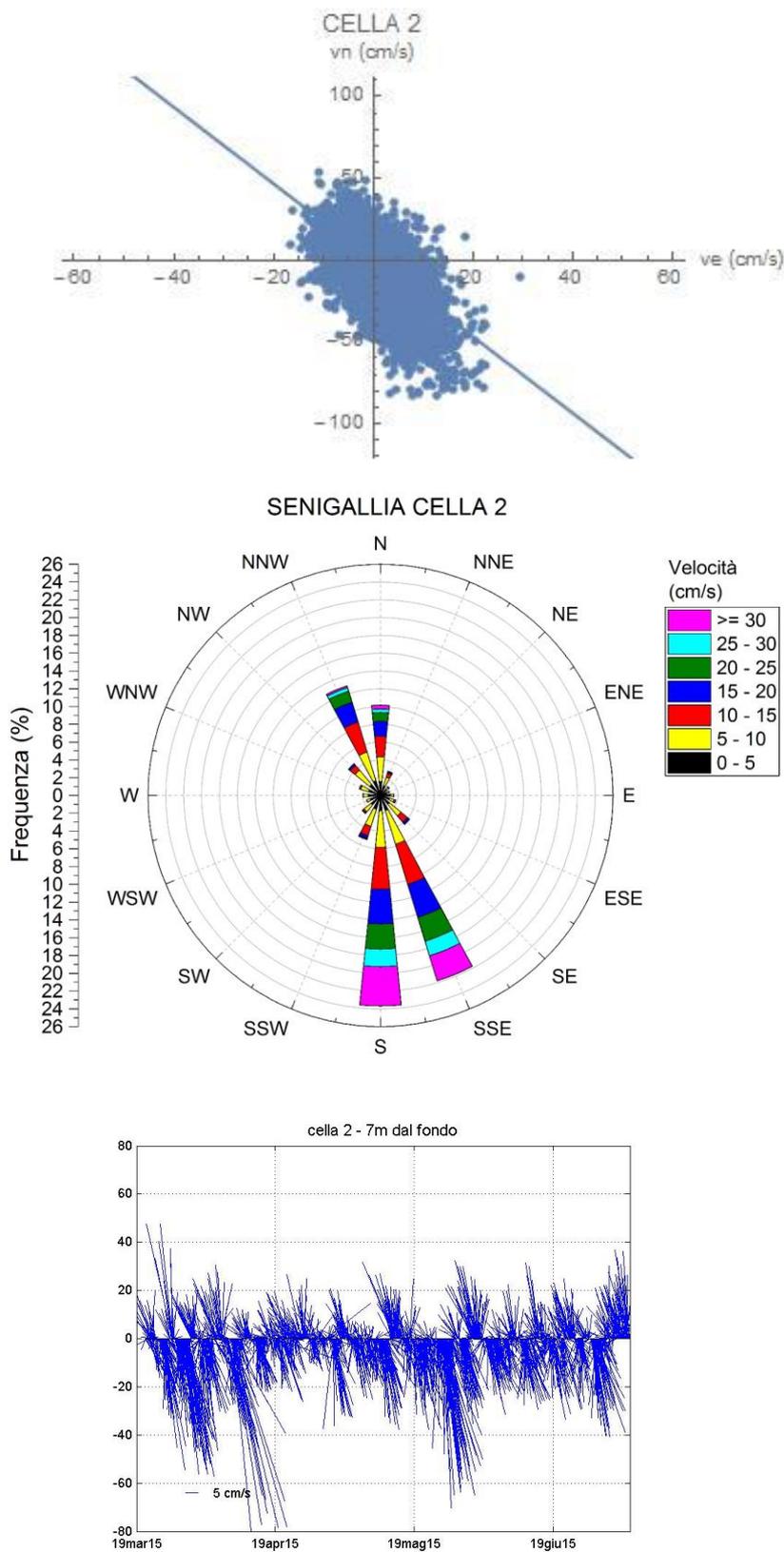
I dati di corrente registrati nelle due celle (cella 1: 3 m dal fondo; cella 2: 7 m dal fondo) hanno mostrato un andamento coerente, con inversione di direzione ogni 3-5 gg, ma con una prevalenza dell'intensità nella direzione SE (figg. 6 e 7). Le intensità più elevate (superiori a 50 cm/s) si sono registrate nella cella 2 a fine marzo, a metà aprile e a fine maggio. La cella inferiore (cella 1) ha mostrato valori di corrente più bassi, inferiori a 50 cm/s.

### **3.2.2 Correntometro nella Baia di Mezzavalle (Portonovo)**

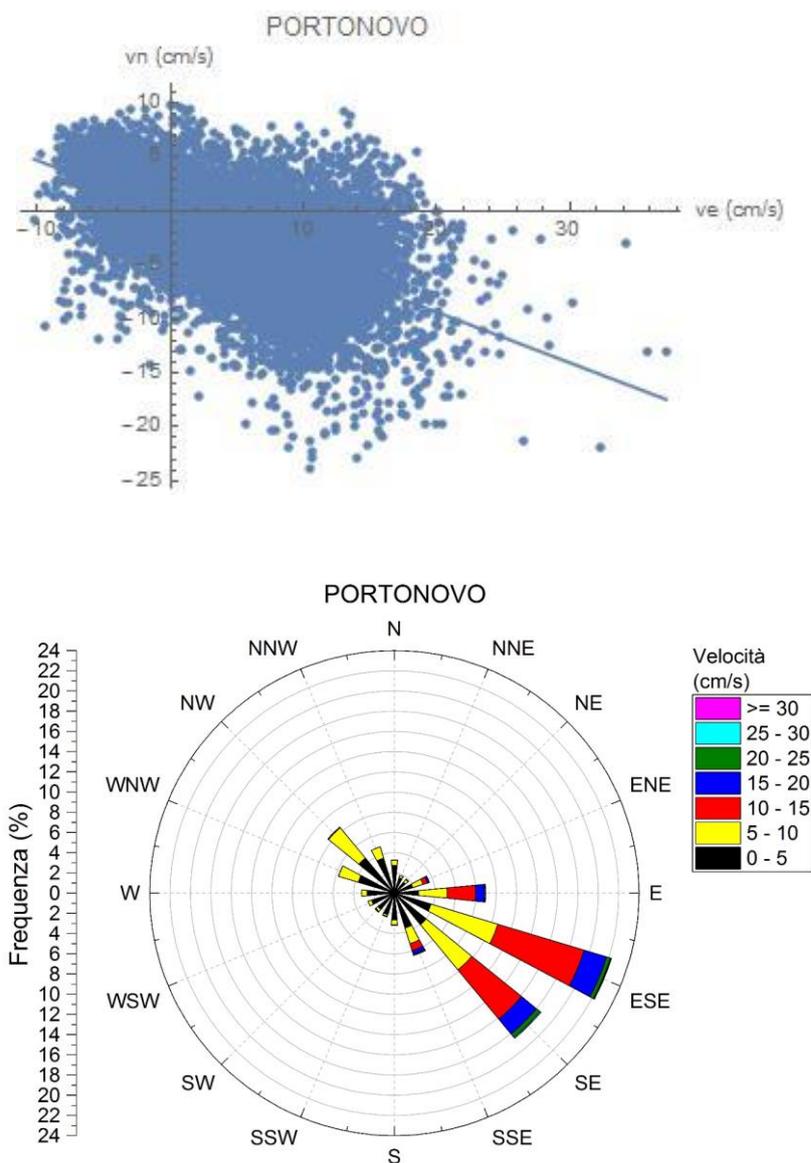
I dati di corrente (fig. 8) hanno mostrato una prevalenza dell'intensità nella direzione SE, con valori intorno a 20 cm/s; nei giorni compresi fra il 15 e 18 maggio sono stati superati i 30 cm/s. La corrente verso NW è risultata inferiore, generalmente sotto i 10 cm/s. Anche in questo sito, analogamente a quanto osservato a Senigallia, sono state notate inversioni di corrente con la frequenza di pochi giorni.



**Fig. 6** -Senigallia. Scatterogramma a dispersione, diagramma a rosa e stickplot della direzione e velocità della corrente (cm/s) dei dati registrati a dal 19/03/15 al 22/06/15 a **3 m dal fondo** dal correntometro ADCP.



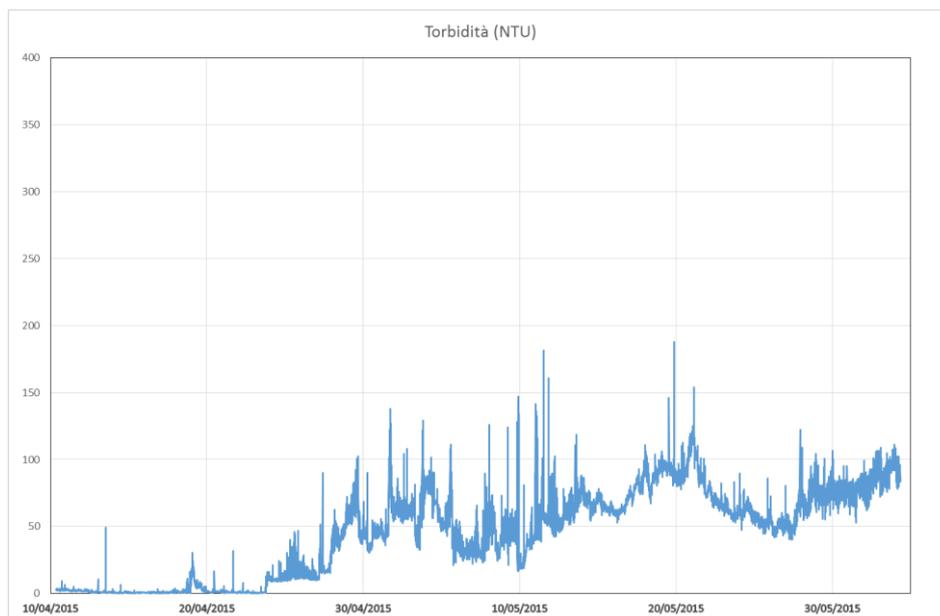
**Fig. 7** - Senigallia. Scatterogramma a dispersione, diagramma a rosa e stickplot della direzione e velocità della corrente (cm/s) dei dati registrati a dal 19/03/15 al 22/06/15 a 7 m dal fondo dal correntometro ADCP.



**Fig. 8** - Portonovo. Scatterogramma a dispersione e diagramma a rosa della direzione e velocità della corrente (cm/s) dei dati registrati a dal 09/04/15 al 03/06/15 a 5 m dal fondo dal correntometro Aanderaa RCM7.

La torbidità sul fondo (fig. 9) ha presentato valori molto bassi, prossimi a 0 NTU, fino al 25 aprile, aumentati poi gradualmente per mantenersi fra 50 e 100 NTU fino a fine registrazione. Non sono stati rilevati eventi associati a forti mareggiate con picchi di alta torbidità.

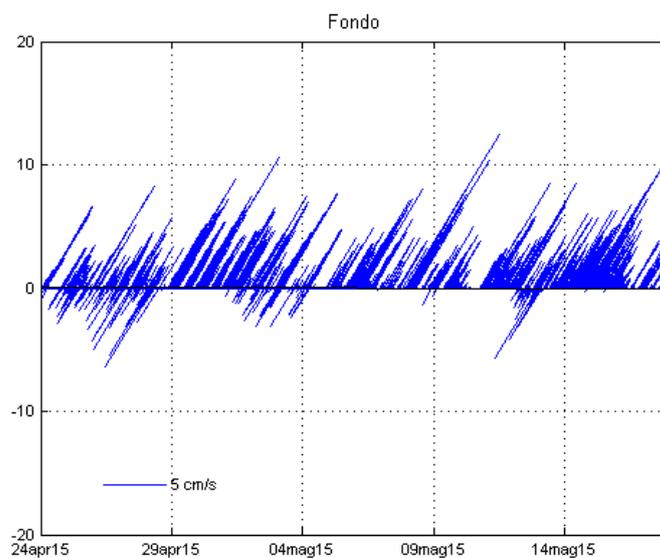
Nonostante il sensore fosse dotato di uno schermo antifouling di rame, l'andamento crescente durante il periodo di misura lascia ipotizzare un accumulo di un sottile film di polvere sulla finestra ottica del sensore.



**Fig. 9** - Portonovo. Andamento della torbidità (dati ogni 5 minuti) registrata a 5m dal fondo dal 10/04/15 al 03/06/15.

### 3.2.3 Correntometro presso la diga foranea del Porto di Ancona

E' stata notata una netta prevalenza della corrente in direzione NE e di intensità inferiore a 10 cm/s (fig. 10). Solo nei primi giorni di registrazione (dal 24 al 28 aprile) e nella prima metà di maggio (dall'1 al 5 e dall'11 al 12) si è osservata una corrente completamente opposta e di debole intensità (intorno a 5 cm/s). Le correnti misurate nel porto sono risultate le più deboli dei tre siti di misura.



**Fig. 10** - Diga foranea del Porto di Ancona. Stickplot in cm/s della corrente (dati ogni 10 min) registrati dal 24/04/15 al 18/05/15a 1m dal fondo del correntometro Aanderaa RCM7.



**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

ISMAR - Istituto di Scienze Marine

U.O.S. di Ancona

Largo Fiera della Pesca, 1 - 60125 Ancona, Italy

Tel +39 071 207881 Fax +39 071 55313

[segreteria@an.ismar.cnr.it](mailto:segreteria@an.ismar.cnr.it) - [www.ismar.cnr.it](http://www.ismar.cnr.it)

C.F. 80054330586 - P.IVA 02118311006



## **STUDI DI CARATTERE AMBIENTALE VOLTI A VALUTARE LE DINAMICHE E GLI EFFETTI AMBIENTALI DEI SEDIMENTI MARINI PROVENIENTI DA ESCAVI PORTUALI**



### **III RAPPORTO**

## **DINAMICHE DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI, VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI E SU ORGANISMI SENTINELLA (FASE IN CORSO D'OPERA)**

**COORDINATORE: Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, Ancona)**

**RESPONSABILE SCIENTIFICO: Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, Ancona)**

**Rapporto a cura di : Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, ANCONA)  
Dott. ssa Federica Grilli (CNR-ISMAR, Ancona)  
Dott. Alessio Gomiero (IRIS, Norvegia)  
Dott. Elio Paschini (CNR-ISMAR, Ancona)  
Dott. Pierluigi Penna (CNR-ISMAR, Ancona)  
Dott. Federico Spagnoli (CNR-ISMAR, Ancona)  
Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, Ancona)**

**Preparato per: AUTORITÀ PORTUALE DI ANCONA**

**Febbraio 2016**



## INDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>1. PREMESSA</b> .....   | 1  |
| <b>2. MATERIALI E METODI</b> .....   | 2  |
| 2.1. ACQUISIZIONE DATI OCEANOGRAFICI PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO<br>IDRODINAMICO.....                                 | 2  |
| 2.1.1 Analisi dei dati .....   | 2  |
| 2.2. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI<br>LUNGO LA FASCIA COSTIERA.....                               | 2  |
| 2.2.1 Analisi dei dati .....   | 3  |
| 2.3. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI DEL LARGO.....   | 3  |
| 2.3.1 Attività di laboratorio e analisi dei dati.....  | 5  |
| 2.4. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI.....   | 7  |
| 2.4.1 Attività di laboratorio e analisi dei dati.....  | 9  |
| 2.5. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI ORGANISMI<br>SENTINELLA.....  | 10 |
| 2.5.1 Attività di laboratorio e analisi dei dati.....  | 11 |
| <b>3. RISULTATI</b> .....  | 22 |
| 3.1. ACQUISIZIONE DATI OCEANOGRAFICI PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO<br>IDRODINAMICO.....                                 | 22 |
| 3.2. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI<br>LUNGO LA FASCIA COSTIERA.....                               | 24 |
| 3.2.1 Correntometro a Nord di Ancona (Senigallia) .....  | 24 |
| 3.3. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI DEL LARGO.....   | 26 |
| 3.3.1 Area di sversamento .....  | 26 |
| 3.3.2 Area di escavo.....  | 30 |
| 3.4. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI.....   | 32 |
| 3.4.1 Nutrienti .....  | 32 |
| 3.4.2 Metalli .....  | 35 |
| 3.4.3 Parametri chimici e fisici.....  | 37 |
| 3.5. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI ORGANISMI<br>SENTINELLA.....  | 39 |
| 3.5.1 Biomarker .....  | 39 |
| 3.5.2 Bioaccumulo di Idrocarburi totali nel segmento C5-C40,<br>idrocarburi policiclici aromatici e metalli pesanti..... | 47 |
| <b>4. CONCLUSIONI</b> .....  | 52 |
| <b>5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....  | 56 |
| <b>ALLEGATO A - SCHEDE TECNICHE DELLA STRUMENTAZIONE<br/>UTILIZZATA NELLE INDAGINI</b> .....                             | i  |

## PARTECIPANTI AL PROGRAMMA

|               |                       |  |
|---------------|-----------------------|--|
| G. Fabi       | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Coordinatore   |
| A. Spagnolo   | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Responsabile Scientifico   |
| E. Paschini   | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Responsabile dati oceanografici e correntometrici                                  |
| M. Betti      | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Raccolta dati oceanografici, analisi di laboratorio                                |
| A. Campanelli | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Raccolta dati oceanografici, analisi di laboratorio ed elaborazione                |
| E. Frapiccini | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Raccolta dati oceanografici, analisi di laboratorio                                |
| F. Grilli     | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Elaborazione dati correntometrici  |
| S. Guicciardi | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Elaborazione dati meteo  |
| P. Penna      | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Raccolta ed elaborazione dati correntometrici e dati meteo, realizzazione database |
| F. Spagnoli   | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Responsabile dati flussi bentici   |
| P. Giordano   | CNR-ISMAR UOS Bologna | Elaborazione dati flussi bentici   |
| L. Borgognoni | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Elaborazione dati flussi bentici   |
| F. Acri       | CNR-ISMAR UOS Venezia | Elaborazione dati flussi bentici   |
| G. Caccamo    | CNR-ISMAR UOS Ancona  | Raccolta dati flussi bentici   |
| A. Gomiero    | IRIS Norvegia         | Responsabile Mussel watch, raccolta ed elaborazione dati                           |

Hanno inoltre collaborato allo svolgimento dei campionamenti in mare i Sigg.ri G. Gaetani e A. Marziali imbarcati sulla M/R TecnoPesca II del CNR – ISMAR di Ancona utilizzata per le indagini.

## **1. PREMESSA**

Nel presente rapporto vengono riportati i risultati relativi alla fase “durante operam” degli studi di carattere ambientale condotti dal CNR-ISMAR UOS Ancona nell'ambito dell'Accordo tra codesto Istituto e l'Autorità Portuale di Ancona (Prot. 0021161 del 27/03/2015) e riguardano in particolare la verifica delle dinamiche sul trasporto dei sedimenti del largo e lungo la fascia costiera, gli effetti del dragaggio sui sedimenti marini e sugli organismi sentinella (*Mytilus galloprovincialis*).

Tali risultati sono confrontati con quanto rilevato con le indagini integrative relative alla fase di pre-survey condotta per le operazioni di escavo della Banchina 26 del Porto di Ancona (Fabi *et al.*, 2015).

## **2. MATERIALI E METODI**

### **2.1. ACQUISIZIONE DATI OCEANOGRAFICI PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO**

Dal 1997 è in funzione una centralina meteo posizionata sul tetto del CNR-ISMAR UOS Ancona e gestita dall'Istituto. La stazione acquisisce in continuo in tempo reale dati di velocità e direzione del vento. Nella presente relazione sono riportati i dati acquisiti dal 23 giugno al 31 agosto 2015 (periodo di escavo).

I dati del livello di marea sono stati ottenuti mediante il sensore di livello posizionato all'interno del porto di Ancona. Tali dati sono stati forniti dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA.

I valori di altezza/direzione dell'onda della Boa Ondametrica Nazionale (RON/ISPRA) posta al largo di Ancona non sono disponibili in quanto il sistema è inattivo dal 2006.

#### **2.1.1 Analisi dei dati**

Dopo una fase di standardizzazione e post processing è stato realizzato ed è disponibile per l'Autorità Portuale di Ancona un database in MySQL per il periodo in esame. A richiesta è anche possibile fornire i dati in formato testo (ascii) leggibile da qualsiasi software (tipo Excel). Il Database contiene tutti i dati meteo della stazione CNR-ISMAR di Ancona e tutti i dati di marea (livello) messi a disposizione dalla stazione mareografica dell'ISPRA. I dati sono memorizzati con valori giornalieri ogni 10 minuti anziché ogni 60 minuti come riportato nella Specifica Tecnica.

### **2.2. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI LUNGO LA FASCIA COSTIERA**

In base alla Specifica Tecnica durante i lavori di escavo oltre ai dati provenienti dai 2 correntometri costieri già posizionati nella fase di pre-survey (Nord del Porto di Ancona e Baia di Mezzavalle; Fabi *et al.*, 2016) era prevista l'immersione di altri 2 correntometri posizionati a partire dall'inizio delle operazioni di escavo per la misura in continuo delle correnti marine. Uno di questi (correntometro posizionato presso il terminale SPM API) non è stato posizionato per la difficoltà di individuare un punto

di immersione tale da garantire l'incolumità dello strumento. L'altro era invece da installare nell'area interessata dalle operazioni di escavo.

Lo strumento posizionato a Nord di Ancona (bianco; ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler della Sontex; All. A1) presso la barriera artificiale di Cesano-Senigallia ha fornito dati dal 23/06/2015 al 02/07/2015, quando è avvenuto il recupero. Il correntometro è stato quindi immerso di nuovo e, attualmente, è ancora lì. Sono state programmate 3 celle dello spessore di 4 m ciascuna a partire da 1 m dal fondo. La cella più superficiale è stata scartata perché presentava un forte rumore di fondo dovuto all'azione delle onde superficiali. Quindi sono state considerate solo 2 celle (inferiore e superiore) i cui baricentri erano rispettivamente a 3 m e 7 m dal fondo.

Il correntometro nella Baia di Mezzavalle (mod. Aanderaa ricondizionato RC200; All. 2) è stato posizionato a Portonovo presso la barriera artificiale del CNR-ISMAR il giorno 03/06/2015 ed è stato recuperato l'11/11/2015; a causa di un allagamento dello strumento non vi sono dati disponibili per questo periodo.

Il correntometro posto nell'area di escavo (mod. Aanderaa RCM7; All. A2) è stato posizionato presso la diga foranea di Ancona il giorno 09/06/2015 ed è stato recuperato il 02/11/2015. A causa di problemi tecnici legati alla presenza di biofouling i dati non sono purtroppo disponibili.

I dati disponibili sono stati utilizzati per ottimizzare il modello idrodinamico di trasporto volto a valutare la dispersione sia dei sedimenti escavati all'interno dell'area portuale sia dei sedimenti sversati nell'area di immersione in mare aperto.

### **2.2.1 Analisi dei dati**

I dati registrati dal correntometro posizionato a Nord di Ancona sono stati processati, validati e visualizzati mediante l'utilizzo del software MATLAB.

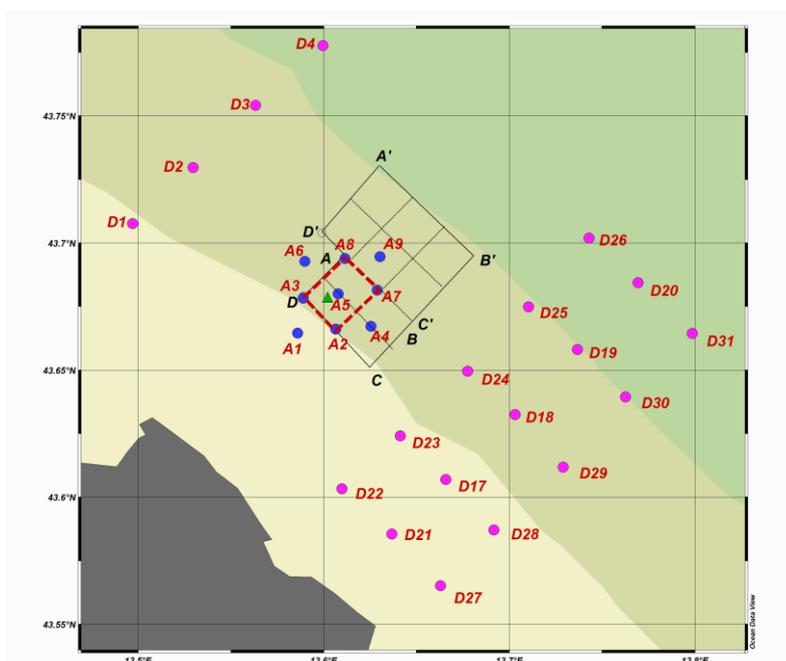
### **2.3. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI DEL LARGO**

Durante le operazioni di escavo e sversamento relative ai lavori condotti dall'Autorità Portuale di Ancona presso la Banchina 26 sia nell'area portuale che nell'area di escavo sono state effettuate misurazioni basilari mediante sonda CTD per caratterizzare le diverse masse d'acqua.

Nell'area di sversamento sono state condotte due campagne di misura (7 e 13 luglio 2015). Nel corso del primo survey sono state campionate n. 19 stazioni dislocate lungo 4 transetti perpendicolari a costa al di fuori dell'area di sversamento e n. 9 stazioni all'interno dell'area per un totale complessivo di 28 stazioni (fig. 1; Tab. 1), mentre nel secondo survey il campionamento si è focalizzato nell'area adiacente alle operazioni di sversamento (pallini blu in fig. 1).

In entrambi i survey in prossimità della zona di sversamento è stato posizionato un correntometro ADCP (modello Sentinel Workhorse della ditta RDInstruments; All. A4) per l'acquisizione dei dati correntometrici lungo tutta la colonna d'acqua. Le coordinate del posizionamento dell'ADCP sono riportate in Tab. 1.

Nell'area portuale di escavo il giorno 13 luglio 2015 sono state campionate n. 13 stazioni (Stazioni "P"; fig. 2; Tab. 1) di cui 5 esterne al Porto di Ancona (P09, P07, P04, P10 e P11).



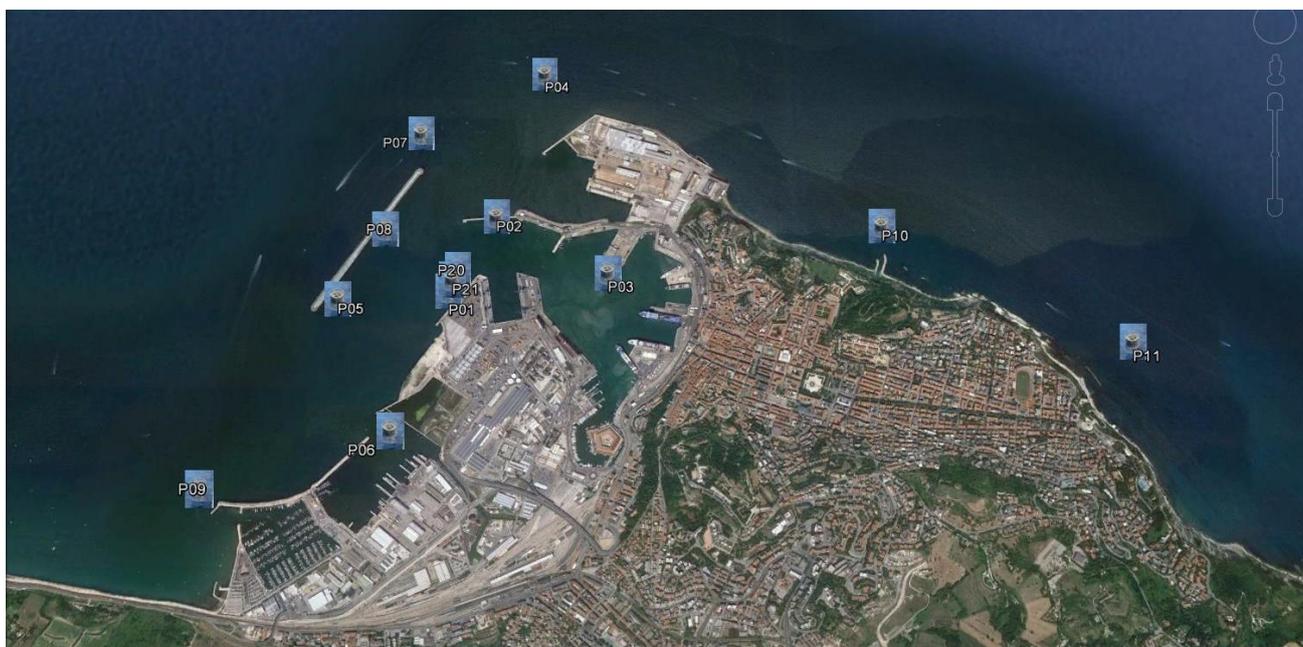
**Fig. 1** - Schema delle stazioni di campionamento utilizzate durante i due survey nella zona individuata per lo sversamento dei sedimenti (area tratteggiata in rosso) e posizione del correntometro ADCP (triangolo verde).

La sonda utilizzata è della Ditta SeaBird modello SBE911plus (All. A3) equipaggiata, oltre che con i sensori standard di temperatura e conducibilità e pompa in duplice coppia, con un fluorimetro e torbidimetro ECO FLNTU della WETLabs per la misurazione della concentrazione di clorofilla a e del particolato sospeso (TSM: Total Suspended Matter), un sensore di ossigeno SBE43 per la misurazione della

concentrazione di ossigeno disciolto e un altimetro della Datasonics per la misurazione della profondità. La sonda era accoppiata a una “rosette” della General Oceanics da 12 bottiglie Niskin della capacità di 10 lt. Le sonde sono state periodicamente calibrate presso il centro di calibrazione del SACLANT della NATO di La Spezia.

Durante i tre monitoraggi sono stati misurati i seguenti parametri ambientali:

- Salinità/conducibilità;
- Temperatura;
- Ossigeno disciolto;
- Torbidità (misura del materiale sospeso);
- Fluorescenza.



**Fig. 2** - Posizione delle stazioni di campionamento effettuate durante il secondo survey (13 luglio 2015) dentro e fuori il porto di Ancona.

### **2.3.1 Attività di laboratorio e analisi dei dati**

Per l’acquisizione e l’elaborazione dei dati registrati e raccolti tramite la sonda CTD è stato utilizzato un software fornito dalla casa produttrice seguendo le norme suggerite dall’UNESCO (UNESCO, 1988) e riportate sul manuale “Handbook of method protocols” (Artegiani, 1996); le grandezze derivate, come salinità e anomalie della densità, sono state calcolate secondo gli algoritmi dell’UNESCO (UNESCO,

1983). Infine, per l'analisi dei dati è stato utilizzato un apposito software sviluppato dal CNR-ISMAR di Ancona e la mappatura dei dati ricavati è stata effettuata con il software Ocean Data View 2015 v.4.7.4.

I dati registrati dal correntometro sono stati processati, validati e visualizzati mediante l'utilizzo del software MATLAB.

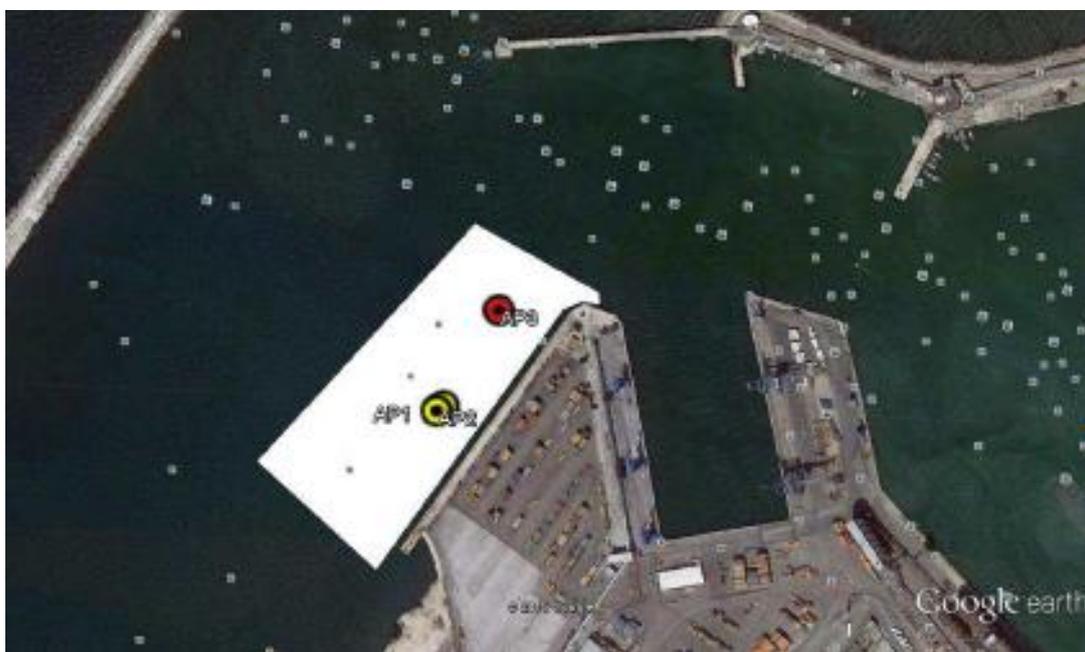
**Tab. 1** – Coordinate geografiche delle stazioni di campionamento utilizzate nelle indagini idrologiche condotte sia nell'area di sversamento che di escavo e dell'ADCP.

| Sito               | Coordinate                  |
|--------------------|-----------------------------|
| A1                 | 13°35',245 E – 43°39',987 N |
| A2                 | 13°36',353 E – 43°39',898 N |
| D = A3             | 13°35',200 E – 43°40',700 N |
| A4                 | 13°37',638 E – 43°40',018 N |
| A5                 | 13°36',513 E – 43°40',806 N |
| A6                 | 13°35',436 E – 43°41',650 N |
| A7                 | 13°37',799 E – 43°40',925 N |
| A = A8             | 13°36',700 E – 43°41',700 N |
| A9                 | 13°37',818 E – 43°41',676 N |
| D1                 | 13°28',814 E – 43°42',462 N |
| D2                 | 13°31',770 E – 43°43',782 N |
| D3                 | 13°33',792 E – 43°45',246 N |
| D4                 | 13°35',970 E – 43°46',662 N |
| D17                | 13°39',942 E – 43°36',426 N |
| D18                | 13°42',186 E – 43°37',956 N |
| D19                | 13°44',202 E – 43°39',486 N |
| D20                | 13°46',158 E – 43°41',064 N |
| D21                | 13°37',980 E – 43°34',540 N |
| D22                | 13°36',530 E – 43°35',490 N |
| D23                | 13°38',420 E – 43°37',150 N |
| D24                | 13°40',590 E – 43°39',040 N |
| D25                | 13°42',620 E – 43°40',480 N |
| D26                | 13°44',580 E – 43°42',090 N |
| D27                | 13°43',710 E – 43°43',960 N |
| D28                | 13°41',520 E – 43°35',090 N |
| D29                | 13°39',620 E – 43°33',590 N |
| D30                | 13°45',630 E – 43°38',540 N |
| D31                | 13°47',610 E – 43°40',110 N |
| P01                | 13 29'.600 E – 43 37'.310 N |
| P02                | 13 29'.770 E – 43 37'.520 N |
| P03                | 13 30'.220 E – 43 37'.340 N |
| P04                | 13 29'.940 E – 43 38'.010 N |
| P05                | 13 29'.170 E – 43 37'.260 N |
| P06                | 13 29'.420 E – 43 36'.870 N |
| P07                | 13 29'.440 E – 43 37'.800 N |
| P08                | 13 29'.330 E – 43 37'.480 N |
| P09                | 13 28'.740 E – 43 36'.710 N |
| P10                | 13 31'.310 E – 43 37'.490 N |
| P11                | 13 32'.240 E – 43' 37.130 N |
| P20                | 13 29'.630 E – 43'37.350 N  |
| P21                | 13 29'.610 E – 43' 37.320 N |
| Correntometro ADCP | 13 36',199 E – 43 40',857 N |

#### 2.4. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI

Durante le operazioni di escavo della banchina 26 del Porto di Ancona è stata eseguita una misurazione dei flussi di sostanze disciolte naturali e/o di origine antropica (nutrienti e metalli pesanti) al fine di verificare eventuali variazioni rispetto al monitoraggio condotto durante il pre-survey (Fabi *et al.*, 2015). In fig. 3 sono riportate le stazioni di campionamento relative alle due fasi.

L'indagine è stata condotta immediatamente dopo l'azione del dragaggio (circa 12 ore dopo l'interruzione dell'attività di rimozione dei sedimenti superficiali nel punto di misura). I flussi bentici misurati in fase di escavo sono stati confrontati con quelli misurati durante il pre-survey e saranno successivamente confrontati con i flussi misurati al termine delle operazioni di dragaggio (entro 6 mesi). Lo scopo finale è di valutare le eventuali alterazioni indotte nella colonna d'acqua dal fondale del bacino interessato dal dragaggio. Da questo confronto si potranno infatti individuare e quantificare le variazioni dei flussi delle sostanze prese in esame e valutare la loro influenza sul chimismo della colonna d'acqua e sulle biocenosi dell'area portuale interessata al dragaggio.



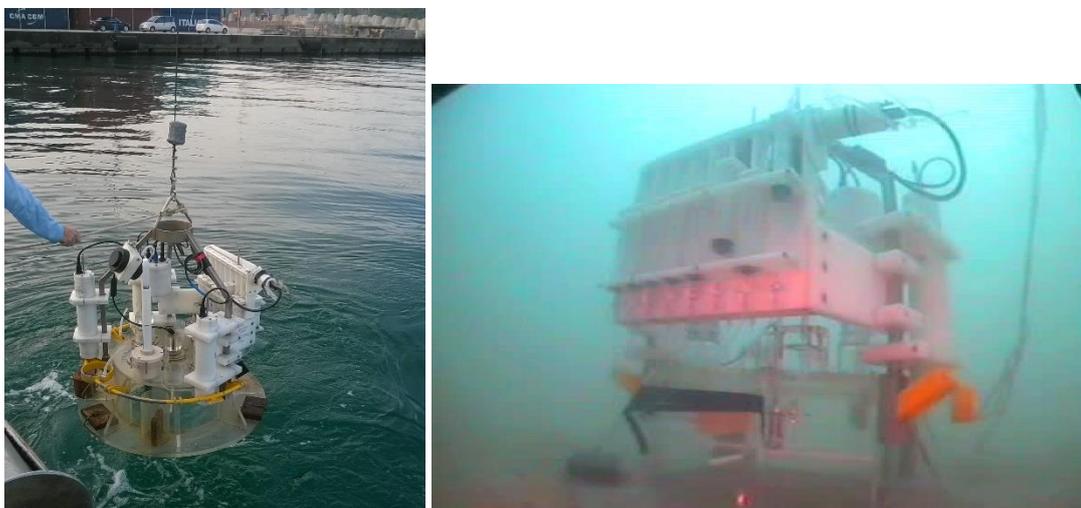
**Fig. 3** - Stazioni di misura dei flussi bentici in fase ante-operam (AP1 e AP2, in giallo) e in fase di escavo (AP3, in rosso) all'interno dell'area di dragaggio.

La misura dei flussi bentici, analogamente al pre-survey, è consistita nella deposizione di una camera bentica automatica sul fondale (figg. 4 e 5) in una

stazione di misura (AP3) ubicata all'interno dell'area di escavo. Il campionamento è stato eseguito il 23/07/2015. In Tab. 2 sono indicate le coordinate delle stazioni campionate in entrambe le fasi (pre-survey e durante lavori di escavo).

**Tab. 2** - Coordinate delle stazioni di campionamento AP3 (stazione di campionamento della fase di escavo) e AP1 e AP2 (stazioni di campionamento della fase ante-operam).

| Stazioni | Coordinate geografiche |             |
|----------|------------------------|-------------|
|          | Latitudine             | Longitudine |
| AP3      | 43°37.349'             | 13°39.641'  |
| AP2      | 43°37.284'             | 13°29.587'  |
| AP1      | 43°37.287'             | 13°29.593'  |



**Fig. 4** - Camera bentonica automatica durante le operazioni di messa a mare (a sinistra) e in attività sul fondale (a destra).



**Fig. 5** - Foto scattata dalla fotocamera installata sulla camera bentonica automatica durante l'attività sul fondale. La scarsa visibilità è dovuta all'abbondanza di materiale sospeso nella colonna d'acqua all'interno del Porto di Ancona.

La camera bentica automatica è stata posizionata sul fondale per circa 12 ore. I campioni di acqua all'interno della camera sono stati prelevati a intervalli di tempo prestabiliti (Tab. 3).

I parametri chimici e fisici (salinità, temperatura, ossigeno disciolto, pH, ORP) dell'acqua all'interno della camera bentica sono stati misurati per tutto il tempo di campionamento mediante sonda CTD Hydrolab MS5, solidale alla struttura della camera bentica automatica.

**Tab. 3** - Tempi di campionamento della camera bentica automatica per la "fase di escavo".

| SIRINGHE | TEMPI INTERMEDI | TEMPI PROGRESSIVI | TEMPI PROGRESSIVI | TEMPI PRELIEVO | TEMPI PRELIEVO | TEMPO PRELIEVO      | TEMPO DEPLOYMENT    | AZIONI        |
|----------|-----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------|
|          | ORE             | MIN               | ORE               | ORE            | GIORNI         | DATA                | DATA                |               |
|          |                 | 0                 | 0                 |                |                | 23/07/2014 07.01.00 | 23/07/2014 07.01.00 | start         |
|          |                 | 0.17              | 0.00              |                |                |                     | 23/07/2014 07.01.10 | attesa 0      |
|          |                 | 0.33              | 0.01              |                |                |                     | 23/07/2014 07.01.20 | prova         |
|          | 0.67            | 40.33             | 0.67              |                |                |                     | 23/07/2014 07.41.20 | attesa 2      |
| 0        | 0.10            | 46.33             | 0.77              | 0.00           | 0.00           | 23/07/2014 07.47.20 | 23/07/2014 07.47.20 | prelievo 1    |
|          | 1.12            | 113.33            | 1.89              |                |                |                     | 23/07/2014 08.54.20 | attesa 4      |
| 1        | 0.10            | 119.33            | 1.99              | 1.22           | 0.05           | 23/07/2014 09.00.20 | 23/07/2014 09.00.20 | prelievo 2    |
|          | 0.08            | 124.33            | 2.07              |                |                |                     | 23/07/2014 09.05.20 | attesa 6      |
| 2        | 0.10            | 130.33            | 2.17              | 1.40           | 0.06           | 23/07/2014 09.11.20 | 23/07/2014 09.11.20 | iniezione     |
|          | 1.62            | 227.33            | 3.79              |                |                |                     | 23/07/2014 10.48.20 | attesa 8      |
| 3        | 0.10            | 233.33            | 3.89              | 3.12           | 0.13           | 23/07/2014 10.54.20 | 23/07/2014 10.54.20 | prelievo 3    |
|          | 1.78            | 340.33            | 5.67              |                |                |                     | 23/07/2014 12.41.20 | attesa 10     |
| 4        | 0.10            | 346.33            | 5.77              | 5.00           | 0.21           | 23/07/2014 12.47.20 | 23/07/2014 12.47.20 | prelievo 4    |
|          | 1.78            | 453.33            | 7.56              |                |                |                     | 23/07/2014 14.34.20 | attesa 12     |
| 5        | 0.10            | 459.33            | 7.66              | 6.88           | 0.29           | 23/07/2014 14.40.20 | 23/07/2014 14.40.20 | prelievo 5    |
|          | 1.78            | 566.33            | 9.44              |                |                |                     | 23/07/2014 16.27.20 | attesa 14     |
| 6        | 0.10            | 572.33            | 9.54              | 8.77           | 0.37           | 23/07/2014 16.33.20 | 23/07/2014 16.33.20 | prelievo 6    |
|          | 1.78            | 679.33            | 11.32             |                |                |                     | 23/07/2014 18.20.20 | attesa 16     |
| 7        | 0.10            | 685.33            | 11.42             | 10.65          | 0.44           | 23/07/2014 18.26.20 | 23/07/2014 18.26.20 | prelievo 7    |
|          | 0.50            | 715.33            | 11.92             |                |                |                     | 23/07/2014 18.56.20 | attesa finale |

#### 2.4.1 Attività di laboratorio e analisi dei dati

I campioni raccolti con la camera bentica automatica sono stati divisi, in atmosfera inerte di N<sub>2</sub>, in più aliquote per le determinazioni dei nutrienti (N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, P-PO<sub>4</sub>, Si-Si(OH)<sub>4</sub>), del carbonio inorganico totale disciolto (DIC), del metano e dei metalli (Al, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Cu, V, Zn). I campioni destinati alle analisi dei nutrienti sono stati congelati a -20°C subito dopo la suddivisione in aliquote; i campioni per la determinazione del DIC sono stati avvelenati con HgCl (0,02% v:v di soluzione satura) e conservati a +4°C; i campioni per la determinazione dei metalli sono stati acidificati con acido nitrico suprapuro (0,5% v:v) e conservati a +4°C; il

metano è stato misurato al momento del campionamento con un sensore Franatech.

Dalle concentrazioni delle specie ioniche analizzate nei campioni di acqua raccolti in tempi diversi e rapportati al volume e all'area della camera bentica, sono stati calcolati i flussi bentici in termini di millimoli (mmol) per metro quadro (sqm) per giorno (d), per i nutrienti, e in termini di micromoli ( $\mu\text{mol}$ ) per metro quadro per giorno, per i metalli.

La formula applicata è la seguente:

$$F_i = (C_f - C_0 \cdot h) / (T_f - T_0)$$

Dove:

$F_i$  è il flusso del composto chimico  $i$  in millimoli per metro quadro per giorno ( $\text{mmol}/\text{sqm} \cdot \text{d}$ );

$C_f$  è la concentrazione del composto chimico  $i$  misurata al tempo  $f$ ;

$C_0$  è la concentrazione del composto chimico  $i$  misurata al tempo 0;

$h$  è l'altezza della camera bentica automatica;

$T_f$  è il tempo  $f$ ;

$T_0$  è il tempo iniziale dell'esperimento.

La misura dei parametri chimici e fisici all'interno della camera bentica ha permesso di calcolare anche il flusso bentico di ossigeno disciolto.

Venezia. Le analisi per i nutrienti sono state eseguite con l'analizzatore colorimetrico automatico EasyChem Plus della Systea S.p.A., seguendo il metodo proposto da Hansen e Koroleff (1999).

I metalli sono stati analizzati nel laboratorio ACTLAB (Ontario, Canada) mediante ICP-MS.

Il DIC è stato analizzato seguendo il metodo proposto da Dickson (2007) e modificato da Spagnoli (dati non pubblicati).

## **2.5. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SU ORGANISMI SENTINELLA**

Al fine di verificare gli eventuali effetti indotti dalle operazioni di dragaggio sugli organismi sentinella, il giorno 13/05/2015 sono stati prelevati n. 3 campioni di mitili (*Mytilus galloprovincialis*) dalla baia di Portonovo. Ogni campione era composto da circa 100 esemplari. Uno è stato utilizzato come "controllo" ed è stato subito analizzato per verificare lo stato degli organismi al "tempo 0" ( $T_0$ ), mentre gli altri due sono stati trapiantati tramite gabbie all'interno del Porto di Ancona, uno in corrispondenza dell'area di escavo (banchina 26) e l'altro in un'area interna al porto non interessata dalle attività di dragaggio (banchina 4; fig. 6). Lo scopo di

quest'ultimo campione era di poter discriminare, nella fase dei lavori di escavo, tra gli eventuali impatti sugli organismi determinati dal dragaggio e quelli indotti invece da altre attività portuali indipendenti dalle operazioni previste.

Ogni campione è stato suddiviso in due subcampioni di circa 50 esemplari cadauno, uno per analisi biologiche e uno per analisi chimiche.

Dopo 30 gg dall'immersione (dunque durante le operazioni di escavo) i campioni immersi nel porto sono stati prelevati per le successive analisi di laboratorio. In contemporanea al prelievo sono stati anche campionati altri 100 esemplari da Portonovo (controllo "T30").

Le misure biometriche dei quattro campioni erano le seguenti:

Controllo "T0":  $5,21 \pm 0,50$  cm LC

Controllo "T30":  $5,30 \pm 0,55$  cm LC

Banchina 26:  $5,26 \pm 0,55$  cm LC

Banchina 4:  $5,73 \pm 0,56$  cm LC



**Fig. 6** - Siti utilizzati per posizionare le gabbie contenenti gli esemplari di mitili presso banchine 26 e 4.

## **2.5.1 Attività di laboratorio e analisi dei dati**

### **Biomarker**

I Biomarker analizzati sono riportati in Tab. 4.

**Tab. 4** - Lista di biomarker proposti su *M. galloprovincialis* per la valutazione degli effetti biologici associati alle attività di dragaggio nel Porto di Ancona.

| Indice  | Rilevanza ecologica                 | Livello biologico           | Target biologico      | Significato tossicologico  |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--|
| Mortalità   | Endpoint di alto livello            | Individuo                   | Intero organismo      | Indice di effetto generico   |
| Stabilità delle Membrane lisosomiali  | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di effetto generico   |
| Accumulo lisosomiale di Lipofuscine   | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a specie ossigeno reattive (stress ossidativo) |
| Accumulo lisosomiale di Lipidi Neutri   | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a sostanze organiche                           |
| Rapporto volume lisosomi/citoplasma   | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare               | Ghiandola digestiva   | Indice di effetto generico   |
| Attività dell'enzima di catalasi  | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - Biochimico  | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a specie ossigeno reattive (stress ossidativo) |
| Livelli di proteine metallo-chelanti (metallotioneine)                            | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - Biochimico  | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a metalli                                      |
| Frequenza di micronuclei  | Endpoint subletale                  | Individuo                   | Cellule dell'emolinfa | Indice di stress genotossico   |
| Espressione genica dei geni codificanti induzione alla sintesi di metallotioneine | Endpoint subletale                  | Sub cellulare - genomico    | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a metalli                                      |
| Valutazione dei livelli di composti aromatici per via immunofluorescente          | Endpoint subletale                  | Sub cellulare - Istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a composti aromatici                           |

**Mortalità** – La mortalità nelle gabbie è stata misurata registrando il numero di conchiglie vuote e individui che, dopo il periodo di traslocazione di 30 gg e la successiva fase di prelievo, mantenevano aperte le valve anche in ambiente subaereo.

**Stabilità delle membrane lisosomiali** - Le ghiandole digestive di 5 mitili provenienti da ciascun sito sono state tagliate con criostato (All. A5) in modo tale da ottenere delle sezioni trasversali dei tubuli disposti parallelamente all'asse longitudinale della ghiandola stessa e poste in fila su apposito supporto in alluminio (chuck) precedentemente raffreddato in ghiaccio. Successivamente, il supporto con i frammenti è stato posto per 15" in un piccolo recipiente contenente N-esano, già raffreddato con azoto liquido. Il chuck è stato poi avvolto in 4-5 strati di Parafilm e posto immediatamente a -80°C. Al momento dell'analisi, per mezzo di un criostato, sono state ottenute sezioni di 10-20 µm di spessore con un'angolatura di taglio di 15°. Le sezioni sono state quindi trasferite su vetrini tenuti a temperatura ambiente. La stabilità della membrana lisosomiale è stata testata attraverso l'enzima N-acetylhexosaminidase che ha come substrato il naphthol As-BI N-acetyl-β-D-glucosaminide.

Le sezioni preparate come descritto in precedenza sono state trattate in una

vaschetta di Hellendal con un tampone destabilizzante le membrane lisosomiali a 37°C per tempi diversi (0, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40') in modo da determinare il tempo di trattamento richiesto per labilizzare interamente le membrane lisosomiali (periodo di labilizzazione). Il set di vetrini è stato trasferito nel mezzo di incubazione del substrato contenente naphthol As-BI N-acetyl- $\beta$ -D-glucosaminide precedentemente disciolto in 2,5 ml di 2-metossietanolo e portato a volume con il tampone citrato contenente Polipep, un polipeptide a bassa viscosità che agisce come stabilizzante per le sezioni. L'incubazione con il substrato è stata di 20' a 37°C nella vaschetta di Hellendal in un bagno agitante. I vetrini sono stati successivamente risciacquati in acqua di mare filtrata a temperatura ambiente o in una soluzione di NaCl al 3% a 37°C per 2' prima del loro trasferimento per 10' a temperatura ambiente in un tampone fosfato pH 7,4 contenente il colorante diazoinico fast violet B blue. I vetrini, risciacquati in acqua corrente per 5', sono stati successivamente fissati con gelatina glicerinata. Le sezioni così ottenute sono state analizzate mediante un sistema di analisi d'immagine al microscopio ottico (All. A6) per la determinazione del periodo di labilizzazione lisosomiale. Le analisi sono state eseguite almeno in quintuplicato.

***Accumulo lisosomiale di lipofuscine*** - Le sezioni di 5 individui provenienti da ciascun sito preparate al criostato (All. V) sono state fissate in calcio-formolo a 4°C, risciacquate in acqua distillata e poste nel mezzo di reazione contenente cloruro di ferro e potassio ferrocianuro per 5'. Successivamente, sono state lavate in acido acetico, risciacquate in acqua, montate su vetrino ed analizzate mediante un sistema di analisi d'immagine al microscopio ottico (All. A6) per la determinazione della colorazione dei lisosomi dovuta all'accumulo di lipofuscine.

***Accumulo lisosomiale di lipidi neutri*** - Le sezioni, derivanti da 5 individui per ciascun sito preparate al criostato (All. V) con la stessa modalità seguita per la valutazione della stabilità delle membrane lisosomiali, sono state fissate in calcio-formolo per 15' a 4°C, risciacquate in acqua distillata e poste in una soluzione di trietilfosfato. Successivamente sono state colorate con una soluzione di oil red in trietilfosfato a 20°C per 15', lavate in trietilfosfato per 30", risciacquate in acqua distillata e montate con gelatina.

Le sezioni così ottenute sono state analizzate al microscopio ottico (All. A6) mediante un sistema di analisi d'immagine che determina la percentuale di colorazione dei lisosomi dovuta all'accumulo dei lipidi neutri insaturi.

***Rapporto volume lisosomi / citoplasma*** - I dati ottenuti da analisi di tipo

quantitativo possono essere associati a quelli della citochimica qualitativa tramite l'analisi di immagine. Con questo sistema computerizzato, l'immagine del preparato in esame viene digitalizzata tramite un collegamento tra microscopio ottico e computer. Ciò permette di quantificare direttamente su sezioni istologiche il preparato in esame, preservando sia la localizzazione dell'enzima che le sue caratteristiche biochimiche.

La procedura si basa sulla legge di Lambert-Beer che mette in relazione la concentrazione del precipitato (c) con l'assorbanza (A):

$$A = \text{Log } I_0/I = klc$$

Dove  $I_0$  ed  $I$  sono rispettivamente l'intensità del raggio incidente e di quello trasmesso,  $l$  il percorso del raggio nel campione e  $k$  la costante massima di assorbanza.

Il raggio incidente ( $I_0$ ) colpisce il campione e viene trasmesso ( $I$ ) a una telecamera che forma l'immagine. Questa viene poi digitalizzata da una convertitore analogico, cioè trasformata in un valore numerico discreto ed immagazzinata nel computer in un sistema binario che formerà una matrice. L'elemento di questa matrice è il pixel, cioè il più piccolo dettaglio rilevabile dell'immagine, e il suo valore rispecchia la densità ottica in quel punto.

La matrice che viene a formarsi è costituita da 600 pixel verticali e 800 orizzontali, che rispecchiano la risoluzione dell'immagine digitalizzata. Più pixel sono presenti in una matrice, maggiore sarà la risoluzione e quindi la nitidezza dell'immagine. Generalmente i pixel possono assumere valori compresi fra 0 e 255, rispecchiando in tal modo 256 toni di grigio.

Una volta scelta la soglia dei toni di grigio la relazione tra l'intensità della luce trasmessa e il livello di grigio permette di quantificare la densità del precipitato in esame, che risulta direttamente proporzionale alla sua concentrazione.

Per le analisi d'immagine necessarie alla quantificazione del rapporto lisosomi / citoplasma cellulare sono state sequenzialmente determinate le superfici (in pixels) del microtubulo della ghiandola digestiva dell'esemplare analizzato, rapportato alla superficie dei soli lisosomi (in pixel). Per ogni campione (sito) sono state analizzate almeno 10 immagini e un totale di 30-40 microtubuli.

**Attività dell'enzima di catalasi** - Tale attività è stata determinata in aliquote di ghiandola di mitilo (3 pool di 5 individui per ogni sito) preventivamente lavate con una soluzione di NaCl (0,9%), omogeneizzate in 4 volumi di tampone Tris-HCl pH 7,4 contenente saccarosio e infine centrifugate (All. A7), prima a 2.000 x g per 10'

per eliminare la frazione lipidica, e successivamente a 9.000 x g per 30' per ottenere la frazione citosolica. L'attività dell'enzima di catalasi è stata determinata per via spettrofotometrica (Aebi, 1974; All. A8) a 240 nm valutando la diminuzione in assorbanza dell'estratto dovuta al consumo di H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

***Livelli di proteine metallo-chelanti (metallotioneine)*** - Al momento dell'analisi i tessuti (3 pool di 5-7 individui per ogni sito) sono stati omogeneizzati in 3 volumi di Saccoroso/Tris-HCl addizionati di Leupeptina e β-mercaptoetanolo. L'omogenato è stato quindi centrifugato (All. A7) per ottenere una frazione solubile contenente le metallotioneine. Il sopranatante è stato successivamente precipitato con etanolo-cloroformio con il duplice scopo di rimuovere i tioli a basso peso molecolare e concentrare le metallotioneine; 1 ml di citosol è stato quindi addizionato con 1,05 ml di etanolo freddo e cloroformio e centrifugato a 6.000 x g per 10'. Il sopranatante così ottenuto è stato addizionato di 3 volumi di etanolo freddo e mantenuto a -20°C per 1 h e quindi centrifugato a 6.000 x g per 10' in rotore oscillante. Il pellet è stato lavato una volta con etanolo e cloroformio nel buffer di omogeneizzazione, ricentrifugato, insufflato con azoto e risospeso in NaCl 0,25 M addizionato di 150 µl di HCl e EDTA. Ai campioni così risospesi è stato aggiunto DTNB (acido ditiobisnitrobenzoico) preparato al momento dell'uso e quindi sono stati centrifugati a 3.000 x g. L'assorbanza è stata valutata per via spettrofotometrica (All. A8) misurandola a 412 nm.

***Frequenza di micronuclei*** - L'allestimento dei preparati citologici è stato effettuato direttamente sul campione fresco lo stesso giorno di arrivo in laboratorio. L'emolinfa di ogni individuo (per un totale di 5 esemplari per campione) è stata prelevata dal muscolo adduttore posteriore con una siringa contenente Alsever (soluzione salina al 33‰ composta di NaCl, Na citrato x 2H<sub>2</sub>O, acido citrico x 1H<sub>2</sub>O e glucosio a pH fisiologico). Alcune gocce della sospensione cellulare, fissata in metanolo:acido acetico, sono state posizionate su vetrino e colorate con Giemsa.

Per ogni mitilo sono state osservate al microscopio ottico (All. A6) circa 2000 cellule di emociti e su queste sono state determinate le frequenze di micronuclei e delle anomalie nucleari (Ottaviani e Franceschini, 1997).

***Espressione genica dei geni codificanti induzione alla sintesi di metallotioneine (Real Time PCR (q-PCR))*** - L'amplificazione del DNA costituisce una tecnica d'indagine consolidata in campo biomedico e solo di recente è stata implementata con tecniche innovative per lo studio della qualità degli ambienti

marini. La tecnica di Real Time PCR consente di monitorare e quantificare una molecola target mentre la reazione biochimica che le produce la sua amplificazione è in corso. La metodologia prevede l'amplificazione selettiva e quantificazione in vitro di una sequenza di DNA target. Ciò è reso possibile dall'impiego di diversi prodotti chimici fluorescenti detti *reporter* che correlano l'amplificazione con l'intensità della fluorescenza (Higuchi *et al.*, 1993). La reazione di una classica PCR ad un certo numero di cicli giunge a plateau; ciò solitamente è indipendente dalla quantità iniziale di templati. Il sistema giunge a plateau per un ampio raggio di DNA di partenza. Grazie alla PCR quantitativa si può, quindi, monitorare la quantità di DNA prima del plateau, durante la fase esponenziale di crescita, per risalire alla quantità di template di partenza.

Con particolare riferimento all'ambiente marino la q-PCR può essere utilizzata per quantificare l'espressione di geni funzionali considerati bioindicatori.

In particolare nella presente esperienza di monitoraggio è stata prevista l'estrazione del RNA dalle cellule delle ghiandole digestive di mitilo, la retrotrascrizione dell'RNA in cDNA e infine l'amplificazione del cDNA tramite PCR. In questo caso, rispetto alla sequenza completa rappresentata dall'intero RNA, il metodo di studio si è focalizzato sulla quantificazione di due sequenze geniche, MT<sub>10</sub> ed MT<sub>20</sub>, responsabili della sintesi delle proteine metallo-chelanti "metallotioneine" (Dondero *et al.*, 2005).

La tecnologia di q-PCR adottata ha previsto:

- l'utilizzo di fluorocromi intercalanti del DNA tipo SYBR Green, una molecola fluorescente non specifica che si lega al solco minore del DNA a doppio filamento (eccitazione/emissione massima a 494/521 nm);
- l'impiego di sonde a idrolisi tipo "TaqMan". Questa fase consiste in una sequenza oligonucleotidica che, come i primers della PCR, viene disegnata per essere complementare alla sequenza bersaglio del gene da amplificare. Tale sequenza presenta all'estremità 5' un fuoroforo "reporter" come HEX (esacloro-6-carbossifluorescina) e all'estremità 3' una molecola "quencher" rappresentata dal TAMRA (6-carbossitetrametilrodamina);
- l'uso di acqua RNA-se e DNA-se free.

Operativamente, 0,1 gr di ghiandola digestiva è stato omogenato in Trizol e incubato a temperatura ambiente per 5' per favorire la completa dissociazione dei complessi nucleoproteici. Sono stati quindi aggiunti 100 µl di cloroformio e dopo 3' l'estratto è stato centrifugato (10.000 x g per 5' a 4°C; All. A7) realizzando una separazione in

due fasi: una inferiore arricchita in fenolo rosso e una superiore acquosa contenente l'RNA. La fase acquosa è stata trasferita in una eppendorf e l'RNA raccolto è stato concentrato mediante precipitazione per mezzo di trattamenti sequenziali a base di alcool isopropilico ed etanolo (75%) seguiti da centrifugazione a 10.000 x g per 10' a 4°C. Il surnatante ottenuto è stato quindi eliminato e il pellet depositato sul fondo della provetta è stato risospeso in 100 mM sodio acetato ed etanolo (100 %). Il passaggio successivo ha previsto la purificazione attraverso trattamento con LiCl (8M), incubato a -20°C per 30' e centrifugato a 20.000 x g per 30'; il surnatante è stato quindi eliminato. Il pellet così ottenuto è stato nuovamente risospeso in etanolo (75%) per la fase di analisi o conservato a -20°C. E' seguita la quantificazione dell'RNA ottenuto tramite lettura a diverse bande come  $\lambda = 230, 260$  e 280.

Per la fase successiva di sintesi del cDNA sono stati prelevati 0,1 g di RNA totale, incubato a 70° C per 5' con appropriate quantità di oligoTprimers. Successivamente, sono stati aggiunti in rapida sequenza il tampone di reazione, il mix di desossiribonucleotidi trifosfato (dNTP), l'acqua deionizzata nucleas free, e il RevertAid M-MuLV Reverse Transcriptase<sup>®</sup>. E' stato quindi impostato il seguente ciclo termico di PCR:

- 1 Incubazione della miscela a 37°C per favorire l'annealing degli oligo(d)T;
- 2 incubazione a 40°C per 40-60';
- 3 incubazione a 50°C per 20';
- 4 interruzione della reazione tramite riscaldamento a 70°C per 10';
- 5 raffreddamento;

Alla fine della reazione di amplificazione, l'analisi dei risultati è stata operata attraverso il metodo comparativo cicli soglia. Dall'analisi delle curve di amplificazione sono stati desunti i parametri fondamentali alla quantificazione delle molecole inizialmente presenti nel campione come il ciclo soglia e la linea soglia di reazione.

L'efficienza della reazione di PCR è stata valutata tramite i cambiamenti di espressione genica del campione sulla base di un controllo esterno attraverso un campione di riferimento e un gene di riferimento (house-keeping), la cui espressione mantiene gli stessi livelli indipendentemente da variazioni ambientali (Livak e Schmittgen, 2001).

***Valutazione dei livelli di composti aromatici per via immunofluorescente*** - Le ghiandole digestive di 5 mitili provenienti da ciascun sito sono state tagliate in modo tale da ottenere delle sezioni trasversali dei tubuli disposti parallelamente all'asse longitudinale della ghiandola stessa e poste in fila su apposito supporto in alluminio.

Al momento dell'analisi, per mezzo di un criostato (All. A5), sono state ottenute sezioni di 25  $\mu\text{m}$  di spessore con un'angolazione di taglio di 15°. Le sezioni sono state quindi trasferite su vetrini tenuti a temperatura ambiente. La presenza di composti aromatici nelle cellule delle ghiandole digestive dei mitili analizzati stata testata su sezioni di tessuto sciacquate tre volte da una soluzione di Hanks e stabilizzate in una soluzione di bloccaggio e permemabilizzazione costituita da 5% Triton X-100, 2% BSA, 0,5% siero di coniglio in soluzione di Hanks e successivamente incubate a 4 C con anticorpo primario monoclonale (Santa Cruz Biotechnology) 1/100 per 8h al buio e successivamente con anticorpo secondario anti IPA policlonale DyLight 594 (AbCAM) in concentrazione 1/100 per un ulteriore ora, al buio ed a 20 C. Le sezioni così trattate sono state risciacquate in soluzione di Hanks e montate in Mowiol. Dalle 10 alle 20 immagini per ogni vetrino sono state acquisite e analizzate tramite un software per l'analisi d'immagine. I risultati sono espressi come densità ottica / pixels<sup>2</sup>.

### **Idrocarburi Policiclici Aromatici**

Gli esemplari di mitilo sono stati scongelati e le parti molli sono state separate dalla conchiglia in maniera tale da ottenere circa 50 g di peso umido per ciascun sito. Gli organismi, così suddivisi e selezionati, sono stati pesati in un contenitore di vetro senza coperchio, previamente tarato, pulito con solventi (acetone, esano) e asciugato per evitare qualsiasi tipo di contaminazione. Successivamente, le parti molli in questi contenitori sono state liofilizzate fino a completa essiccazione (processo che avviene in circa 3-5 gg) e poi pesate.

L'intero processo analitico la determinazione degli IPA è stato diviso in tre fasi distinte: estrazione e isolamento dei contaminanti dalla matrice, purificazione dell'estratto, determinazione analitica finale del composto.

I campioni di mitili liofilizzati (3 g) sono stati sottoposti ad una tecnica basata su estrazione in apparato Soxhlet (All. A8) a 120°C per 8 h, evaporati a 50°C per la determinazione della Materia Organica Estratta (MOE) e successivamente ripresi e purificati su colonna allumina/gel di silice. La purificazione e la separazione degli estratti è stata effettuata su colonna di gel di silice e sodio solfato anidro (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (attivati a 130°C per 24 h). La colonna è stata eluita con 32 ml di esano, seguiti da 15 ml di una soluzione esano:diclorometano (1:1 v/v). Durante le analisi dei campioni sono state effettuate prove in bianco. La frazione contenente gli IPA è stata concentrata sotto blando flusso d'azoto per il raggiungimento di un volume

finale di circa 0,5 ml, trasferita in acetonitrile e impiegata per la determinazione analitica degli IPA. La determinazione qualitativa e quantitativa degli IPA è avvenuta mediante cromatografia liquida ad alta pressione (HPLC - High Performance Liquid Chromatography) con rivelatore a serie di fotodiodi (Waters® PDA 996) e con rivelatore a fluorescenza (Waters® 474 Scanning Fluorescence Detector) in serie (All. A9). Per quanto riguarda le condizioni di corsa, la fase mobile iniziale è costituita da acetonitrile (40%) ed acqua (60%), fino al raggiungimento di un gradiente lineare al 100% di acetonitrile, ad una velocità di corsa di 1,5 ml min<sup>-1</sup> per 50'. È stata usata una colonna cromatografica Supelcosil LC-PAH HPLC (25 cm x 4,6 mm, 5 µm) (All. A9a).

La formula finale per il calcolo della concentrazione degli analiti è la seguente:

$$C \text{ (ng/l)} = \frac{\text{Area picco} \times \text{Conc. Std} \times \text{vol finale}}{\text{Area picco Std} \times \text{g. Peso secco}}$$

Con area si intende l'area dei picchi risultati nel cromatogramma. Il risultato finale è espresso in ng g<sup>-1</sup> di tessuto liofilizzato.

Le rette di taratura sono state ottenute iniettando quattro soluzioni a concentrazione nota dello standard TLC Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Mix (Supelco), contenente i 16 composti considerati inquinanti prioritari previsti dall'EPA: Naftalene, Acenaftilene, Acenaftene, Fluorene, Fenantrene, Antracene, Fluorantene, Pirene, Benzo(a)Antracene, Crisene, Benzo(b)Fluorantene, Benzo(k)Fluorantene, Benzo(a)Pirene, Dibenzo(a,h,)Antracene, Benzo(g,h,i,)Perilene e Indeno(1,2,3-c,d)Pirene.

### **Idrocarburi totali**

La tecnica d'indagine si basa sull'applicazione integrale dei metodi USEPA 3550c rev. 3 – 2007 e 8015c rev. 3 – 2000.

Una quantità nota di campione (5-10 g di parti molli) è stata dapprima liofilizzata e successivamente estratta mediante sonicazione a freddo per 60' con 50 ml di acetone/n-eptano (1:1 v/v). Nella soluzione estraente è stata aggiunta la soluzione di riferimento per la finestra dei tempi di ritenzione contenente n-pentano (C<sub>5</sub>), n-dodecano (C<sub>12</sub>) e n-tetracontano (C<sub>40</sub>). L'estratto è stato purificato su colonna di Florisil. Un'aliquota dell'estratto purificato è stato analizzato in GG-FID. In particolare, è stata misurata l'area totale dei picchi presenti nell'intervallo delimitato dalle tre soluzioni di riferimento C<sub>5</sub>, C<sub>12</sub> e C<sub>40</sub>. La quantità di idrocarburi è stata quindi

determinata mediante confronto con la soluzione di riferimento esterno costituito da quantità uguali di tre standard. Ulteriormente, sono state disposte prove in bianco per ogni serie di analisi al fine di identificare la baseline.

### **Metalli pesanti**

Due aliquote di circa 2,5 g di campione liofilizzato per ogni sito di prelievo sono state mineralizzate a reflusso con 30 ml di acido nitrico concentrato. I campioni, posti in un apposito pallone da 250 ml, sono stati sottoposti a digestione a freddo per 20-30' e portati ad ebollizione per circa 2 h in forno a microonde *ETHOS 900*<sup>®</sup> della *Milestone* (All. A10). La mineralizzazione è stata eseguita secondo la procedura ICRAM (2001).

Le soluzioni risultanti sono state filtrate attraverso un filtro di cellulosa e portate a un volume di 100 ml con acqua MilliQ. Un simile procedimento è stato effettuato anche con un'uguale quantità di acido per ottenere il bianco da sottrarre ai valori dei campioni ottenuti per via strumentale.

La determinazione strumentale di **alluminio**, **vanadio**, **cadmio**, **cromo**, **nicel**, **rame** e **piombo** è avvenuta mediante spettrofotometria di assorbimento atomico in fornello di grafite (*GF-AAS*), una tecnica molto sensibile per la determinazione di questi elementi generalmente presenti in concentrazioni minori. Come gas di trasporto è stato utilizzato l'argon. Per le analisi ci si è avvalsi di uno spettrofotometro ad assorbimento atomico *AAnalyst 700*<sup>®</sup> della Perkin Elmer in configurazione Autosampler AS40<sup>®</sup> – Mercury/Hydride System MHS-10<sup>®</sup> (All. A11). Lo **zinco** è stato analizzato direttamente in fiamma aria-acetilene (*F-AAS*) con lo stesso strumento e quantificato da una curva di calibrazione costruita da concentrazioni note dell'elemento. La temperatura della fiamma a cui avviene l'atomizzazione è di 2300°C.

Il **mercurio** è stato determinato mediante analisi dei vapori ottenuti per riduzione a freddo con NaBH<sub>4</sub> (*HG-AAS*) secondo la seguente reazione:



I campioni sono stati pre-trattati con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e K<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub> in modo da ossidare la sostanza organica. La reazione con NaBH<sub>4</sub> riduce il mercurio presente in forma ionica a mercurio metallico il quale, assieme all'idrogeno gassoso liberato dalla reazione, viene trasportato dal flusso di gas inerte nella cella al quarzo dove è stata misurata la sua assorbanza tramite il *Flow Injection Mercury System FIMS 400*<sup>®</sup>

della Perkin-Elmer (All. A11a). Per evitare assorbimenti di tipo molecolare, nelle analisi che richiedono lunghezze d'onda nella zona dell'ultravioletto è stato impiegato il correttore di fondo al deuterio.

La metodica seguita per la determinazione di Hg, Cr, Cd e Pb è quella delle aggiunte, secondo la quale aliquote uguali di standard sono state addizionate ai campioni al fine di misurare l'assorbanza delle soluzioni così ottenute e calcolare il valore della concentrazione. Il dosaggio dell'**arsenico** è stato ottenuto in HG-AAS utilizzando il *Flow Injection Analysis System FIAS 400*<sup>®</sup> di Perkin Elmer con lettura in GF-AAS e correttore di fondo Zeeman, 4100 ZL, Perkin-Elmer (All. A11Bb).

Le lunghezze d'onda utilizzate per i singoli metalli analizzati sono riportate in Tab. 5.

**Tab. 5** – Lunghezze d'onda utilizzate per i metalli analizzati.

|    | <b>Lunghezze d'onda</b> |
|----|-------------------------|
| Al | 308,215                 |
| As | 193,696                 |
| Cd | 226,502                 |
| Cr | 267,716                 |
| Hg | 194,227                 |
| Ni | 231,604                 |
| Pb | 220,353                 |
| Cu | 324,754                 |
| V  | 292,402                 |
| Zn | 213,856                 |

### **Composti organo stannici: Mono-, Di- e Tributil-stagno**

La tecnica d'indagine si basa sull'applicazione integrale del metodo in Appendice I, "Metodo per la determinazione di composti organostannici in sedimenti e matrici biologiche tramite GC-MS e GC-FPD", ICRAM APAT (2001). In dettaglio, il metodo prevede il prelievo di 0,1-0,5 g di parti molli, trattamento con tropolone in metanolo e HCl 37%, separazione degli estratti mediante centrifugazione e ripartizione liquido-liquido con CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> e NaCl, evaporazione del solvente mediante evaporatore rotante, trasferimento dell'estratto in fiala con diclorometano e isoottano, evaporazione del solvente sino quasi a secchezza sotto un debole flusso di azoto. Successivamente viene effettuata derivatizzazione con PeMgBr 2M in etere dietilico, distruzione dell'eccesso del reattivo con acqua con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ed estrazione degli analiti con esano. Si procede con il lavaggio degli estratti con due aliquote di NaHCO<sub>3</sub>, concentrazione a 0,5 ml sotto un debole flusso di azoto, successiva purificazione con gel di silice o Florisil, eluizione tramite una soluzione esano-toluene 1:1. Infine avviene la preconcentrazione e l'analisi in GC-MS.

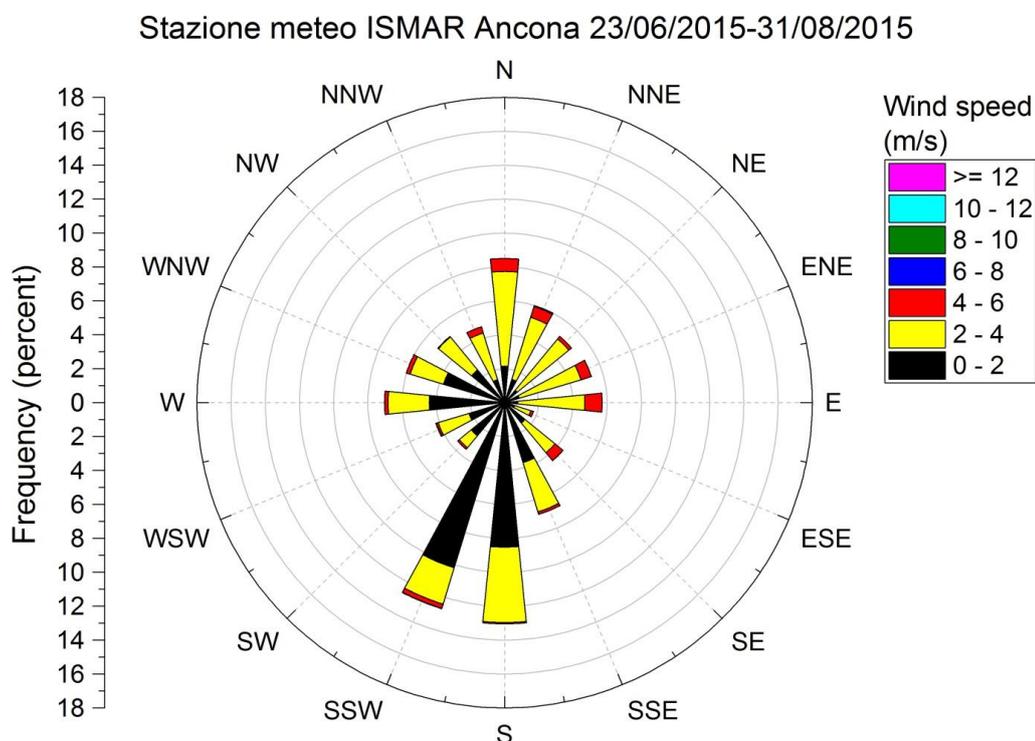
### 3. RISULTATI

#### 3.1. ACQUISIZIONE DATI OCEANOGRAFICI PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO

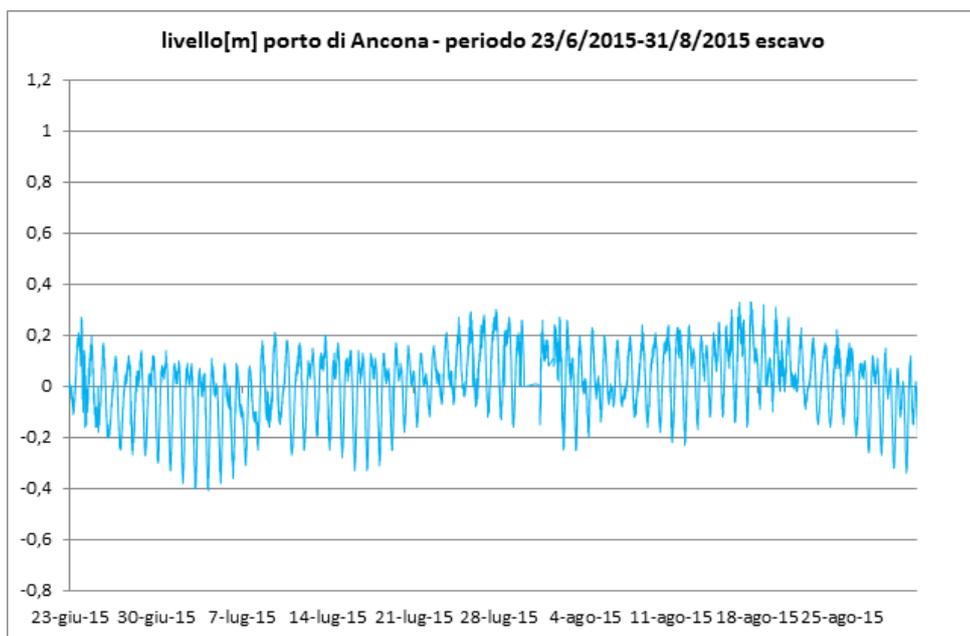
Nel periodo precedente alle operazioni di escavo era stata registrata una netta prevalenza del vento di provenienza S e S-SW (vento da terra) con bassa intensità, per lo più inferiore a 2-4 m/s. Velocità del vento più elevate (inferiore a 8-10 m/s) erano state registrate nei settori NE-ENE ma con minore frequenza (Fabi *et al.*, 2016).

Il diagramma a rosa riferito al periodo durante le operazioni di escavo (fig. 7) ha mostrato, a differenza del periodo precedente, una mancanza di venti di intensità elevate compresi fra 6 e 10 m/s e una prevalenza del vento di provenienza S, S-SW e N.

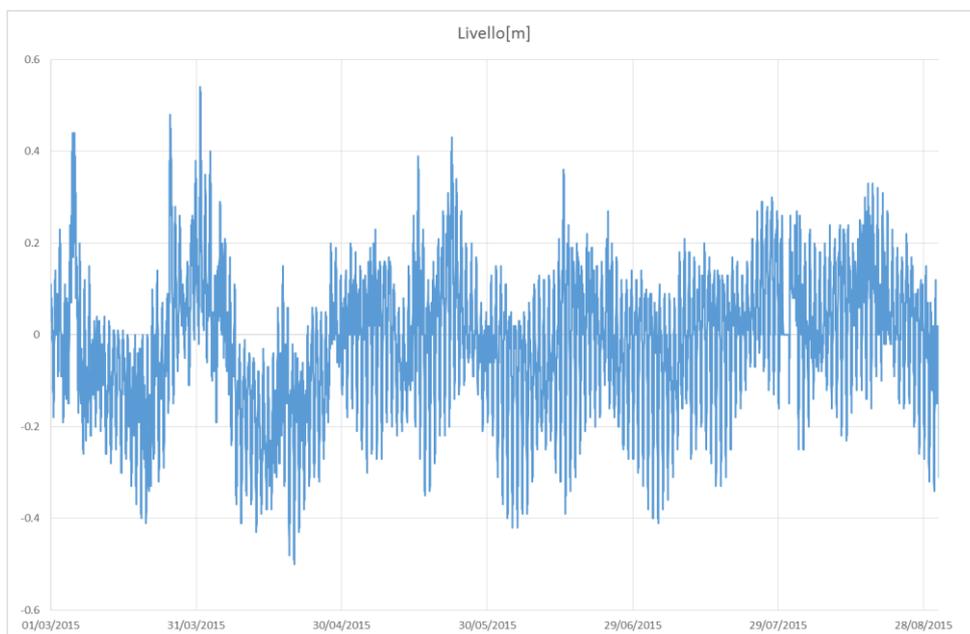
L'andamento del livello idrometrico è risultato compreso fra -0,4 m e +0,2 m (fig. 8), mentre nel pre-survey era risultato compreso tra -0,4 m e +0,4 m con tre picchi registrati nel mese di marzo (fig. 9; Fabi *et al.*, 2016).



**Fig. 7** – Diagramma a rosa della velocità e frequenza della direzione del vento (dati ogni 10 minuti) della stazione meteo di Ancona dal 23/06/15 al 31/08/15 (periodo durante le operazioni di escavo).



**Fig. 8** – Variazione del livello idrometrico (m) all'interno del porto di Ancona dal 23/06/15 al 31/08/15 (dati ogni 10 minuti, fonte ISPRA), periodo durante le operazioni di escavo.

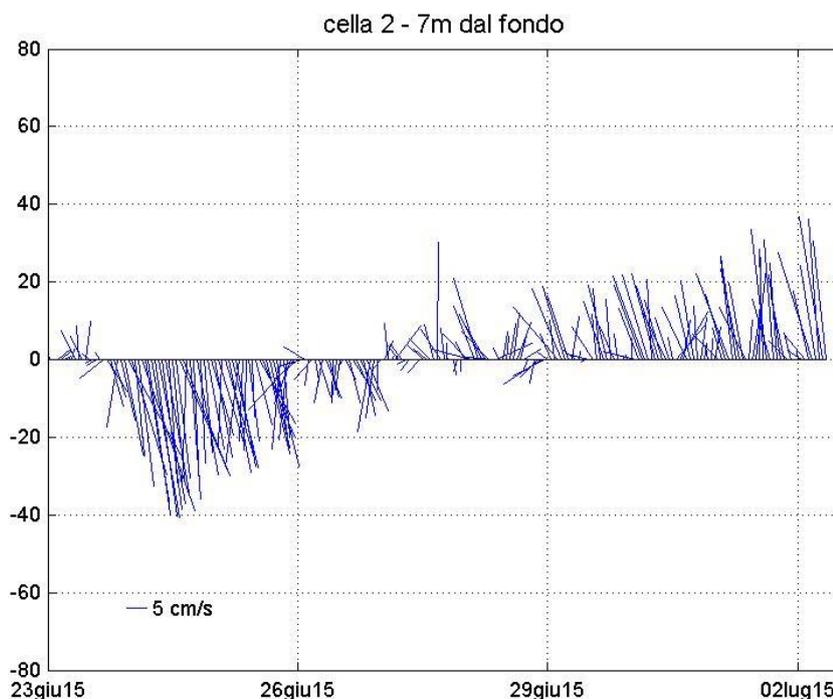


**Fig. 9** – Variazione del livello idrometrico (m) all'interno del porto di Ancona dal 01/03/15 al 31/08/15 (dati ogni 10 minuti, fonte ISPRA), periodi di pre-survey e durante le operazioni di escavo.

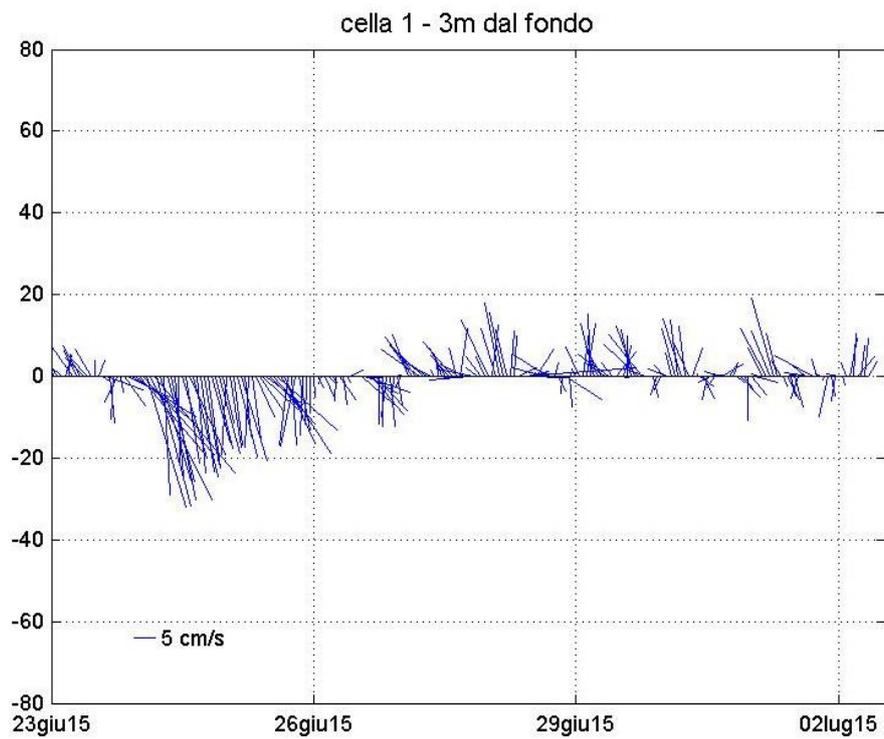
## 3.2. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI LUNGO LA FASCIA COSTIERA

### 3.2.1 Correntometro a Nord di Ancona (Senigallia)

I dati di corrente registrati nelle due celle hanno mostrato un andamento piuttosto irregolare. La cella 2 (7 m dal fondo) ha mostrato un primo periodo (dal 23 al 27 giugno) in cui è prevalsa una corrente verso Sud di intensità non superiore a 40 cm/s, seguito da un secondo periodo in cui è prevalsa una corrente verso Nord sempre di intensità contenuta entro i 40 cm/s (fig. 10). La cella 1 ha registrato un andamento di corrente simile alla cella 2 ma di intensità più contenuta (fig. 11): infatti, nei primi 4 giorni l'intensità di corrente non ha mai superato i 30 cm/s, mentre nei restanti giorni l'intensità di corrente si è mantenuta entro i 20cm/s.



**Fig. 10** – Stickplot in cm/s della corrente (dati ogni ora) a 7 m dal fondo registrata dal 23/06/15 al 02/07/15 dal correntometro ADCP immerso a Senigallia.



**Fig. 11** – Stickplot in cm/s della corrente (dati ogni ora) a 3 m dal fondo registrata dal 23/06/15 al 02/07/15 dal correntometro ADCP immerso a Senigallia.

### **3.3. VERIFICA DELLE DINAMICHE SUL TRASPORTO DEI SEDIMENTI DEL LARGO**

#### **3.3.1 Area di sversamento**

Nel 1° monitoraggio condotto il **7 luglio 2015**, a causa di un mal funzionamento della pompa del CTD, i dati di salinità, densità e ossigeno disciolto non sono risultati di buona qualità per cui non è stato possibile elaborarli. Comunque, da un'analisi generale (fig. 12) si è potuta notare una colonna d'acqua completamente stratificata. La **temperatura** ha mostrato uno strato superficiale (fino a 5 m) di acqua molto calda, con valori compresi fra 24,8°C e 27,5°C, rapidamente diminuiti fino a circa 20 m di profondità dove sono stati raggiunti 15°C circa. Sul fondo sono stati registrati valori intorno a 13,5°C. La clorofilla a misurata come **fluorescenza** indotta ha mostrato valori più alti sul fondo di tutte le stazioni con valori fino a 3 mg/m<sup>3</sup>, in particolare in tutte le stazioni interne alla cella di sversamento. La **torbidità** ha mostrato valori bassissimi, prossimi allo zero lungo tutta la colonna d'acqua delle stazioni campionate ad eccezione di quelle in prossimità della posizione dello sversamento della draga dove i valori osservati sul fondo hanno raggiunto anche 20 NTU.

In fig. 13 vengono rappresentati i profili di **torbidità** di 4 stazioni campionate subito dopo uno scarico della draga e dunque più interessanti. Il profilo grigio, corrispondente al punto di sversamento della draga, rappresenta la stazione campionata alle 10:46 dove si sono osservati bassi valori di torbidità su tutta la colonna d'acqua ad eccezione del fondo. La successiva stazione (in verde) monitorata 20 minuti dopo (11:03) ha mostrato una maggiore torbidità sempre in prossimità del fondo. La terza stazione (profilo in rosso) campionata alle ore 11:09 ha mostrato un massimo secondario a 15 m (4 NTU) seguito da un massimo principale a 20 m (20 NTU) e uno sul fondo (8 NTU). Infine, la stazione in viola campionata alle 11:21 ha mostrato un andamento simile alla stazione precedente ma con valori attenuati.

Per quanto concerne le misurazioni correntometriche effettuate con l'ADCP contemporaneamente al campionamento della colonna d'acqua dalle ore 06:00 alle ore 11:40 nelle quattro quote qui rappresentate (superficie, 11 m, 17 m e fondo) si è potuto notare una netta prevalenza della corrente in direzione NW (fig. 14), con maggiore intensità nella quota di superficie e a 11 m (valori fino a oltre 40 cm/s). Nelle due quote più profonde la corrente è risultata di intensità minore rispetto a quella superficiale (al di sotto di 15 cm/s).

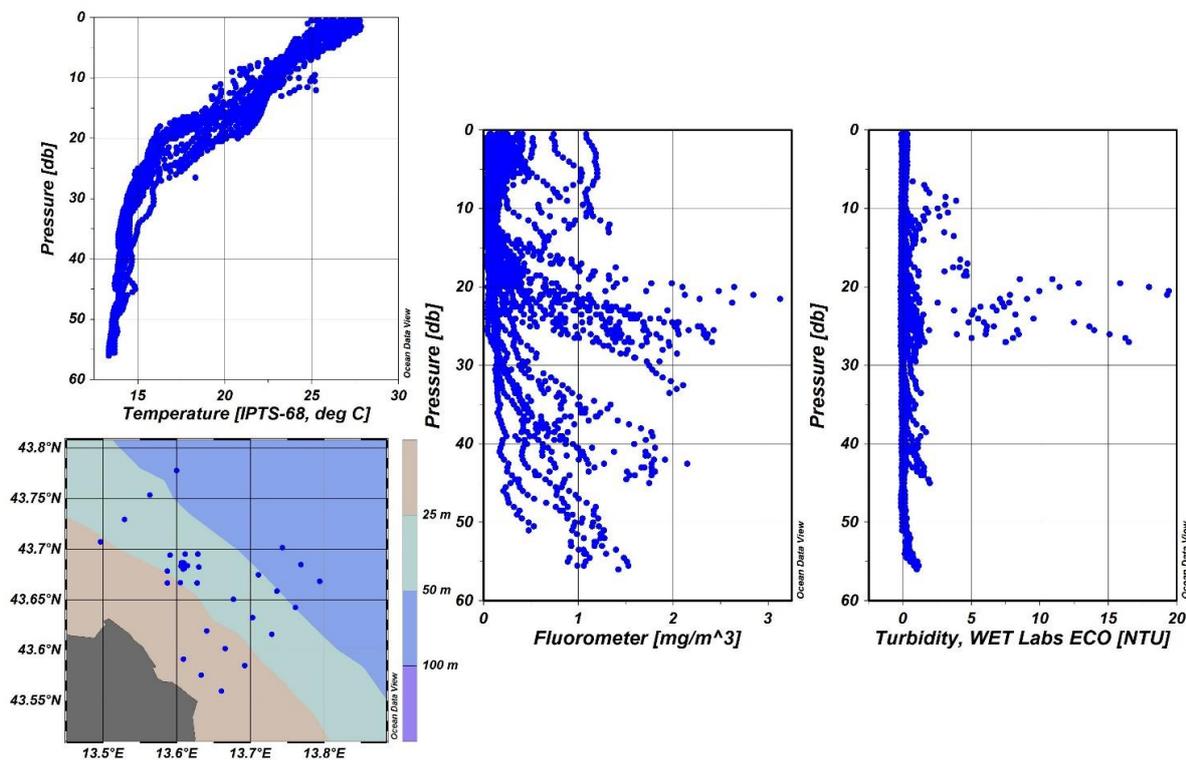


Fig. 12 - Profili verticali di tutte le stazioni visualizzate nella mappa rappresentanti la temperatura (°C), la fluorescenza ( $\text{mg m}^{-3}$ ) e la torbidità (NTU).

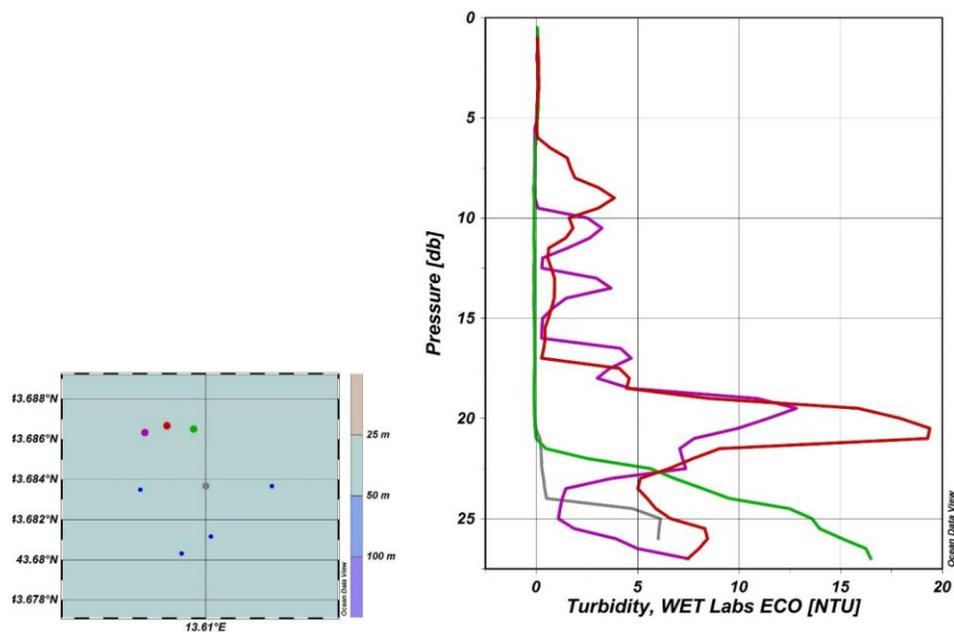
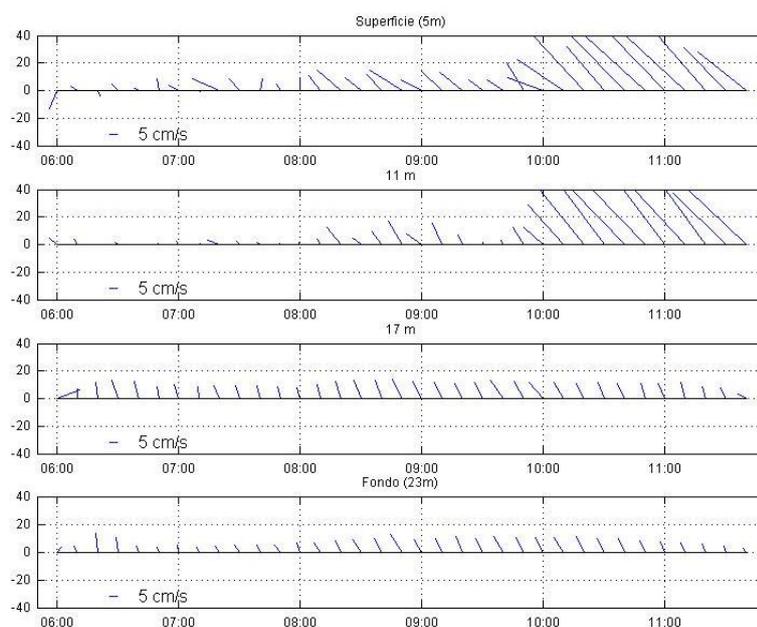


Fig. 13 - Profili verticali di torbidità (NTU) della stazioni ripetute nel tempo in prossimità della posizione dello sversamento della draga (pallino grigio).

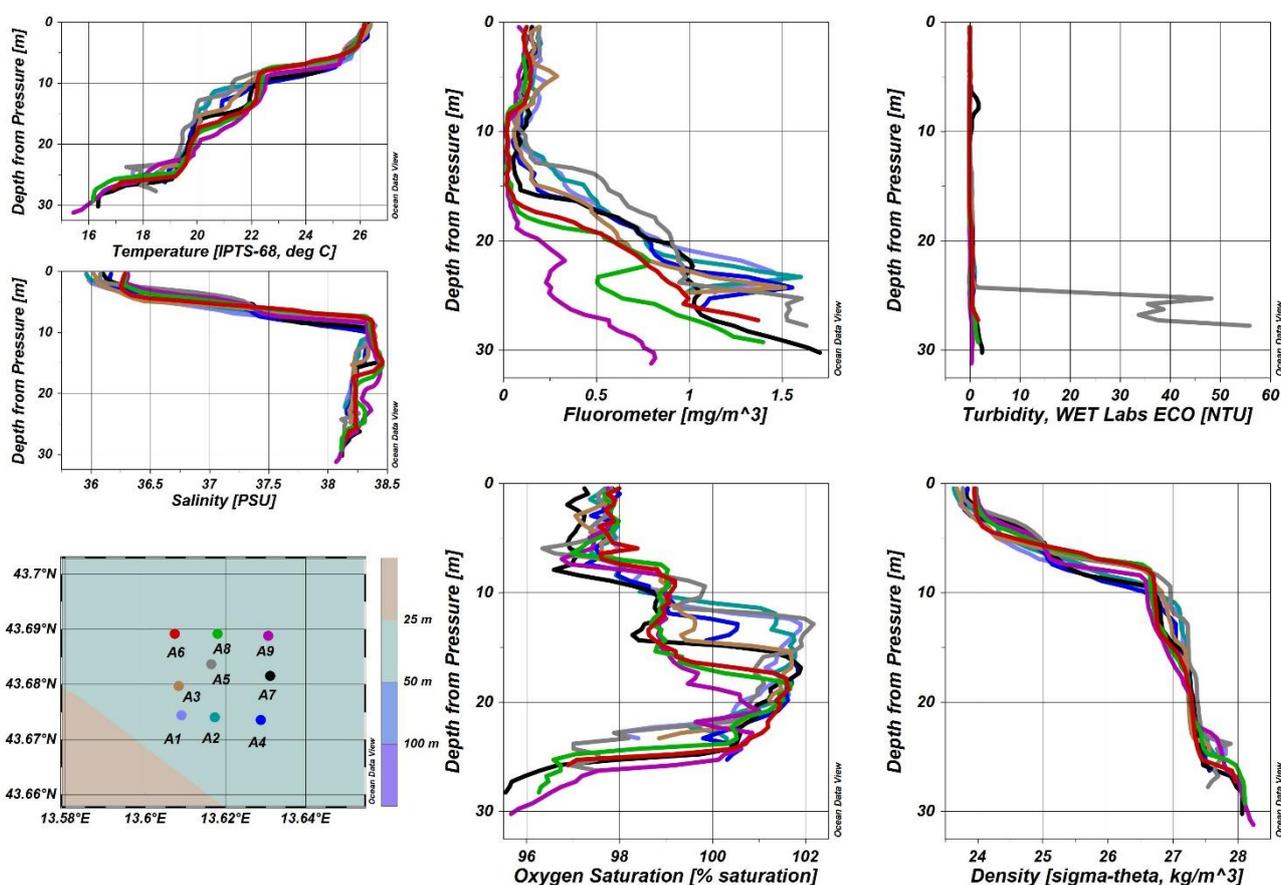


**Fig. 14** - Stickplot in cm/s della corrente (dati ogni 10 minuti) alla superficie, a 11 m, a 17 m e sul fondo registrata dal correntometro ADCP il giorno 07/07/15 dalle ore 06:00 alle ore 11:40 GMT.

Durante il 2° survey effettuato il **13/07/2015** le stazioni interne poste nell'area di sversamento hanno mostrato caratteristiche fisiche simili fra loro ad eccezione della stazione centrale (A5) il cui profilo di torbidità si è discostato nettamente dagli altri negli ultimi 4 m di profondità mostrando valori piuttosto elevati (fig. 15). E' da tenere presente che il campionamento è stato effettuato pochi minuti dopo lo sversamento dei fanghi portuali e la stazione centrale ne ha probabilmente risentito maggiormente essendo quella posizionata più vicino all'area di attività.

I profili di **temperatura** hanno mostrato un andamento tipico della situazione estiva con tutta la colonna d'acqua completamente stratificata, essendo caratterizzata dalla presenza di un netto termocline posto a 10 m di profondità. I valori superficiali (circa 26°C) sono diminuiti dapprima bruscamente sino a 10 m di profondità, dove sono stati registrati 22°C, poi più gradatamente sino al fondo dove sono stati raggiunti 16°C. I profili di **salinità** hanno mostrato la presenza di un netto aloclino caratterizzato da bassi valori in superficie (intorno a 36-36,3 PSU) aumentati rapidamente a 38,3 a 10 m di profondità. Da qui la salinità si è mantenuta pressoché costante in tutta la colonna d'acqua con valori compresi fra 38 e 38,5 PSU fino al fondo. I profili di **densità** hanno mostrato un andamento simile alla salinità, con un evidente pycnocline che separava due masse di acqua diverse: una superficiale di 10 m dove la densità è passata da 23,8 a 26,6 kg/m<sup>3</sup> e una sottostante caratterizzata da valori uniformi compresi fra 27 e 28 kg/m<sup>3</sup> fino al fondo. Le

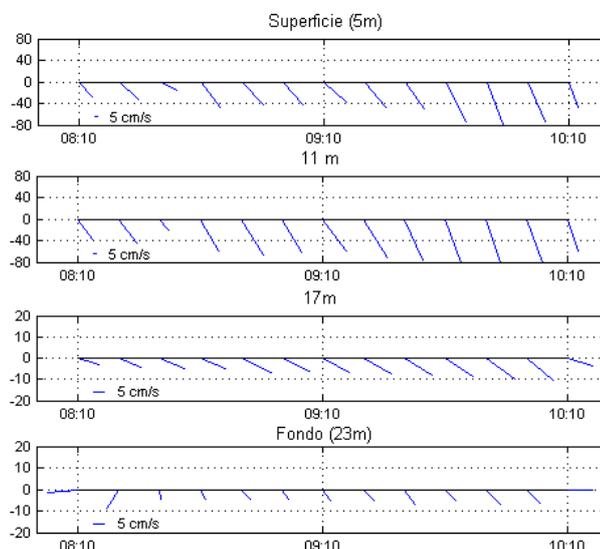
concentrazioni di **ossigeno disciolto** hanno presentato valori di saturazione superficiali intorno al 97%, aumentati fino al 102% nello strato compreso fra 10 m e 15 m e ridotti sino al 96% sul fondo delle stazioni A7, A8 e A9. I profili di clorofilla a misurata come **fluorescenza indotta** hanno mostrato bassi valori ( $\leq 0,1 \text{ mg/m}^3$ ) nei primi 10 m di profondità per poi aumentare sino a raggiungere o superare  $1,5 \text{ mg/m}^3$  sul fondo (stazioni A2, A5 e A7). I profili di **torbidità** hanno mostrato bassissimi valori (prossimi allo zero) su tutta la colonna d'acqua delle nove stazioni campionate ad eccezione del sito centrale in cui, come scritto in precedenza, i valori sono apparsi particolarmente elevati negli ultimi 4 m dal fondo (55 NTU).



**Fig. 15** - Profili verticali delle stazioni prossime e interne alla cella utilizzata per lo sversamento dei fanghi portuali (A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 e A9) rappresentanti la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), la salinità (PSU), fluorescenza ( $\text{mg/m}^3$ ), la torbidità (NTU), la saturazione di ossigeno (%) e la densità ( $\text{kg/m}^3$ ).

Le misurazioni correntometriche effettuate con l'ADCP dalle ore 08:10 alle ore 10:10 (fig. 16) hanno evidenziato la presenza di una corrente prevalente in direzione SE/SSE, con intensità maggiore in superficie e nella quota a 11 m, dove ha superato i 40 cm/s, e minore nelle due quote più profonde, dove sono stati registrati

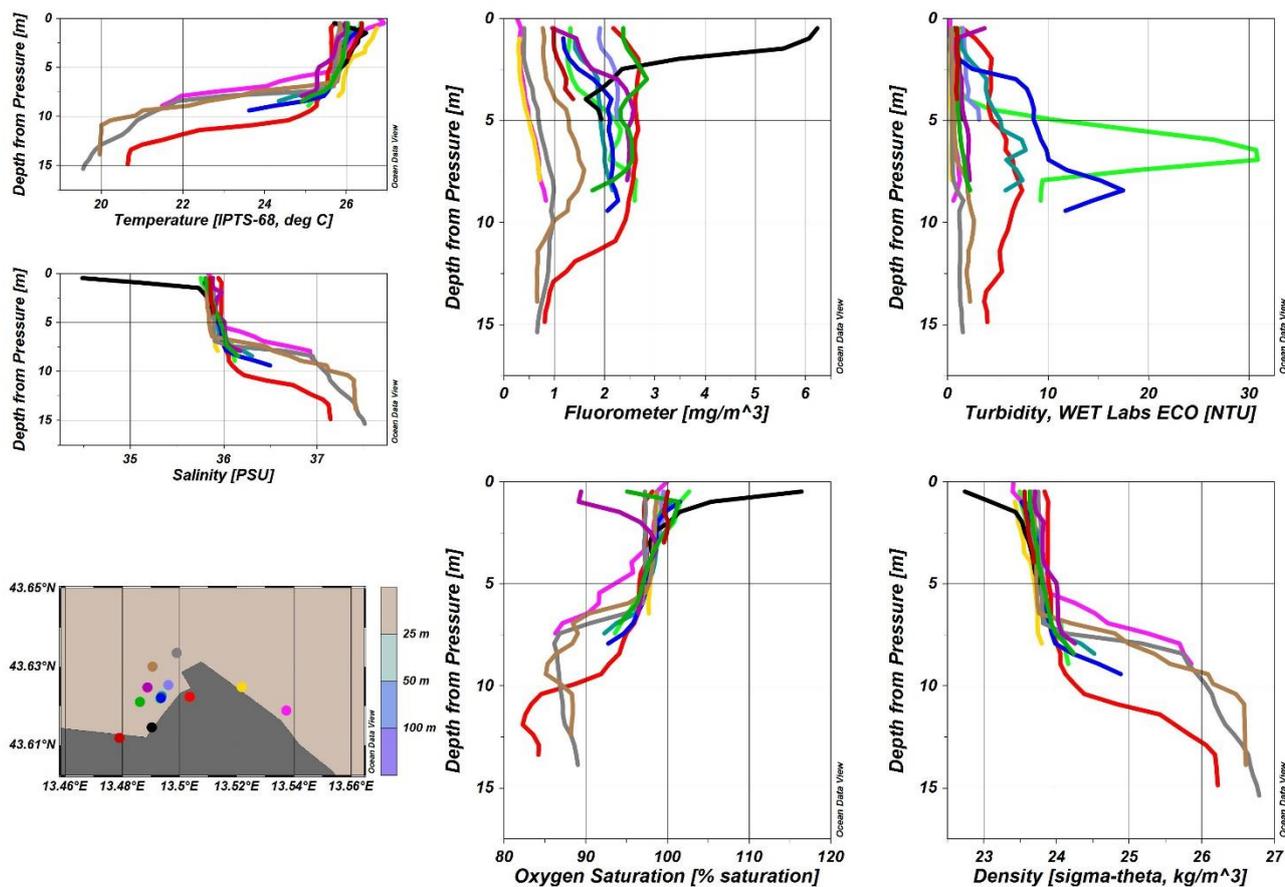
valori inferiori a 10 cm/s (fondo).



**Fig. 16** - Stickplot in cm/s della corrente (dati ogni 10 minuti) alla superficie, a 11m, a 17m e sul fondo del correntometro ADCP dalle ore 08:10 alle ore 10:10 GMT del 13/07/15.

### 3.2.2 Area di escavo

I profili verticali delle stazioni effettuate dentro e fuori il porto di Ancona (fig. 17) hanno evidenziato una colonna d'acqua stratificata, con uno strato superficiale di 7 m caratterizzato da **temperature** intorno a 26°C, **salinità** di circa 36 PSU e **densità** 24 kg/m<sup>3</sup>, e uno strato più profondo con temperature inferiori (sino a 19°C sul fondo), ma con salinità e densità superiori (sino a 37 PSU e 26,5 kg/m<sup>3</sup> rispettivamente). La **fluorescenza** è risultata più o meno omogenea lungo tutta la colonna d'acqua e compresa fra 1 e 2,5 mg/m<sup>3</sup> (massimo presso la stazione P03 dentro il porto, linea rossa), ad eccezione della stazione P06 (imboccatura del bacino dei Cantieri Minori, linea grigia) che ha mostrato valori piuttosto alti in superficie (intorno a 6 mg/m<sup>3</sup>), diminuiti poi rapidamente fino ad arrivare a 2 mg/m<sup>3</sup> sul fondo. La **torbidità** ha presentato valori più alti, compresi fra 5 e 30 NTU, nelle stazioni più vicine alla zona di escavo (banchina 26), precisamente nelle stazioni P01, P20 e P21 (rispettivamente profilo verde, celeste e blu). In particolare, la P01 è stata campionata subito dopo l'escavo, non appena il mezzo adibito alle operazioni di dragaggio ha liberato la banchina. Questa stazione è risultata ovviamente quella con valori più alti di torbidità (30 NTU) che si sono attenuati dopo circa 15 min.



**Fig. 17** - Profili verticali delle stazioni campionate il 13/07/2015 dentro e fuori il porto di Ancona rappresentanti la temperatura (°C), la salinità (PSU), fluorescenza (mg/m<sup>3</sup>), la torbidità (NTU), la saturazione di ossigeno (%) e la densità (kg/m<sup>3</sup>).

### **3.4. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI**

I flussi benthici misurati nella stazione nell'area di escavo in fase *operativa* e nella fase *ante-operam* sono riassunti in Tab. 6 e nelle figg. 18 e 19. Oltre ai metalli analizzati in base alla convenzione stipulata con l'Autorità Portuale, si è deciso di analizzare anche il Fe e il Mn, in quanto questi due elementi sono molto importanti per la comprensione dei processi di rilascio e/o assorbimento dal sedimento. I valori di metano sono risultati sempre inferiori al limite di rilevabilità.

#### **3.4.1 Nutrienti**

Nella stazione di misura dei flussi benthici (AP3) sono stati registrati flussi di rilascio dal sedimento (valori positivi) di ammoniaca (3,223 mmol/sqm\*d) e di carbonio inorganico disciolto (DIC; 56,692 mmol/sqm\*d), simili a quelli del pre-survey ma particolarmente attivi se confrontati con i dati di flusso delle zone pelitiche dell'Adriatico centrale (Tab. 6, fig. 18).

I flussi di fosfati hanno presentato un valore positivo (ovvero di rilascio dal sedimento) molto basso e prossimo allo zero (0,038 mmol/sqm\*d), confrontabile con quelli registrati nel pre-survey (Tab. 6, fig. 18). Il valore del flusso benthico dell'ossigeno disciolto è risultato negativo, indicando un assorbimento da parte del fondale, ed è apparso più intenso del flusso negativo registrato nel pre-survey e di quelli misurati nell'Adriatico centrale pelitico (Tab. 6, fig. 18).

Il flusso di nitrato ha mostrato un valore positivo apprezzabile che differisce sostanzialmente dai valori negativi misurati prima delle operazioni di escavo, risultando superiore anche ai flussi medi misurati nelle aree adriatiche e indicando un rilascio di nitrati dai sedimenti verso la colonna d'acqua (Tab. 6, fig. 18).

Il valore del flusso della silice disciolta è apparso leggermente superiore rispetto al pre-survey, indicando una scarsa sensibilità di questo composto al processo di rimozione dei sedimenti superficiali. Il processo di dissoluzione dei gusci degli organismi silicei (diatomee) che produce la silice disciolta non è, infatti, influenzato dalle condizioni anossiche e riducenti del sedimento ma, principalmente, dalle concentrazioni di equilibrio della silice disciolta con la fase solida. I valori registrati in entrambe le fasi del monitoraggio, anche se in misura leggermente inferiore, sono comunque in linea con i flussi medi di silice disciolta misurati nell'Adriatico centrale pelitico (Tab. 6, fig. 18).

Per i nitriti sono stati ottenuti bassi valori di flusso in entrambe le fasi.

**Tab. 6** - Valori e parametri statistici dei flussi benthici misurati nella stazione durante i lavori di dragaggio (AP3), nelle stazioni durante la fase di pre-survey (AP1 e AP2) e, ove i dati fossero disponibili, nell'Adriatico centrale su fondali pelitici. <DL: inferiore del limite di rilevabilità.

| Stations                              | N-NH3      | N-NO2      | N-NO3      | Si-SiO4    | P-PO4      | O2         | DIC        | Fe         | Mn         | Al         | As         | Cd         | Cr         | Hg         | Ni         | Pb         | Cu         | V          | Zn         |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                       | mmol/sqm*d | μmol/sqm*d |
| <b>AP3</b>                            | 3.223      | 0.003      | 0.841      | 6.741      | 0.038      | -79.589    | 56.692     | 3343.20    | 531.05     | < DL       | < DL       | < DL       | < DL       | 18.54      | 31.64      | 2.48       | 22.48      | < DL       | 331.60     |
| <b>AP1</b>                            | 3.458      | 0.381      | -0.979     | 5.365      | 0.108      | -60.527    | 109.588    | 865.00     | 44.65      | < DL       | -2.99      | 0.00       | 6.36       | -0.33      | < DL       | -0.82      | -1.07      | -4.34      | 26.49      |
| <b>AP2</b>                            | 3.711      | -0.041     | -0.579     | 3.598      | -0.301     | -          | 73.809     | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          | -          |
| <b>media</b>                          | 3.464      | 0.114      | -0.239     | 5.234      | -0.052     | -70.058    | 80.030     | 2104.10    | 287.85     | -          | -2.99      | 0.00       | 6.36       | 9.10       | 31.64      | 0.83       | 10.71      | -4.34      | 179.04     |
| <b>Standard Deviation</b>             | 0.144      | 0.213      | 0.370      | 0.985      | 0.206      | 6.739      | 19.116     | 876.18     | 171.97     | -          | -          | -          | -          | 6.67       | -          | 1.17       | 8.33       | 0.00       | 107.87     |
| <b>difference between AP3 and AP1</b> | -0.235     | -0.378     | 1.819      | 1.376      | -0.070     | -19.062    | -52.896    | 2478.200   | 486.404    | -          | -          | -          | -          | 18.868     | -          | 3.307      | 23.556     | -          | 305.112    |
| <b>Central Pelitic Adriatic Sea</b>   | 1.500      |            | 0.050      | 7.300      | 0.270      | -2.800     | 16.000     | 15.00      | 180.00     | -          | -          | -          | -          |            |            |            |            |            |            |

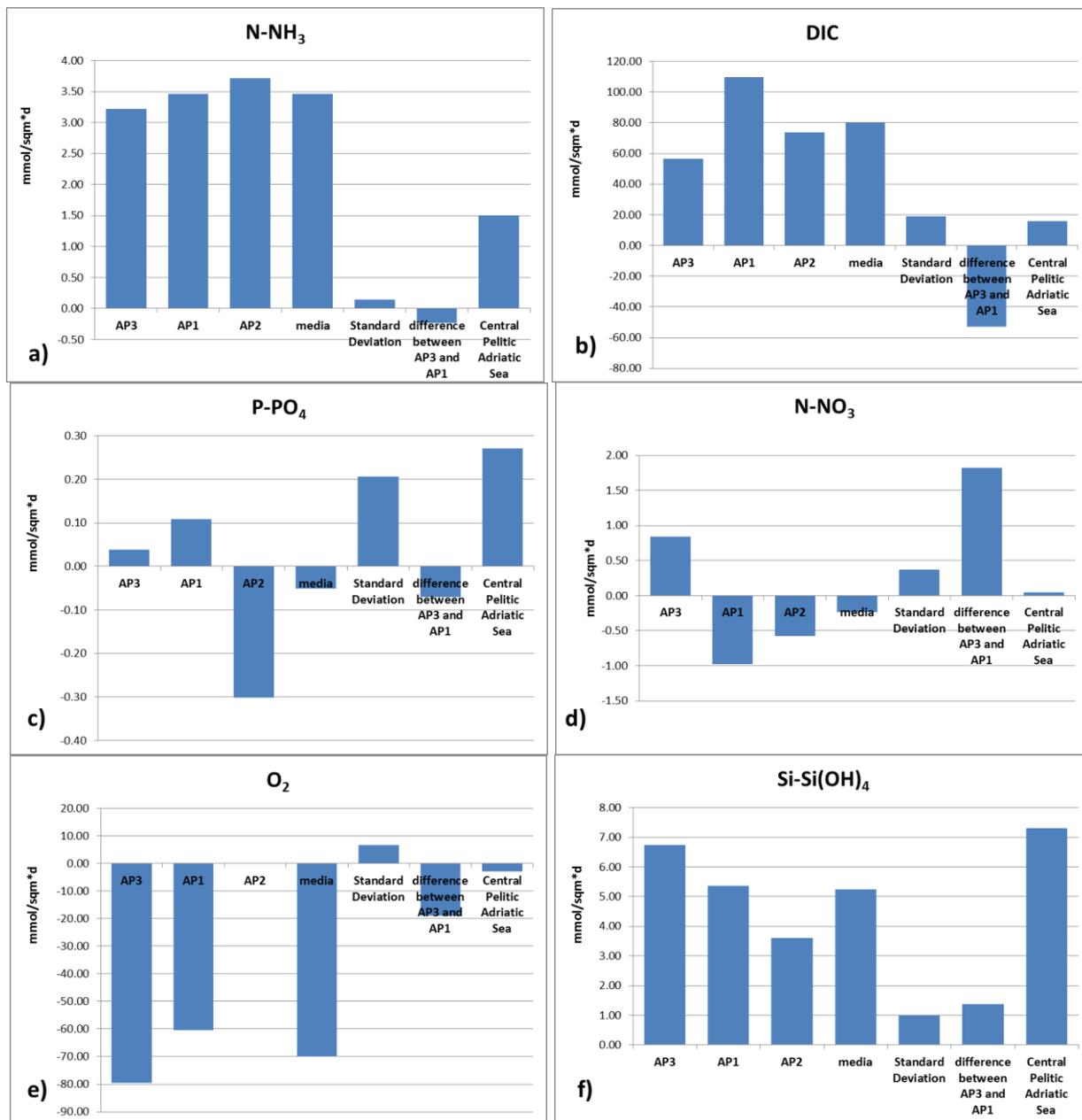
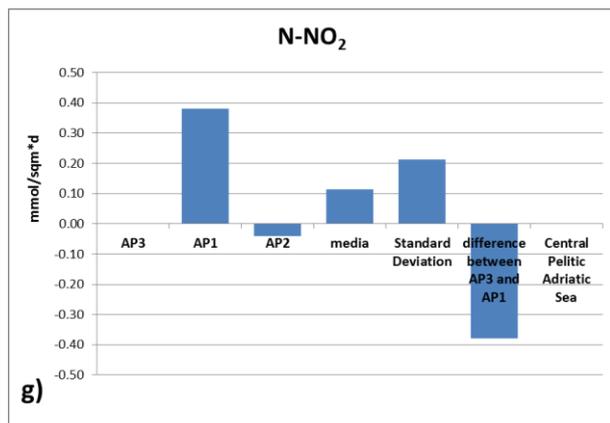


Fig. 18 - Grafici dei flussi misurati nelle stazioni AP3 (durante l'escavo), AP1 e AP2 (pre-survey) e, ove i dati fossero disponibili, nell'Adriatico centrale in corrispondenza di fondali pelitici. a) ammoniaca, b) carbonio inorganico disciolto, c) fosfati, d) nitrati, e) ossigeno disciolto, f) acido ortosilicico, g) nitrati.



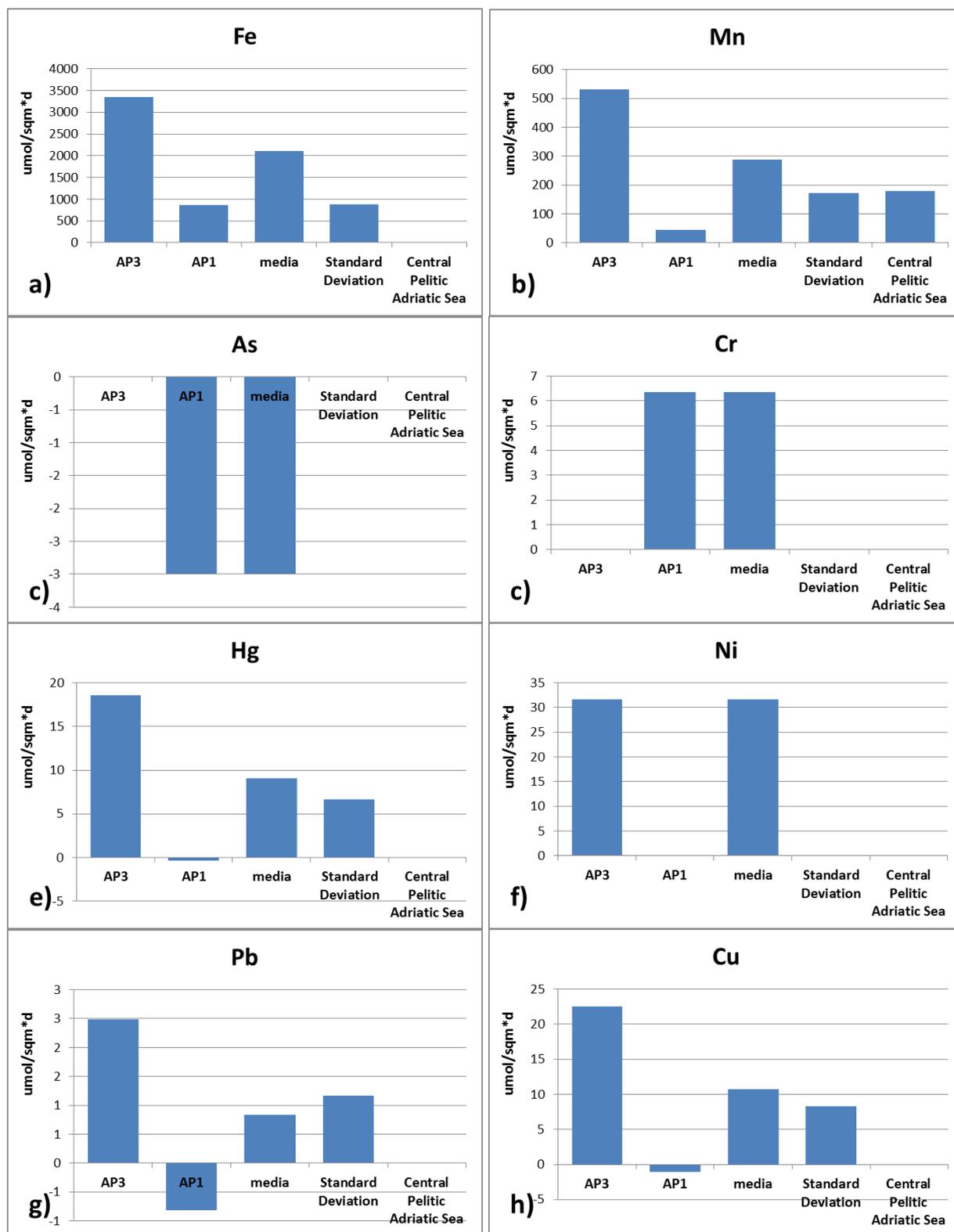
**Fig. 18** - Continuo.

### 3.4.2 Metalli

Per ciò che riguarda i flussi bentici dei metalli, nella fase di escavo sono state riscontrate concentrazioni inferiori al limite di rilevabilità (<DL), e quindi dei flussi pari a zero, per Al, As, Cd Cr e V. Per tutti gli altri metalli i flussi sono stati positivi, indicando un rilascio da parte del sedimento (Tab. 6, fig. 19).

In ordine decrescente Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Hg e Pb hanno presentato flussi di rilascio dal sedimento, immediatamente dopo la rimozione dei sedimenti superficiali, notevolmente superiori rispetto ai flussi registrati nel pre-survey.

Per As e V l'escavo ha comportato un'interruzione del processo di assorbimento da parte del sedimento; questo comunque non ha prodotto incrementi importanti delle concentrazioni di questi due elementi nella colonna d'acqua all'interno del Porto di Ancona. I lavori di escavo hanno invece interrotto il processo di rilascio del Cr osservato nel pre-survey, suggerendo che vi possa essere stato un arricchimento temporaneo di questo elemento nei sedimenti superficiali davanti alla banchina 26 che è stato rimosso con l'escavo.



**Fig. 19** - Flussi dei metalli misurati nella stazione AP3 (fase di escavo) e AP1 (pre-survey). Sono indicati solo i valori di riferimento adriatici di Fe e Mn non esistendo misure confrontabili per gli altri metalli indagati.

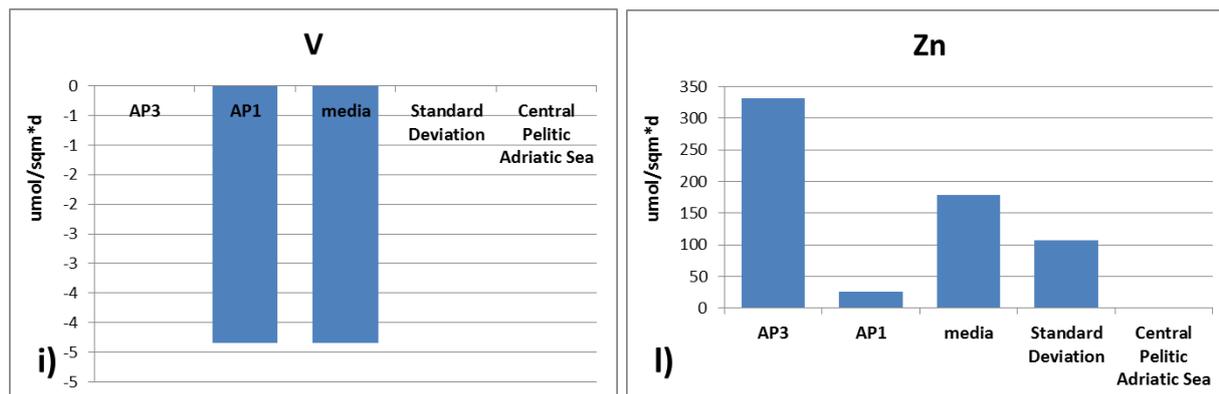


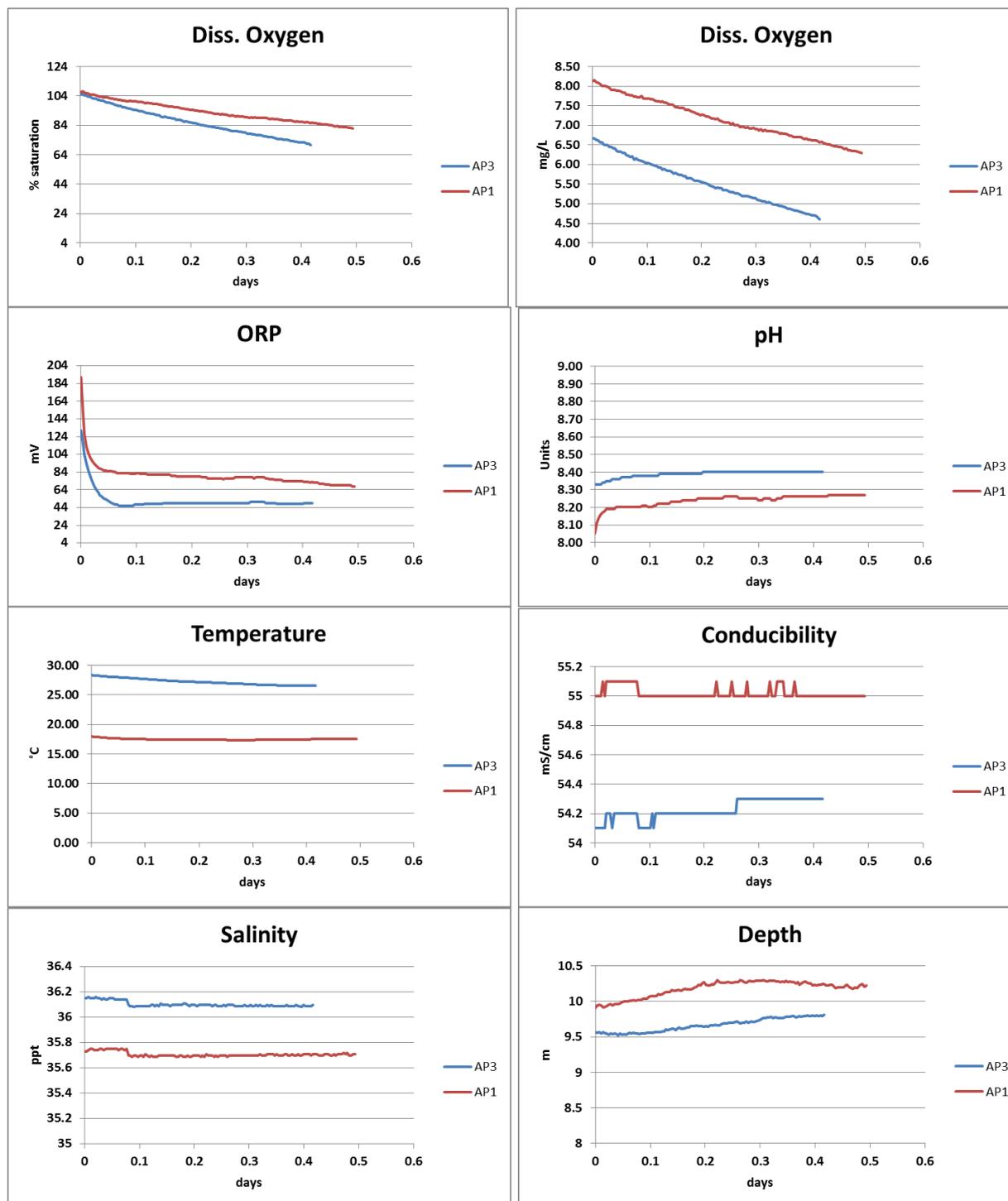
Fig. 19 - Continuo.

### 3.4.3 Parametri chimici e fisici

I parametri chimici e fisici registrati dalla sonda multiparametrica durante la fase di rimozione del sedimento del fondale nella stazione AP3, e nella stazione AP1 durante il pre-survey (fig. 20) indicano un consumo di ossigeno disciolto dovuto alla degradazione per via microbica della sostanza organica presente nel sedimento superficiale. Tale consumo è risultato più intenso rispetto al pre-survey e la maggiore intensità è attribuita all'affioramento, conseguente alla rimozione dei sedimenti superficiali dal fondale, di sedimenti ridotti e quindi tendenti a ossidarsi con maggiore intensità rispetto ai sedimenti superficiali già ossidati del pre-survey. Il valore del potenziale di ossidoriduzione (ORP) costante, dopo una diminuzione iniziale per l'assestamento dell'ambiente all'interno della camera bentica registrata in entrambe le fasi, è risultato inferiore rispetto al pre-survey indicando delle condizioni maggiormente anossiche durante l'escavo.

E' stato registrato un debole aumento del pH, legato al rilascio del DIC dal sedimento e quindi all'incremento della sua concentrazione nella camera bentica. Per quanto concerne la temperatura, sono state registrate deboli variazioni legate alle dinamiche della colonna d'acqua in prossimità del fondale, con valori maggiori durante la fase di escavo in conseguenza del periodo di misura che era in piena estate.

La salinità è apparsa costante con un gradino, legato all'immissione di un tracciante per la misura del volume della camera bentica, e con una differenza rispetto al pre-survey legata a dinamiche locali della colonna d'acqua. Infine, la variazioni di profondità durante il campionamento sono dovute al ciclo di marea; la differenza rispetto al pre-survey è una conseguenza della rimozione del fango superficiale.



**Fig. 20** - Parametri chimico-fisici registrati all'interno della camera bentica automatica nella stazione AP3 (fase di escavo) e nella stazione AP1 (fase di pre-survey).

### 3.5. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SU ORGANISMI SENTINELLA

#### 3.5.1 Biomarker

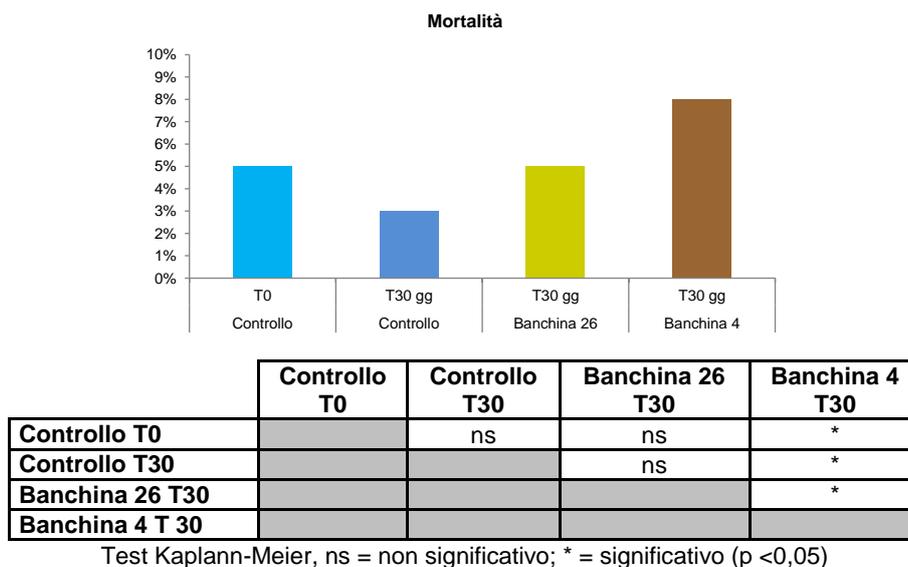
In Tab. 7 sono riportati i valori ottenuti per i biomarker nei quattro campioni analizzati durante la fase di escavo.

**Tab. 7** - Valori medi dei biomarker ( $\pm$ dev.st.) determinati nei mitili traslocati presso i siti di monitoraggio nel corso dei lavori di approfondimento batimetrico della banchina 26 del Porto di Ancona.

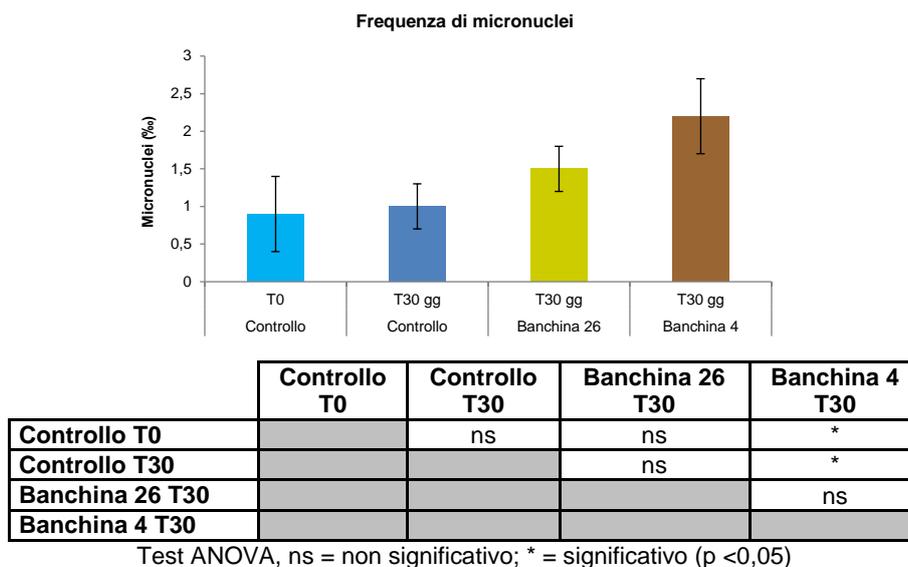
| Indice   | Unità di misura                      | Controllo T0      | Controllo T30 gg  | Banchina 26 T30 gg | Banchina 4 T30 gg |
|--|--------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Mortalità  | n. individui %                       | 5                 | 3                 | 5                  | 8                 |
| Frequenza di micronuclei   | frequenza ‰                          | 0,9 $\pm$ 0,5     | 1,0 $\pm$ 0,3     | 1,5 $\pm$ 0,3      | 2,2 $\pm$ 0,5     |
| Accumulo lisosmiale di Lipofuscine                                       | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 8831 $\pm$ 443    | 8943 $\pm$ 837    | 9932 $\pm$ 720     | 12393 $\pm$ 928   |
| Accumulo lisosmiale di Lipidi Neutri                                     | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 23549 $\pm$ 4230  | 24324 $\pm$ 2037  | 29038 $\pm$ 1932   | 30261 $\pm$ 2438  |
| Stabilità delle Membrane lisosomiali                                     | min                                  | 45,0 $\pm$ 5,0    | 40,5 $\pm$ 5,5    | 34,0 $\pm$ 2,5     | 25,5 $\pm$ 2,5    |
| Rapporto volume lisosomi/citoplasma                                      | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 0,21 $\pm$ 0,02   | 0,20 $\pm$ 0,02   | 0,16 $\pm$ 0,02    | 0,17 $\pm$ 0,02   |
| Attività delle enzima di catalasi  | mmol/min/mg proteine di              | 0,024 $\pm$ 0,005 | 0,026 $\pm$ 0,006 | 0,030 $\pm$ 0,005  | 0,035 $\pm$ 0,005 |
| Livelli di metallotioneine   | µg MT/g                              | 88,87 $\pm$ 13,50 | 80,55 $\pm$ 8,35  | 116,71 $\pm$ 12,99 | 121,90 $\pm$ 8,50 |
| Espressione genica metallotioneine MT 10                                 | Induzione                            | 1,00 $\pm$ 0,10   | 0,75 $\pm$ 0,07   | 1,45 $\pm$ 0,14    | 2,00 $\pm$ 0,20   |
| Espressione genica metallotioneine MT 20                                 | Induzione                            | 1,00 $\pm$ 0,10   | 1,60 $\pm$ 0,16   | 3,50 $\pm$ 0,35    | 4,50 $\pm$ 0,45   |
| Valutazione dei livelli di composti aromatici per via immunofluorescente | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 335 $\pm$ 65      | 260 $\pm$ 55      | 601 $\pm$ 73       | 721 $\pm$ 45      |
| Misure Biometriche   | Lunghezza esemplari (cm)             | 5,21 $\pm$ 0,50   | 5,30 $\pm$ 0,55   | 5,26 $\pm$ 0,55    | 5,73 $\pm$ 0,56   |

**Mortalità** - Dei mitili prelevati presso i siti investigati, solo quelli traslocati per 30 gg presso la banchina 4 (8%) hanno evidenziato un modesto ma significativo aumento della mortalità rispetto a tutti gli altri campioni analizzati (fig. 21). Quanto osservato porta ad ipotizzare la presenza di una risposta biologica ristretta a livello subletale negli organismi analizzati. Confrontando i risultati ottenuti con quelli osservati nel pre-survey (Fabi *et al.*, 2015), non sono state osservate significative differenze dei tassi di mortalità.

**Micronuclei** - I risultati relativi alla fase di studio condotta durante i lavori di escavo hanno evidenziato una distribuzione di frequenze compresa tra 0,9 $\pm$ 0,5‰, osservata presso il controllo T0 e 2,2 $\pm$ 0,5‰ evidenziata per i bivalvi traslocati per 30 gg presso la banchina 4. Nel complesso, solo i bivalvi prelevati presso quest'ultimo sito hanno mostrato un aumento significativo delle frequenze di formazione dei micronuclei rispetto ai controlli (fig. 22). La distribuzione è risultata confrontabile a quella osservata in precedenza (Fabi *et al.*, 2015) e le frequenze osservate appaiono contenute rispetto a quanto riportato in aree simili interessate da fenomeni d'inquinamento più marcati (Bolognesi *et al.*, 1996; 2004; Daillanis *et al.*, 2003).



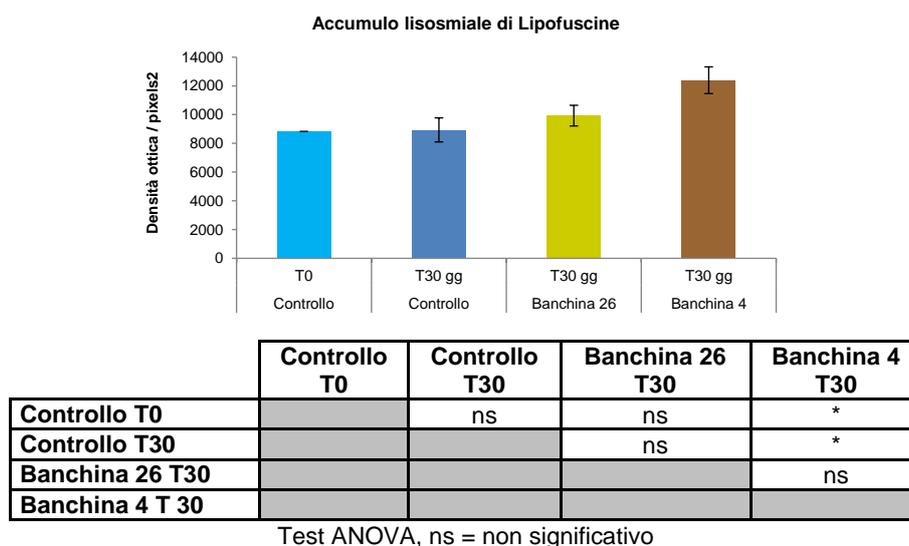
**Fig. 21** - Distribuzione dei valori di mortalità rilevati negli esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell’immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.



**Fig. 22** - Distribuzione della frequenza media di micronuclei riscontrati nell’emolinfa di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell’immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

**Valutazione del contenuto di lipofuscine** - I livelli di lipofuscine sono risultati compresi tra 8831±443 presso il controllo T0 e 12393±928 osservati presso la banchina 4. Solo presso quest’ultimo sito sono stati osservati incrementi significativi dei livelli intralisosomiali di lipofuscine rispetto ad entrambi i controlli (fig. 23). Nel complesso sia la distribuzione che i livelli medi assunti dal parametro presso la banchina 26 sono simili a quelli osservati nel pre-survey (Fabi *et al.*, 2015) e non

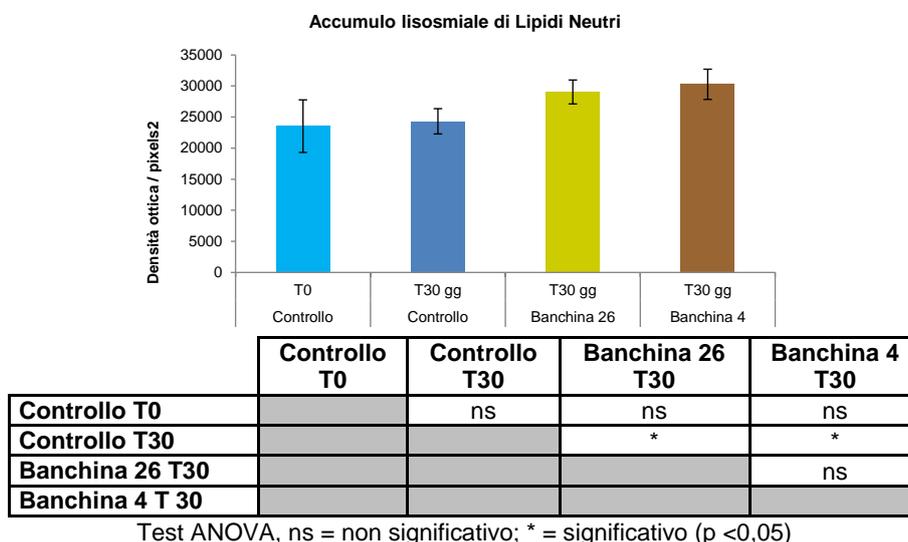
portano a ipotizzare alcuna criticità correlabile alla presenza di stress perossidativo a carico degli organismi analizzati. Se confrontati con quanto riportato in letteratura, i livelli ottenuti sono infatti inferiori a quelli evidenziati nel corso di precedenti esperienze di monitoraggio in aree costiere dell'Adriatico settentrionale (Petrovic *et al.*, 2004).



**Fig. 23** - Valori medi di accumulo di lipofuscine espressi in unità di densità ottica associate ai lisosomi della ghiandola digestiva di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

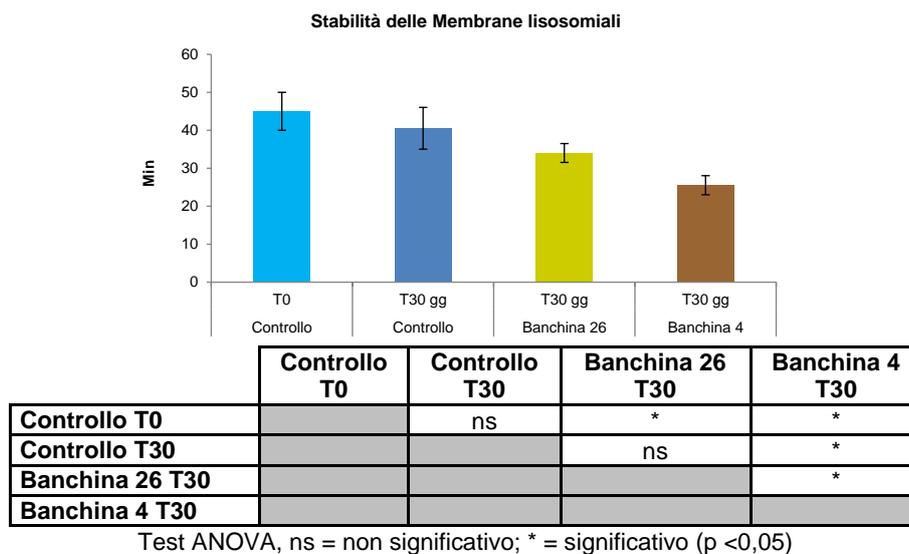
**Valutazione del contenuto di lipidi neutri** - La distribuzione dei livelli di lipidi neutri ha evidenziato, durante i lavori di dragaggio, valori compresi tra  $23549 \pm 4230$  unità di densità ottica/pixel (Controllo T0) e  $30261 \pm 2438$  unità di densità ottica/pixel (banchina 4 dopo 30 gg di permanenza). In entrambi i siti portuali è stato registrato un accumulo significativo di lipidi neutri rispetto al controllo T30 (fig. 24). Ciò evidenzia un leggero peggioramento delle condizioni ambientali rispetto al pre-survey, quando solo al banchina 4 aveva presentato un incremento significativo rispetto ai mitili di riferimento. Comunque, nel complesso la distribuzione osservata presso la banchina 26 indica una modesta alterazione biologica, rappresentata dalla sintesi dei lipidi nell'organismo e correlata alla presenza di sostanze xenobiotiche biodisponibili, quali i composti organici, capaci di alterare il normale metabolismo lipidico di un organismo marino. Allo stesso modo, è stato osservato che, in organismi esposti a contaminanti organici (PCB, IPA, diossine), vi è un incremento sostanziale dell'accumulo di lipidi neutri associati ai lisosomi secondari. In ogni

caso, confrontando i risultati ottenuti con la letteratura si evidenziano risposte nella norma e assimilabili a organismi soggetti a una bassa pressione antropica (Petrovic *et al.*, 2004).



**Fig. 24** - Valori medi di accumulo di lipidi neutri espressi in unità di densità ottica associati ai lisosomi della ghiandola digestiva di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

**Stabilità delle membrane lisosomiali** - Durante i lavori di dragaggio sono stati evidenziati tempi medi di destabilizzazione compresi tra  $25,5 \pm 2,5$  min e  $45,0 \pm 5,0$  min osservati rispettivamente presso la banchina 4 dopo 30 gg di esposizione e presso il controllo T0. Rispetto agli organismi di riferimento al tempo 0, i mitili posizionati presso entrambe le aree portuali hanno evidenziato un significativo seppur lieve abbassamento dei tempi necessari all'enzima per destabilizzare le membrane lisosomiali (fig. 25). Inoltre, i mitili traslocati presso la banchina 4 hanno mostrato una diminuzione della stabilità delle membrane lisosomiali anche rispetto al controllo T30 gg e alla banchina 26. I risultati ottenuti tendono a indicare un leggero aumento dello stato di stress nei bivalvi prelevati dalla banchina 4. Dal confronto con i dati relativi al pre-survey (Fabi *et al.*, 2015) da una parte viene confermato lo stato di alterazione osservato nei mitili prelevati presso la banchina 4 e, dall'altra, si evidenzia la leggera alterazione presso la banchina 26. Comunque, nel complesso i tempi di destabilizzazione osservati sono risultati confrontabili a quelli riscontrati su organismi in buono stato di salute (Petrovic *et al.*, 2004, Donnini *et al.*, 2007).



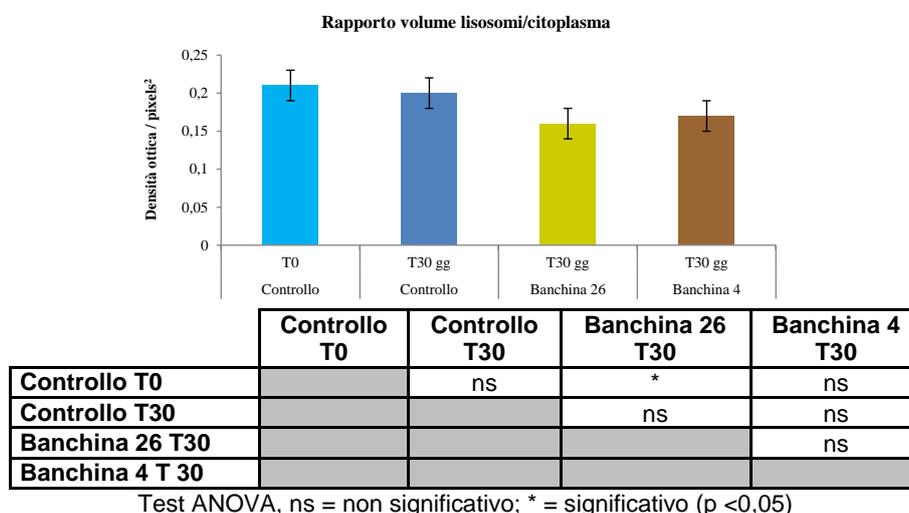
**Fig. 25** - Valori medi dei tempi di destabilizzazione espressi in min ed associati alla fragilità dei lisosomi della ghiandola digestiva di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

**Volume lisosomi/citoplasma** - Durante la fase di escavo i mitili prelevati dalla banchina 26 hanno presentato un rapporto volume lisosomi/citoplasma significativamente differente rispetto al controllo T0 (fig. 26), mentre nel pre-survey non era stata rilevata alcuna differenza statistica (Fabi *et al.*, 2015). Ciò tende ad evidenziare un leggero stato di alterazione al comparto lisosomiale, anche se la distribuzione osservata non porta ad indicare alcuna diminuzione dello stato di salute dei bivalvi prelevati presso entrambe le aree portuali poiché in nessun caso i valori del rapporto lisosomi/citoplasma hanno evidenziato differenze significative con il controllo T30.

**Stress ossidativo: determinazione dell'attività di catalasi** - L'attività di catalasi, misurata nelle ghiandole digestive dei bivalvi, è risultata compresa tra  $0,024 \pm 0,005$  mmoli/min/mg di proteine totali (controllo T0) e  $0,035 \pm 0,005$  mmoli/min/mg (banchina 4 dopo 30 gg). I livelli hanno mostrato differenze significative solo tra la banchina 4 e il controllo T0 (fig. 27). Nel pre-survey, in cui la banchina 4 aveva presentato differenze significative anche rispetto al T30 gg e la banchina 26 rispetto al controllo T0 (Fabi *et al.*, 2015), si osserva un leggero miglioramento della qualità ambientale.

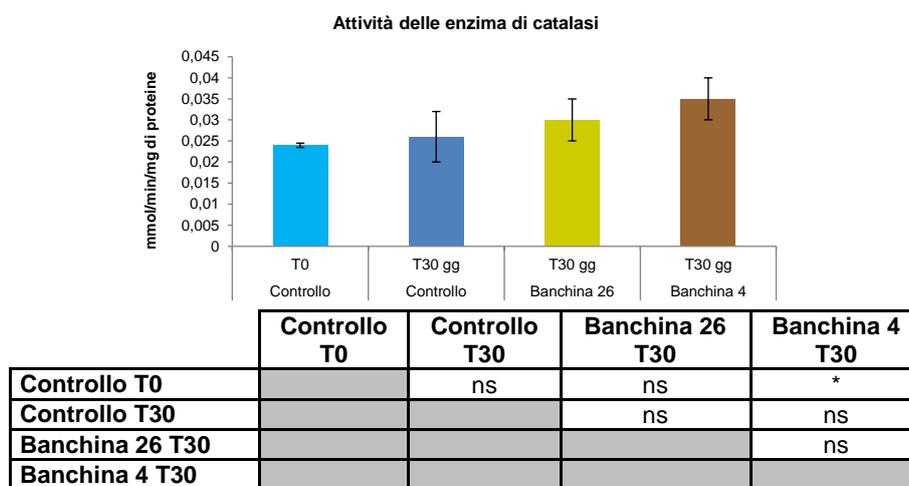
Nel complesso, sulla base anche della più recente letteratura disponibile, è possibile evidenziare solo una leggera forma di stress negli organismi sentinella utilizzati. I livelli di catalasi osservati appaiono infatti contenuti e assimilabili ad organismi

prelevati in aree marino-costiere soggette a un medio basso impatto antropico (Petrovic *et al.*, 2004).



Test ANOVA, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 26** - Distribuzione dei valori medi dei rapporti lisosomi / citoplasma nei mitili analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

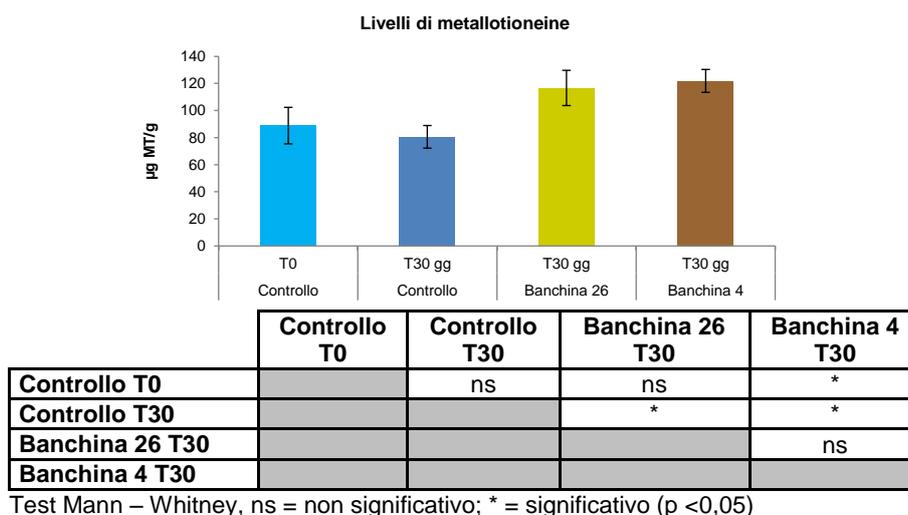


Test ANOVA, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 27** - Valori medi dell'attività di catalasi (mmoli di catalasi/min. mg<sup>-1</sup> proteine totali estratte) associata alla ghiandola digestiva di mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

**Livelli di metallotioneine** - Gli organismi prelevati nel corso delle fasi di dragaggio hanno evidenziato livelli di metallotioneine nelle frazioni citosoliche comprese tra 80,55±8,35 µg MT/g del sito di controllo T30 e 121,90±8,50 µg MT/g degli organismi prelevati presso la banchina 4. Quanto rilevato indica un significativo seppur moderato aumento dei livelli rispetto al controllo T30 nei bivalvi prelevati presso

entrambe le banchine, con la banchina 4 superiore anche al controllo T0 (fig. 28). Tale risposta biologica indica un modesto aumento della biodisponibilità di metalli pesanti nell'area investigata rispetto al periodo di studio precedente, quando erano state riscontrate differenze significative solo tra la banchina 4 e il controllo T0 (Fabi *et al.*, 2015). Le risposte biologiche finora rilevate rimangono comunque contenute rispetto a quanto evidenziato in analoghe aree marino-costiere (Petrovic *et al.*, 2004).

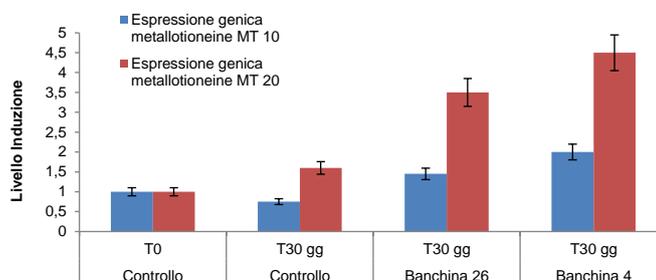


**Fig. 28** - Concentrazione di metallotioneine rilevate nella ghiandola digestiva di mitilo (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

**Espressione genica metallotioneine (qPCR -Polymerase Chain Reaction) -** I risultati relativi allo studio ambientale condotto durante l'esecuzione dei lavori di escavo tendono ad evidenziare una significativa, seppur moderata, induzione del MT<sub>20</sub> nei siti di traslocazione all'interno del porto (Banchina 26: 3,5 volte; Banchina 4: 4,5) rispetto al controllo T30 gg (Up-regulation; fig. 29). Tutti questi tre siti a 30 gg sono risultati significativamente maggiori del controllo T0. Diversamente, l'MT<sub>10</sub> appare stimolato nella banchina 26 rispetto al controllo al tempo T30 gg e nella banchina 4 rispetto a tutti gli altri siti (fig. 28). Anche il T30 ha presentato un valore statisticamente superiore al T0. Dal pre-survey (Fabi *et al.*, 2015) si evidenzia un peggioramento delle condizioni per quanto concerne l'induzione di MT<sub>10</sub>, mentre vengono confermati i risultati relativi all'MT<sub>20</sub>. L'espressione del gene MT<sub>10</sub> risulta correlata all'omeostasi di cationi tipicamente essenziali allo sviluppo e alla corretta funzionalità cellulare nel mitilo quali Ca, Mg, Zn, Fe e, in piccole quantità, Cu. Al contrario, il gene MT<sub>20</sub> risulta indotto in presenza di cationi non essenziali quali As,

Be, Cd, Cs, Hg e Pb.

I risultati osservati applicando la tecnica della PCR quantitativa tendono a confermare la risposta biologica associata a una moderata presenza biodisponibile di cationi metallici. Confrontando i risultati ottenuti nel corso della fase precedente all'inizio delle attività (Fabi *et al.*, 2015), quando i valori dell'MT<sub>10</sub> erano risultati tutti omogenei, si nota una leggera stimolazione dei meccanismi di protezione alla presenza di metalli non essenziali. La risposta risulta per lo più moderata e non tende a compromettere la salute degli organismi analizzati. I livelli d'induzione osservati all'interno del porto appaiono in tutti i casi simili a quelli osservati su mitili prelevati presso aree marine-costiere interessate da diverse attività tra cui industriali, agricole e urbane (+0,86 ÷ +1,65; Banni *et al.*, 2007).



| MT 10           | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T30  |              |               |                 |                |

Test Mann – Whitney, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

| MT 20           | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T30  |              |               |                 |                |

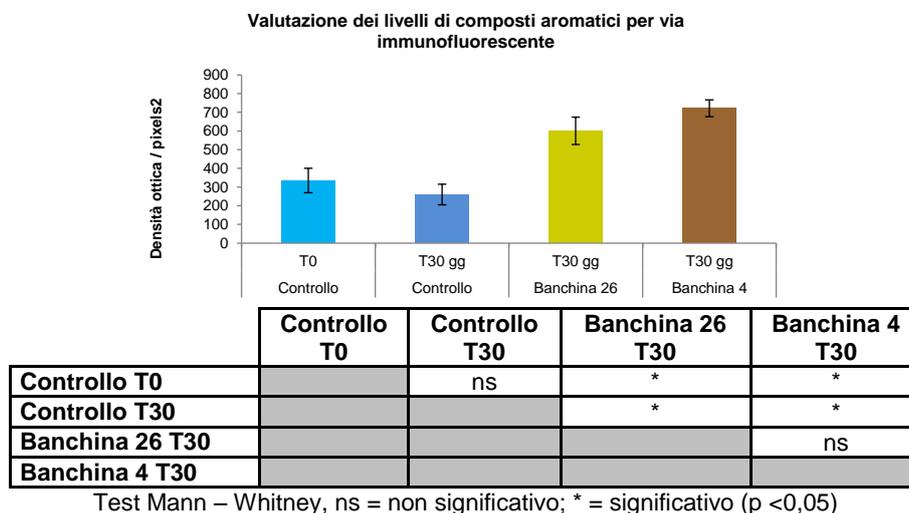
Test Mann – Whitney, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 29** - Livelli di induzione MT<sub>10</sub> ed MT<sub>20</sub> osservati nella ghiandola digestiva di mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

### Valutazione dei livelli di composti aromatici per via immunofluorescente -

Durante i lavori di escavo la distribuzione dei livelli di composti aromatici ha evidenziato valori compresi tra 260±55 unità di densità ottica/pixel del sito di controllo T30 gg e 721±45 unità di densità ottica/pixel dei mitili prelevati presso la banchina 4 dopo 30 gg di permanenza. Analogamente a quanto osservato nel pre-

survey (Fabi *et al.*, 2015), sia i mitili posizionati presso la banchina 4 che quelli collocati presso la banchina 26 hanno presentato un aumento della risposta associata alla presenza di composti aromatici rispetto ai controlli (fig. 30).



**Fig. 29** - Livelli di composti aromatici per via immunofluorescente osservati nei mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg. Survey durante le attività di dragaggio.

### 3.5.2 Bioaccumulo di idrocarburi totali nel segmento C5-C40, idrocarburi policiclici aromatici e metalli pesanti

**Idrocarburi Totali** - Analogamente a quanto osservato nel corso del pre-survey (Fabi *et al.*, 2015), anche nella fase durante lavori è stato osservato un accumulo di idrocarburi inferiore ai limiti di rilevabilità strumentale (<50 µg/kg) in tutti i siti investigati (Tab. 8).

**Tab. 8** - Distribuzione degli Idrocarburi Totali (C10-C40) rilevati nei tessuti di mitili trapiantati presso le due aree interne al porto di Ancona e presso un sito di controllo nella fase di escavo del Porto di Ancona. Valori espressi in µg/kg p.s., LOD = limite di quantificazione strumentale.

|                              | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|------------------------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Idrocarburi totali (C10-C40) | < LOD        | < LOD         | < LOD           | < LOD          |

**Idrocarburi Policiclici Aromatici** - I livelli di IPA determinati nei tessuti dei bivalvi prelevati nel corso dell'attività di biomonitoraggio attivo presso le aree portuali di Ancona durante le attività di dragaggio sono risultati inferiori ai limiti di rilevabilità strumentale (<2 µg/kg) in tutti i siti (Tab. 9), confermando il trend già evidenziato nel

monitoraggio precedente (Fabi *et al.*, 2015).

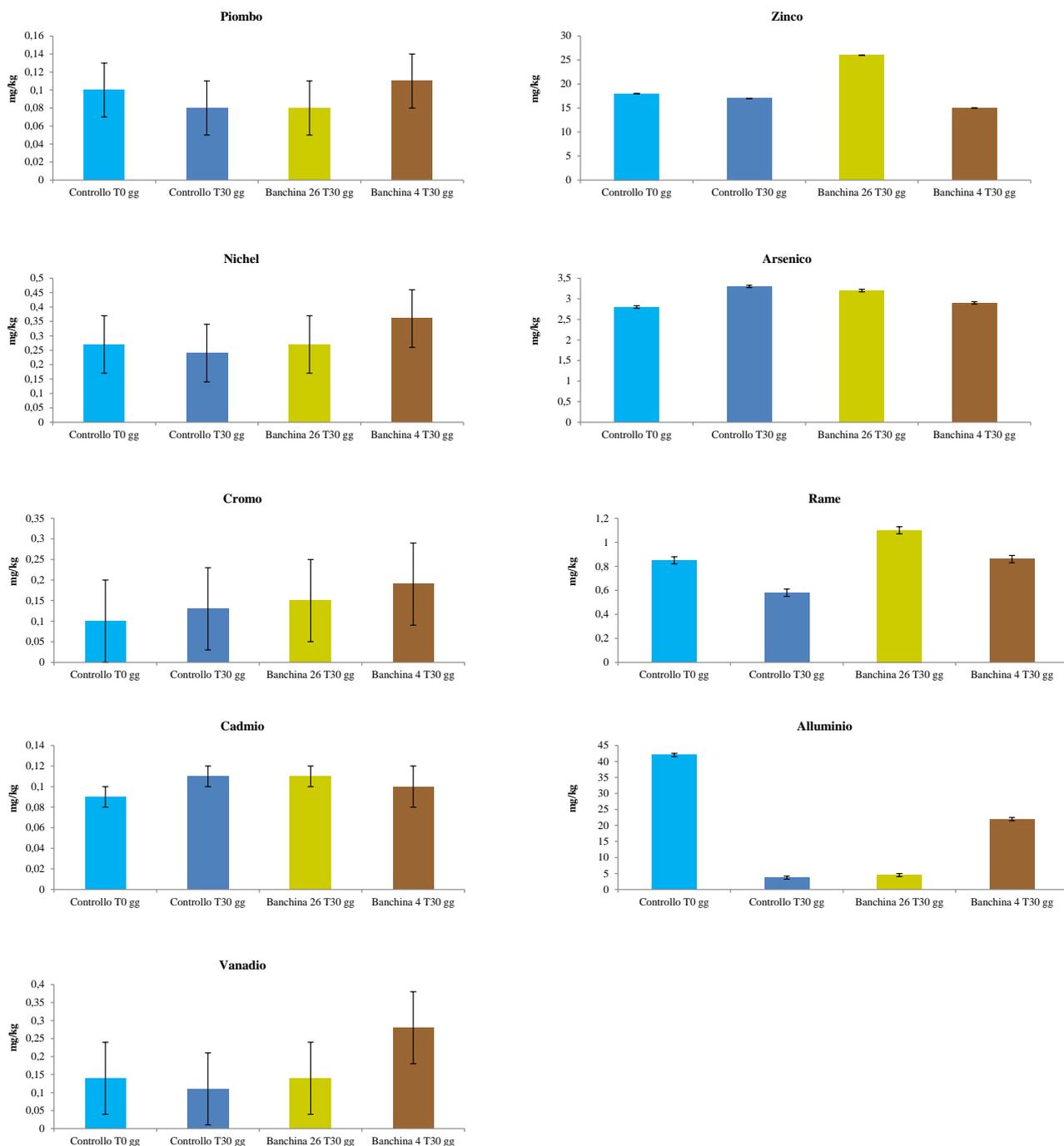
**Tab. 9** - Distribuzione di idrocarburi policiclici aromatici rilevati nei tessuti di mitili (media±dev.st.) trapiantati presso alcune aree interne al porto di Ancona e presso un sito di controllo durante le attività di dragaggio. < LOD = inferiore al limite di rilevabilità strumentale (<2 µg/kg), nc= non calcolabile.

|                     | <b>Controllo<br/>T0 gg</b> | <b>Controllo<br/>T30 gg</b> | <b>Banchina 26<br/>T30 gg</b> | <b>Banchina 4<br/>T30 gg</b> |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Naftalene           | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Acenaftene          | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Acenaftilene        | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Fluorene            | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Fenantrene          | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Antracene           | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Fluorantene         | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Pirene              | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| B[a]Antracene       | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Crisene             | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| B[b]Fluorantene     | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| B[k]Fluorantene     | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| B[a]Pirene          | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| DiB[a,h]A           | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| BghiPerilene        | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| Indeno [c,d] pirene | < LOD                      | < LOD                       | < LOD                         | < LOD                        |
| <b>Σ ipa</b>        | <b>nc</b>                  | <b>nc</b>                   | <b>nc</b>                     | <b>nc</b>                    |

**Metalli** - L'analisi della distribuzione dei metalli pesanti tende ad evidenziare la leggera biodisponibilità per alcune delle specie metalliche investigate. L'alluminio è risultato il metallo maggiormente accumulato, variando tra 42,0 mg/Kg osservati nei bivalvi prelevati presso la mitilicoltura al tempo 0 (controllo T0) e 3,5 mg/Kg rilevati presso in medesimo sito di controllo dopo 30 gg. Tutti i campioni prelevati dopo 30 gg di traslocazione sia nel controllo che nelle aree portuali hanno evidenziato decrementi significativi rispetto al controllo T0. Inoltre, il bioaccumulo nei mitili della banchina 4 è risultato superiore a quelli della banchina 26 e del controllo T30 (fig. 31; Tab. 10).

Il secondo elemento maggiormente presente negli organismi analizzati è risultato lo zinco, variato tra 15,0±0,05 mg/kg (banchina 4) e 26,0±0,05 mg/kg (banchina 26). Entrambi i siti portuali hanno evidenziato una differenza significativa rispetto ad entrambi i controlli (fig. 29; Tab. 10) ma, mentre il bioaccumulo negli organismi prelevati presso la banchina 4 è risultato inferiore rispetto a quelli di riferimento, i

mitili trapiantati presso la banchina 26 hanno evidenziato un livello significativamente maggiore. Una differenza significativa seppur lieve è stata osservata anche tra T0 e T30.



**Fig. 31** - Distribuzione dei metalli in traccia (mg/kg p.s. ( $\pm$  dev. std.) rilevati nei mitili (*Mytilus galloprovincialis*) campionati presso le aree portuali e un sito di controllo durante le attività di dragaggio presso il porto di Ancona. Ba, e Hg non sono riportati in quanto le concentrazioni sono risultate al di sotto del limite di rilevabilità strumentale.

**Tab. 10** - Risultati dei confronti statistici relativi alla distribuzione dei metalli pesanti nei siti campionati presso le aree portuali e in un sito di controllo durante il dragaggio. (test U - Mann-Whitney). \* =  $p < 0,05$ ; ns = non significativo.

| Piombo          |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30   |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Zinco           |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Nichel          |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30   |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Arsenico        |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | *             | *               | ns             |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Cromo           |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30   |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Rame            |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | *             | *               | ns             |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Cadmio          |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30   |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Alluminio       |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| Vanadio         |              |               |                 |                |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
|                 | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30   |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

Un incremento significativo dei livelli di rame è stato osservato nei mitili prelevati

presso la banchina 26 ( $1,10 \pm 0,03$  mg/kg) rispetto agli altri tre siti. La banchina 4, invece, è risultata significativamente superiore rispetto al controllo T30 gg ma confrontabile con il controllo T0 (fig. 30; Tab. 10).

Per quanto concerne l'arsenico, sono risultati statisticamente omogenei la banchina 26 con il controllo T 30 gg e la banchina 4 con il controllo T0, questi ultimi con valori inferiori rispetto ai primi due siti (fig. 30; Tab. 10).

Infine i livelli di Cr, Cd, Ni, V e Pb sono risultati tutti omogenei mentre Ba e Hg sono risultati ovunque non rilevabili (fig. 30; Tab. 10).

Rispetto al pre-survey (Fabi *et al.*, 2015) alcuni elementi (Pb, Ni, Cr e V) non hanno presentato variazioni degne di nota. Diversamente, As e in parte Zn, Cd e Cu hanno riportato leggeri aumenti presso la banchina 26 (Zn e Cd) o la banchina 4 (Cu). Infine, l'alluminio ha evidenziato un sostanziale decremento in tutti i siti investigati dopo 30 giorni dal trapianto.

Nel complesso i livelli osservati sono inferiori a quelli riportati da un precedente studio pluriennale condotto da Fattorini *et al.* (2008) e mirato a valutare la biodisponibilità di metalli pesanti evidenziata da mitili prelevati presso alcune aree marine. Livelli simili vengono osservati anche presso analoghe aree marino-costiere (Covelli *et al.*, 2001; Storelli *et al.*, 2001; Frontalini *et al.*, 2008; Giani *et al.*, 1994).

**Composti Organostannici** - A differenza di quanto osservato in alcuni studi condotti recentemente presso analoghe zone marino-costiere (Furdek *et al.*, 2012; Turja *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2015; Okoro *et al.*, 2015), anche durante i lavori di dragaggio non è stato osservato alcun accumulo dei tre composti ricercati sia ai controlli che presso le due banchine, analogamente alla fase di pre-survey (Fabi *et al.*, 2015).

**Tab. 11** - Distribuzione dei composti organostannici (valori espressi in  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) nei tessuti dei mitili di controllo e di quelli immersi nelle aree interne del porto di Ancona e prelevati dopo 30 giorni di permanenza durante la fase di dragaggio.  $100 \mu\text{g}/\text{kg}$  = limite di rilevanza strumentale.

|     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| MBT | <100         | <100          | <100            | <100           |
| DBT | <100         | <100          | <100            | <100           |
| TBT | <100         | <100          | <100            | <100           |

#### **4. CONCLUSIONI**

**Verifica delle dinamiche sul trasporto dei sedimenti del largo** - Nell'area di sversamento è stata evidenziata una stratificazione superficiale tipica del periodo estivo, con una lingua d'acqua dolce e calda estesa a tutta la zona investigata. I valori di torbidità sono apparsi maggiori solo presso la stazione dove era appena avvenuto lo sversamento della draga e in prossimità del fondo, mentre le stazioni limitrofe non sono apparse influenzate dalle attività.

Anche nell'area interna al porto la torbidità ha presentato valori più alti nelle stazioni più vicine alla zona interessata dai lavori di dragaggio (banchina 26) e soprattutto nella stazione P01 campionata subito dopo la fine delle operazioni di escavo, ma tali valori apparivano attenuati già dopo 15 minuti. La fluorescenza ha mostrato valori più elevati sul fondo, dove le comunità fitoplanctoniche si addensano durante i periodi di maggior irradiazione solare, senza evidenziare differenze sostanziali tra le diverse stazioni. Per l'ossigeno disciolto non sono mai stati rilevati valori di saturazione inferiori all'80%, escludendo la presenza di episodi ipossici.

**Valutazione degli effetti del dragaggio sui sedimenti marini** - I flussi positivi di ammoniaca e DIC, che sono i principali prodotti di degradazione della sostanza organica, indicano dei processi di degradazione superficiale della sostanza organica depositatasi sul fondale in seguito all'attività di produzione primaria e zooplanctonica. I flussi di questi due composti, misurati durante la fase di escavo, sono simili a quelli misurati nel pre-survey; ciò indica che i processi di degradazione e i rilasci dei sedimenti sub-superficiali, affioranti in seguito all'escavazione dei sedimenti superficiali nell'area di fronte alla banchina 26, non sono stati condizionati dalle attività di dragaggio eseguite sul fondale. I processi di degradazione della sostanza organica nella fase di escavo, al pari della fase di pre-survey, sono apparsi comunque particolarmente attivi se confrontati con i dati di flusso delle zone pelitiche dell'Adriatico centrale. Come già rilevato precedentemente (Fabi *et al.*, 2015), ciò indica la presenza di abbondanti processi di produzione primaria e deposizione di sostanza organica e di materiale fine nell'area portuale; ciò avviene solitamente in presenza di acque calme e ricche di nutrienti, tipiche delle aree portuali, che generano elevati flussi di ammoniaca e DIC all'interfaccia acqua-sedimento in seguito ai processi di degradazione dell'abbondante sostanza organica che si deposita sul fondale. I flussi di fosfati, risultati comparabili con quelli del pre-survey, indicano che il processo di rimozione del sedimento superficiale non ha influenzato il rilascio di fosfati verso la colonna d'acqua. I deboli valori di flusso

misurati prima e durante l'escavo sono dovuti al processo di precipitazione dei fosfati con gli idrossidi di ferro; ciò avviene quando i fosfati, prodotti dalla degradazione della sostanza organica e la solubilizzazione in ambiente anossico, raggiungono la superficie ossidata del fondale o entrano in contatto con l'ambiente ossico della colonna d'acqua in seguito alla rimozione dei sedimenti più superficiali. L'incremento dell'assorbimento dell'ossigeno da parte del fondale durante la fase di escavo è dovuto alla rimozione dei sedimenti superficiali e quindi all'affioramento del sedimento organico e inorganico anossico e ridotto; tale sedimento si forma negli strati sub-superficiali in conseguenza dei processi di degradazione della sostanza organica che consumano l'ossigeno libero e l'ossigeno legato ad altri composti chimici. Le sostanze organiche e inorganiche ridotte, una volta in contatto con l'ossigeno disciolto nella colonna d'acqua, tendono ad ossidarsi e quindi a consumare ossigeno. L'aumento del flusso negativo di ossigeno durante la fase di escavo non sembra comunque aver creato dei veri e propri fenomeni di anossia, come si osserva dai valori iniziali della concentrazione di ossigeno durante il campionamento che sono rimasti alti. I valori di flusso dell'ossigeno disciolto sono risultati comunque altamente negativi, sia prima che durante i lavori di escavo, rispetto ai valori di flusso dell'Adriatico pelitico centrale; ciò indica che i processi di degradazione che avvengono sul fondale e i processi di produzione della sostanza organica nella colonna d'acqua del Porto di Ancona sono molto elevati rispetto a quelli che avvengono nelle acque dell'Adriatico centrale.

Il rilascio di nitrati suggerisce l'instaurarsi di un processo di nitrificazione dell'ammoniaca rilasciata dal sedimento anossico affiorante in seguito al dragaggio e, quindi, al contatto con l'ambiente ossidante della colonna d'acqua. Il processo di nitrificazione sottintende un processo di rilascio leggermente superiore dell'ammoniaca (di quasi un'unità) e leggermente inferiore di ossigeno (3 unità) dei fondali oggetto del dragaggio.

I bassi valori di flusso di nitrito, sia in fase di escavo sia nel pre-survey, sono imputabili al processo di nitrificazione dell'ammoniaca prodotta dalla degradazione della sostanza organica quando questa viene in contatto con l'ambiente ossico della colonna d'acqua. Per tali motivi lo ione nitrito è poco considerato come risultato dei processi di degradazione della sostanza organica in quanto è un prodotto temporaneo di reazioni chimiche secondarie.

Complessivamente si può affermare che i flussi bentici dei nutrienti misurati davanti alla banchina 26 durante la fase di escavo (stazione AP3) sono in linea con i flussi

bentici misurati durante il pre-survey ad eccezione dell'ossigeno e del nitrato che presentano, rispettivamente, un flusso leggermente più negativo e positivo per il processo di ossidazione dei sedimenti affioranti in seguito al dragaggio.

Più in generale, i flussi dei nutrienti sono apparsi leggermente superiori ai valori medi misurati sui fondali dell'Adriatico centrale caratterizzati da sedimenti pelitici e quindi direttamente confrontabili con i sedimenti pelitici del Porto di Ancona. Tali valori elevati di flussi di nutrienti all'interno dell'area portuale non costituiscono comunque delle anomalie critiche, in quanto non hanno indotto veri e propri fenomeni di anossia o crisi distrofiche nell'ambiente circostante.

Per quanto concerne i metalli pesanti, il maggior rilascio di Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Hg e Pb durante i lavori di escavo rispetto al pre-survey indica che il sedimento sub-superficiale davanti alla banchina 26 ha rilasciato notevoli quantità di questi elementi in seguito all'escavo; come conseguenza si è verificato sicuramente un aumento, almeno temporaneo, delle concentrazioni di questi elementi nella colonna d'acqua di quest'area del Porto di Ancona.

In ogni caso, i flussi sinora misurati andranno confrontati con quelli relativi al post lavori per valutare il comportamento del fondale una volta terminato il processo di rimozione dei sedimenti superficiali.

Per quanto riguarda infine i parametri chimici e fisici, il maggiore consumo di ossigeno in conseguenza del dragaggio, qualora fosse esteso ad un'area ampia e per più giorni, potrebbe portare a una crisi anossica del fondale del porto interessato dal dragaggio. La situazione di maggiore anossia indicata dai valori dell'ORP durante l'escavo è dovuta alla rimozione dei fanghi superficiali e, come già detto, al conseguente maggior consumo di ossigeno nella colonna d'acqua da parte dei sedimenti anossici sub superficiali affioranti dopo la rimozione del sedimento superficiale.

**Valutazione degli effetti del dragaggio su organismi sentinella** - I risultati delle attività di biomonitoraggio finalizzato a determinare un'eventuale rimobilizzazione di sostanze tossiche confinate nei sedimenti dragati presso il Porto di Ancona hanno riportato solo sporadici segnali di stress ambientale. In particolare, dopo il periodo di traslocazione di 30 gg, negli organismi prelevati in entrambe le aree portuali (banchine 4 e 26) sono state osservate alcune alterazioni limitate a livello sub-letale. Tali alterazioni hanno interessato per lo più alcune funzionalità sub-cellulari come un aumento della fragilità delle membrane lisosomiali, l'accumulo di lipidi neutri e l'aumento di proteine metallo-chelanti. Nel complesso i risultati ottenuti da tali test

hanno evidenziato un moderato aumento della biodisponibilità di alcuni metalli pesanti, come ulteriormente confermato dalla distribuzione degli inquinanti osservati nei tessuti degli organismi prelevati presso le diverse aree portuali rispetto ai controlli e in accordo con quanto evidenziato dalle indagini sui flussi bentici. L'accumulo di tali sostanze appare da attribuirsi sia all'intenso traffico navale che contraddistingue l'area oggetto di studio, sia ai lavori di dragaggio che si stavano svolgendo nel periodo di campionamento. Più discontinua è apparsa la risposta alla presenza di molecole organiche poiché, seppur evidenziando alcune significative risposte biologiche, come ad esempio la risposta del sistema immunitario del mitilo, queste non hanno trovato conferma nei livelli di idrocarburi policiclici aromatici risultati al di sotto del limite di rilevabilità strumentale. Di maggiore intensità sono apparse le risposte biologiche osservate presso l'area più interna del porto (banchina 4), non influenzata dalle attività di escavo, ma contraddistinta tuttavia da un più lento ricircolo delle acque e da sorgenti multiple e diversificate d'impatto antropico. La scelta apposita di tale sito (controllo positivo) e le risposte ad esso associate confermano la sensibilità dei test adottati e validano l'efficacia della batteria di test adottati. Scarso è risultato il rischio genotossico, con frequenze di micronuclei simili a quelle riscontrabili naturalmente su popolazioni di bivalvi prelevati in ambienti marino costieri poco impattati (Bolognesi *et al.*, 2004).

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aebi H. 1974. Catalase. Pagg. 671-684, in: Bergmeyer H.U. (Ed.), *Methods on enzymatic analysis*. Academic Press, London.
- Artegiani A. 1996. Temperature and salinity measurements of seawaters, Handbook of method protocols. *MAST II Mediterranean Targeted Project*. 34 pp.
- Banni M., Dondero F., Jebali J., Guerbej H., Boussetta H., Viarengo A. 2007 Assessment of heavy metal contamination using real-time PCR analysis of mussel metallothionein mt10 and mt20 expression: a validation along the Tunisian coast. *Biomarkers*, 12(4): 369 – 383.
- Bolognesi C., Fenzilli G., Lasagna C., Perrone E., Roggeri P., 2004. Genotoxicity biomarkers in *Mytilus galloprovincialis* wild versus caged mussels. *Mutation Research*, 552: 153-162.
- Bolognesi C., Rabboni R., Roggeri P. 1996. Genotoxicity biomarkers in *M. galloprovincialis* as indicators of marine pollutants. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 113C(2): 319-323.
- Covelli S., Faganeli J., Horvat M., Brambati A. 2001. Mercury contamination of coastal sediments as the result of long-term cinnabar mining activity (Gulf of Trieste, northern Adriatic sea). *Applied Geochemistry*, 16(5): 541-558.
- Dailianis S., Domouhtsidou G.P., Raftopoulou E., Kaloyianni M., Dimitriandis V.K. 2003. Evaluation of neutral red retention assay, micronucleus test, acetylcholinesterase activity and signal transduction molecule (cAMP) in tissues of *Mytilus galloprovincialis* (L.), in pollution monitoring. *Marine Environmental Research*, 56: 443-470.
- Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. 2007. *Guide to best practices for ocean CO2 measurements*.
- Dong C.D., Chen C. , Chen C.W. 2015. Composition and source of butyltins in sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156: 134-143.
- Dondero F., Piacentini L., Banni M., Reselo M., Burlando B., Viarengo A. 2005. Quantitative PCR analysis of two molluscan metallothionein genes unveils differential expression and regulation. *Gene*, 345: 259–270.
- Donnini F., Dinelli E., Sangiorgi F., Fabbri E. 2007. A biological and geochemical integrated approach to assess the environmental quality of a coastal lagoon (Ravenna, Italy). *Environment International*, 33(7): 919-928.
- Fabi G., Ferrarin C., Spagnolo A. 2015. *Modellizzazione della diffusione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo e di sversamento in mare aperto - Lavori di escavo per adeguamento dei fondali antistanti il primo tratto della Banchina 26 del Porto di Ancona e simulazioni su tutte le celle dell'area di sversamento*. Rapporto per l'Autorità Portuale di Ancona. 46 pp.
- Fabi G., Grilli F., Paschini E., Penna P., Spagnolo A. 2016. *Studi di carattere ambientali volti a valutare le dinamiche e gli effetti ambientali dei sedimenti marini provenienti da escavi portuali. Il Rapporto - Dati correntometrici, meteorologici e di marea (pre-survey)*. Rapporto per l'Autorità Portuale di Ancona. 10 pp.
- Fattorini D., Notti A., Di Mento R., Cicero A.M., Gabellini M., Russo A. Regoli F. 2008. Seasonal, spatial and inter-annual variations of trace metals in mussels from the Adriatic sea: a regional gradient for arsenic and implications for monitoring the impact of off-shore activities. *Chemosphere*, 72: 1524–1533.
- Frontalini F., Coccioni R. 2008. Benthic foraminifera for heavy metal pollution monitoring: a case study from the central Adriatic Sea coast of Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(2): 404-417.

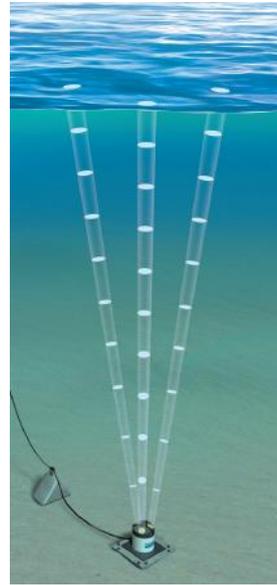
- Furdek M., Vahčić M., Ščančar J., Milačić R., Kniewald G., Mikac N. 2012. Organotin compounds in seawater and *Mytilus galloprovincialis* mussels along the Croatian Adriatic Coast. *Marine Pollution Bulletin*, 64(2), 189-199.
- Giani M., Gabellini M., Pellegrini D., Costantin S., Beccaloni E., Giordano R. 1994. Concentration and partitioning of Hg, Cr and Pb in sediments of dredge and disposal sites of the northern Adriatic Sea. *Science of the Total Environment*, 158: 97-112.
- Higuchi R., Fockler C., Dollinger G., Watson R. 1993. Kinetic PCR analysis: real-time monitoring of DNA amplification reactions. *Biotechnology (NY)*, 11 (9): 1026-1030.
- ICRAM. 2001. *Metodologie analitiche di riferimento. Programma di monitoraggio per il controllo dell'ambiente marino-costiero (triennio 2001-2003)*.
- Okoro H.K., Snyman R.G., Fatoki O.S., Adekola F.A., Ximba B.J., Slabber M.Y. 2015. Lysosomal Membrane Stability of the Mussel, *Mytilus galloprovincialis* (L.), as a Biomarker of Tributyltin Exposure. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94(5): 609-613.
- Ottaviani E., Franceschini C. 1997. The invertebrate phagocytic immunocyte: clues to a common evolution of immune and neuroendocrine system. *Immunology Today*, 18: 169-174.
- Petrovic S., Semencic L., Ozetic B., Orzetic M. 2004. Seasonal variations of physiological and cellular biomarkers and their use in the biomonitoring of north Adriatic coastal waters (Croatia). *Marine Pollution Bulletin*, 49(9-10): 713-720.
- Storelli M.M., Storelli, A., Marcotrigiano G.O. 2001. Heavy metals in the aquatic environment of the Southern Adriatic Sea, Italy: macroalgae, sediments and benthic species. *Environment International*, 26(7): 505-509.
- Turja R., Soirinsuo A., Budzinski H., Devier M.H., Lehtonen K.K. 2013. Biomarker responses and accumulation of hazardous substances in mussels (*Mytilus trossulus*) transplanted along a pollution gradient close to an oil terminal in the Gulf of Finland (Baltic Sea). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 157(1): 80-92.
- UNESCO. 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, by N.P. Fofonoff and R.C. Millard Jr. *Tech. Pap. Mar. Sci.*, 44. 53 pp.
- UNESCO. 1988. The acquisition, calibration, and analysis of CTD data. *Tech. Pap. Mar. Sci.*, 54. 59 pp.

**ALLEGATO A**

**SCHEDE TECNICHE DELLA STRUMENTAZIONE**

**UTILIZZATA NELLE INDAGINI**

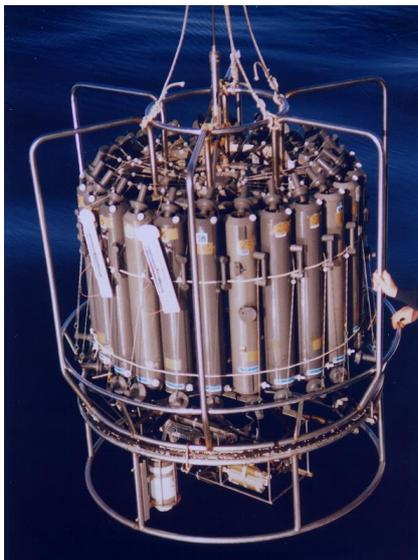
**AII. A1      ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER, Sontex**



**AII. A2      CORRENTOMETRO AANDERAA RCM7**



**AII. A3      SONDA MULTIPARAMETRICA CTD e “ROSETTE”**



**CTD:** Sea Bird Electronics SBE911plus (frequenza di campionamento 24 Hz) dotato dei seguenti sensori:

| Sensore         | Costruttore              | Modello                  | Accuratezza                    | Intervallo di misura          |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Temperatura     | Sea Bird Electronics     | SBE 3                    | $\pm 0,002$ °C                 | -5 : +35°C                    |
| Conducibilità   | Sea Bird Electronics     | SBE 4                    | $\pm 0,0003$ S m <sup>-1</sup> | 0 : 7 S m <sup>-1</sup>       |
| Pompa           | Sea Bird Electronics     | SBE 5                    | ---                            | 9 : 18 VDC                    |
| Ossigeno        | Sea Bird Electronics     | SBE 43                   | $\pm 0,1$ ml L <sup>-1</sup>   | 0 : 15 ml L <sup>-1</sup>     |
| Fluorimetro     | Turner Designs           | SCUFA                    | $\pm 0,01$ µg L <sup>-1</sup>  | 0,02 : 100 µg L <sup>-1</sup> |
| Torbidimetro    | Turner Designs           | SCUFA                    | $\pm 0,01$ NTU                 | 0,05 : 100 NTU                |
| Back-scattering | Seapoint Turbidity Meter | Seapoint Turbidity Meter | < 5cm (approx.)                | 2 : 750 FTU                   |
| Altimetro       | Datasonics               | PSA-900                  | $\pm 0,75$ cm                  | 0 : 300 m                     |

**Campionatore:** Rosette General Oceanics equipaggiato con 12 bottiglie idrologiche Niskin da 10 lt.

**All. A4**

**ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER, RDI  
WORKHORSE SENTINEL ADCP 300 KHZ**



**All. A5**

**CRIOSTATO Leica CM1900**



| Strumento | Costruttore | Serie | Cabina                   | Refrigerante |
|-----------|-------------|-------|--------------------------|--------------|
| Criostato | Leica       | 1900  | Refrigerata fino a -50C° | Freon        |

## **All. A6      MICROSCOPIO invertito Carl Zeiss AxioCam 135 motorizzato con telecamera Carl Zeiss Axiovert HS**



|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Main features                 | Highly stable pyramid shape and low center of gravity for vibration-free work, min. 6 adaptation options (12 drilled holes) e.g. for micromanipulators<br>Optovar revolver 3x motorized<br>6x objective nosepiece for HD DIC, motorized |
| Optics                        | ICS optics for finest image quality: special application objectives with long working distance  |
| Objectives                    | Reflected light: Epiplan, Epiplan-Neofluar, EC Epiplan-Neofluar<br>Transmitted light: Achroplan, Plan-Neofluar<br>Special: LD-Epiplan, LD-EC Epiplan-Neofluar (reflected light objective with long working distance)                    |
| Modules                       | Polarization optical shearing interferometer (TIC) to measure reflected light-phase objects(levels, differences in height), MHT 10, DeepView  |
| Illumination Reflected light  | 12V, 100W halogen<br>HBO 50W mercury vapor short arc lamp<br>HBO 100W mercury vapor short arc lamp<br>XBO 75W xenon lamp  |
| Reflected light/filter slider | 3 positions for filters with 25 mm diameter   |
| Reflector turret              | 5 positions, manual or motorized, exchangeable  |
| Light Trap                    | High contrast, minimized stray light  |
| Transmitted light             | 6V, 30W<br>12V, 100W<br>LCD-display, light manager  |

### **TelecameraAxiovert HS**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Sensore               | Sony ICX 414, progressives readout   |
| Risoluzione           | 660(H) x 494 (V) = 330 K Pixels  |
| Pixel Size            | 9.9 $\mu\text{m}$ (H) x 9.9 $\mu\text{m}$ (V)  |
| Dimensione sensore    | 6,5 mm x 4,9 mm, equivalent to $\frac{1}{2}$   |
| Sensibilità spettrale | HSc appr. 400 bis 720 nm con BG 40 IR-blocking filter HSm appr. 350 bis 1000 nm con BK7 protective cover glass |
| Dynamic Range         | Typical SNR 65 dB = 1 : 1800   |
| Noise                 | 1 17 e   |
| Dark Current          | 0,7 LSB/s, equivalenti a to 5,4 e / Pixel/s  |
| Fotogrammi / sec      | Appr. 54 fotogrammi/s in risoluzione normale fino a . 140 fotogrammi/s a                                       |
| Tempo di esposizione  | da 0,25 ms fino a 60 s   |
| Color optimisation    | Available for color model, default white point 3200 k  |

**All. A7      CENTRIFUGA Beckman Allegra 25R**



| Strumento  | Costruttore | Modello     | Range velocità | Range temperatura (°C)                           | Precisione | Diametro rotore |
|------------|-------------|-------------|----------------|--|------------|-----------------|
| Centrifuga | Beckman     | Allegra 25R | 100-25000 rpm  | 0 – 50 piena velocità<br>-30-40 a veloc. ridotta | ±1         | 215 mm          |

**All. A8      ESTRAZIONE LIQUIDO-SOLIDO A FLUSSO tipo Soxhlet**



**Materiale:** Apparato elevatore, isomantello, pallone da 250 ml, un apparato di Soxhlet con refrigerante apposito, un ditale di carta, pinze e morsetti, due tubi di gomma, moderatore di ebollizione (sfere di pyrex), cilindro graduato da 250 ml, solvente organico d'estrazione, cilindretto graduato da 10 ml, pipette Pasteur, cristallizzatore, piastra riscaldante, ancorretta magnetica, imbuto, tettarelle, cotone, provetta o protettone da 250 ml.

**All. A9 CROMATOGRAFIA LIQUIDA Waters 996 PDA HPLC System  
(liquid chromatograph)**



TIPO DI STRUMENTO: **Cromatografo per cromatografia liquida ad alte pressioni (HPLC).**

COSTRUTTORE **Waters**

SERIE **996 PDA**

TIPO DI DETECTOR: **Fluorescenza (Waters® 474 Scanning Fluorescence Detector) e UV-Visibile (rivelatore a serie di fotodiodi Waters® PDA 996)**

VOLUME DI INIEZIONE: **5 µl**

CARRIER: **Acqua/Acetonitrile**

TIPO DI COLONNA: **Supelcosil LC-PAH**

LUNGHEZZA: **25 cm**

DIAMETRO: **4.5 mm**

FASE: **C-18**

PARTICLE SIZE: **5 µm**

INTEGRAZIONE ED ANALISI DEL DATO: **Waters Millennium software®**

**All. A9a SUPELCOSIL™ LC-PAH HPLC Column  
(colonna per cromatografia liquida ad alte prestazioni-HPLC)**



CARATTERISTICHE FISICHE: **5 µm diametro granuli, lunghezza x I.D. 25 cm x 4.6 mm**

MATRICE (supporto): **gel di silice a forma sferica**

(Fase stazionaria): **octadecyl silice**

diámetro granuli: **5 µm**

dimensione pori: **120 Å**

**AII. A10      MINERALIZZATORE Milestone Ethos 900**



TIPO DI STRUMENTO: Forno **Mineralizzatore /estrattore**

COSTRUTTORE **Milestone**

SERIE: **900**

VOLUME DI INIEZIONE: **6 posizioni da 200 ml**

POTENZA SORGENTE: **fino a 1600w**

SOFTWARE DI CONTRIOLLO: **EasyControl software®**

**All. A11      SPETTROFOTOMETRO AD ASSORBIMENTO ATOMICO  
Perkin-Elmer AANALYST 700**



**All. A11a**

**Flow injection Mercury system  
FIMS 400, Perkin-Elmer per il  
dosaggio/analisi del Hg**



**All. A11b**

**Flow Injection Analysis  
System (FIAS 400, Perkin Elmer)  
per il dosaggio/analisi dell'As**





**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

ISMAR - Istituto di Scienze Marine

U.O.S. di Ancona

Largo Fiera della Pesca, 1 – 60125 Ancona, Italy

Tel +39 071 207881 Fax +39 071 55313

[segreteria@an.ismar.cnr.it](mailto:segreteria@an.ismar.cnr.it) - [www.ismar.cnr.it](http://www.ismar.cnr.it)

C.F. 80054330586 - P.IVA 02118311006



## **STUDI DI CARATTERE AMBIENTALE VOLTI A VALUTARE LE DINAMICHE E GLI EFFETTI AMBIENTALI DEI SEDIMENTI MARINI PROVENIENTI DA ESCAVI PORTUALI**



### **IV RAPPORTO**

## **VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI E SU ORGANISMI SENTINELLA (Rapporto finale)**

**COORDINATORE: Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, Ancona)**

**RESPONSABILE SCIENTIFICO: Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, Ancona)**

**Rapporto a cura di : Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, ANCONA)**

**Dott. Alessio Gomiero (IRIS, Norvegia)**

**Dott. Federico Spagnoli (CNR-ISMAR, Ancona)**

**Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, Ancona)**

**Preparato per:           AUTORITÀ PORTUALE DI ANCONA**

**Luglio 2016**



## INDICE

|  |       |
|--|-------|
| <b>1. PREMESSA</b> .....   | 1     |
| <b>2. MATERIALI E METODI</b> .....   | 2     |
| 2.1. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI ...  | 2     |
| 2.1.1. ATTIVITÀ DI LABORATORIO E ANALISI DEI DATI .....  | 5     |
| 2.2. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI ORGANISMI<br>SENTINELLA .....   | 6     |
| 2.2.1. ATTIVITÀ DI LABORATORIO E ANALISI DEI DATI .....  | 7     |
| 2.2.1.1 Biomarker .....  | 7     |
| 2.2.1.2 Idrocarburi totali nel segmento C5-C40.....  | 13    |
| 2.2.1.3 Idrocarburi Policiclici Aromatici.....   | 13    |
| 2.2.1.4 Metalli pesanti.....   | 14    |
| 2.2.1.5 Composti organostannici: Mono-, Di- e Tributilstagno .....   | 16    |
| <b>3. RISULTATI</b> .....  | 17    |
| 3.1. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI .  | 17    |
| 3.1.1. SPECIE IONICHE .....  | 17    |
| 3.1.1.1 Prodotti di degradazione della sostanza organica e<br>silice disciolta .....                                       | 17    |
| 3.1.1.2 Accettori finali di elettroni.....   | 21    |
| 3.1.1.3 Metalli .....  | 24    |
| 3.1.2. PARAMETRI CHIMICI E FISICI .....  | 25    |
| 3.2. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI ORGANISMI<br>SENTINELLA .....   | 28    |
| 3.2.1. BIOMARKER.....  | 28    |
| 3.2.2. BIOACCUMULO DI IDROCARBURI TOTALI NEL SEGMENTO C5-C40,<br>IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI E METALLI PESANTI ..... | 38    |
| 3.2.3. COMPOSTI ORGANOSTANNICI: MONO- BI- E TRIBUTILSTAGNO .....   | 48    |
| <b>4. CONCLUSIONI</b> .....  | 50    |
| <b>5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....  | 52    |
| <br><b>ALLEGATO A - SCHEDE TECNICHE DELLA STRUMENTAZIONE<br/>UTILIZZATA NELLE INDAGINI</b> .....                           | <br>i |

## PARTECIPANTI AL PROGRAMMA

|               |                                      |   |
|---------------|--------------------------------------|---|
| G. Fabi       | CNR-ISMAR UOS Ancona                 | Coordinatore  |
| A. Spagnolo   | CNR-ISMAR UOS Ancona                 | Responsabile Scientifico  |
| F. Spagnoli   | CNR-ISMAR UOS Ancona                 | Responsabile dati flussi bentici  |
| P. Giordano   | CNR-ISMAR UOS Bologna                | Elaborazione dati flussi bentici  |
| L. Borgognoni | CNR-ISMAR UOS Ancona                 | Elaborazione dati flussi bentici  |
| F. Acri       | CNR-ISMAR Venezia                    | Elaborazione dati flussi bentici  |
| R. De Marco   | CNR-ISMAR UOS Ancona                 | Raccolta dati flussi bentici  |
| G. Caccamo    | CNR-ISMAR UOS Ancona                 | Raccolta dati flussi bentici  |
| A. Gomiero    | IRIS Norvegia - CNR-ISMAR UOS Ancona | Responsabile Mussel watch,<br>raccolta campioni ed elaborazione<br>dati |
| P. Polidori   | CNR-ISMAR UOS Ancona                 | Raccolta campioni Mussel watch  |

Hanno inoltre collaborato allo svolgimento dei campionamenti in mare i Sigg.ri G. Gaetani e A. Marziali imbarcati sulla M/R TecnoPesca II del CNR – ISMAR di Ancona utilizzata per le indagini.

## **1. PREMESSA**

Nel presente rapporto vengono riportati i risultati finali relativi agli studi di carattere ambientale condotti dal CNR-ISMAR UOS Ancona nell'ambito dell'Accordo tra codesto Istituto e l'Autorità Portuale di Ancona (Prot. 0021161 del 27/03/2015) e riguardano, in particolare, gli effetti del dragaggio sui sedimenti marini e sugli organismi sentinella (*Mytilus galloprovincialis*) alla fine dei lavori di escavo della Banchina 26 del Porto di Ancona, iniziati il 23/06/2015 e terminati il giorno 04/08/2015.

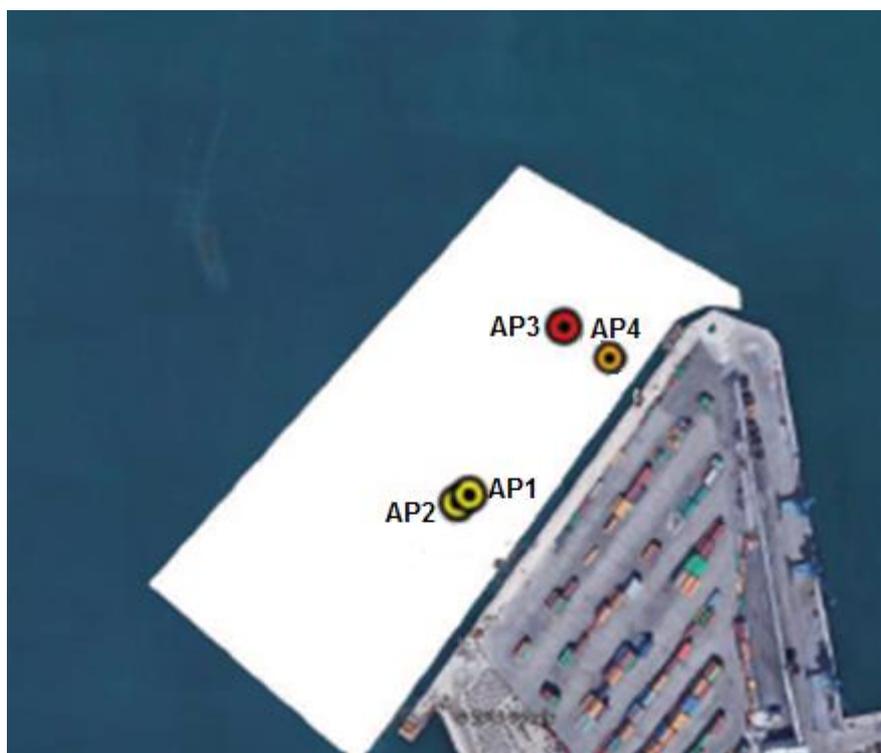
Lo studio ha riguardato tre fasi (pre-survey, durante lavori di escavo e post-operam) e i risultati relativi alle prime due sono stati prodotti in Fabi *et al.* (2015 e 2016).

Nella presente relazione sono riportati quelli ottenuti nella fase di post-operam confrontati con i precedenti al fine di verificare eventuali cambiamenti sulle dinamiche dei sedimenti portuali e sugli organismi sentinella indotti dalle operazioni di dragaggio.

## **2. MATERIALI E METODI**

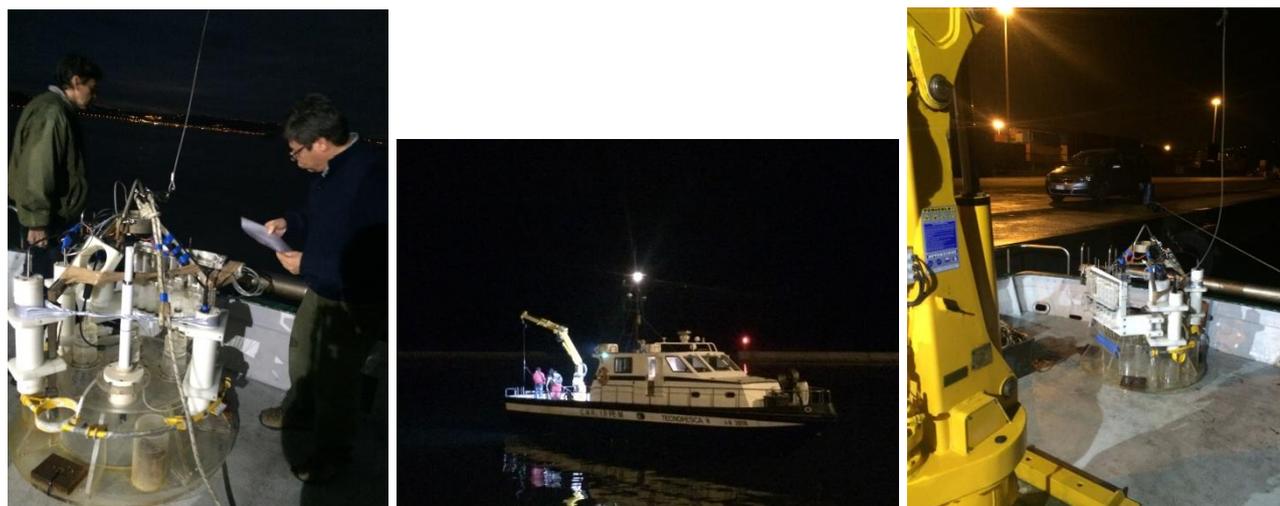
### **2.1. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI**

Tale tipologia di indagine prevedeva la quantificazione dei flussi bentici in tre diversi tempi davanti alla Banchina 26 (fig. 1) del Porto di Ancona: prima dell'esecuzione dei lavori di dragaggio (pre-survey), durante l'esecuzione dei lavori (fase di escavo) e dopo la fine dei lavori (fase post-operam).



**Fig. 1** - Stazioni di misura dei flussi bentici in fase ante-operam (AP1 e AP2, in giallo), in fase di escavo (AP3, in rosso) e in fase di post-operam (AP4, arancione) all'interno dell'area di dragaggio.

Nel post-operam la misura dei flussi bentici, analogamente al pre-survey e al durante lavori, è consistita nella deposizione di una camera bentica automatica sul fondale (fig. 2; All. A1) in una stazione di misura (AP4) ubicata all'interno dell'area di escavo. Il campionamento è stato eseguito tra il 27 e il 28 gennaio 2016, ovvero circa sei mesi dopo la fine dei lavori di escavo come richiesto nella Specifica Tecnica. In Tab. 1 sono indicate le coordinate delle stazioni campionate nelle tre fasi (pre-survey, durante lavori e post-operam).



**Fig. 2** - Camera bentica automatica durante le operazioni di messa a mare nella fase di post-operam.

**Tab. 1** - Coordinate delle stazioni di campionamento AP4 (post-operam), AP3 (fase di escavo) e AP1 e AP2 (pre-survey).

| Stazioni | Coordinate geografiche |             |
|----------|------------------------|-------------|
|          | Latitudine             | Longitudine |
| AP4      | 43°37.337'             | 13°29.664'  |
| AP3      | 43°37.349'             | 13°39.641'  |
| AP2      | 43°37.284'             | 13°29.587'  |
| AP1      | 43°37.287'             | 13°29.593'  |

La camera bentica automatica è stata posizionata sul fondale per circa 10 h. I campioni di acqua all'interno della camera sono stati prelevati a intervalli di tempo prestabiliti (Tab. 2). I parametri chimici e fisici (salinità, temperatura, ossigeno disciolto, pH, ORP) dell'acqua all'interno della camera bentica sono stati misurati per tutto il tempo di campionamento mediante sonda CTD Hydrolab MS5, solidale alla struttura della camera bentica automatica.

**Tab. 2** - Tabella dei tempi di campionamento della camera bentica automatica nella fase post-operam.

| SIRINGHE | TEMPI      | TEMPI       | TEMPI       | TEMPI       | TEMPO PRELIEVO | TEMPO PRELIEVO      | TEMPO PRELIEVO      | TEMPO DEPLOYMENT |
|----------|------------|-------------|-------------|-------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------|
|          | INTERVALLI | PROGRESSIVI | PROGRESSIVI | PROGRESSIVI |                |                     |                     |                  |
|          | MIN        | MIN         | MIN         | ORE         | GIORNI         | DATA                | DATA                |                  |
|          | 0.00       | 0.00        |             | 0.00        |                | 27/01/2016 18.01.00 | 27/01/2016 18.01.00 | start            |
|          | 0.17       | 0.17        |             | 0.00        |                |                     | 27/01/2016 18.01.10 | attesa 0         |
|          | 0.17       | 0.33        |             | 0.01        |                |                     | 27/01/2016 18.01.20 | prova            |
|          | 15.00      | 15.33       |             | 0.26        |                |                     | 27/01/2016 18.16.20 | attesa 2         |
| 0        | 8.00       | 23.33       | 0.00        | 0.39        | 0.00           | 27/01/2016 18.24.20 | 27/01/2016 18.24.20 | prelievo 1       |
|          | 58.00      | 81.33       |             | 1.36        |                |                     | 27/01/2016 19.22.20 | attesa 4         |
| 1        | 8.00       | 89.33       | 66.00       | 1.49        | 0.05           | 27/01/2016 19.30.20 | 27/01/2016 19.30.20 | prelievo 2       |
|          | 5.00       | 94.33       |             | 1.57        |                |                     | 27/01/2016 19.35.20 | attesa 6         |
| 2        | 8.00       | 102.33      | 79.00       | 1.71        | 0.05           | 27/01/2016 19.43.20 | 27/01/2016 19.43.20 | iniezione        |
|          | 78.00      | 180.33      |             | 3.01        |                |                     | 27/01/2016 21.01.20 | attesa 8         |
| 3        | 8.00       | 188.33      | 165.00      | 3.14        | 0.11           | 27/01/2016 21.09.20 | 27/01/2016 21.09.20 | prelievo 3       |
|          | 88.00      | 276.33      |             | 4.61        |                |                     | 27/01/2016 22.37.20 | attesa 10        |
| 4        | 8.00       | 284.33      | 261.00      | 4.74        | 0.18           | 27/01/2016 22.45.20 | 27/01/2016 22.45.20 | prelievo 4       |
|          | 88.00      | 372.33      |             | 6.21        |                |                     | 28/01/2016 00.13.20 | attesa 12        |
| 5        | 8.00       | 380.33      | 357.00      | 6.34        | 0.25           | 28/01/2016 00.21.20 | 28/01/2016 00.21.20 | prelievo 5       |
|          | 88.00      | 468.33      |             | 7.81        |                |                     | 28/01/2016 01.49.20 | attesa 14        |
| 6        | 8.00       | 476.33      | 453.00      | 7.94        | 0.31           | 28/01/2016 01.57.20 | 28/01/2016 01.57.20 | prelievo 6       |
|          | 88.00      | 564.33      |             | 9.41        |                |                     | 28/01/2016 03.25.20 | attesa 16        |
| 7        | 8.00       | 572.33      | 549.00      | 9.54        | 0.38           | 28/01/2016 03.33.20 | 28/01/2016 03.33.20 | prelievo 7       |
|          | 30.00      | 602.33      |             | 10.04       |                |                     | 28/01/2016 04.03.20 | attesa finale    |

### 2.1.1. ATTIVITÀ DI LABORATORIO E ANALISI DEI DATI

I campioni raccolti con la camera bentica automatica sono stati divisi, in atmosfera inerte di N<sub>2</sub>, in più aliquote per le determinazioni dei nutrienti (N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, P-PO<sub>4</sub>, Si-Si(OH)<sub>4</sub>), del carbonio inorganico totale disciolto (DIC), del metano e dei metalli (Al, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Cu, V, Zn). I campioni destinati alle analisi dei nutrienti sono stati congelati a -20°C subito dopo la suddivisione in aliquote; quelli per la determinazione del DIC sono stati avvelenati con HgCl (0,02% v:v di soluzione satura) e conservati a +4°C; i campioni per la determinazione dei metalli sono stati acidificati con acido nitrico suprapuro (0,5% v:v) e conservati a +4°C; il metano è stato misurato al momento del campionamento con un sensore Franatech.

Dalle concentrazioni delle specie ioniche analizzate nei campioni di acqua raccolti in tempi diversi e rapportati al volume e all'area della camera bentica, sono stati calcolati i flussi bentici in termini di millimoli (mmol) per metro quadro (sqm) per giorno (d), per i nutrienti, e in termini di micromoli (µmol) per metro quadro per giorno, per i metalli.

La formula applicata è la seguente:

$$F_i = \frac{(C_{if} - C_{i0}) * h}{T_f - T_0}$$

Dove:

F<sub>i</sub> è il flusso del composto chimico i in millimoli per metro quadro per giorno (mmol/sqm\*d);

C<sub>if</sub> è la concentrazione del composto chimico i misurata al tempo f;

C<sub>i0</sub> è la concentrazione del composto chimico i misurata al tempo 0;

h è l'altezza della camera bentica automatica;

T<sub>f</sub> è il tempo f;

T<sub>0</sub> è il tempo iniziale dell'esperimento.

La misura dei parametri chimici e fisici all'interno della camera bentica ha permesso di calcolare anche il flusso bentico di ossigeno disciolto.

Le analisi per i nutrienti sono state eseguite presso il CNR-ISMAR di Venezia con l'analizzatore colorimetrico automatico EasyChem Plus della Systea S.p.A., seguendo il metodo proposto da Hansen e Koroleff (1999).

I metalli sono stati analizzati nel laboratorio ACTLAB (Ontario, Canada) mediante ICP-MS.

Il DIC è stato analizzato presso il CNR-ISMAR UOS Ancona seguendo il metodo proposto da Dickson (2007) e modificato da Spagnoli (dati non pubblicati).

## 2.2. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SU ORGANISMI SENTINELLA

Analogamente a quanto effettuato nelle fasi di indagine precedenti (Fabi *et al.*, 2016), dopo la fine dei lavori di dragaggio dei sedimenti antistanti la Banchina 26 il giorno 16/09/2015 sono stati prelevati n. 3 campioni di mitili (*Mytilus galloprovincialis*) dalla baia di Portonovo. Ogni campione era composto da circa 100 esemplari. Uno è stato utilizzato come “controllo” ed è stato subito analizzato per verificare lo stato degli organismi al “tempo 0” (T0), mentre gli altri due sono stati trapiantati tramite gabbie all’interno del Porto di Ancona, uno in corrispondenza dell’area di escavo (Banchina 26) e l’altro in un’area interna al porto non interessata dalle attività di dragaggio (Banchina 4; fig. 3). Lo scopo di quest’ultimo campione era di poter discriminare tra gli eventuali impatti sugli organismi determinati dal dragaggio concluso da poco e quelli indotti invece da altre attività portuali indipendenti dalle operazioni previste.



**Fig. 3** - Siti utilizzati per posizionare le gabbie contenenti gli esemplari di mitili presso banchine 26 e 4.

Ogni campione è stato suddiviso in due subcampioni di circa 50 esemplari cadauno, uno per analisi biologiche e uno per analisi chimiche.

Dopo 30 gg dall’immersione i campioni immersi nel porto sono stati prelevati per le successive analisi di laboratorio. In contemporanea al prelievo sono stati anche campionati altri 100 esemplari da Portonovo (controllo “T30”).

Le misure biometriche dei quattro campioni erano le seguenti:

Controllo "T0": 5,45±0,40 cm LC

Controllo "T30": 5,50±0,49 cm LC

Banchina 26: 5,51±0,51 cm LC

Banchina 4: 5,53±0,52 cm LC

## 2.2.1. ATTIVITÀ DI LABORATORIO E ANALISI DEI DATI

### 2.2.1.1 Biomarker

I Biomarker analizzati sono riportati in Tab. 3.

**Tab. 3** - Lista di biomarker proposti su *M. galloprovincialis* per la valutazione degli effetti biologici associati alle attività di dragaggio nel Porto di Ancona.

| Indice  | Rilevanza ecologica                 | Livello biologico           | Target biologico      | Significato tossicologico  |
|---|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--|
| Mortalità   | Endpoint di alto livello            | Individuo                   | Intero organismo      | Indice di effetto generico   |
| Stabilità delle Membrane lisosomiali  | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di effetto generico   |
| Accumulo lisosomiale di Lipofuscine   | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a specie ossigeno reattive (stress ossidativo) |
| Accumulo lisosomiale di Lipidi Neutri   | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a sostanze organiche                           |
| Rapporto volume lisosomi/citoplasma   | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare               | Ghiandola digestiva   | Indice di effetto generico   |
| Attività dell'enzima di catalasi  | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - Biochimico  | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a specie ossigeno reattive (stress ossidativo) |
| Livelli di proteine metallo-chelanti (metallotioneine)                            | Endpoint subletale di basso livello | Sub cellulare - Biochimico  | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a metalli                                      |
| Frequenza di micronuclei  | Endpoint subletale                  | Individuo                   | Cellule dell'emolinfa | Indice di stress genotossico   |
| Espressione genica dei geni codificanti induzione alla sintesi di metallotioneine | Endpoint subletale                  | Sub cellulare - genomico    | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a metalli                                      |
| Valutazione dei livelli di composti aromatici per via immunofluorescente          | Endpoint subletale                  | Sub cellulare - Istochimico | Ghiandola digestiva   | Indice di esposizione a composti aromatici                           |

**Mortalità** – La mortalità nelle gabbie è stata misurata registrando il numero di conchiglie vuote e individui che, dopo il periodo di traslocazione di 30 gg e la successiva fase di prelievo, mantenevano aperte le valve anche in ambiente subaereo.

**Stabilità delle membrane lisosomiali** - Le ghiandole digestive di 5 mitili provenienti da ciascun sito sono state tagliate con criostato (All. A2) in modo tale da ottenere delle sezioni trasversali dei tubuli disposti parallelamente all'asse longitudinale della ghiandola stessa e poste in fila su apposito supporto in alluminio (chuck) precedentemente raffreddato in ghiaccio. Successivamente, il supporto con i frammenti è stato posto per 15" in un piccolo recipiente contenente N-esano, già raffreddato con azoto liquido. Il chuck è stato poi avvolto in 4-5 strati di Parafilm e posto immediatamente a -80°C. Al momento

dell'analisi, per mezzo di un criostato, sono state ottenute sezioni di 10-20  $\mu\text{m}$  di spessore con un'angolazione di taglio di  $15^\circ$ . Le sezioni sono state quindi trasferite su vetrini tenuti a temperatura ambiente. La stabilità della membrana lisosomiale è stata testata attraverso l'enzima N-acetyl-hexosaminidase che ha come substrato il naphthol As-BI N-acetyl- $\beta$ -D-glucosaminide.

Le sezioni preparate come descritto in precedenza sono state trattate in una vaschetta di Hellendal con un tampone destabilizzante le membrane lisosomiali a  $37^\circ\text{C}$  per tempi diversi (0, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40') in modo da determinare il tempo di trattamento richiesto per labilizzare interamente le membrane lisosomiali (periodo di labilizzazione). Il set di vetrini è stato trasferito nel mezzo di incubazione del substrato contenente naphthol As-BI N-acetyl- $\beta$ -D-glucosaminide precedentemente disciolto in 2,5 ml di 2-metossietanolo e portato a volume con il tampone citrato contenente Polipep, un polipeptide a bassa viscosità che agisce come stabilizzante per le sezioni. L'incubazione con il substrato è stata di 20' a  $37^\circ\text{C}$  nella vaschetta di Hellendal in un bagno agitante. I vetrini sono stati successivamente risciacquati in acqua di mare filtrata a temperatura ambiente o in una soluzione di NaCl al 3% a  $37^\circ\text{C}$  per 2' prima del loro trasferimento per 10' a temperatura ambiente in un tampone fosfato pH 7,4 contenente il colorante diazoinico fast violet B blue. I vetrini, risciacquati in acqua corrente per 5', sono stati successivamente fissati con gelatina glicerinata. Le sezioni così ottenute sono state analizzate mediante un sistema di analisi d'immagine al microscopio ottico (All. A3) per la determinazione del periodo di labilizzazione lisosomiale. Le analisi sono state eseguite almeno in quintuplicato.

**Accumulo lisosomiale di lipofuscine** - Le sezioni di 5 individui provenienti da ciascun sito preparate al criostato (All. A2) sono state fissate in calcio-formolo a  $4^\circ\text{C}$ , risciacquate in acqua distillata e poste nel mezzo di reazione contenente cloruro di ferro e potassio ferrocianuro per 5'. Successivamente, sono state lavate in acido acetico, risciacquate in acqua, montate su vetrino ed analizzate mediante un sistema di analisi d'immagine al microscopio ottico (All. A3) per la determinazione della colorazione dei lisosomi dovuta all'accumulo di lipofuscine.

**Accumulo lisosomiale di lipidi neutri** - Le sezioni, derivanti da 5 individui per ciascun sito preparate al criostato (All. A2) con la stessa modalità seguita per la valutazione della stabilità delle membrane lisosomiali, sono state fissate in calcio-formolo per 15' a  $4^\circ\text{C}$ , risciacquate in acqua distillata e poste in una soluzione di trietilfosfato. Successivamente sono state colorate con una soluzione di oil red in trietilfosfato a  $20^\circ\text{C}$  per 15', lavate in trietilfosfato per 30", risciacquate in acqua distillata e montate con gelatina.

Le sezioni così ottenute sono state analizzate al microscopio ottico (All. A3) mediante un sistema di analisi d'immagine che determina la percentuale di colorazione dei lisosomi dovuta all'accumulo dei lipidi neutri insaturi.

**Rapporto volume lisosomi / citoplasma** - I dati ottenuti da analisi di tipo quantitativo possono essere associati a quelli della citochimica qualitativa tramite l'analisi di immagine. Con questo sistema computerizzato, l'immagine del preparato in esame viene digitalizzata tramite un collegamento tra microscopio ottico e computer. Ciò permette di quantificare direttamente su sezioni istologiche il preparato in esame, preservando sia la localizzazione dell'enzima che le sue caratteristiche biochimiche.

La procedura si basa sulla legge di Lambert-Beer che mette in relazione la concentrazione del precipitato (c) con l'assorbanza (A):

$$A = \text{Log } I_0/I = klc$$

Dove  $I_0$  ed  $I$  sono rispettivamente l'intensità del raggio incidente e di quello trasmesso,  $l$  il percorso del raggio nel campione e  $k$  la costante massima di assorbimento.

Il raggio incidente ( $I_0$ ) colpisce il campione e viene trasmesso ( $I$ ) a una telecamera che forma l'immagine. Questa viene poi digitalizzata da un convertitore analogico, cioè trasformata in un valore numerico discreto ed immagazzinata nel computer in un sistema binario che formerà una matrice. L'elemento di questa matrice è il pixel, cioè il più piccolo dettaglio rilevabile dell'immagine, e il suo valore rispecchia la densità ottica in quel punto. La matrice che viene a formarsi è costituita da 600 pixel verticali e 800 orizzontali, che rispecchiano la risoluzione dell'immagine digitalizzata. Più pixel sono presenti in una matrice, maggiore sarà la risoluzione e quindi la nitidezza dell'immagine. Generalmente i pixel possono assumere valori compresi fra 0 e 255, rispecchiando in tal modo 256 toni di grigio.

Una volta scelta la soglia dei toni di grigio la relazione tra l'intensità della luce trasmessa e il livello di grigio permette di quantificare la densità del precipitato in esame, che risulta direttamente proporzionale alla sua concentrazione.

Per le analisi d'immagine necessarie alla quantificazione del rapporto lisosomi / citoplasma cellulare sono state sequenzialmente determinate le superfici (in pixels) del microtubulo della ghiandola digestiva dell'esemplare analizzato, rapportato alla superficie dei soli lisosomi (in pixel). Per ogni campione (sito) sono state analizzate almeno 10 immagini e un totale di 30-40 microtubuli.

**Attività dell'enzima di catalasi** - Tale attività è stata determinata in aliquote di ghiandola di mitilo (3 pool di 5 individui per ogni sito) preventivamente lavate con una soluzione di NaCl (0,9%), omogeneizzate in 4 volumi di tampone Tris-HCl pH 7,4 contenente

saccarosio e infine centrifugate (All. A4), prima a 2.000 x g per 10' per eliminare la frazione lipidica, e successivamente a 9.000 x g per 30' per ottenere la frazione citosolica. L'attività dell'enzima di catalasi è stata determinata per via spettrofotometrica (Aebi, 1974; All. A5) a 240 nm valutando la diminuzione in assorbanza dell'estratto dovuta al consumo di H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

***Livelli di proteine metallo-chelanti (metallotioneine)*** - Al momento dell'analisi i tessuti (3 pool di 5-7 individui per ogni sito) sono stati omogeneizzati in 3 volumi di Saccoroso/Tris-HCl addizionati di Leupeptina e β-mercaptoetanolo. L'omogenato è stato quindi centrifugato (All. A4) per ottenere una frazione solubile contenente le metallotioneine. Il sopranatante è stato successivamente precipitato con etanolo-cloroformio con il duplice scopo di rimuovere i tioli a basso peso molecolare e concentrare le metallotioneine; 1 ml di citosol è stato quindi addizionato con 1,05 ml di etanolo freddo e cloroformio e centrifugato a 6.000 x g per 10'. Il sopranatante così ottenuto è stato addizionato di 3 volumi di etanolo freddo e mantenuto a -20°C per 1 h e quindi centrifugato a 6.000 x g per 10' in rotore oscillante. Il pellet è stato lavato una volta con etanolo e cloroformio nel buffer di omogeneizzazione, ri-centrifugato, insufflato con azoto e risospeso in NaCl 0,25 M addizionato di 150 µl di HCl e EDTA. Ai campioni così risospesi è stato aggiunto DTNB (acido ditiobisnitrobenzoico) preparato al momento dell'uso e quindi sono stati centrifugati a 3.000 x g. L'assorbanza è stata valutata per via spettrofotometrica (All. A5) misurandola a 412 nm.

***Frequenza di micronuclei*** - L'allestimento dei preparati citologici è stato effettuato direttamente sul campione fresco lo stesso giorno di arrivo in laboratorio. L'emolinfa di ogni individuo (per un totale di 5 esemplari per campione) è stata prelevata dal muscolo adduttore posteriore con una siringa contenente Alsever (soluzione salina al 33‰ composta di NaCl, Na citrato x 2H<sub>2</sub>O, acido citrico x 1H<sub>2</sub>O e glucosio a pH fisiologico). Alcune gocce della sospensione cellulare, fissata in metanolo:acido acetico, sono state posizionate su vetrino e colorate con Giemsa.

Per ogni mitilo sono state osservate al microscopio ottico (All. A3) circa 2000 cellule di emociti e su queste sono state determinate le frequenze di micronuclei e delle anomalie nucleari (Ottaviani e Franceschini, 1997).

***Espressione genica dei geni codificanti induzione alla sintesi di metallotioneine (Real Time PCR (q-PCR))*** - L'amplificazione del DNA costituisce una tecnica d'indagine consolidata in campo biomedico e solo di recente è stata implementata con tecniche innovative per lo studio della qualità degli ambienti marini. La tecnica di Real Time PCR consente di monitorare e quantificare una molecola target mentre la reazione biochimica

che le produce la sua amplificazione è in corso. La metodologia prevede l'amplificazione selettiva e quantificazione in vitro di una sequenza di DNA target. Ciò è reso possibile dall'impiego di diversi prodotti chimici fluorescenti detti *reporter* che correlano l'amplificazione con l'intensità della fluorescenza (Higuchi *et al.*, 1993). La reazione di una classica PCR ad un certo numero di cicli giunge a plateau; ciò solitamente è indipendente dalla quantità iniziale di templati. Il sistema giunge a plateau per un ampio raggio di DNA di partenza. Grazie alla PCR quantitativa si può, quindi, monitorare la quantità di DNA prima del plateau, durante la fase esponenziale di crescita, per risalire alla quantità di template di partenza.

Con particolare riferimento all'ambiente marino la q-PCR può essere utilizzata per quantificare l'espressione di geni funzionali considerati bioindicatori.

In particolare nella presente esperienza di monitoraggio è stata prevista l'estrazione del RNA dalle cellule delle ghiandole digestive di mitilo, la retrotrascrizione dell'RNA in cDNA e infine l'amplificazione del cDNA tramite PCR. In questo caso, rispetto alla sequenza completa rappresentata dall'intero RNA, il metodo di studio si è focalizzato sulla quantificazione di due sequenze geniche, MT<sub>10</sub> ed MT<sub>20</sub>, responsabili della sintesi delle proteine metallo-chelanti "metallotioneine" (Dondero *et al.*, 2005).

La tecnologia di q-PCR adottata ha previsto:

- l'utilizzo di fluorocromi intercalanti del DNA tipo SYBR Green, una molecola fluorescente non specifica che si lega al solco minore del DNA a doppio filamento (eccitazione/emissione massima a 494/521 nm);
- l'impiego di sonde a idrolisi tipo "TaqMan". Questa fase consiste in una sequenza oligonucleotidica che, come i primers della PCR, viene disegnata per essere complementare alla sequenza bersaglio del gene da amplificare. Tale sequenza presenta all'estremità 5' un fuorofooro "reporter" come HEX (esacloro-6-carbossifluorescina) e all'estremità 3' una molecola "quencher" rappresentata dal TAMRA (6-carbossitetrametilrodamina);
- l'uso di acqua RNA-se e DNA-se free.

Operativamente, 0,1 gr di ghiandola digestiva è stato omogenato in Trizol e incubato a temperatura ambiente per 5' per favorire la completa dissociazione dei complessi nucleoproteici. Sono stati quindi aggiunti 100 µl di cloroformio e dopo 3' l'estratto è stato centrifugato (10.000 x g per 5' a 4°C; All. A4) realizzando una separazione in due fasi: una inferiore arricchita in fenolo rosso e una superiore acquosa contenente l'RNA. La fase acquosa è stata trasferita in una eppendorf e l'RNA raccolto è stato concentrato mediante precipitazione per mezzo di trattamenti sequenziali a base di alcool isopropilico ed etanolo (75%) seguiti da centrifugazione a 10.000 x g per 10' a 4°C. Il surnatante ottenuto è stato

quindi eliminato e il pellet depositato sul fondo della provetta è stato risospeso in 100 mM sodio acetato ed etanolo (100%). Il passaggio successivo ha previsto la purificazione attraverso trattamento con LiCl (8M), incubato a -20°C per 30' e centrifugato a 20.000 x g per 30'; il surnatante è stato quindi eliminato. Il pellet così ottenuto è stato nuovamente risospeso in etanolo (75%) per la fase di analisi o conservato a -20°C. È seguita la quantificazione dell'RNA ottenuto tramite lettura a diverse bande come  $\lambda = 230, 260$  e 280. Per la fase successiva di sintesi del cDNA sono stati prelevati 0,1 g di RNA totale, incubato a 70° C per 5' con appropriate quantità di oligoTprimers. Successivamente, sono stati aggiunti in rapida sequenza il tampone di reazione, il mix di desossiribonucleotidi trifosfato (dNTP), l'acqua deionizzata nuclease free, e il RevertAid M-MuLV Reverse Transcriptase®. È stato quindi impostato il seguente ciclo termico di PCR:

- 1 Incubazione della miscela a 37°C per favorire l'annealing degli oligo(d)T;
- 2 incubazione a 40°C per 40-60';
- 3 incubazione a 50°C per 20';
- 4 interruzione della reazione tramite riscaldamento a 70°C per 10';
- 5 raffreddamento;

Alla fine della reazione di amplificazione, l'analisi dei risultati è stata operata attraverso il metodo comparativo cicli soglia. Dall'analisi delle curve di amplificazione sono stati desunti i parametri fondamentali alla quantificazione delle molecole inizialmente presenti nel campione come il ciclo soglia e la linea soglia di reazione.

L'efficienza della reazione di PCR è stata valutata tramite i cambiamenti di espressione genica del campione sulla base di un controllo esterno attraverso un campione di riferimento e un gene di riferimento (house-keeping), la cui espressione mantiene gli stessi livelli indipendentemente da variazioni ambientali (Livak e Schmittgen, 2001).

**Valutazione dei livelli di composti aromatici per via immunofluorescente** - Le ghiandole digestive di 5 mitili provenienti da ciascun sito sono state tagliate in modo tale da ottenere delle sezioni trasversali dei tubuli disposti parallelamente all'asse longitudinale della ghiandola stessa e poste in fila su apposito supporto in alluminio. Al momento dell'analisi, per mezzo di un criostato (All. A2), sono state ottenute sezioni di 25  $\mu\text{m}$  di spessore con un'angolatura di taglio di 15°. Le sezioni sono state quindi trasferite su vetrini tenuti a temperatura ambiente. La presenza di composti aromatici nelle cellule delle ghiandole digestive dei mitili analizzati stata testata su sezioni di tessuto sciacquate tre volte da una soluzione di Hanks e stabilizzate in una soluzione di bloccaggio e permeabilizzazione costituita da 5% Triton X-100, 2% BSA, 0,5% siero di coniglio in soluzione di Hanks e successivamente incubate a 4 C con anticorpo primario monoclonale (Santa Cruz Biotechnology) 1/100 per 8h al buio e successivamente con anticorpo secondario anti IPA policlonale DyLight 594 (AbCAM) in concentrazione 1/100

per un'ulteriore ora, al buio ed a 20 C. Le sezioni così trattate sono state risciacquate in soluzione di Hanks e montate in Mowiol. Dalle 10 alle 20 immagini per ogni vetrino sono state acquisite e analizzate tramite un software per l'analisi d'immagine. I risultati sono espressi come densità ottica / pixels<sup>2</sup>.

### **2.2.1.2 Idrocarburi totali nel segmento C5-C40**

La tecnica d'indagine si basa sull'applicazione integrale dei metodi USEPA 3550c rev. 3 – 2007 e 8015c rev. 3 – 2000.

Una quantità nota di campione (5-10 g di parti molli) è stata dapprima liofilizzata e successivamente estratta mediante sonicazione a freddo per 60' con 50 ml di acetone/n-eptano (1:1 v/v). Nella soluzione estraente è stata aggiunta la soluzione di riferimento per la finestra dei tempi di ritenzione contenente n-pentano (C<sub>5</sub>), n-dodecano (C<sub>12</sub>) e n-tetracontano (C<sub>40</sub>). L'estratto è stato purificato su colonna di Florisil. Un'aliquota dell'estratto purificato è stato analizzato in GG-FID. In particolare, è stata misurata l'area totale dei picchi presenti nell'intervallo delimitato dalle tre soluzioni di riferimento C<sub>5</sub>, C<sub>12</sub> e C<sub>40</sub>. La quantità di idrocarburi è stata quindi determinata mediante confronto con la soluzione di riferimento esterno costituito da quantità uguali di tre standard. Ulteriormente, sono state disposte prove in bianco per ogni serie di analisi al fine di identificare la baseline.

### **2.2.1.3 Idrocarburi Policiclici Aromatici**

Gli esemplari di mitilo sono stati scongelati e le parti molli sono state separate dalla conchiglia in maniera tale da ottenere circa 50 g di peso umido per ciascun sito. Gli organismi, così suddivisi e selezionati, sono stati pesati in un contenitore di vetro senza coperchio, previamente tarato, pulito con solventi (acetone, esano) e asciugato per evitare qualsiasi tipo di contaminazione. Successivamente, le parti molli in questi contenitori sono state liofilizzate fino a completa essiccazione (processo che avviene in circa 3-5 gg) e poi pesate.

L'intero processo analitico la determinazione degli IPA è stato diviso in tre fasi distinte: estrazione e isolamento dei contaminanti dalla matrice, purificazione dell'estratto, determinazione analitica finale del composto.

I campioni di mitili liofilizzati (3 g) sono stati sottoposti ad una tecnica basata su estrazione in apparato Soxhlet (All. A4) a 120°C per 8 h, evaporati a 50°C per la determinazione della Materia Organica Estratta (MOE) e successivamente ripresi e purificati su colonna allumina/gel di silice. La purificazione e la separazione degli estratti è stata effettuata su colonna di gel di silice e sodio solfato anidro (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (attivati a 130°C per 24 h). La

colonna è stata eluita con 32 ml di esano, seguiti da 15 ml di una soluzione esano:diclorometano (1:1 v/v). Durante le analisi dei campioni sono state effettuate prove in bianco. La frazione contenente gli IPA è stata concentrata sotto blando flusso d'azoto per il raggiungimento di un volume finale di circa 0,5 ml, trasferita in acetonitrile e impiegata per la determinazione analitica degli IPA. La determinazione qualitativa e quantitativa degli IPA è avvenuta mediante cromatografia liquida ad alta pressione (HPLC - High Performance Liquid Chromatography) con rivelatore a serie di fotodiodi (Waters® PDA 996) e con rivelatore a fluorescenza (Waters® 474 Scanning Fluorescence Detector) in serie (All. A6). Per quanto riguarda le condizioni di corsa, la fase mobile iniziale è costituita da acetonitrile (40%) ed acqua (60%), fino al raggiungimento di un gradiente lineare al 100% di acetonitrile, ad una velocità di corsa di 1,5 ml min<sup>-1</sup> per 50'. È stata usata una colonna cromatografica Supelcosil LC-PAH HPLC (25 cm x 4,6 mm, 5 µm) (All. A6a).

La formula finale per il calcolo della concentrazione degli analiti è la seguente:

$$C \text{ (ng/l)} = \frac{\text{Area picco} \times \text{Conc Std} \times \text{vol finale}}{\text{Area picco Std} \times \text{g. Peso secco}}$$

Con area si intende l'area dei picchi risultati nel cromatogramma. Il risultato finale è espresso in ng g<sup>-1</sup> di tessuto liofilizzato.

Le rette di taratura sono state ottenute iniettando quattro soluzioni a concentrazione nota dello standard TLC Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Mix (Supelco), contenente i 16 composti considerati inquinanti prioritari previsti dall'EPA: Naftalene, Acenaftilene, Acenaftene, Fluorene, Fenantrene, Antracene, Fluorantene, Pirene, Benzo(a)Antracene, Crisene, Benzo(b)Fluorantene, Benzo(k)Fluorantene, Benzo(a)Pirene, Dibenzo(a,h,)Antracene, Benzo(g,h,i,)Perilene e Indeno(1,2,3-c,d)Pirene.

#### **2.2.1.4 Metalli pesanti**

Due aliquote di circa 2,5 g di campione liofilizzato per ogni sito di prelievo sono state mineralizzate a riflusso con 30 ml di acido nitrico concentrato. I campioni, posti in un apposito pallone da 250 ml, sono stati sottoposti a digestione a freddo per 20-30' e portati ad ebollizione per circa 2 h in forno a microonde *ETHOS 900*<sup>®</sup> della *Milestone* (All. A7). La mineralizzazione è stata eseguita secondo la procedura ICRAM (2001).

Le soluzioni risultanti sono state filtrate attraverso un filtro di cellulosa e portate a un volume di 100 ml con acqua MilliQ. Un simile procedimento è stato effettuato anche con un'uguale quantità di acido per ottenere il bianco da sottrarre ai valori dei campioni

ottenuti per via strumentale.

La determinazione strumentale di **alluminio**, **vanadio**, **cadmio**, **cromo**,  **nichel**, **rame** e **piombo** è avvenuta mediante spettrofotometria di assorbimento atomico in fornello di grafite (*GF-AAS*), una tecnica molto sensibile per la determinazione di questi elementi generalmente presenti in concentrazioni minori. Come gas di trasporto è stato utilizzato l'argon. Per le analisi ci si è avvalsi di uno spettrofotometro ad assorbimento atomico *AAnalyst 700*<sup>®</sup> della Perkin Elmer in configurazione Autosampler AS40<sup>®</sup> – Mercury/Hydride System MHS-10<sup>®</sup> (All. A8).

Lo **zinco** è stato analizzato direttamente in fiamma aria-acetilene (*F-AAS*) con lo stesso strumento e quantificato da una curva di calibrazione costruita da concentrazioni note dell'elemento. La temperatura della fiamma a cui avviene l'atomizzazione è di 2300°C.

Il **mercurio** è stato determinato mediante analisi dei vapori ottenuti per riduzione a freddo con NaBH<sub>4</sub> (*HG-AAS*) secondo la seguente reazione:



I campioni sono stati pre-trattati con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e K<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub> in modo da ossidare la sostanza organica. La reazione con NaBH<sub>4</sub> riduce il mercurio presente in forma ionica a mercurio metallico il quale, assieme all'idrogeno gassoso liberato dalla reazione, viene trasportato dal flusso di gas inerte nella cella al quarzo dove è stata misurata la sua assorbanza tramite il *Flow Injection Mercury System FIMS 400*<sup>®</sup> della Perkin-Elmer (All. A8a). Per evitare assorbimenti di tipo molecolare, nelle analisi che richiedono lunghezze d'onda nella zona dell'ultravioletto è stato impiegato il correttore di fondo al deuterio.

La metodica seguita per la determinazione di Hg, Cr, Cd e Pb è quella delle aggiunte, secondo la quale aliquote uguali di standard sono state addizionate ai campioni al fine di misurare l'assorbanza delle soluzioni così ottenute e calcolare il valore della concentrazione. Il dosaggio dell'**arsenico** è stato ottenuto in *HG-AAS* utilizzando il *Flow Injection Analysis System FIAS 400*<sup>®</sup> di Perkin Elmer con lettura in *GF-AAS* e correttore di fondo Zeeman, 4100 ZL, Perkin-Elmer (All. A8b).

Le lunghezze d'onda utilizzate per i singoli metalli analizzati sono riportate in Tab. 4.

**Tab. 4** – Lunghezze d'onda utilizzate per i metalli analizzati.

|    | <b>Lunghezze<br/>d'onda</b> |
|----|-----------------------------|
| Al | 308,215                     |
| As | 193,696                     |
| Cd | 226,502                     |
| Cr | 267,716                     |
| Hg | 194,227                     |
| Ni | 231,604                     |
| Pb | 220,353                     |
| Cu | 324,754                     |
| V  | 292,402                     |
| Zn | 213,856                     |

#### **2.2.1.5 Composti organo stannici: Mono-, Di- e Tributilstagno**

La tecnica d'indagine si basa sull'applicazione integrale del metodo in Appendice I, "Metodo per la determinazione di composti organostannici in sedimenti e matrici biologiche tramite GC-MS e GC-FPD", ICRAM (2001). In dettaglio, il metodo prevede il prelievo di 0,1-0,5 g di parti molli, trattamento con tropolone in metanolo e HCl 37%, separazione degli estratti mediante centrifugazione e ripartizione liquido-liquido con CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> e NaCl, evaporazione del solvente mediante evaporatore rotante, trasferimento dell'estratto in fiala con diclorometano e isottano, evaporazione del solvente sino quasi a secchezza sotto un debole flusso di azoto. Successivamente viene effettuata derivatizzazione con PeMgBr 2M in etere dietilico, distruzione dell'eccesso del reattivo con acqua con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ed estrazione degli analiti con esano. Si procede con il lavaggio degli estratti con due aliquote di NaHCO<sub>3</sub>, concentrazione a 0,5 ml sotto un debole flusso di azoto, successiva purificazione con gel di silice o Florisil, eluizione tramite una soluzione esano-toluene 1:1. Infine avviene la preconcentrazione e l'analisi in GC-MS.

### **3. RISULTATI**

#### **3.1. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SUI SEDIMENTI MARINI**

##### **3.1.1. SPECIE IONICHE**

I flussi bentici misurati nelle stazioni posizionate nell'area di escavo nelle tre fasi (pre-survey, durante lavori e post-operam) e nella fase *ante-operam* sono riassunti in Tab. 5 e nelle figg. 4-6. Oltre ai metalli ricercati in base alla Convenzione stipulata con l'Autorità Portuale, si è deciso di analizzare anche il Fe e il Mn, in quanto questi due elementi sono molto importanti per la comprensione dei processi di rilascio e/o assorbimento dal sedimento. I valori di metano sono risultati sempre inferiori al limite di rilevabilità.

##### **3.1.1.1 Prodotti di degradazione della sostanza organica e silice disciolta**

Per ciò che riguarda i prodotti di degradazione della sostanza organica (N-NH<sub>3</sub>, DIC N-NO<sub>2</sub>, P-PO<sub>4</sub>) e il Si-Si(OH)<sub>4</sub>, i flussi bentici misurati davanti alla Banchina 26 nel Porto di Ancona nei giorni 27 e 29 gennaio 2016 (stazione AP4, Tab. 5 e fig. 4) hanno evidenziato un rilascio dal sedimento (indicato da valori positivi del dato di flusso) per il DIC (37,586 mmol/sqm\*d), per lo ione ammonio (1,468 mmol/sqm\*d), per P-PO<sub>4</sub> (0,105 mmol/sqm\*d) e per Si-Si(OH)<sub>4</sub> (1,026 mmol/sqm\*d) e un assorbimento da parte del sedimento (indicato dal valore negativo del flusso) per i nitriti (-0,088 mmol/sqm\*d).

Come nella fase di escavo, i flussi positivi di ammoniaca e DIC registrati nel post-operam indicano un processo di degradazione della sostanza organica presente nei primi cm del sedimento. Tale sostanza organica, originatasi in seguito ai processi di produzione primaria e secondaria (presenti nella colonna d'acqua del porto e nelle zone antistanti al porto stesso), in parte si è depositata sul fondale tra la fine dell'escavo e il giorno di misura e, in parte, è affiorata in seguito all'escavo stesso. La sostanza organica di recente formazione, generalmente, è particolarmente attiva e produce sostanziali flussi di ammoniaca e DIC, mentre quella meno recente ha già subito un processo di degradazione iniziale che la rende meno reattiva.

La comparazione dei flussi dello ione ammonio e del DIC tra le 3 fasi (pre-survey, durante lavori e post-operam) evidenzia una diminuzione del flusso nell'ultima fase rispetto alle precedenti (differenza: -1,755 mmol/sqm\*d per l'ammonio e -19,106 mmol/sqm\*d per il DIC rispetto alla fase di escavo). Tale diminuzione è attribuita all'affioramento, in seguito al dragaggio, di sedimento con sostanza organica a bassa reattività perché ormai "invecchiata", e con bassi contenuti di "nuova sostanza organica" che non ha avuto modo

di formarsi nel tempo intercorso tra la fine del dragaggio e la misura della fase post-operam. Nel corso del tempo la formazione di nuova sostanza organica che si deposita sul fondale dovrebbe portare a dei valori di flusso dei suoi due principali prodotti di degradazione (ione ammonio e DIC) simili a quelli registrati nel pre-survey. Va precisato che valori di rilascio più bassi di questi due composti indicano un sedimento meno ricco di sostanza organica reattiva e quindi con meno potenziale inquinante.

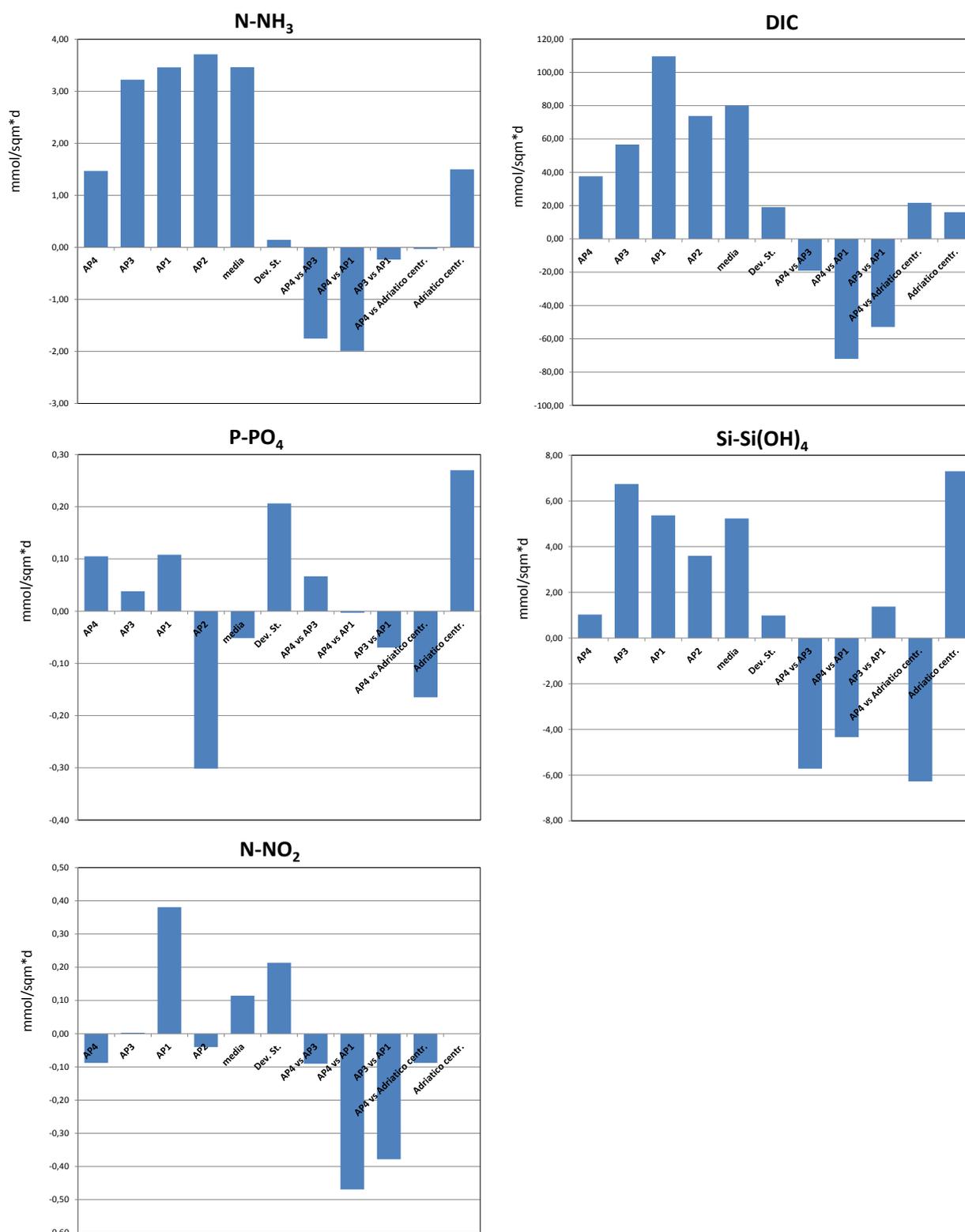
Il confronto con il flusso dei sedimenti pelitici dell'Adriatico centrale invece evidenzia una sostanziale similitudine per l'ammoniaca e valori più bassi in Adriatico per il DIC. Ciò conferma la presenza di sostanza organica poco reattiva nei sedimenti affioranti dopo il dragaggio che comunque è maggiore rispetto ai sedimenti adriatici superficiali.

Per ciò che riguarda i fosfati, nel post-operam hanno presentato un valore di flusso leggermente superiore rispetto alla fase di escavo (differenza: +0,067 mmol/sqm\*d) ma sostanzialmente uguale rispetto al pre-survey (differenza: +0,003 mmol/sqm\*d) e inferiore rispetto ai sedimenti pelitici centro-adriatici (differenza: -1,165 mmol/sqm\*d). Tali differenze sono imputabili alla rimozione degli idrossidi di ferro negli strati più superficiali del fondale avvenuta con il dragaggio dei sedimenti che trattengono, mediante un processo di dissoluzione e precipitazione all'interfaccia acqua-sedimento, i fosfati disciolti prodotti e accumulati nelle acque interstiziali.

Il flusso positivo ottenuto nel post-operam di  $\text{Si-Si(OH)}_4$ , come nel durante lavori, è dovuto alla dissoluzione dei gusci di diatomee (alghe con esoscheletro siliceo) che si sono depositati sul fondale in seguito a fioriture algali. Tali gusci tendono a dissolversi dopo la morte degli organismi fino a un valore limite quando anche la silice biogenica non è più reattiva. Il valore del flusso di  $\text{Si-Si(OH)}_4$  nella fase post-operam è risultata inferiore al flusso del durante lavori (differenza: -5,715 mmol/sqm\*d). Tale differenza indica che i flussi di  $\text{Si-Si(OH)}_4$  sono condizionati dall'affioramento dei sedimenti sub-superficiali in seguito al dragaggio: questi ultimi contengono meno silice biogenica reattiva e quindi producono meno silice disciolta. I valori di flusso di questa specie chimica sono apparsi inferiori anche rispetto al pre-survey e ai valori di flusso medi dei sedimenti pelitici centro-adriatici, a conferma della presenza sul fondale di un sedimento povero di silice biogenica di neoformazione in seguito all'escavazione.

**Tab. 5** - Valori (espressi in mmol/sqm\*d) e parametri statistici dei flussi bentici misurati nella fase post-operam (stazione AP4), durante i lavori di dragaggio (stazione AP3), durante il pre-survey (stazioni AP1 e AP2) e nel Mar Adriatico centrale su fondali pelitici (Spagnoli F., dati non pubblicati). <DL: inferiore del limite di rilevabilità. -: flusso non determinabile. In rosso: flusso incerto.

| Stazioni   | N-NH <sub>3</sub> | DIC     | P-PO <sub>4</sub> | Si-SiO <sub>4</sub> | N-NO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N-NO <sub>3</sub> | Fe       | Mn       | Al   | As      | Cd     | Cr   | Hg     | Ni       | Pb    | Cu     | V     | Zn      |         |
|--|-------------------|---------|-------------------|---------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------|----------|------|---------|--------|------|--------|----------|-------|--------|-------|---------|---------|
| AP4  | 1,468             | 37,586  | 0,105             | 1,026               | -0,088            | -22,641        | -1,121            | -        | 112,51   | -    | -19,874 | -      | -    | -      | -156,87  | -     | -      | -     | -       | -56,016 |
| AP3  | 3,223             | 56,692  | 0,038             | 6,741               | 0,003             | -79,589        | 0,841             | 3343,20  | 531,05   | < DL | < DL    | < DL   | < DL | 18,54  | 31,64    | 2,48  | 22,48  | < DL  | 331,60  |         |
| AP1  | 3,458             | 109,588 | 0,108             | 5,365               | 0,381             | -60,527        | -0,979            | 865,00   | 44,65    | < DL | -2,99   | 0,0027 | 6,36 | -0,33  | < DL     | -0,82 | -1,07  | -4,34 | 26,49   |         |
| AP2  | 3,711             | 73,809  | -0,301            | 3,598               | -0,041            | -              | -0,579            | -        | -        | -    | -       | -      | -    | -      | -        | -     | -      | -     | -       | -       |
| media  | 3,464             | 80,030  | -0,052            | 5,234               | 0,114             | -70,058        | -0,239            | 2104,10  | 287,85   | -    | -2,99   | 0,0027 | 6,36 | 9,10   | 31,64    | 0,83  | 10,71  | -4,34 | 179,04  |         |
| Deviazione standard                              | 0,144             | 19,116  | 0,206             | 0,985               | 0,213             | 6,739          | 0,370             | 876,18   | 171,97   | -    | 9,75    | -      | -    | 6,67   | -        | 1,17  | 8,33   | 0,00  | 107,87  |         |
| differenza tra AP4 e AP3                         | -1,755            | -19,106 | 0,067             | -5,715              | -0,091            | 56,948         | -1,962            | -        | -418,540 | -    | -       | -      | -    | -      | -188,514 | -     | -      | -     | -       | -       |
| differenza tra AP4 e AP1                         | -1,990            | -72,002 | -0,003            | -4,339              | -0,469            | 37,886         | -0,142            | -        | 67,864   | -    | -16,881 | -      | -    | -      | -        | -     | -      | -     | -       | -82,504 |
| differenza tra AP3 e AP1                         | -0,235            | -52,896 | -0,070            | 1,376               | -0,378            | -19,062        | 1,819             | 2478,200 | 486,404  | -    | -       | -      | -    | 18,868 | -        | 3,307 | 23,556 | -     | 305,112 |         |
| differenza tra AP4 e Adriatico centrale pelitico | -0,032            | 21,586  | -0,165            | -6,274              | -0,088            | -19,841        | -1,171            | -        | -67,490  | -    | -       | -      | -    | -      | -        | -     | -      | -     | -       | -       |
| Adriatico centrale pelitico                      | 1,500             | 16,000  | 0,270             | 7,300               |                   | -2,800         | 0,050             | 15,00    | 180,00   | -    | -       | -      | -    | -      | -        | -     | -      | -     | -       | -       |



**Fig. 4** - Grafici dei flussi misurati nelle stazioni AP4 (fase post-operam), AP3 (durante l'escavo), AP1 e AP2 (pre-survey) e nel Mar Adriatico centrale su fondali pelitici e vari confronti tra le stazioni/fasi di indagine e l'Adriatico centrale pelitico.

I bassi valori di flusso di nitrito registrati nelle tre fasi sono imputabili al processo di nitrificazione dell'ammoniaca prodotta dalla degradazione della sostanza organica quando questa viene in contatto con l'ambiente ossico della colonna d'acqua. Per tali motivi lo ione nitrito è poco considerato come risultato dei processi di degradazione della sostanza organica in quanto è un prodotto temporaneo di reazioni chimiche secondarie.

Complessivamente si può affermare che i flussi bentici dei prodotti di degradazione della sostanza organica, misurati davanti alla Banchina 26 a distanza di sei mesi dalla fine dei lavori di dragaggio, sono diminuiti per la minore presenza di sostanza organica reattiva (nel caso dell'ammonio e del DIC); solo i fosfati sono leggermente aumentati per la minore presenza di idrossidi di ferro in seguito alla rimozione degli strati più superficiali del fondale. Ciò suggerisce l'affioramento, dopo le operazioni di dragaggio, di un sedimento relativamente meno influenzato dall'idrodinamica e dalle attività portuali.

### **3.1.1.2 Accettori finali di elettroni**

Gli accettori finali di elettroni sono le specie chimiche che vengono utilizzate dai microorganismi per la degradazione della sostanza organica; esse sono, in ordine di utilizzo con la disponibilità e quindi con la profondità, l'ossigeno disciolto, i nitrati, il manganese legato agli idrossidi, il ferro legato agli idrossidi, i solfati e la sostanza organica (queste ultime due specie non sono coinvolte nei processi di diagenesi precoce che si hanno nei sedimenti superficiali e sub-superficiali del Porto di Ancona).

Tra gli accettori finali di elettroni nel post-operam è stato riscontrato un assorbimento da parte del sedimento (indicato dal valore negativo del flusso) dell'ossigeno (-22,461 mmol/sqm\*d) e dei nitrati (-1,121 mmol/sqm\*d; (Tab. 5, fig. 5) e un rilascio (valori positivi del flusso bentico) di Manganese (Mn; 112,51  $\mu$ mol/sqm\*d), mentre il Ferro ha presentato un flusso indeterminabile per l'assenza di un trend definito.

Il valore del flusso bentico dell'ossigeno disciolto è risultato notevolmente meno negativo rispetto al durante lavori di escavo (differenza: +56,948 mmol/sqm\*d). Inoltre, i flussi registrati sin dal pre-survey sono apparsi sempre più negativi rispetto a quelli relativi ai sedimenti pelitici dell'Adriatico centrale. In questo caso il flusso negativo più contenuto dell'ossigeno disciolto dopo circa sei mesi dalla fine delle operazioni di dragaggio suggerisce che, durante la rimozione del sedimento superficiale, si producevano flussi negativi più intensi per un processo di degradazione della sostanza organica reattiva presente sul fondale e affiorante in seguito al dragaggio. Tale sostanza organica reattiva è stata rimossa durante il dragaggio e pertanto, nel post-operam, i sedimenti affioranti presentavano un contenuto di sostanza organica reattiva minore rispetto ai sedimenti presenti prima e durante il dragaggio.

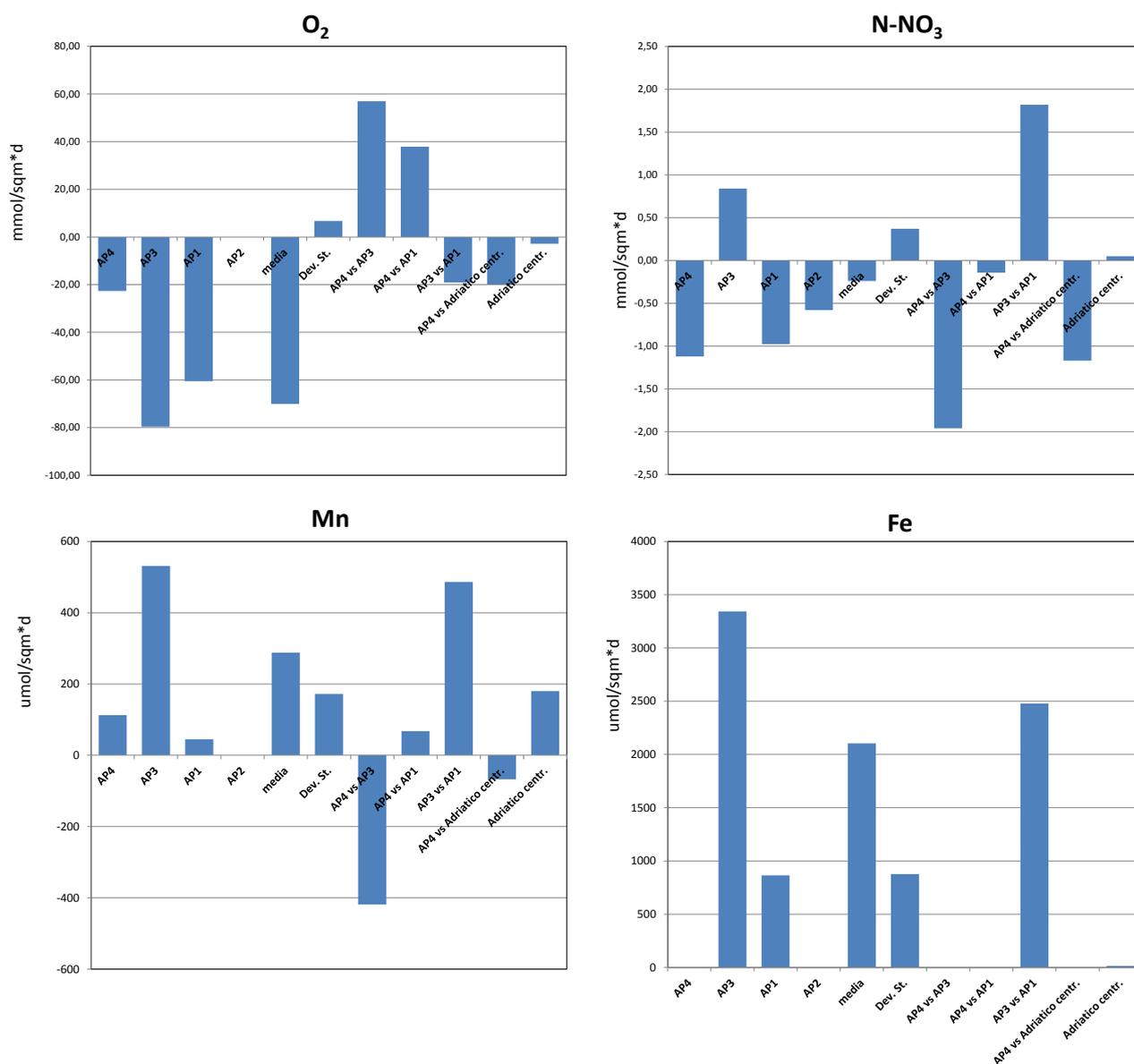
In ogni caso, i valori elevati di flusso negativo registrati nelle tre fasi rispetto ai sedimenti pelitici dell'Adriatico centrale indicano la presenza di una maggiore quantità di sostanza organica reattiva nei sedimenti del porto di Ancona. Ciò è dovuto alla maggiore di produzione di sostanza organica nella colonna d'acqua del porto sia per la presenza di quantità maggiori di nutrienti che per la minore idrodinamica.

Il flusso di nitrato registrato nell'ultimo monitoraggio ha presentato un valore negativo rispetto alla fase di escavo e ai sedimenti pelitici centro-adriatici (Tab. 5, fig. 5). In questo caso il flusso negativo, come per l'ossigeno, indica la presenza di sostanza organica in decomposizione sulla superficie del fondale e la scarsità dei processi di nitrificazione dovuti alla produzione di ammoniaca. Ciò conferma ulteriormente la scarsa presenza di sostanza organica reattiva in via di decomposizione rispetto alle fasi di escavo e di pre-survey.

Il valore di flusso di Mn è risultato positivo, vale a dire rilascio dal sedimento, ed è apparso nettamente inferiore rispetto al durante lavori e leggermente superiore al pre-survey. Ciò indica chiaramente che il Mn rilasciato dal sedimento, aumentato durante la fase di escavo per il rilascio del Mn disciolto presente nelle acque interstiziali, è tornato a livelli più bassi a sei mesi dalla fine dei lavori di escavo, confrontabili con il pre-survey e inferiori ai valori medi dei sedimenti pelitici dell'Adriatico centrale.

I valori di flusso del Ferro sono risultati indeterminabili in quanto non è stato possibile individuare un trend delle concentrazioni in aumento o in diminuzione durante la misura con la camera bentica. Ciò è dovuto al fatto che le concentrazioni di Fe, durante la misura, erano prossime al limite di rilevabilità. Tali valori di concentrazione e l'indeterminazione del flusso indicano che il Ferro rilasciato dal sedimento a sei mesi di distanza dalla fine dei lavori era inferiore a quello rilasciato durante la fase di escavo, nel pre-survey e anche a quello rilasciato dai sedimenti pelitici dell'Adriatico centrale. Ciò suggerisce che il Ferro che si era accumulato nel sedimento superficiale dell'area portuale davanti alla Banchina 26 è stato rimosso con il dragaggio e, quindi, che è affiorato un sedimento meno ricco di questo metallo.

Complessivamente, come per i prodotti di degradazione della sostanza organica, per gli accettori finali di elettroni si può affermare che il sedimento affiorante in seguito alla rimozione dei sedimenti superficiali è meno ricco di sostanza organica reattiva e quindi produce minori flussi di sostanze che potrebbero condizionare l'ecologia della colonna d'acqua.



**Fig. 5** - Grafici dei flussi degli accettori finali di elettroni misurati nelle stazioni AP4 (fase post-operam), AP3 (durante l'escavo), AP1 e AP2 (pre-survey) e nel Mar Adriatico centrale su fondali pelitici e vari confronti tra le stazioni/fasi di indagine e l'Adriatico centrale pelitico.

### **3.1.1.3 Metalli**

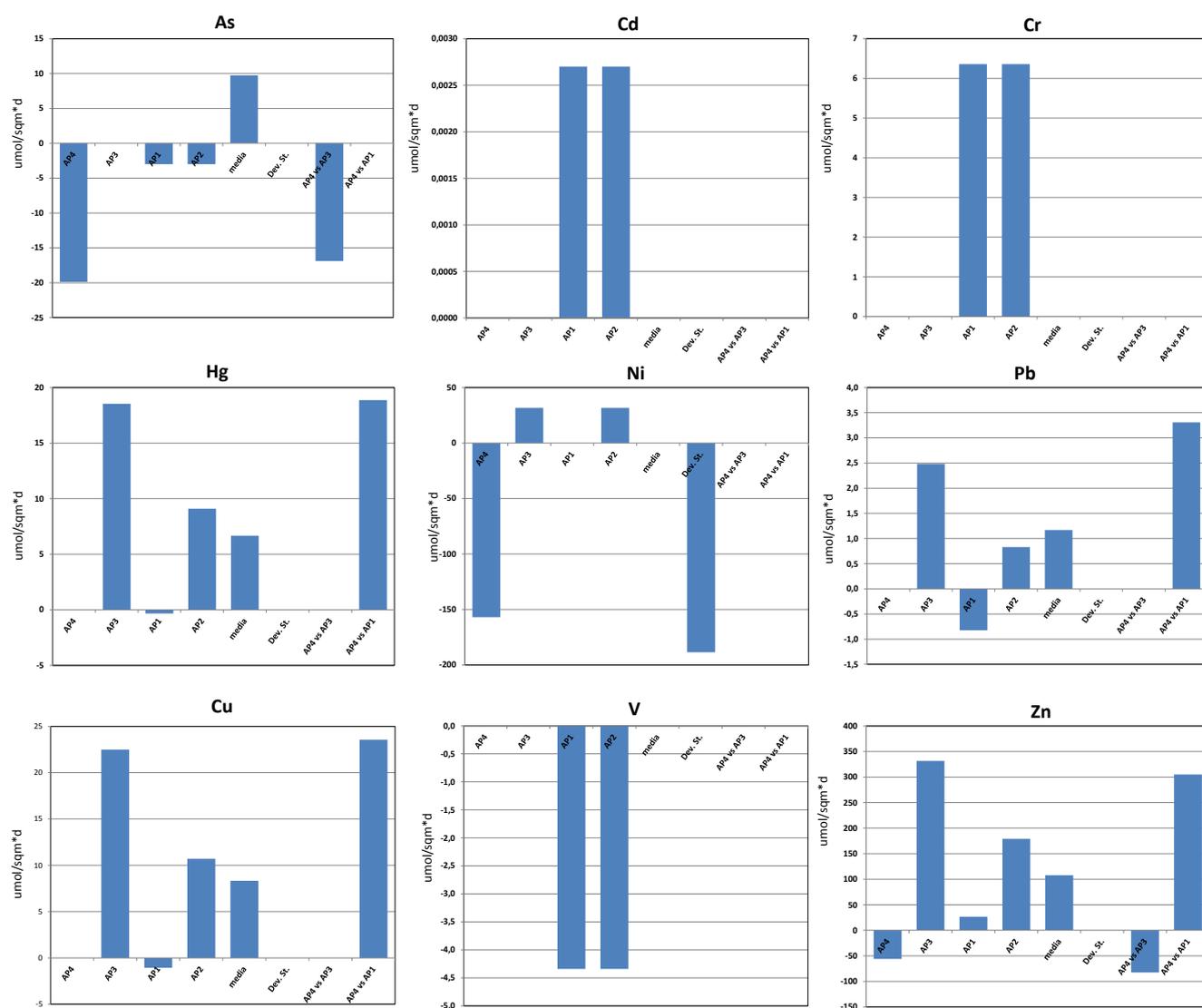
Per ciò che riguarda i flussi bentici dei metalli (Mn e Fe già descritti nel Cap. 3.1.1.2), nella fase post-operam sono stati riscontrati dei valori di flusso indeterminabili per Al, Cd, Cr, Hg, Pb, Cu e V (Tab. 5). Tali flussi sono risultati non rilevabili per la mancanza di un evidente trend delle concentrazioni in aumento o in diminuzione durante l'esperimento di misura all'interno della camera bentica. La mancanza di un trend per questi elementi è attribuibile principalmente alle bassissime concentrazioni che sono state riscontrate nella colonna d'acqua e che fanno quindi pensare a uno scarso se non nullo rilascio di questi elementi da parte del sedimento a una distanza temporale di circa sei mesi dalla fine dei lavori di escavo.

Valori inferiori al limite di rilevabilità erano presenti per Al, Cd, Cr, e V anche nella fase di escavo, suggerendo che questi elementi non erano presenti in misura apprezzabile o, comunque, non erano in una forma mobilizzabile, nei sedimenti sub-superficiali affioranti in seguito alla rimozione di quelli superficiali. In pratica, questi elementi non sono coinvolti in processi generati dall'escavazione dei sedimenti portuali.

Hg, Pb e Cu, invece, durante i lavori presentavano valori debolmente positivi di flusso, dovuti all'affioramento di sedimenti anossici. I valori indeterminabili dei flussi a distanza di sei mesi dalla fine dei lavori di escavo indicano che, anche per questi tre elementi, il sedimento affiorante non presentava dei rilasci rilevabili.

Al contrario, nel caso di Zn, As e Ni nella fase post-operam sono stati riscontrati degli assorbimenti da parte del sedimento (flussi negativi, Tab. 5 e fig. 6). Riguardo ad As, l'intenso assorbimento da parte del sedimento si contrappone al flusso indeterminabile nella fase di escavo e al debole assorbimento osservato nel pre-survey. Per quanto concerne Zn e Ni, l'assorbimento è contrario al rilascio osservato durante i lavori di escavo, mentre i valori del pre-survey erano debolmente positivi per Zn e inferiori al limite di rilevabilità per Ni.

Per questi tre elementi si può quindi affermare che, a sei mesi dalla fine dei lavori, era presente un generale processo di assorbimento dovuto all'affioramento di un sedimento più povero di questi elementi e quindi meno compromesso da un punto di vista ambientale. Il leggero assorbimento di questi tre elementi può essere anche imputato alla co-precipitazione con gli idrossidi e ossidi di Fe che è favorita in un sedimento povero di questi composti a seguito della rimozione del sedimento stesso.

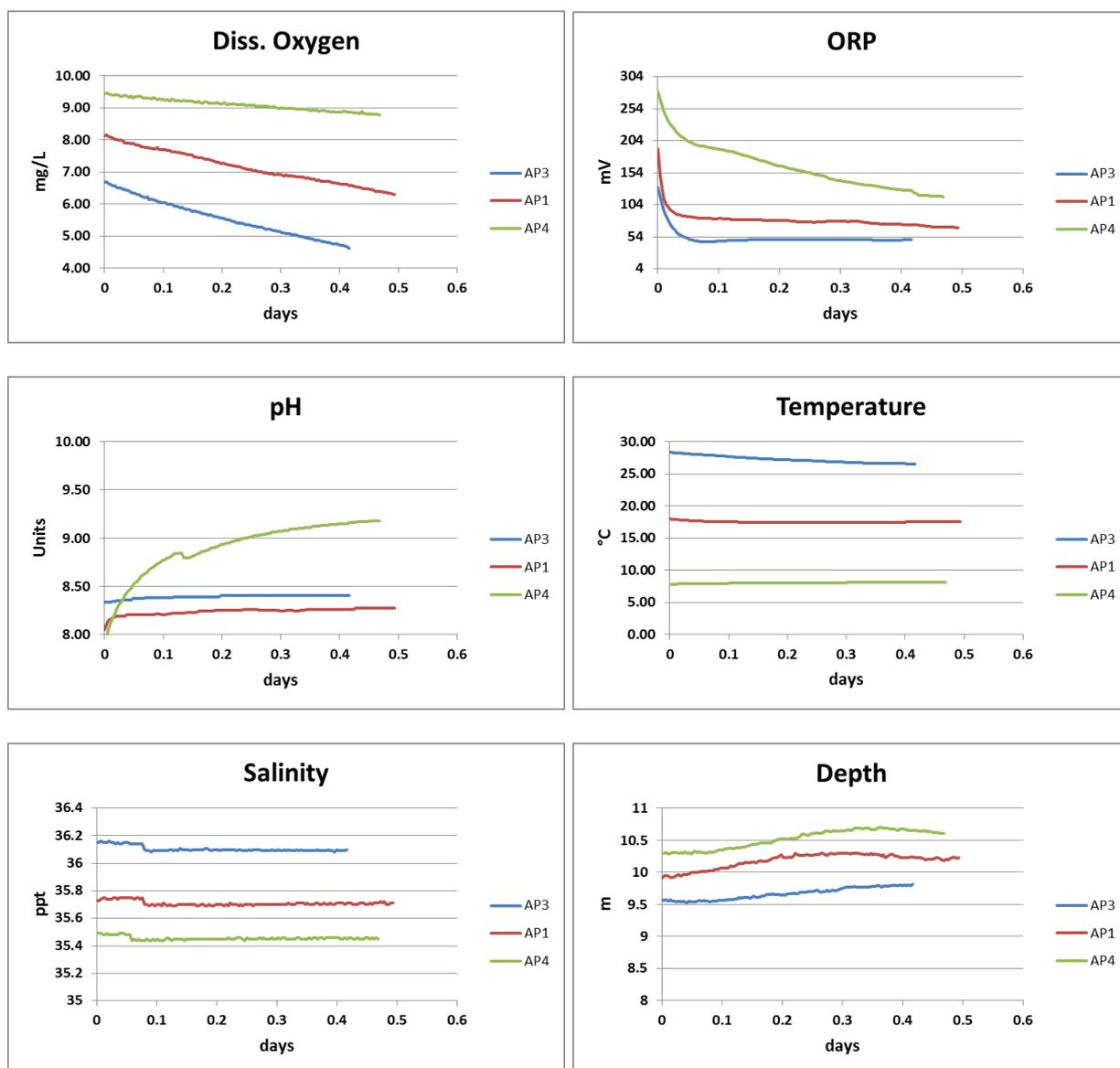


**Fig. 6** - Flussi dei metalli misurati nelle stazioni AP4 (fase post-operam), AP3 (durante l'escavo), AP1 e AP2 (pre-survey) e nel Mar Adriatico centrale su fondali pelitici e vari confronti tra le stazioni/fasi di indagine e l'Adriatico centrale pelitico. Non è riportato l'Alluminio in quanto non rilevabile in alcuna delle fasi di monitoraggio.

### 3.1.2. PARAMETRI CHIMICI E FISICI

I parametri chimici e fisici registrati dalla sonda multiparametrica nella camera bentica nella stazione AP4 (post-operam), confrontati con le stazioni AP3 (durante lavori di escavo) e AP1 (pre-survey; fig. 7) indicano, come già discusso nel paragrafo 3.1.1.2, un consumo di ossigeno disciolto dovuto alla degradazione, per via microbica, della sostanza organica presente nel sedimento superficiale. Tale consumo è risultato inferiore rispetto alle misure effettuate nelle due fasi di monitoraggio precedenti ma superiore rispetto ai flussi dei sedimenti pelitici centro-adriatici (Tab. 5; fig. 5). Come già spiegato precedentemente il flusso negativo meno intenso sul fondale, da cui è stato asportato il

sedimento superficiale, è attribuito alla rimozione della sostanza organica reattiva depositatasi nell'area portuale nei mesi e giorni precedenti alla rimozione. Infatti, la sostanza organica reattiva consuma quantità notevoli di ossigeno per la sua mineralizzazione per via microbica. Ciò significa che il sedimento esposto dopo il dragaggio era più povero di sostanza organica reattiva e quindi tendenzialmente meno alterato dalle dinamiche portuali.



**Fig. 7** - Parametri chimici e fisici registrati all'interno della camera bentica automatica nelle stazioni AP4 (fase post-operam), AP3 (fase di escavo) e AP1 (pre-survey).

Il potenziale di ossido-riduzione (ORP) registrato nel post-operam è risultato in un graduale decremento, dopo una diminuzione iniziale per l'assestamento dell'ambiente all'interno della camera bentica. Esso è apparso superiore rispetto sia alla misura

antecedente all'inizio dei lavori, sia a quella eseguita in fase di escavo. Ciò indica delle condizioni maggiormente ossiche nel post-operam dovute alla migliore ossigenazione delle acque del porto e quindi dell'acqua interna alla camera bentica. La maggiore ossidazione è imputata alla minore temperatura e maggiore idrodinamica invernale, periodo in cui è stato effettuato il campionamento.

Il pH ha mostrato un aumento, in parte dovuto a un *drift* dello strumento e in parte legato al rilascio del DIC dal sedimento e quindi all'incremento della sua concentrazione nella camera bentica. Lo scalino iniziale nel profilo del pH è invece dovuto all'immissione di un tracciante nella camera stessa.

Per quanto concerne la temperatura, essa è apparsa tendenzialmente costante, con valori assoluti inferiori alle misure precedenti per la diversa stagione di misura. Analogamente, anche la salinità è risultata costante con un gradino, legato all'immissione di un tracciante per la misura del volume della camera bentica, e inferiore rispetto alle misure delle due fasi precedenti a causa della minore evaporazione invernale.

Infine, sono state registrate delle variazioni di profondità dovute al ciclo di marea e una differenza rispetto al pre-survey e al durante lavori determinata dalla rimozione del fango superficiale.

## 3.2. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL DRAGAGGIO SU ORGANISMI SENTINELLA

### 3.2.1. BIOMARKER

In Tab. 6 sono riportati i valori ottenuti per i biomarker nei quattro campioni analizzati durante il pre-survey, la fase di escavo e il post-operam.

**Tab. 6** - Valori medi dei biomarker ( $\pm$ dev.st.) determinati nei mitili traslocati presso i siti di monitoraggio nelle tre fasi del monitoraggio.

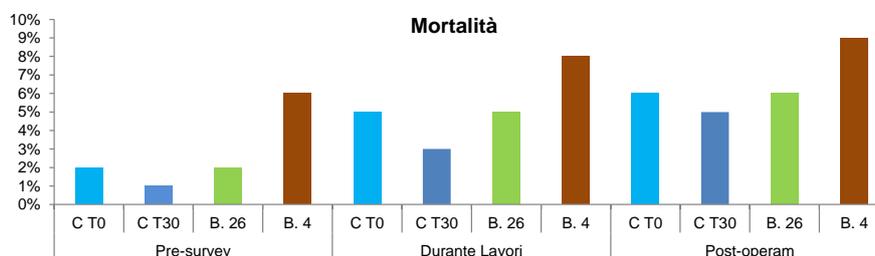
| PRE-SURVEY                               | Unità di misura                      | Controllo T0 gg   | Controllo T30 gg  | Banchina 26 T30 gg | Banchina 4 T30 gg |
|--|--------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Mortalità                                | n. individui %                       | 2                 | 1                 | 2                  | 6                 |
| Frequenza di micronuclei                 | frequenza %                          | 0,8 $\pm$ 0,1     | 0,8 $\pm$ 0,1     | 0,8 $\pm$ 0,1      | 1,9 $\pm$ 0,1     |
| Accumulo lisosmiale di Lipofuscine       | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 9106 $\pm$ 345    | 9230 $\pm$ 354    | 9500 $\pm$ 576     | 9514 $\pm$ 949    |
| Accumulo lisosmiale di Lipidi Neutri     | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 25299 $\pm$ 4750  | 27286 $\pm$ 2806  | 32400 $\pm$ 3002   | 34567 $\pm$ 2541  |
| Stabilità delle Membrane lisosomiali     | min                                  | 55,0 $\pm$ 5,5    | 46,0 $\pm$ 5,0    | 40,0 $\pm$ 4,5     | 30,0 $\pm$ 6,5    |
| Rapporto volume lisosomi/citoplasma      | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 0,22              | 0,20              | 0,19               | 0,19              |
| Attività delle enzima di catalasi        | mmol/min/mg di proteine              | 0,019 $\pm$ 0,002 | 0,021 $\pm$ 0,001 | 0,023 $\pm$ 0,002  | 0,027 $\pm$ 0,004 |
| Livelli di metallotioneine               | $\mu$ g MT/g                         | 65,80 $\pm$ 10,57 | 71,23 $\pm$ 9,15  | 80,71 $\pm$ 7,99   | 91,3 $\pm$ 11,0   |
| Espressione genica metallotioneine MT 10 | Induzione                            | 1,00 $\pm$ 0,10   | 0,85 $\pm$ 0,09   | 0,99 $\pm$ 0,10    | 1,00 $\pm$ 0,10   |
| Espressione genica metallotioneine MT 20 | Induzione                            | 1,00 $\pm$ 0,10   | 1,60 $\pm$ 0,16   | 2,60 $\pm$ 0,25    | 3,20 $\pm$ 0,31   |
| Livelli di composti aromatici            | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 463 $\pm$ 74      | 512 $\pm$ 74      | 1031 $\pm$ 56      | 1043 $\pm$ 72     |

| DURANTE LAVORI DI ESCAVO                 | Unità di misura                      | Controllo T0 gg   | Controllo T30 gg  | Banchina 26 T30 gg | Banchina 4 T30 gg |
|--|--------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Mortalità                                | n. individui %                       | 5                 | 3                 | 5                  | 8                 |
| Frequenza di micronuclei                 | frequenza %                          | 0,9 $\pm$ 0,5     | 1,0 $\pm$ 0,3     | 1,5 $\pm$ 0,3      | 2,2 $\pm$ 0,5     |
| Accumulo lisosmiale di Lipofuscine       | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 8831 $\pm$ 443    | 8943 $\pm$ 837    | 9932 $\pm$ 720     | 12393 $\pm$ 928   |
| Accumulo lisosmiale di Lipidi Neutri     | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 23549 $\pm$ 4230  | 24324 $\pm$ 2037  | 29038 $\pm$ 1932   | 30261 $\pm$ 2438  |
| Stabilità delle Membrane lisosomiali     | min                                  | 45,0 $\pm$ 5,0    | 40,5 $\pm$ 5,5    | 34,0 $\pm$ 2,5     | 25,5 $\pm$ 2,5    |
| Rapporto volume lisosomi/citoplasma      | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 0,21 $\pm$ 0,02   | 0,20 $\pm$ 0,02   | 0,16 $\pm$ 0,02    | 0,17 $\pm$ 0,02   |
| Attività delle enzima di catalasi        | mmol/min/mg di proteine              | 0,024 $\pm$ 0,005 | 0,026 $\pm$ 0,006 | 0,030 $\pm$ 0,005  | 0,035 $\pm$ 0,005 |
| Livelli di metallotioneine               | $\mu$ g MT/g                         | 88,87 $\pm$ 13,50 | 80,55 $\pm$ 8,35  | 116,71 $\pm$ 12,99 | 121,90 $\pm$ 8,50 |
| Espressione genica metallotioneine MT 10 | Induzione                            | 1,00 $\pm$ 0,10   | 0,75 $\pm$ 0,07   | 1,45 $\pm$ 0,14    | 2,00 $\pm$ 0,20   |
| Espressione genica metallotioneine MT 20 | Induzione                            | 1,00 $\pm$ 0,10   | 1,60 $\pm$ 0,16   | 3,50 $\pm$ 0,35    | 4,50 $\pm$ 0,45   |
| Livelli di composti aromatici            | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 335 $\pm$ 65      | 260 $\pm$ 55      | 601 $\pm$ 73       | 721 $\pm$ 45      |

Tab. 6 - Continuo.

| POST-OPERAM                              | Unità di misura                      | Controllo T0 gg | Controllo T30 gg | Banchina 26 T30 gg | Banchina 4 T30 gg |
|--|--------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------|-------------------|
| Mortalità                                | n. individui %                       | 6               | 5                | 6                  | 9                 |
| Frequenza di micronuclei                 | frequenza ‰                          | 1,0±0,5         | 1,5±0,3          | 1,2±0,3            | 2,5±0,5           |
| Accumulo lisosmiale di Lipofuscine       | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 8042±250        | 8392±332         | 8032±630           | 11849±548         |
| Accumulo lisosmiale di Lipidi Neutri     | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 20418±3330      | 21748±1957       | 21830±2812         | 27821±2028        |
| Stabilità delle Membrane lisosomiali     | min                                  | 52,0±3,5        | 55,5±5,0         | 46,0±2,5           | 30,5±2,5          |
| Rapporto volume lisosomi/citoplasma      | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 0,21            | 0,20             | 0,18               | 0,17              |
| Attività delle enzima di catalasi        | mmol/min/mg di proteine              | 0,028±0,005     | 0,030±0,004      | 0,032±0,004        | 0,037±0,004       |
| Livelli di metallotioneine               | µg MT/g                              | 80,80±15,70     | 78,32±8,31       | 122,52±14,33       | 101,23±11,30      |
| Espressione genica metallotioneine MT 10 | Induzione                            | 1,00±0,10       | 0,95±0,10        | 1,22±0,12          | 1,95±0,20         |
| Espressione genica metallotioneine MT 20 | Induzione                            | 1,00±0,10       | 1,60±0,16        | 2,30±0,23          | 4,00±0,40         |
| Livelli di composti aromatici            | densità ottica / pixels <sup>2</sup> | 211±31          | 323±45           | 272±81             | 611±78            |

**Mortalità** - Dei mitili prelevati presso i siti investigati nel post-operam, solo quelli traslocati per 30 gg presso la Banchina 4 (9%) hanno evidenziato un modesto aumento della mortalità rispetto a tutti gli altri campioni analizzati, analogamente a quanto osservato nelle due fasi precedenti (fig. 8). Tali risultati portano a ipotizzare in generale la presenza di una risposta biologica ristretta a livello sub letale potenzialmente più marcata presso gli organismi trapiantati presso la Banchina 4.



| PRE-SURVEY      | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

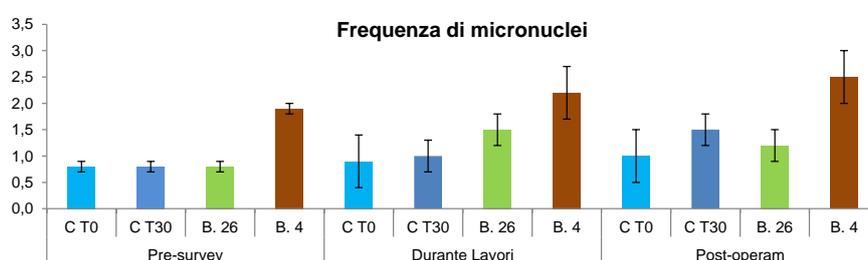
| DURANTE LAVORI  | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| POST-OPERAM     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

Test Kaplann-Meier, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 8** - Distribuzione dei valori di mortalità rilevati negli esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

**Micronuclei** - Nella fase di post-operam la distribuzione di frequenze dei micronuclei è risultata significativamente superiore nei bivalvi traslocati per 30 gg presso la Banchina 4 rispetto agli altri tre siti, analogamente a quanto osservato nel pre-survey (fig. 9). Nel durante lavori, invece, era stato registrato un aumento significativo nella Banchina 4 solo rispetto ai controlli T0 e T30. Le frequenze osservate nell'intero periodo appaiono contenute rispetto a quanto riportato su aree simili interessate da fenomeni d'inquinamento più marcati (Bolognesi *et al.*, 1996; 2004; Daillanis *et al.*, 2003).



| PRE-SURVEY      | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| DURANTE LAVORI  | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| POST-OPERAM     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

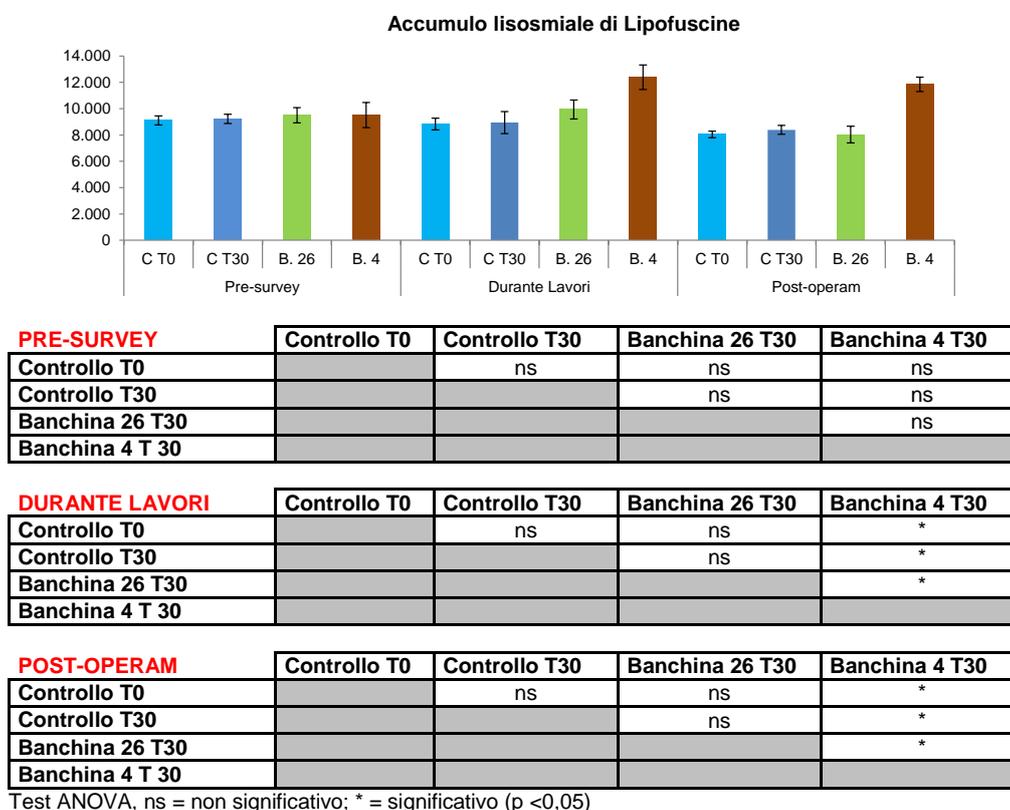
Test ANOVA, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 9** - Distribuzione della frequenza media di micronuclei riscontrati nell'emolinfia di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

**Valutazione del contenuto di lipofuscine** - I livelli di lipofuscine rilevati nell'ultimo survey presso la Banchina 4 sono risultati significativamente superiori a quelli degli altri tre siti come già nella fase di escavo (fig. 10). Nel pre-survey era stata invece registrata una situazione omogenea.

Nel complesso, sia la distribuzione che i livelli medi assunti dal parametro nelle ultime due fasi di monitoraggio portano a ipotizzare alcune criticità correlabili alla presenza di stress perossidativo a carico degli organismi trapiantati presso la Banchina 4. Se confrontati con

quanto riportato in letteratura, i livelli ottenuti sono comunque inferiori a quelli evidenziati nel corso di precedenti indagini in aree costiere dell'Adriatico settentrionale (Petrovic et al., 2004).

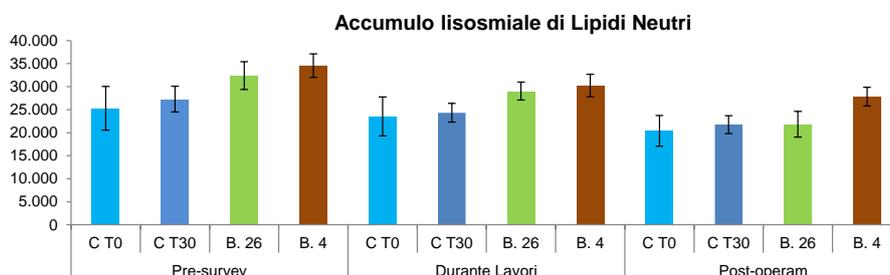


**Fig. 10** - Valori medi di accumulo di lipofuscine espressi in unità di densità ottica associate ai lisosomi della ghiandola digestiva di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B = banchina.

**Valutazione del contenuto di lipidi neutri** - Anche i livelli di lipidi neutri ottenuti nell'ultimo survey sono risultati significativamente superiori presso la Banchina 4 rispetto agli altri tre siti (fig. 11). Diversamente, nel pre-survey erano state riscontrate differenze significative tra la Banchina 4 e i controlli T0 e T30, mentre nel durante lavori entrambe le banchine avevano presentato un contenuto di lipidi neutri statisticamente superiore al controllo T30.

Sulla base delle risposte biologiche osservate si evidenziano un miglioramento del tempo della condizione ambientale dell'area interessata all'escavo e la permanenza di una modesta alterazione biologica nei mitili trapiantati nella Banchina 4. Tale alterazione è rappresentata dalla sintesi dei lipidi nell'organismo ed è correlata alla presenza di sostanze xenobiotiche biodisponibili, quali i composti organici, che sono sostanze capaci di alterare il normale metabolismo lipidico di un organismo marino. In ogni caso,

confrontando i risultati ottenuti con la letteratura le risposte ottenute si possono considerare moderate e assimilabili ad organismi soggetti a una bassa pressione antropica (Petrovic *et al.*, 2004).



| PRE-SURVEY      | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| DURANTE LAVORI  | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

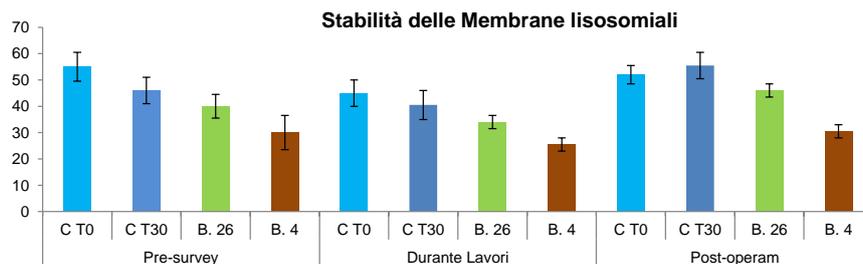
  

| POST-OPERAM     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

Test ANOVA, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 11** - Valori medi di accumulo di lipidi neutri espressi in unità di densità ottica associati ai lisosomi della ghiandola digestiva di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

**Stabilità delle membrane lisosomiali** - Nel monitoraggio successivo ai lavori di dragaggio la stabilità delle membrane lisosomiali registrata nei mitili trapiantati presso la Banchina 4 è risultata significativamente inferiore a quella degli altri tre siti. Anche presso la Banchina 26 i tempi sono risultati statisticamente inferiori rispetto al controllo T30 (fig. 12). Viene pertanto confermato il leggero e costante stato di stress nei bivalvi prelevati dalle due banchine già osservato sin dal pre-survey. Tuttavia, nel complesso i tempi di destabilizzazione registrati nell'intero periodo sono risultati confrontabili con quelli riscontrati su organismi in buono stato di salute o soggetti a una bassa pressione antropica (Petrovic *et al.*, 2004, Donnini *et al.*, 2007).



| PRE-SURVEY      | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| DURANTE LAVORI  | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| POST-OPERAM     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

Test ANOVA, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 12** - Valori medi dei tempi di destabilizzazione espressi in min ed associati alla fragilità dei lisosomi della ghiandola digestiva di esemplari di *M. galloprovincialis* analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

**Volume lisosomi/citoplasma** - Nel periodo di monitoraggio successivo alla fase di escavo i mitili hanno presentato valori del rapporto volume lisosmi/citoplasma omogeneamente distribuiti in tutti siti (fig. 13), dimostrando l'assenza di uno stato di alterazione al comparto lisosomiale, analogamente al pre-survey. Solo durante i lavori di dragaggio era stato registrato un rapporto significativamente inferiore nella Banchina 26 rispetto al controllo T0 che aveva suggerito una lieve alterazione.

**Stress ossidativo: determinazione dell'attività di catalasi** - L'attività di catalasi misurata nel post-operam non ha presentato differenze statisticamente significative tra i quattro campioni (fig. 14). Ciò conferma la scarsa attivazione dei meccanismi cellulari di protezione contro l'ossidazione già osservata durante le attività di dragaggio. Nel pre-survey, invece, in entrambe le banchine i valori erano risultati significativamente superiori a uno o entrambi i controlli.

Nel complesso, sulla base anche della letteratura disponibile, è possibile escludere una qualche forma di stress nei mitili studiati. I livelli di catalasi osservati appaiono infatti contenuti e assimilabili ad organismi prelevati in aree marino-costiere soggette a un medio-basso impatto antropico (Petrovic *et al.*, 2004).

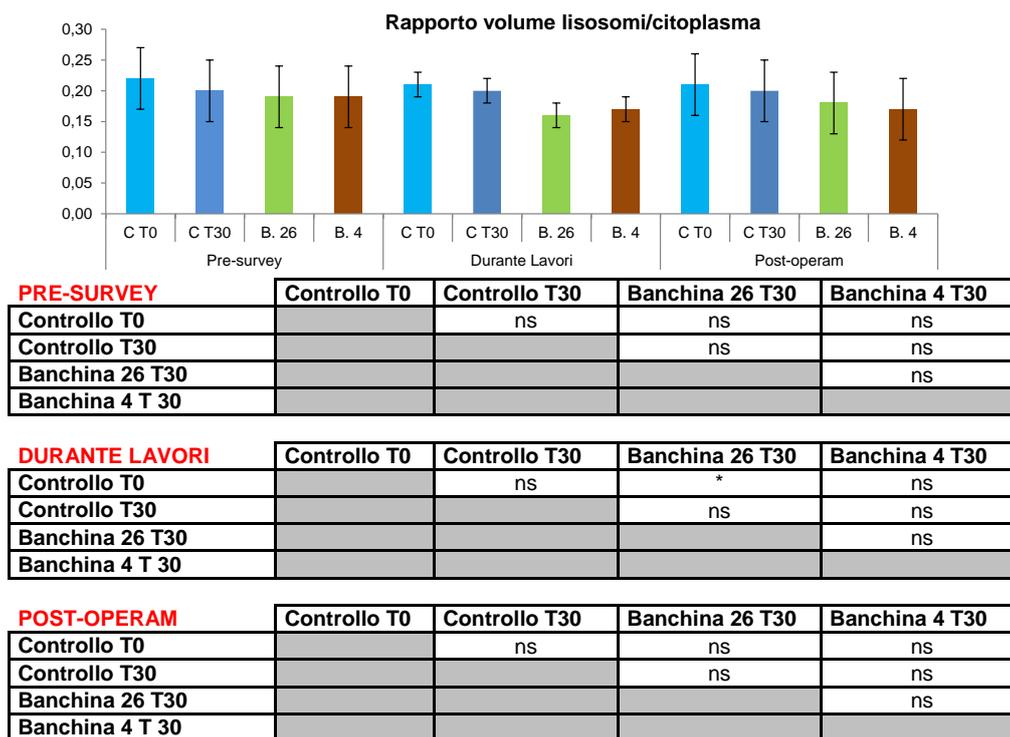


Fig. 13 - Distribuzione dei valori medi dei rapporti lisosomi / citoplasma nei mitili analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

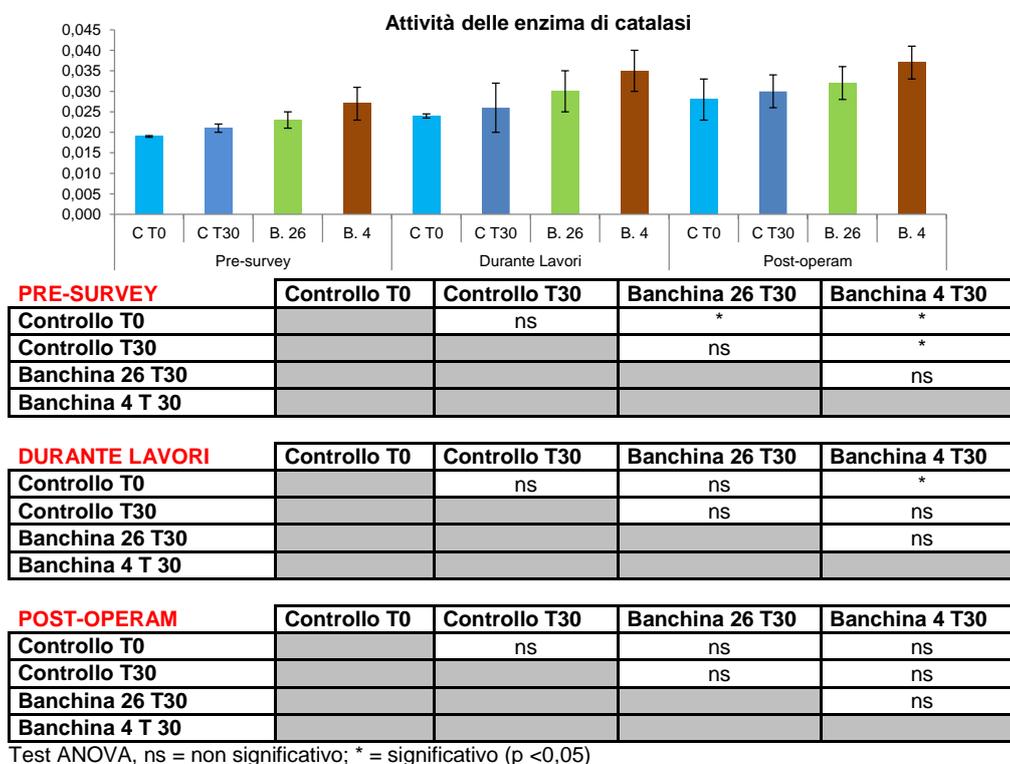
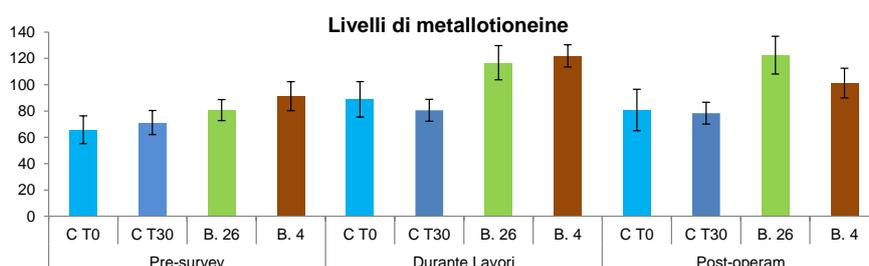


Fig. 14 - Valori medi dell'attività di catalasi (mmoli di catalasi/min. mg<sup>-1</sup> proteine totali estratte) associata alla ghiandola digestiva di mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

**Livelli di metallotioneine** - Gli organismi prelevati nell'ultimo survey dalle due banchine hanno evidenziato livelli di metallotioneine significativamente superiori al controllo T30; inoltre, nella Banchina 26 è stato riscontrato anche un aumento significativo rispetto al controllo T0 (fig. 15). Tale risposta biologica è associata alla presenza di metalli pesanti nei mitili traslocati presso entrambe le aree portuali investigate ed era già stata osservata anche durante la fase di escavo e, per quanto concerne le Banchina 4, nel pre-survey. Quanto rilevato rimane comunque simile a quanto evidenziato in mitili soggetti a una bassa pressione antropica (Petrovic *et al.*, 2004).



| PRE-SURVEY      | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T30  |              |               |                 |                |

| DURANTE LAVORI  | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | ns              | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T30  |              |               |                 |                |

| POST-OPERAM     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | ns            | *               | ns             |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T30  |              |               |                 |                |

Test Mann – Whitney, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 15** - Concentrazione di metallotioneine rilevate nella ghiandola digestiva di mitilo (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

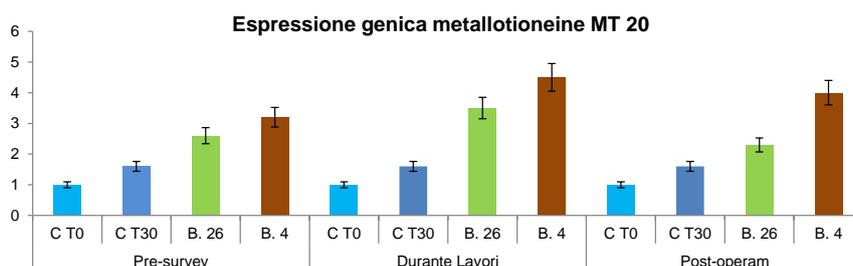
**Espressione genica metallotioneine (qPCR -Polymerase Chain Reaction)** - I risultati relativi all'ultimo campionamento riguardanti l'induzione del MT20 sono risultati tutti statisticamente differenti tra loro e tendono a evidenziare una significativa, seppur moderata, induzione del MT20 nei siti di traslocazione all'interno del porto rispetto ad entrambi i controlli (fig. 16). Anche nel pre-survey e durante lavori i valori erano risultati significativamente differenti eccetto quelli relativi alle due banchine.

Diversamente, l'MT10 appare scarsamente stimolato in tutti i siti eccetto la Banchina 4 che ha mostrato un valore significativamente superiore agli altri tre (fig. 17). Nessuna

differenza significativa era stata invece riscontrata nel pre-survey, mentre durante il dragaggio l'MT10 era apparso stimolato nella Banchina 26 rispetto ai controlli e nella Banchina 4 rispetto a tutti gli altri siti.

L'espressione di quest'ultimo gene risulta correlata all'omeostasi di cationi tipicamente essenziali allo sviluppo e alla corretta funzionalità cellulare nel mitilo quali Ca, Mg, Zn, Fe e, in piccole quantità, Cu. Al contrario, il gene MT20 risulta indotto in presenza di cationi non essenziali quali As, Be, Cd, Cs, Hg e Pb.

I risultati osservati applicando la tecnica della PCR quantitativa tendono a confermare la risposta biologica associata a una moderata presenza biodisponibile di cationi metallici. Confrontando i risultati ottenuti nel pre-survey e durante i lavori si nota una leggera stimolazione dei meccanismi di protezione alla presenza di metalli non essenziali. La risposta risulta per lo più moderata e non tende a compromettere la salute degli organismi analizzati. I livelli d'induzione osservati all'interno del porto appaiono in tutti i casi simili a quelli osservati su mitili prelevati presso aree marine-costiere interessate da diverse attività tra cui industriali, agricole e urbane (Banni *et al.*, 2007).



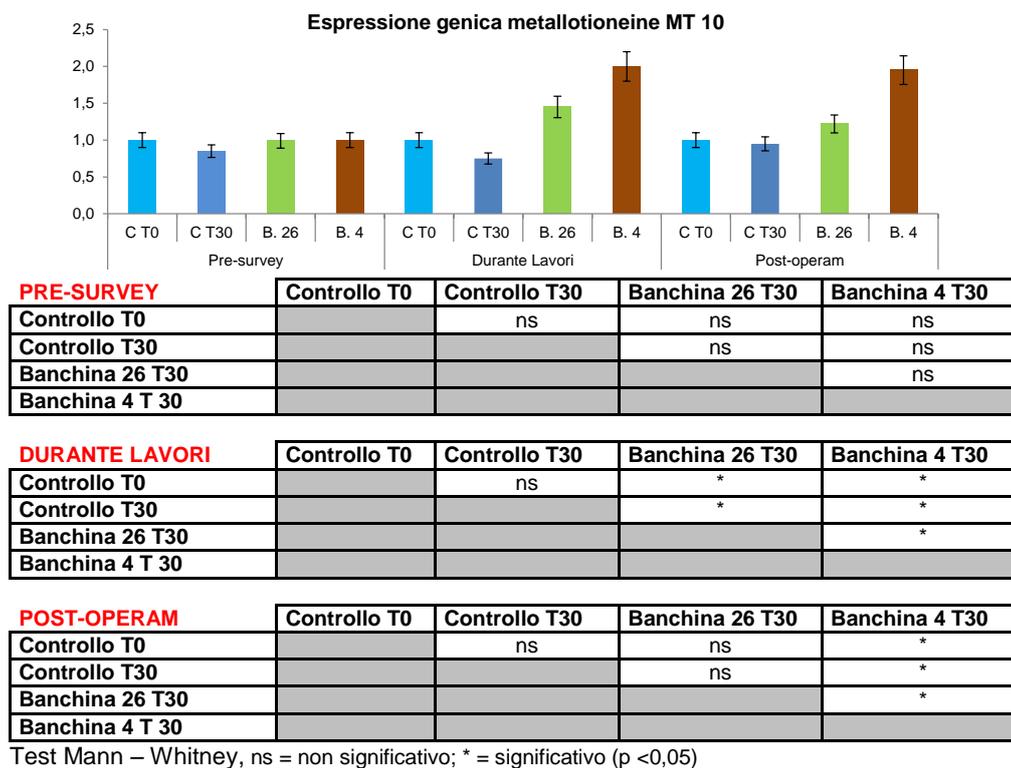
| PRE-SURVEY      | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| DURANTE LAVORI  | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

| POST-OPERAM     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| Controllo T0    |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30   |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30 |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30 |              |               |                 |                |

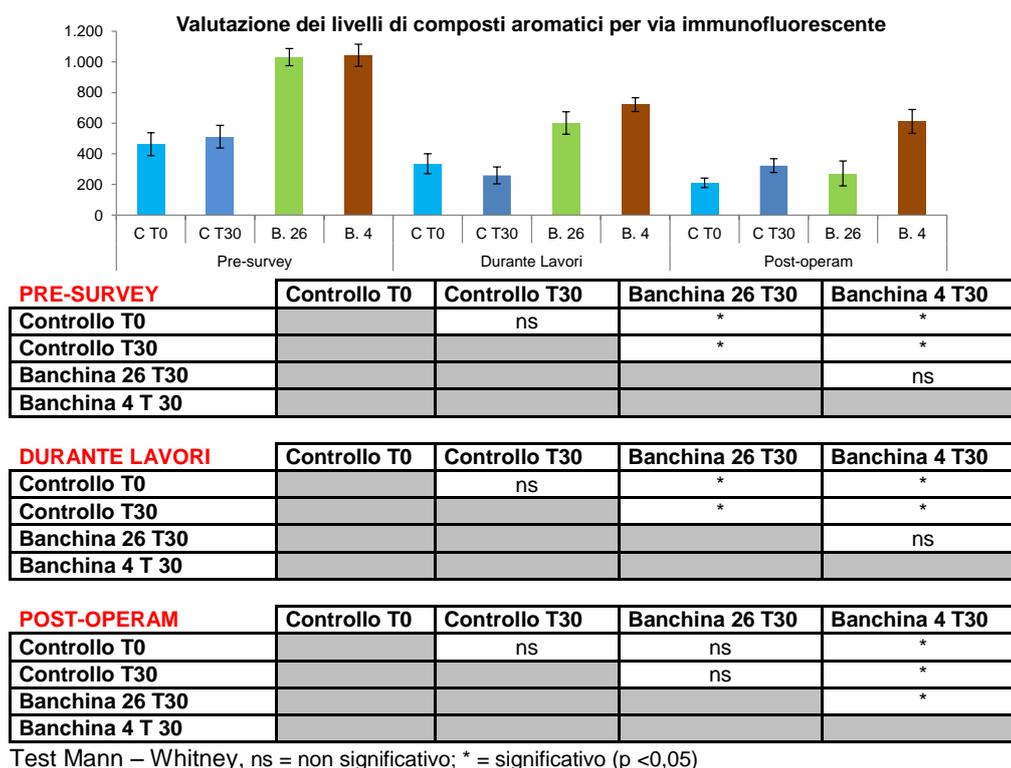
Test Mann – Whitney, ns = non significativo; \* = significativo (p <0,05)

**Fig. 16** - Livelli di induzione MT<sub>20</sub> osservati nella ghiandola digestiva di mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.



**Fig. 17** - Livelli di induzione MT<sub>10</sub> osservati nella ghiandola digestiva di mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

**Valutazione dei livelli di composti aromatici per via immunofluorescente** - Diversamente da quanto osservato nel pre-survey e durante il dragaggio, nel post lavori la distribuzione dei livelli di composti aromatici ha evidenziato un aumento significativo della risposta associata alla presenza di tali sostanze solo nei mitili posizionati presso la Banchina 4 rispetto agli altri tre siti (fig. 19). Nelle due fasi precedenti in entrambe le banchine erano stati rilevati valori significativamente superiori rispetto a quelli dei controlli. Ciò porta ad evidenziare un miglioramento del tempo dell'area interessata dai lavori.



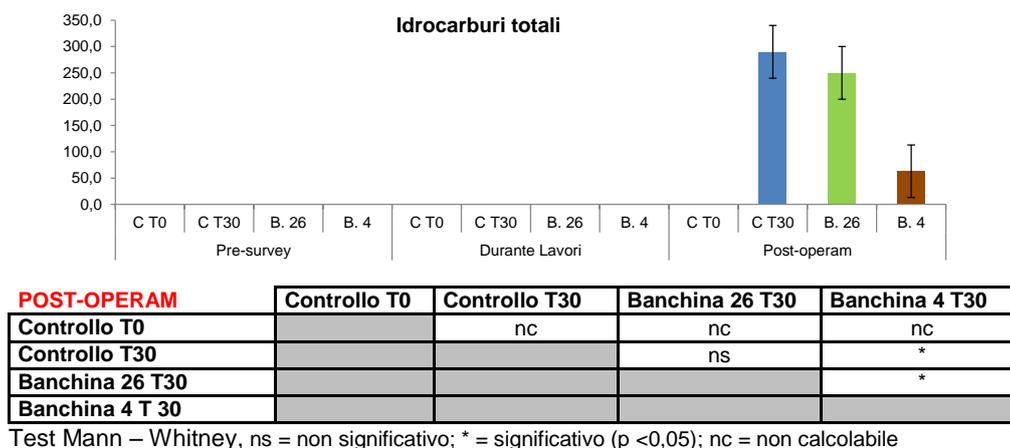
**Fig. 19** - Livelli di composti aromatici per via immunofluorescente osservati nei mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina.

### 3.2.2. BIOACCUMULO DI IDROCARBURI TOTALI NEL SEGMENTO C5-C40, IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI E METALLI PESANTI

**Idrocarburi totali** - Diversamente da quanto osservato nel corso del pre-survey e durante le operazioni di dragaggio, quando i livelli erano apparsi inferiori al limite di rilevabilità strumentale (50 µg/kg p.s.), nel post-operam, eccetto il controllo T0, gli Idrocarburi totali sono stati rilevati con valori compresi tra 63±50 µg/Kg (Banchina 4) e 290±50 µg/Kg (Controllo T30 gg; Tab. 7; fig. 20). I livelli relativi al controllo T30 e alla Banchina 26 sono risultati simili e statisticamente superiori a quello della Banchina 4. Tutti appaiono comunque confrontabili a quelli registrati presso aree sottoposte a un moderato impatto antropico (Fowler *et al.*, 1993; Muxika *et al.*, 2005; Allan *et al.*, 2012).

**Tab. 7** - Distribuzione degli Idrocarburi Totali C10-C40 (± dev. st.) rilevati nei tessuti di mitili trapiantati presso le due aree interne al porto di Ancona e presso un sito di controllo nelle tre fasi del monitoraggio. Valori espressi in µg/kg p.s., LOD = limite di quantificazione strumentale.

|                | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
|----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| PRE-SURVEY     | < LOD        | < LOD         | < LOD           | < LOD          |
| DURANTE LAVORI | < LOD        | < LOD         | < LOD           | < LOD          |
| POST-OPERAM    | < LOD        | 290,0±50,0    | 250,0±50,0      | 63,0±50,0      |



**Fig. 20** - Livelli degli Idrocarburi totali C10 - C40 osservati nei mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell’immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina. Valori espressi in µg/kg p.s. (± dev. st.). nc = non calcolabile.

**Idrocarburi Policiclici Aromatici** - I livelli di IPA determinati nei tessuti dei bivalvi prelevati nel periodo successivo alle fasi di dragaggio sono risultati compresi tra 11,4±2,5 µg/kg e 26,2±4,5 µg/kg (rispettivamente Banchina 26 e Banchina 4; Tab. 8; fig. 21). Nel sito di controllo al tempo T0 i livelli sono apparsi inferiori al limite di rilevabilità strumentale (2 µg/kg), analogamente a quanto riscontrato ovunque sia nel pre-survey che nel durante lavori. Dal confronto statistico sono emerse differenze significative tra la Banchina 4 e gli altri due siti.

Solo quattro IPA (naftalene, fluorene, fenantrene e pirene) sono stati rilevati in uno o più siti. Il composto aromatico maggiormente presente ovunque è stato il fenantrene, seguito dal fluorene presso il controllo T30 e dal naftalene presso le due aree portuali. In tutti i casi si tratta di composti associati alla combustione di idrocarburi e quindi correlati alla presenza di unità navali operanti nella zona.

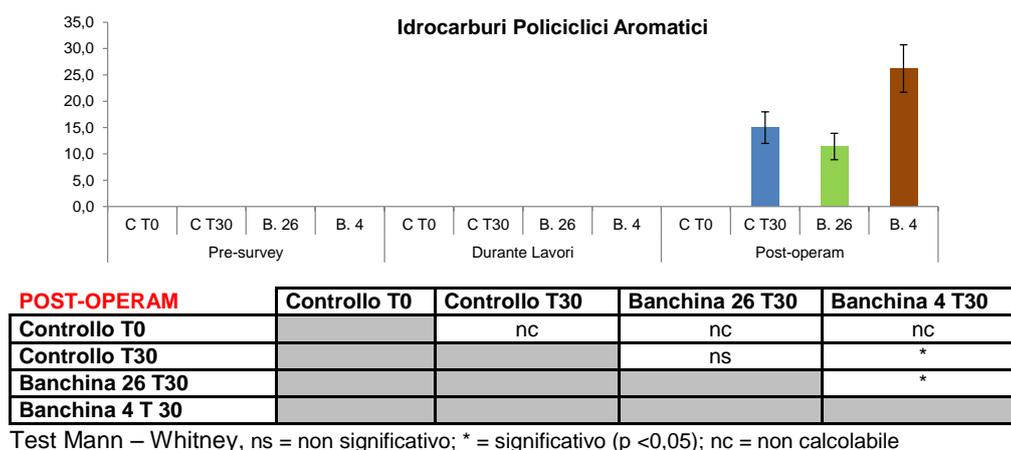
Rispetto alle precedenti fasi di studio si evidenzia dunque un lieve incremento dell’accumulo per i composti sopra elencati, ma i livelli osservati sono inferiori a quelli registrati in studi simili presso aree marino-costiere (Carro *et al.*, 2006; Lima *et al.*, 2007).

**Tab. 8** - Distribuzione di IPA rilevati nei tessuti di mitili (media±dev.st.) trapiantati presso alcune aree interne al porto di Ancona e presso un sito di controllo nelle tre fasi di dragaggio. < LOD = inferiore al limite di rilevabilità strumentale (<2 µg/kg), nc= non calcolabile.

| <b>PRE-SURVEY</b>   | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Naftalene           | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Acenaftene          | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Acenaftilene        | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fluorene            | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fenantrene          | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Antracene           | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fluorantene         | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Pirene              | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[a]Antracene       | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Crisene             | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[b]Fluorantene     | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[k]Fluorantene     | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[a]Pirene          | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| DiB[a,h]A           | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| BghiPerilene        | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Indeno [c,d] pirene | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |

| <b>DURANTE LAVORI</b> | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Naftalene             | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Acenaftene            | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Acenaftilene          | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fluorene              | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fenantrene            | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Antracene             | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fluorantene           | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Pirene                | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[a]Antracene         | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Crisene               | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[b]Fluorantene       | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[k]Fluorantene       | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[a]Pirene            | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| DiB[a,h]A             | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| BghiPerilene          | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Indeno [c,d] pirene   | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |

| <b>POST-OPERAM</b>  | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Naftalene           | < LOD               | < LOD                | 2,8±2,0                | 4,9±2,0               |
| Acenaftene          | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Acenaftilene        | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fluorene            | < LOD               | 4,7±2,0              | < LOD                  | 4,0±2,0               |
| Fenantrene          | < LOD               | 10,8±2,0             | 6,2±2,0                | 11,2±2,0              |
| Antracene           | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Fluorantene         | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | 2,6±2,0               |
| Pirene              | < LOD               | < LOD                | 2,3±2,0                | 3,2±2,0               |
| B[a]Antracene       | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Crisene             | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[b]Fluorantene     | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[k]Fluorantene     | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| B[a]Pirene          | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| DiB[a,h]A           | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| BghiPerilene        | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Indeno [c,d] pirene | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| <b>Σ IPA</b>        |                     | <b>15,5±3,0</b>      | <b>11,4±2,5</b>        | <b>26,2±4,5</b>       |



**Fig. 20** - Livelli degli Idrocarburi totali C10 - C40 osservati nei mitili (*M. galloprovincialis*) analizzati prima dell'immersione delle gabbie (controllo T0) e in quelli prelevati dopo 30 gg durante le tre fasi del monitoraggio. C = controllo; B: = banchina. Valori espressi in µg/kg p.s. (± dev. st.).

**Metalli** - In fig. 21 e in Tab. 10 sono riportate le concentrazioni dei metalli pesanti rilevate nei tre monitoraggi, mentre in Tab. 11 sono indicati i risultati dei test statistici.

Nel pre-survey e nel post lavori l'elemento metallico maggiormente accumulato è stato l'Alluminio che, rimasto abbastanza stabile presso il controllo T0, negli altri tre siti ha presentato diverse oscillazioni. Nell'ultimo campionamento sono state evidenziate differenze statisticamente significative tra tutti i siti, con le concentrazioni massima e minima rispettivamente nel controllo T0 e nella Banchina 4.

Il secondo elemento maggiormente presente negli organismi analizzati è risultato lo Zinco, le cui concentrazioni al controllo T30 e nella Banchina 26 nel durante lavori di escavo hanno superato quelle dell'Alluminio. Lo Zinco ha mostrato differenze significative tra i siti in tutti i monitoraggi. Solo durante i lavori di escavo la massima concentrazione era stata rilevata nella Banchina 26. Nell'ultimo survey quest'ultima è risultata omogenea con il controllo T0, presentando entrambi i siti il massimo contenuto di Zinco ( $17,0 \pm 0,05$  mg/kg); il minimo è stato rilevato nei mitili del controllo T30 ( $11,0 \pm 0,05$  mg/kg).

Anche il Rame ha presentato in ciascun monitoraggio concentrazioni statisticamente quasi sempre differenti. Solo nel pre-survey, infatti, era stata riscontrata un'omogeneità tra il controllo T0 e le due banchine del porto e nel durante lavori tra la Banchina 4 e il controllo T0. Nel post-operam tutti i siti hanno presentato contenuti di Rame significativamente diversi, con il massimo presso la Banchina 26 e il minimo al controllo T0.

Anche per l'Arsenico sono state riscontrate concentrazioni spesso differenti tra i siti monitorati. Nel pre-survey i mitili traslocati nelle due banchine avevano mostrato contenuti

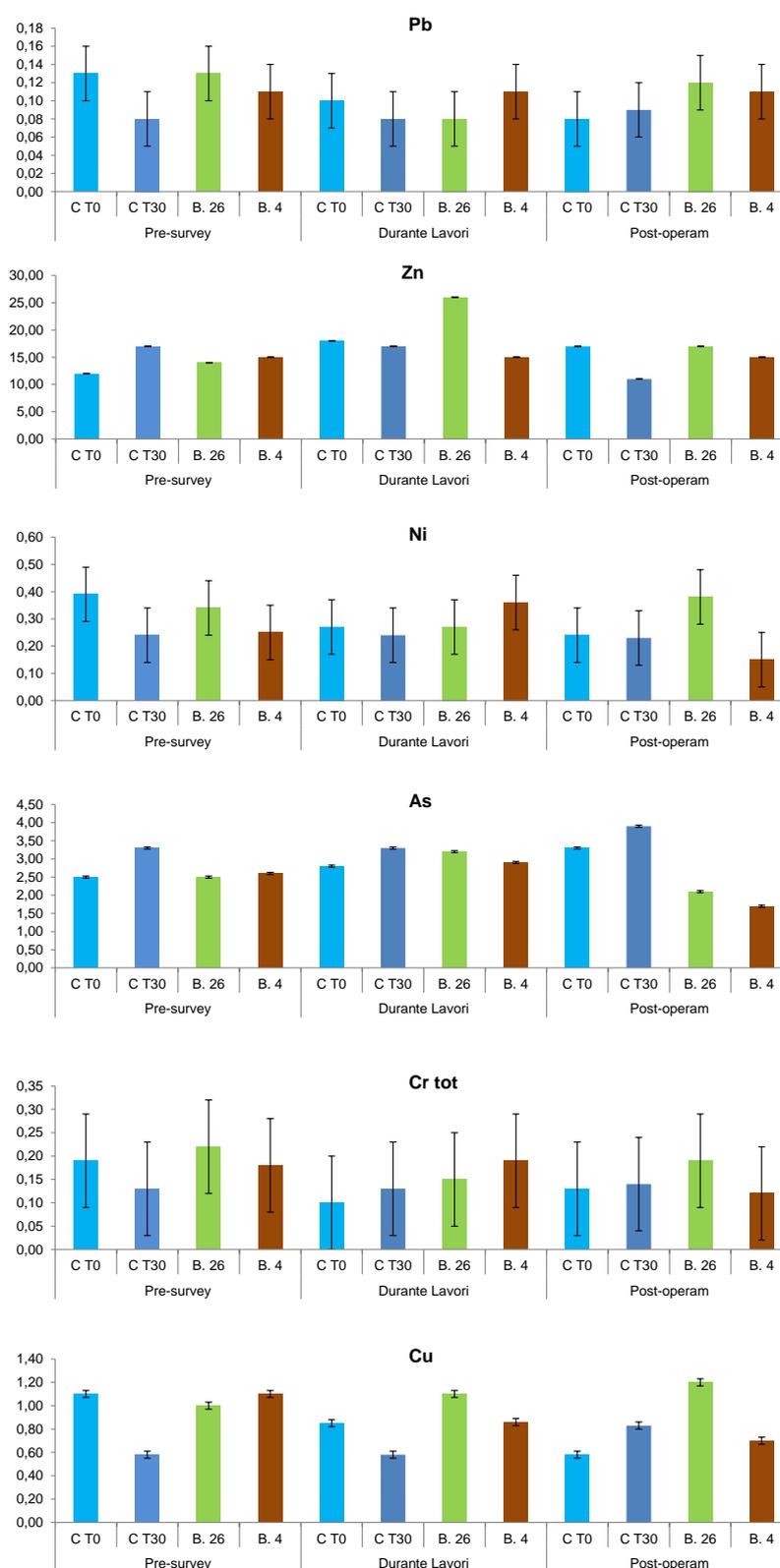
omogenei con quello del controllo T0. Nel durante lavori le concentrazioni rilevate in ciascuna delle due banchine erano apparse confrontabili con un controllo, mentre del post-operam tutti i valori sono risultati statisticamente differenti, con il minimo presso la Banchina 4 e il massimo presso il controllo T30. E' da rilevare che in entrambe le aree del porto si è verificato un decremento del metallo nell'ultima fase.

Il Vanadio è apparso omogeneo nelle prime due fasi di monitoraggio. Nel post-operam non è stato più quantificato nella Banchina 4, mentre la 26 è risultata confrontabile con il controllo T0. Entrambi questi siti hanno presentato concentrazioni notevolmente inferiori rispetto al controllo T30.

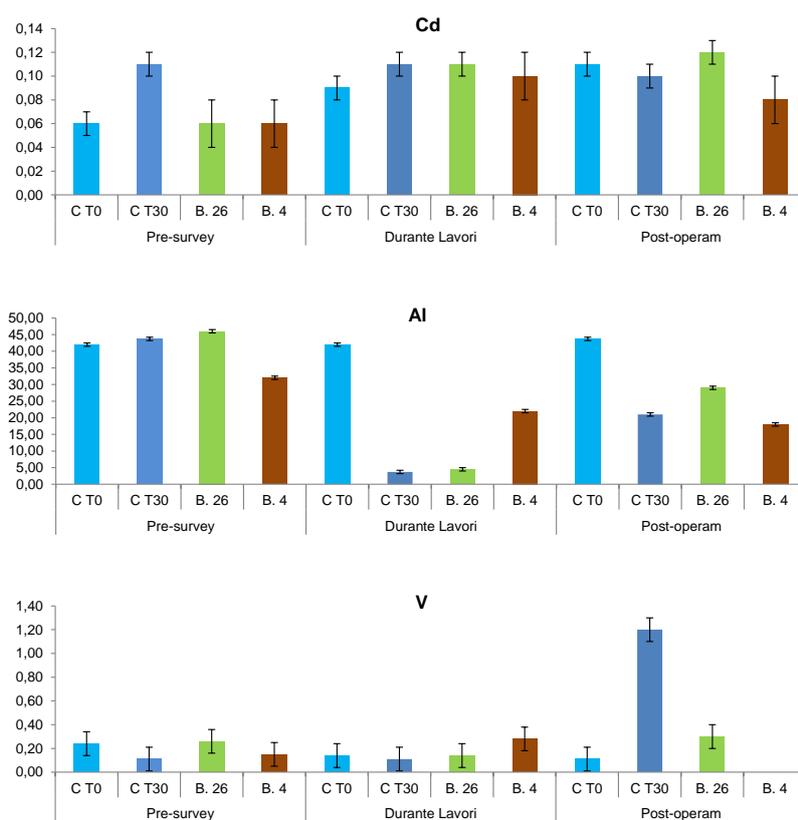
Per quanto concerne il Cadmio, in ciascun survey le due banchine sono sempre risultate confrontabili con almeno un controllo, mentre le concentrazioni di Cromo, Piombo e Nichel sono sempre apparse omogenee.

Infine, Bario e Mercurio sono risultati inferiori ai limiti di quantificazione nell'intero periodo di indagine.

Nel complesso i livelli osservati sono inferiori a quelli riportati in un precedente studio pluriennale condotto da Fattorini *et al.* (2008) e simili a quelli indicati in altre indagini condotte in aree marino-costiere (Giani *et al.*, 1994; Covelli *et al.*, 2001; Storelli *et al.*, 2001; Frontalini *et al.*, 2008).



**Fig. 21** - Distribuzione dei metalli in traccia (mg/kg p.s. (± dev. std.) rilevati nei mitili (*Mytilus galloprovincialis*) campionati presso le aree portuali e un sito di controllo durante le tre fasi di monitoraggio. Ba, e Hg non sono riportati in quanto le concentrazioni sono sempre risultate al di sotto del limite di rilevabilità strumentale.



**Fig. 21 - Continuo.**

**Tab. 10** - Distribuzione dei metalli in traccia (mg/kg p.s. ( $\pm$  dev. std.) rilevati nei mitili (*Mytilus galloprovincialis*) campionati presso le aree portuali e un sito di controllo durante le tre fasi di monitoraggio.

| <b>PRE-SURVEY</b> | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|-------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Pb                | 0,13 $\pm$ 0,03     | 0,08 $\pm$ 0,03      | 0,13 $\pm$ 0,03        | 0,11 $\pm$ 0,03       |
| Zn                | 12,0 $\pm$ 0,05     | 17,0 $\pm$ 0,05      | 14,0 $\pm$ 0,05        | 15,0 $\pm$ 0,05       |
| Ni                | 0,39 $\pm$ 0,10     | 0,24 $\pm$ 0,10      | 0,34 $\pm$ 0,10        | 0,25 $\pm$ 0,10       |
| As                | 2,50 $\pm$ 0,03     | 3,30 $\pm$ 0,03      | 2,50 $\pm$ 0,03        | 2,60 $\pm$ 0,03       |
| Hg                | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Cr tot            | 0,19 $\pm$ 0,10     | 0,13 $\pm$ 0,10      | 0,22 $\pm$ 0,10        | 0,18 $\pm$ 0,10       |
| Cu                | 1,10 $\pm$ 0,03     | 0,58 $\pm$ 0,03      | 1,00 $\pm$ 0,03        | 1,10 $\pm$ 0,03       |
| Cd                | 0,06 $\pm$ 0,01     | 0,11 $\pm$ 0,01      | 0,06 $\pm$ 0,02        | 0,06 $\pm$ 0,02       |
| Ba                | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Al                | 42,0 $\pm$ 0,5      | 43,7 $\pm$ 0,5       | 46,0 $\pm$ 0,5         | 32,0 $\pm$ 0,5        |
| V                 | 0,24 $\pm$ 0,1      | 0,11 $\pm$ 0,1       | 0,26 $\pm$ 0,10        | 0,15 $\pm$ 0,10       |

| <b>DURANTE LAVORI</b> | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Pb                    | 0,10 $\pm$ 0,03     | 0,08 $\pm$ 0,03      | 0,08 $\pm$ 0,03        | 0,11 $\pm$ 0,03       |
| Zn                    | 18,0 $\pm$ 0,05     | 17,0 $\pm$ 0,05      | 26,0 $\pm$ 0,05        | 15,0 $\pm$ 0,05       |
| Ni                    | 0,27 $\pm$ 0,10     | 0,24 $\pm$ 0,10      | 0,27 $\pm$ 0,10        | 0,36 $\pm$ 0,10       |
| As                    | 2,80 $\pm$ 0,03     | 3,30 $\pm$ 0,03      | 3,20 $\pm$ 0,03        | 2,90 $\pm$ 0,03       |
| Hg                    | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Cr tot                | 0,10 $\pm$ 0,10     | 0,13 $\pm$ 0,10      | 0,15 $\pm$ 0,10        | 0,19 $\pm$ 0,10       |
| Cu                    | 0,85 $\pm$ 0,03     | 0,58 $\pm$ 0,03      | 1,10 $\pm$ 0,03        | 0,86 $\pm$ 0,03       |
| Cd                    | 0,09 $\pm$ 0,01     | 0,11 $\pm$ 0,01      | 0,11 $\pm$ 0,01        | 0,10 $\pm$ 0,02       |
| Ba                    | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Al                    | 42,0 $\pm$ 0,5      | 3,7 $\pm$ 0,5        | 4,5 $\pm$ 0,5          | 22,0 $\pm$ 0,5        |
| V                     | 0,14 $\pm$ 0,10     | 0,11 $\pm$ 0,10      | 0,14 $\pm$ 0,10        | 0,28 $\pm$ 0,10       |

| <b>POST-OPERAM</b> | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|--------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Pb                 | 0,08 $\pm$ 0,03     | 0,09 $\pm$ 0,03      | 0,12 $\pm$ 0,03        | 0,11 $\pm$ 0,03       |
| Zn                 | 17,0 $\pm$ 0,05     | 11,0 $\pm$ 0,05      | 17,0 $\pm$ 0,05        | 15,0 $\pm$ 0,05       |
| Ni                 | 0,24 $\pm$ 0,10     | 0,23 $\pm$ 0,10      | 0,38 $\pm$ 0,10        | 0,15 $\pm$ 0,10       |
| As                 | 3,30 $\pm$ 0,03     | 3,90 $\pm$ 0,03      | 2,10 $\pm$ 0,03        | 1,70 $\pm$ 0,03       |
| Hg                 | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Cr tot             | 0,13 $\pm$ 0,10     | 0,14 $\pm$ 0,10      | 0,19 $\pm$ 0,10        | 0,12 $\pm$ 0,10       |
| Cu                 | 0,58 $\pm$ 0,03     | 0,83 $\pm$ 0,03      | 1,20 $\pm$ 0,03        | 0,70 $\pm$ 0,03       |
| Cd                 | 0,11 $\pm$ 0,01     | 0,10 $\pm$ 0,01      | 0,12 $\pm$ 0,01        | 0,08 $\pm$ 0,02       |
| Ba                 | < LOD               | < LOD                | < LOD                  | < LOD                 |
| Al                 | 43,7 $\pm$ 0,5      | 21,0 $\pm$ 0,5       | 29,0 $\pm$ 0,5         | 18,0 $\pm$ 0,5        |
| V                  | 0,11 $\pm$ 0,10     | 1,20 $\pm$ 0,10      | 0,30 $\pm$ 0,10        | < LOD                 |

**Tab. 11** - Risultati dei confronti statistici relativi alla distribuzione dei metalli pesanti nei siti campionati presso le aree portuali e in un sito di controllo durante il dragaggio. (test U - Mann-Whitney). \* =  $p < 0,05$ ; ns = non significativo.

| <b>Piombo</b>         |              |               |                 |                |
|-----------------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>Zinco</b>          |              |               |                 |                |
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | ns              | *              |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>Nichel</b>         |              |               |                 |                |
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |

Tab. 11 - Continuo.

| <b>Arsenico</b>       |              |               |                 |                |
|-----------------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>Cromo</b>          |              |               |                 |                |
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>Rame</b>           |              |               |                 |                |
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | ns             |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |

Tab. 11 - Continuo.

| <b>Cadmio</b>         |              |               |                 |                |
|-----------------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>Alluminio</b>      |              |               |                 |                |
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | *               | *              |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30         |              |               | ns              | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | *               | *              |
| Controllo T30         |              |               | *               | *              |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | *              |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>Vanadio</b>        |              |               |                 |                |
| <b>PRE-SURVEY</b>     | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>DURANTE LAVORI</b> | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | ns            | ns              | ns             |
| Controllo T30         |              |               | ns              | ns             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | ns             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |
| <b>POST-OPERAM</b>    | Controllo T0 | Controllo T30 | Banchina 26 T30 | Banchina 4 T30 |
| Controllo T0          |              | *             | ns              | nc             |
| Controllo T30         |              |               | *               | nc             |
| Banchina 26 T30       |              |               |                 | nc             |
| Banchina 4 T 30       |              |               |                 |                |

### 3.2.3. COMPOSTI ORGANOSTANNICI: MONO, BI- E TRIBUTILSTAGNO

A differenza di quanto osservato in alcuni studi condotti recentemente presso analoghe zone marino-costiere (Furdek *et al.*, 2012; Turja *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2015; Okoro *et al.*, 2015), in tutte le tre fasi di monitoraggio questi composti sono risultati al di sotto del limite di rilevabilità strumentale (Tab. 12).

**Tab. 12** - Distribuzione dei composti organostannici (valori espressi in  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) nei tessuti dei mitili di controllo e di quelli immersi nelle aree interne del porto di Ancona e prelevati dopo 30 giorni di permanenza durante le tre fasi di indagine.  $100 \mu\text{g}/\text{kg}$  = limite di rilevabilità strumentale.

| <b>PRE-SURVEY</b> | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|-------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| MBT               | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |
| DBT               | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |
| TBT               | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |

| <b>DURANTE LAVORI</b> | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|-----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| MBT                   | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |
| DBT                   | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |
| TBT                   | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |

| <b>POST-OPERAM</b> | <b>Controllo T0</b> | <b>Controllo T30</b> | <b>Banchina 26 T30</b> | <b>Banchina 4 T30</b> |
|--------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| MBT                | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |
| DBT                | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |
| TBT                | <100                | <100                 | <100                   | <100                  |

#### **4. CONCLUSIONI**

**Valutazione degli effetti del dragaggio sui sedimenti marini** - Complessivamente si può affermare che, a sei mesi di distanza dalla fine dei lavori di dragaggio, nell'area portuale davanti alla Banchina 26 del Porto di Ancona i flussi delle sostanze nutrienti derivanti dalla degradazione della sostanza organica (N-NH<sub>3</sub> e DIC) e la silice disciolta sono sostanzialmente diminuiti per la rimozione della materia organica reattiva depositatasi sul fondale nei mesi e giorni antecedenti alle operazioni di dragaggio. Il fosforo è tornato a livelli del pre-survey in quanto coinvolto nei processi di precipitazione e dissoluzione degli idrossidi di ferro. In seguito a quanto detto sopra si può affermare con una certa sicurezza che il sedimento, a distanza di circa 6 mesi dalla fine dei lavori di dragaggio, contribuiva in maniera sostanzialmente minore a eventuali processi di eutrofizzazione dello specchio d'acqua portuale rispetto alla fase antecedente.

Tra gli accettori finali di elettroni anche il flusso di ossigeno è diminuito rispetto alle fasi pre-survey e di escavo, confermando la minore presenza di sostanza organica reattiva, mentre i nitrati sono tornati a livelli registrati prima dell'inizio delle operazioni di dragaggio. Anche in questo caso, la minore richiesta di ossigeno da parte del sedimento, dovuta alla rimozione degli strati più superficiali, ha fatto sì che il fondale non potesse contribuire come prima ai processi di eutrofizzazione dello specchio d'acqua portuale.

Gli accettori finali di elettroni con i loro flussi negativi meno intensi confermano che il sedimento affiorante in seguito al dragaggio era meno ricco di sostanza organica reattiva e quindi produceva minori flussi di sostanze che avrebbero potuto condizionare l'ecologia della colonna d'acqua.

Nel caso di metalli in tracce anche i flussi indeterminabili di Al, Cd, Cr, Hg, Pb, Cu e V e l'assorbimento di Zn, As e Ni suggeriscono la presenza di un sedimento affiorante povero di sostanza organica reattiva e di elementi che potessero risultare dannosi per la catena trofica.

**Valutazione degli effetti del dragaggio su organismi sentinella** - I risultati delle attività di biomonitoraggio finalizzato a determinare un'eventuale rimobilizzazione di sostanze tossiche confinate nei sedimenti dragati presso il Porto di Ancona hanno riportato solo sporadici segnali di stress ambientale nel corso della fase successiva all'escavo. In particolare, dopo il periodo di traslocazione di 30 gg, negli organismi prelevati presso la Banchina 26 è stato osservato solo un numero ristretto di alterazioni limitate ad alcune funzionalità sub-cellulari quali la permeabilità delle membrane lisosomiali, la sintesi di metallotioneine e la relativa espressione genica, l'accumulo di lipidi neutri e l'aumento di proteine metallo-chelanti. Di maggiore intensità sono apparse le risposte biologiche

osservate presso l'area più interna del porto (Banchina 4), non influenzata dalle attività di escavo ma contraddistinta da un più lento ricircolo delle acque e da sorgenti multiple e diversificate d'impatto antropico. La scelta apposita di tale sito (controllo positivo) e le risposte ad esso associate confermano la capacità dei test adottati di evidenziare condizioni ambientali critiche, validando in tal modo l'efficacia della batteria di test adottati. Nel complesso i risultati ottenuti da tali test hanno evidenziato un moderato aumento della biodisponibilità di alcuni metalli pesanti, come ulteriormente confermato dalla distribuzione degli inquinanti come lo Zinco e il Rame osservati nei tessuti degli organismi prelevati presso le diverse aree portuali rispetto al sito di controllo. Moderata è apparsa la risposta biologica alla presenza di molecole organiche quale ad esempio la risposta immunoistochimica del mitilo alla presenza di molecole organiche, come confermato anche dai bassi livelli dei pochi Idrocarburi Policiclici Aromatici rinvenuti in concentrazioni superiori al limite di rilevabilità strumentale. Il rischio genotossico appare limitato alle aree più interne al porto; comunque, le frequenze di micronuclei riscontrate sono simili a quelle osservate in aree contraddistinte da un moderato impatto ambientale (Bolognesi *et al.*, 2004). In generale, quindi, i precoci segnali di stress evidenziati nel corso dell'indagine svolta durante le operazioni di dragaggio hanno evidenziato una progressiva diminuzione nel tempo verso una situazione simile a quella osservata durante il pre-survey.

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aebi H. 1974. Catalase. Pagg. 671-684, in: Bergmeyer H.U. (Ed.), *Methods on enzymatic analysis*. Academic Press, London.
- Allan S.E., Smith B.W., Anderson K.A. 2012. Impact of the Deepwater Horizon oil spill on bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons in Gulf of Mexico coastal waters. *Environmental science & technology*, 46(4): 2033-2039.
- Banni M., Dondero F., Jebali J., Guerbej H., Boussetta H., Viarengo A. 2007 Assessment of heavy metal contamination using real-time PCR analysis of mussel metallothionein mt10 and mt20 expression: a validation along the Tunisian coast. *Biomarkers*, 12(4): 369 – 383.
- Bolognesi C., Fenzilli G., Lasagna C., Perrone E., Roggeri P., 2004. Genotoxicity biomarkers in *Mytilus galloprovincialis* wild versus caged mussels. *Mutation Research*, 552: 153-162.
- Bolognesi C., Rabboni R., Roggeri P. 1996. Genotoxicity biomarkers in *M. galloprovincialis* as indicators of marine pollutants. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 113C(2): 319-323.
- Carro N., Cobas J., Maneiro J. 2006. Distribution of aliphatic compounds in bivalve mollusks from Galicia after the Prestige oil spill: Spatial and temporal trends. *Environmental Research*, 100(3): 339-348.
- Covelli S., Faganeli J., Horvat M., Brambati A. 2001. Mercury contamination of coastal sediments as the result of long-term cinnabar mining activity (Gulf of Trieste, northern Adriatic sea). *Applied Geochemistry*, 16(5): 541-558.
- Dailianis S., Domouhtsidou G.P., Raftopoulou E., Kaloyianni M., Dimitriandis V.K. 2003. Evaluation of neutral red retention assay, micronucleus test, acetylcholinesterase activity and signal transduction molecule (cAMP) in tissues of *Mytilus galloprovincialis* (L.), in pollution monitoring. *Marine Environmental Research*, 56: 443-470.
- Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. 2007. *Guide to best practices for ocean CO<sub>2</sub> measurements*.
- Dondero F., Piacentini L., Banni M., Reselo M., Burlando B., Viarengo A. 2005. Quantitative PCR analysis of two molluscan metallothionein genes unveils differential expression and regulation. *Gene*, 345: 259–270.
- Donnini F., Dinelli E., Sangiorgi F., Fabbri E. 2007. A biological and geochemical integrated approach to assess the environmental quality of a coastal lagoon (Ravenna, Italy). *Environment International*, 33(7): 919-928.
- Fabi G., Bernardi Aubry F., Gomiero A., Punzo E., Spagnoli F., Spagnolo A. 2015. *Analisi ambientali e monitoraggi associati ai lavori di escavo per adeguamento dei fondali antistanti il primo tratto della Banchina 26 del Porto di Ancona. Fase di caratterizzazione - analisi integrative*. Rapporto per l’Autorità Portuale di Ancona. 59 pp.
- Fabi G., Grilli F., Gomiero A., Paschini E., Penna P., Spagnoli F., Spagnolo A. 2016. *Studi di carattere ambientale volti a valutare le dinamiche e gli effetti ambientali dei sedimenti marini provenienti da escavi portuali. III Rapporto - Dinamiche di trasporto dei sedimenti, valutazione degli effetti del dragaggio sui sedimenti marini e su organismi sentinella (Fase in corso d’opera)*. Rapporto per l’Autorità Portuale di Ancona. 57 + ix pp.
- Fattorini D., Notti A., Di Mento R., Cicero A.M., Gabellini M., Russo A. Regoli F. 2008. Seasonal, spatial and inter-annual variations of trace metals in mussels from the Adriatic sea: a regional gradient for arsenic and implications for monitoring the impact of off-shore activities. *Chemosphere*, 72: 1524–1533.
- Fowler S.W., Readman J.W., Oregioni B., Villeneuve J.P., McKay K. 1993. Petroleum hydrocarbons and trace metals in nearshore Gulf sediments and biota before and after the 1991 war: an assessment of temporal and spatial trends. *Marine Pollution Bulletin*, 27: 171-182.

- Frontalini F., Coccioni R. 2008. Benthic foraminifera for heavy metal pollution monitoring: a case study from the central Adriatic Sea coast of Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(2): 404-417.
- Furdek M., Vahčić M., Ščančar J., Milačić R., Kniewald G., Mikac N. 2012. Organotin compounds in seawater and *Mytilus galloprovincialis* mussels along the Croatian Adriatic Coast. *Marine Pollution Bulletin*, 64(2), 189-199.
- Giani M., Gabellini M., Pellegrini D., Costantin S., Beccaloni E., Giordano R. 1994. Concentration and partitioning of Hg, Cr and Pb in sediments of dredge and disposal sites of the northern Adriatic Sea. *Science of the Total Environment*, 158: 97-112.
- Hansen H.P., Koroleff F. 1999. Determination of nutrients. Pagg. 159-228, in: Grasshoff K., Cremling K., Ehrhardt M. (Eds), *Methods of Seawater Analysis*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- Higuchi R., Fockler C., Dollinger G., Watson R. 1993. Kinetic PCR analysis: real-time monitoring of DNA amplification reactions. *Biotechnology (NY)*, 11 (9): 1026-1030.
- ICRAM. 2001. *Metodologie analitiche di riferimento. Programma di monitoraggio per il controllo dell'ambiente marino-costiero (triennio 2001-2003)*.
- Lima I., Moreira S. M., Rendón-Von Osten J., Soares A.M.V.M., Guilhermino L. 2007. Biochemical responses of the marine mussel *Mytilus galloprovincialis* to petrochemical environmental contamination along the north-western coast of Portugal. *Chemosphere*, 66(7): 1230-1242.
- Livakk J., Schmittingen T.D. 2001. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2- $\Delta\Delta$ CT. *Methods*, 25: 402-408.
- Muxika I., Borja A., Bonne W. 2005. The suitability of the marine biotic index (AMBI) to new impact sources along European coasts. *Ecological indicators*, 5(1): 19-31.
- Okoro H.K., Snyman R.G., Fatoki O.S., Adekola F.A., Ximba B.J., Slabber M.Y. 2015. Lysosomal Membrane Stability of the Mussel, *Mytilus galloprovincialis* (L.), as a Biomarker of Tributyltin Exposure. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94(5): 609-613.
- Ottaviani E., Franceschini C. 1997. The invertebrate phagocytic immunocyte: clues to a common evolution of immune and neuroendocrine system. *Immunology Today*, 18: 169-174.
- Petrovic S., Semencic L., Ozetic B., Orzetic M. 2004. Seasonal variations of physiological and cellular biomarkers and their use in the biomonitoring of north Adriatic coastal waters (Croatia). *Marine Pollution Bulletin*, 49(9-10): 713-720.
- Storelli M.M., Storelli, A., Marcotrigiano G.O. 2001. Heavy metals in the aquatic environment of the Southern Adriatic Sea, Italy: macroalgae, sediments and benthic species. *Environment International*, 26(7): 505-509.
- Turja R., Soirinsuo A., Budzinski H., Devier M.H., Lehtonen K.K. 2013. Biomarker responses and accumulation of hazardous substances in mussels (*Mytilus trossulus*) transplanted along a pollution gradient close to an oil terminal in the Gulf of Finland (Baltic Sea). *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 157(1): 80-92.

**ALLEGATO A**

**SCHEDE TECNICHE DELLA STRUMENTAZIONE**

**UTILIZZATA NELLE INDAGINI**

**All. A1      CAMERA BENTICA**



**All. A2      CRIOSTATO Leica CM1900**



| <b>Strumento</b> | <b>Costruttore</b> | <b>Serie</b> | <b>Cabina</b>            | <b>Refrigerante</b> |
|------------------|--------------------|--------------|--------------------------|---------------------|
| Criostato        | Leica              | 1900         | Refrigerata fino a -50C° | Freon               |

## **All. A3      MICROSCOPIO invertito Carl Zeiss AxioCam 135 motorizzato con telecamera Carl Zeiss Axiovert HS**



|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Main features                 | Highly stable pyramid shape and low center of gravity for vibration-free work, min. 6 adaptation options (12 drilled holes) e.g. for micromanipulators<br>Optovar revolver 3x motorized<br>6x objective nosepiece for HD DIC, motorized |
| Optics                        | ICS optics for finest image quality: special application objectives with long working distance  |
| Objectives                    | Reflected light: Epiplan, Epiplan-Neofluar, EC Epiplan-Neofluar<br>Transmitted light: Achroplan, Plan-Neofluar<br>Special: LD-Epiplan, LD-EC Epiplan-Neofluar (reflected light objective with long working distance)                    |
| Modules                       | Polarization optical shearing interferometer (TIC) to measure reflected light-phase objects(levels, differences in height), MHT 10, DeepView  |
| Illumination Reflected light  | 12V, 100W halogen<br>HBO 50W mercury vapor short arc lamp<br>HBO 100W mercury vapor short arc lamp<br>XBO 75W xenon lamp  |
| Reflected light/filter slider | 3 positions for filters with 25 mm diameter   |
| Reflector turret              | 5 positions, manual or motorized, exchangeable  |
| Light Trap                    | High contrast, minimized stray light  |
| Transmitted light             | 6V, 30W<br>12V, 100W<br>LCD-display, light manager  |

### **TelecameraAxiovert HS**

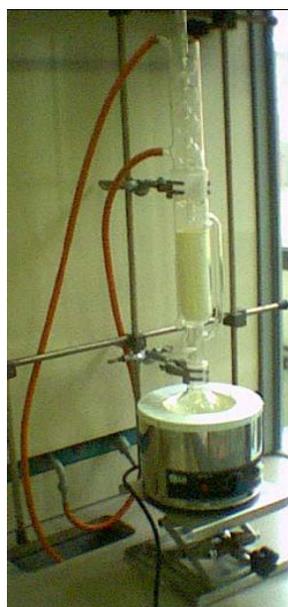
|                       |  |
|-----------------------|--|
| Sensore               | Sony ICX 414, progressives readout   |
| Risoluzione           | 660(H) x 494 (V) = 330 K Pixels  |
| Pixel Size            | 9.9 µm (H) x 9.9 µm (V)  |
| Dimensione sensore    | 6,5 mm x 4,9 mm, equivalent to ½   |
| Sensibilità spettrale | HSc appr. 400 bis 720 nm con BG 40 IR-blocking filter HSm appr. 350 bis 1000 nm con BK7 protective cover glass |
| Dynamic Range         | Typical SNR 65 dB = 1 : 1800   |
| Noise                 | 1 17 e   |
| Dark Current          | 0,7 LSB/s, equivalenti a to 5,4 e / Pixel/s  |
| Fotogrammi / sec      | Appr. 54 fotogrammi/s in risoluzione normale fino a . 140 fotogrammi/s a                                       |
| Tempo di esposizione  | da 0,25 ms fino a 60 s   |
| Color optimisation    | Available for color model, default white point 3200 k  |

**All. A4      CENTRIFUGA Beckman Allegra 25R**



| Strumento  | Costruttore | Modello     | Range velocità | Range temperatura (°C)                           | Precisione | Diametro rotore |
|------------|-------------|-------------|----------------|--|------------|-----------------|
| Centrifuga | Beckman     | Allegra 25R | 100-25000 rpm  | 0 – 50 piena velocità<br>-30-40 a veloc. ridotta | ±1         | 215 mm          |

**All. A5      ESTRAZIONE LIQUIDO-SOLIDO A FLUSSO tipo Soxhlet**



**Materiale:** Apparato elevatore, isomantello, pallone da 250 ml, un apparato di Soxhlet con refrigerante apposito, un ditale di carta, pinze e morsetti, due tubi di gomma, moderatore di ebollizione (sfere di pyrex), cilindro graduato da 250 ml, solvente organico d'estrazione, cilindretto graduato da 10 ml, pipette Pasteur, cristallizzatore, piastra riscaldante, ancorretta magnetica, imbuto, tettarelle, cotone, provetta o protettone da 250 ml.

**All. A6 CROMATOGRAFIA LIQUIDA Waters 996 PDA HPLC System  
(liquid chromatograph)**



TIPO DI STRUMENTO: **Cromatografo per cromatografia liquida ad alte pressioni (HPLC).**

COSTRUTTORE **Waters**

SERIE **996 PDA**

TIPO DI DETECTOR: **Fluorescenza (Waters® 474 Scanning Fluorescence Detector) e UV-Visibile (rivelatore a serie di fotodiodi Waters® PDA 996)**

VOLUME DI INIEZIONE: **5 µl**

CARRIER: **Acqua/Acetonitrile**

TIPO DI COLONNA: **Supelcosil LC-PAH**

LUNGHEZZA: **25 cm**

DIAMETRO: **4.5 mm**

FASE: **C-18**

PARTICLE SIZE: **5 µm**

INTEGRAZIONE ED ANALISI DEL DATO: **Waters Millennium software®**

**All. A6a SUPELCOSIL™ LC-PAH HPLC Column  
(colonna per cromatografia liquida ad alte prestazioni-HPLC)**



CARATTERISTICHE FISICHE: **5 µm diametro granuli, lunghezza x I.D. 25 cm x 4.6 mm**

MATRICE (supporto): **gel di silice a forma sferica**

(Fase stazionaria): **octadecyl silice**

diametro granuli: **5 µm**

dimensione pori: **120 Å**

**AII. A7      MINERALIZZATORE Milestone Ethos 900**



TIPO DI STRUMENTO: Forno **Mineralizzatore /estrattore**

COSTRUTTORE **Milestone**

SERIE: **900**

VOLUME DI INIEZIONE: **6 posizioni da 200 ml**

POTENZA SORGENTE: **fino a 1600w**

SOFTWARE DI CONTROLLO: **EasyControl software®**

**All. A8      SPETTROFOTOMETRO AD ASSORBIMENTO ATOMICO Perkin-Elmer AANALYST 700**



**All. A8a**

**Flow injection Mercury system  
FIMS 400, Perkin-Elmer per il  
dosaggio/analisi del Hg**



**All. A8b**

**Flow Injection Analysis  
System (FIAS 400, Perkin Elmer)  
per il dosaggio/analisi dell'As**



# **MODELLIZZAZIONE DELLA DIFFUSIONE DEL MATERIALE SEDIMENTARIO RISOSPESO DURANTE I LAVORI DI ESCAVO E DI SVERSAMENTO IN MARE APERTO**



## **RAPPORTO FINALE**

**COORDINATORE: Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, Ancona)**

**RESPONSABILE SCIENTIFICO: Dott.ssa Alessandra Spagnolo  
(CNR-ISMAR, Ancona)**

**Rapporto a cura di : Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, Ancona)  
Dott. Christian Ferrarin (CNR-ISMAR, Venezia)  
Dott.ssa Federica Grilli (CNR-ISMAR, Ancona)  
Dott. Pierluigi Penna (CNR-ISMAR, Ancona)  
Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, Ancona)**

**Preparato per:           AUTORITÀ PORTUALE DI ANCONA**

**Luglio 2016**



# INDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>1. PREMESSA</b> .....   | 1  |
| 1.1. FENOMENOLOGIA GENERALE DEL MARE ADRIATICO .....   | 2  |
| <b>2. DESCRIZIONE DEL MODELLO</b> .....  | 4  |
| 2.1. IL MODELLO IDRODINAMICO SHYFEM .....  | 4  |
| 2.2. IL MODELLO DI TRASPORTO E DIFFUSIONE PER SALINITÀ<br>E TEMPERATURA .....                              | 6  |
| 2.2.1 Modulo di calore.....  | 7  |
| 2.3. I MODELLI DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI .....  | 8  |
| 2.3.1 Modello lagrangiano di trasporto dei sedimenti .....   | 8  |
| 2.3.2 Modello euleriano di trasporto dei sedimenti .....   | 9  |
| <b>3. APPLICAZIONE DEL MODELLO</b> .....   | 10 |
| 3.1. LA GRIGLIA DI CALCOLO .....   | 10 |
| 3.2. SET-UP DELLE SIMULAZIONI .....  | 13 |
| 3.3. CALIBRAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO .....   | 20 |
| 3.4. VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO .....  | 22 |
| <b>4. DESCRIZIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E<br/>INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI METEOMARINI</b> ..... | 27 |
| <b>5. SCENARI DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI</b> .....   | 33 |
| 5.1. DISPERSIONE NELLA ZONA DI ESCAVO.....   | 35 |
| 5.2. DISPERSIONE NELLA ZONA DI SVERSAMENTO.....  | 37 |
| <b>6. CONCLUSIONI</b> .....  | 48 |
| <b>7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....  | 49 |

## **PARTECIPANTI AL PROGRAMMA**

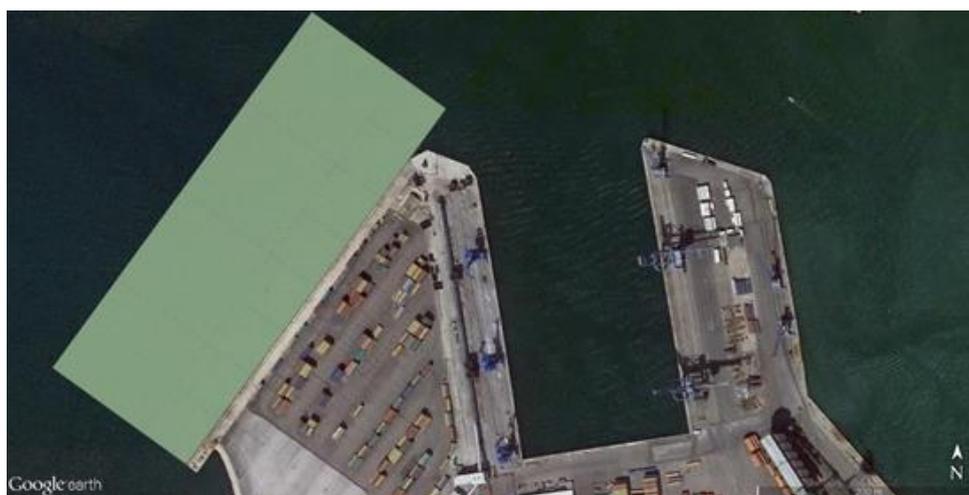
|                     |                      |   |
|---------------------|----------------------|---|
| Gianna Fabi         | CNR-ISMAR UOS Ancona | Coordinatore  |
| Alessandra Spagnolo | CNR-ISMAR UOS Ancona | Responsabile Scientifico                                      |
| Christian Ferrarin  | CNR-ISMAR UO Venezia | Sviluppo e realizzazione modello idrodinamico                 |
| Elio Paschini       | CNR-ISMAR UOS Ancona | Raccolta ed elaborazione dati correntometrici                 |
| Pierluigi Penna     | CNR-ISMAR UOS Ancona | Raccolta ed elaborazione dati correntometrici e metereologici |
| Federica Grilli     | CNR-ISMAR UOS Ancona | Elaborazione dati correntometrici                             |
| Stefano Guicciardi  | CNR-ISMAR UOS Ancona | Elaborazione dai metereologici                                |

Hanno inoltre collaborato i Sigg.ri Giampaolo Gaetani e Antonio Marziali imbarcati sulla M/R Tecnopesca II del CNR – ISMAR di Ancona utilizzata per la raccolta dei dati correntometrici

## 1. PREMESSA

Le attività oggetto del presente rapporto si inseriscono nell'Integrazione Prot. 0021161 del 27703/2015 all'Accordo di Programma tra Autorità Portuale di Ancona e CNR-ISMAR UOS Ancona del 15/05/2012 (Prot. ARR-002979) ai fini dell'esecuzione di studi di carattere ambientale volti a valutare le dinamiche e gli effetti dei sedimenti marini movimentati in seguito all'adeguamento dei fondali antistanti la banchina 26 del porto di Ancona (Fig. 1).

Tali attività hanno previsto lo sviluppo di un modello di trasporto idrodinamico volto a valutare la potenziale dispersione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo nell'area portuale e di sversamento in mare aperto. Scopo di tale modello è verificare se, in quali condizioni meteomarine, e in quale entità, tale materiale potrebbe raggiungere i fondali costieri della costa del Monte Conero e quindi produrre eventuali impatti sulle biocenosi ivi esistenti.



**Fig. 1** – Ubicazione area di escavo.

L'obiettivo principale di questo studio è l'indagine delle dinamiche di trasporto di sedimenti marini provenienti da escavi portuali. L'approccio metodologico proposto in questo progetto si basa sull'integrazione delle acquisizioni sperimentali con strumenti modellistici. Le aree esterne di sversamento sono influenzate direttamente dall'area più settentrionale del mare Adriatico a causa della corrente costiera adriatica che, fluendo verso Sud-Est lungo la costa italiana, trasporta con sé le acque scaricate in mare dai fiumi del Nord Adriatico, mescolate alle acque marine costiere (Franco *et al.*, 1982). È chiaro che un problema così complesso come il trasporto dei sedimenti è intimamente collegato con lo

stato idrodinamico della zona di interesse. Un'indagine dei sedimenti deve perciò partire da un approfondito esame e dalla descrizione dell'idrodinamica costiera.

La simulazione della circolazione delle acque e dei principali processi fisici che interessano le aree costiere necessita l'utilizzo sia di modelli numerici ad alta risoluzione spazio-temporale sia di procedure di *downscaling* in grado di riprodurre le interazioni e gli scambi di massa che avvengono tra l'ambiente di mare aperto e l'ambiente costiero. Tale obiettivo può essere raggiunto sia mediante l'implementazione di procedure di *nesting* tra modelli numerici basati su griglie di calcolo regolari (Kim *et al.*, 2008; Brown *et al.*, 2010), sia mediante l'utilizzo di modelli numerici basati su griglie non strutturate in grado di riprodurre i processi di interesse con una risoluzione spaziale variabile (Bellafiore *et al.*, 2008; Roland *et al.*, 2009). Il primo approccio è comunemente utilizzato all'interno di diversi sistemi operazionali per effettuare procedure di *nesting* da sistemi di previsione a scala di bacino a scala regionale. Tali procedure di accoppiamento sono generalmente robuste e ben testate, tuttavia non prevedono la possibilità di riprodurre le interazioni tra le diverse scale spaziali in modo biunivoco (*downscaling* e *upscaling*).

Il secondo approccio basato sull'utilizzo di modelli a griglia non-strutturata, quali quelli basati sul metodo degli elementi finiti o dei volumi finiti, permette, variando la risoluzione spaziale del dominio di calcolo, di riprodurre facilmente le interazioni biunivoche (*downscaling* e *upscaling*) tra gli ambienti di costieri e quelli di mare aperto.

Molti sono i modelli utilizzati per studiare la circolazione del mare Adriatico (Bellafiore, 2009). Quattro di queste applicazioni sono basate sul modello *Princeton Ocean Model (POM)* (Blumberg e Mellor, 1987): il sistema *AIM- NASM* sviluppato da Zavatarelli *et al.* (2002), lo studio effettuato da Oddo *et al.* (2005); Oddo e Pinardi (2008), l'implementazione di Bergamasco *et al.* (1999) e il sistema *NCOM* (Pullen *et al.*, 2003). Altri modelli applicati sono il *DieCAST*, descritto in Cushman-Roisin *et al.* (2005), il modello *ROMS* (Sherwood *et al.*, 2004) e il modello *MITgcm* applicato al Golfo di Trieste (Crise *et al.*, 2003).

## **1.1. FENOMENOLOGIA GENERALE DEL MARE ADRIATICO**

Il mare Adriatico è un bacino allungato e relativamente stretto, caratterizzato da un'ampia porzione di coste di varie tipologie. A tratti litoranei regolari come quelli del Centro Italia si contrappongono aree più frastagliate e, quindi, più complesse da studiare, quali le coste della Croazia. Il bacino si può dividere topograficamente in tre aree principali (Orlić *et al.*, 1992):

- la parte Nord, caratterizzata da profondità inferiori ai 40 m;
- la parte centrale, avente una profondità massima di 280 m (*Jabuka Pit*);

- la parte Sud, che nella fossa più profonda raggiunge i 1200 m.

Il comportamento del bacino va considerato alla luce delle forzanti che maggiormente influiscono sullo stesso. Primario è il ruolo della forza gravitazionale, del vento e della pressione atmosferica. Si possono osservare tre tipologie di fenomeni prodotti da queste forzanti: marea, sesse e *storm surge*. La forza gravitazionale e quella centrifuga attorno ai centri di massa nei sistemi Terra-Luna e Terra-Sole producono il fenomeno di marea astronomica. Tale marea viene calcolata mediante il cosiddetto *metodo armonico* e in Adriatico, da vari studi condotti nello scorso secolo (Polli, 1960; Tomasin e Pirazzoli, 1999), si può dedurre il comportamento, quasi totalmente, tramite l'azione di sette componenti principali, calcolate sul livello del mare, quattro semidiurne (M2, S2, K2, N2) e tre diurne (K1, O1, P1).

Importanti sono anche gli apporti prodotti da fattori atmosferici, variazioni della pressione atmosferica e del vento. La variabilità è alla base di oscillazioni di lungo periodo, mentre il vento agisce, direttamente, nella formazione della *storm surge* e, indirettamente, come risposta del bacino, nella produzione di sesse.

I gradienti di temperatura e salinità, cause della variazione di densità, sono invece alla base delle correnti barocline e della circolazione termoalina. In Nord Adriatico la circolazione invernale di natura termoalina è guidata dai gradienti di densità tra l'acqua densa al centro del bacino e quella più leggera lungo le coste, di origine fluviale. Osservando la colonna d'acqua si riscontra una struttura omogenea in inverno, mentre tende a prevalere una struttura stratificata in estate a causa dei termo-alopicno cicli stagionali (Franco *et al.*, 1982).

Per una completa descrizione della fenomenologia dell'Alto Adriatico si rimanda a Bellafiore (2009).

## 2. DESCRIZIONE DEL MODELLO

Data la complessità dei fenomeni da studiare e da monitorare, si propone una gerarchia di modelli agli elementi finiti che riescono a descrivere la dinamica della dispersione e del trasporto dei sedimenti. I modelli numerici sviluppati vengono di seguito elencati:

- modello 3D idrodinamico;
- modello di dispersione e diffusione per salinità e temperatura;
- modelli di trasporto dei sedimenti (euleriano e lagrangiano).

I moduli sono integrati e accoppiati tra loro in modo sequenziale e utilizzano la stessa griglia di calcolo agli elementi finiti. Per prima cosa viene risolta l'idrodinamica, calcolando per ogni punto il livello della marea e le velocità. Il modello di trasporto dei sedimenti utilizza le forzanti idrodinamiche per calcolare il trasporto del sedimento in sospensione.

Di seguito vengono descritti i singoli modelli.

### 2.1. IL MODELLO IDRODINAMICO SHYFEM

Per questo studio è stato utilizzato il modello matematico SHYFEM, sviluppato negli ultimi anni da ISMAR-CNR UO Venezia (Umgiesser e Bergamasco, 1995; Umgiesser, 1997; Umgiesser *et al.*, 2004; Bellafigliore e Umgiesser, 2010).

Il modello utilizza il metodo degli elementi finiti per la discretizzazione nello spazio e uno schema semi-implicito per l'integrazione nel tempo. Il metodo degli elementi finiti è altamente flessibile grazie alla suddivisione del dominio numerico in triangoli di varia forma e dimensione. E' particolarmente adatto a riprodurre la geometria e l'idrodinamica di sistemi complessi, come la zona portuale di Ancona.

Il modello risolve le equazioni primitive, integrate verticalmente su ogni livello. La diffusione orizzontale, il gradiente di pressione e l'avvezione baroclina nell'equazione del momento sono trattati in modo esplicito. La forza di Coriolis e il gradiente di pressione barotropica nell'equazione del momento e il termine divergenza nell'equazione di continuità sono trattati in modo semi-implicito. I termini di stress verticale e il termine di attrito al fondo sono trattati in implicito per ragioni di stabilità. La caratteristica fondamentale del metodo semi-implicito è che unisce i vantaggi di uno schema implicito, incondizionata stabilità per ogni passo temporale scelto, con quelli dello schema esplicito, quali la riduzione della matrice di risoluzione.

Per il calcolo della diffusività verticale e viscosità è stato utilizzato uno schema di chiusura turbolenza. Questo schema è un adattamento del modulo  $k-\mathcal{E}$  del modello *GOTM* (*General Ocean Turbulence Model*) descritto in Burchard e Petersen (1999).

Le velocità sono calcolate al centro di ogni elemento, mentre il livello temperatura e salinità è calcolato nei nodi della griglia. Verticalmente il modello descrive la colonna d'acqua tramite livelli Z di diverso spessore. La maggior parte delle variabili sono calcolate al centro di ogni strato, mentre i termini di stress e le velocità verticali sono risolti alle interfacce tra gli strati.

Le equazioni, integrate in ogni livello, sono:

$$\frac{\partial U_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial U_l}{\partial y} - f V_l = -g h_l \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g h_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \quad (1)$$

$$-\frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^{top(l)} - \tau_x^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 U_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial V_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial V_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial V_l}{\partial y} + f U_l = -g h_l \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g h_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \quad (2)$$

$$-\frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^{top(l)} - \tau_y^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 V_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_l}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + \sum_l \frac{\partial V_l}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

dove:

$l$  = livello verticale,

$(U_l, V_l)$  = trasporti orizzontali in ogni livello (velocità integrate),

$f$

= parametro di Coriolis,

$p_a$  = pressione atmosferica,

$g$  = accelerazione gravitazionale,

$\zeta$  = livello del mare,

$\rho_0$  = densità media del mare,

$\rho = \rho_0 + \rho$  = densità del mare,

$\tau$  = stress interni alla superficie e al fondo di ogni strato,

$h_l$  = spessore dello strato

$H_l$  = profondità del fondo dello strato  $l$ ,

$A_H$  = viscosità orizzontale.

Le condizioni al contorno per i termini di stress sono:

$$\tau_x^{surface} = c_D \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad \tau_y^{surface} = c_D \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_x^{bottom} = c_B \rho_0 u_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad \tau_y^{bottom} = c_B \rho_0 v_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad (5)$$

dove:

$c_D$  = coefficiente di attrito del vento,

$c_B$  = coefficiente di attrito al fondo,  
 $\rho_a$  = densità dell'aria,  
 $(w_x, w_y)$  = componenti del vento,  
 $(u_L, v_L)$  = velocità dell'acqua nell'ultimo livello.

Le condizioni al contorno prevedono la suddivisione dei bordi del dominio spaziale in bordi aperti e chiusi. Al contorno di mare aperto viene imposto il livello dell'acqua, mentre per i fiumi viene prescritta la portata. Ai bordi chiusi la componente normale della velocità è uguale a zero, mentre la componente tangenziale della velocità è un parametro libero.

La discretizzazione nello spazio delle incognite è stata attuata con il metodo degli elementi finiti parzialmente modificato rispetto alla formulazione classica. Questo approccio si è rivelato necessario per evitare fenomeni di *numerical damping* e *non conservazione della massa* dovuti alla combinazione di uno schema di tipo semi-implicito per la discretizzazione del tempo con il metodo standard degli elementi finiti conosciuto come *Galerkin method*. La differenza fondamentale rispetto alla formulazione originale consiste nel suddividere lo spazio in triangoli (elementi) e nel descrivere i livelli d'acqua  $\zeta$ , i trasporti  $U, V$ , utilizzando funzioni di forma di diverso ordine, lineari nel caso dei livelli mentre, per i trasporti, costanti a ogni passo spaziale (Umgiesser, 2000; Umgiesser *et al.*, 2004).

## 2.2. IL MODELLO DI TRASPORTO E DIFFUSIONE PER SALINITÀ E TEMPERATURA

Per comprendere la capacità di rimescolamento del sistema e l'evoluzione della salinità, della temperatura dell'acqua o di un qualsivoglia tracciante, è stato studiato il comportamento di una sostanza conservativa disciolta in acqua. In un punto qualsiasi del sistema l'evoluzione della concentrazione  $S$  di un tracciante conservativo è calcolabile applicando il principio di conservazione della massa (Umgiesser, 1997):

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} + \frac{\partial u_l S_l}{\partial x} + \frac{\partial v_l S_l}{\partial y} + \frac{\partial w_l S_l}{\partial z} = \nu_h \left( \frac{\partial^2 S_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_l}{\partial y^2} \right) + \nu_{v,l} \frac{\partial^2 S_l}{\partial z^2} + F \quad (6)$$

dove:

$S_l$  = concentrazione nello strato  $l$ ,

$\nu_h$  e  $\nu_{v,l}$  = coefficienti di diffusione orizzontale e verticale (calcolati dal modello k-E di chiusura della turbolenza),

$F$  = sorgenti esterne

### 2.2.1 Modulo di calore

La temperatura dell'acqua di un bacino varia nello spazio e nel tempo; questo indica che il calore fornito dalla radiazione solare viene assorbito, trasportato dalle correnti e scambiato con l'atmosfera per mezzo di diversi processi, come evaporazione e convezione.

La variazione della temperatura dell'acqua nel tempo è data dall'equazione 6 e gli scambi di calore con l'atmosfera sono contenuti nel termine sorgente  $\varphi = Q/C$  (Zampato *et al.*, 1998).  $C$  è la capacità termica del volume  $V$  di fluido considerato con

$$C = c\rho V$$

$c=4183$  [J/kg K] calore specifico e  $\rho=1000.52$  [kg/m<sup>3</sup>] densità dell'acqua.  $Q$  è il flusso di calore per unità di tempo in W/m<sup>2</sup> scambiato tra l'atmosfera e mare attraverso la superficie marina, che si può scindere nella somma di quattro termini:

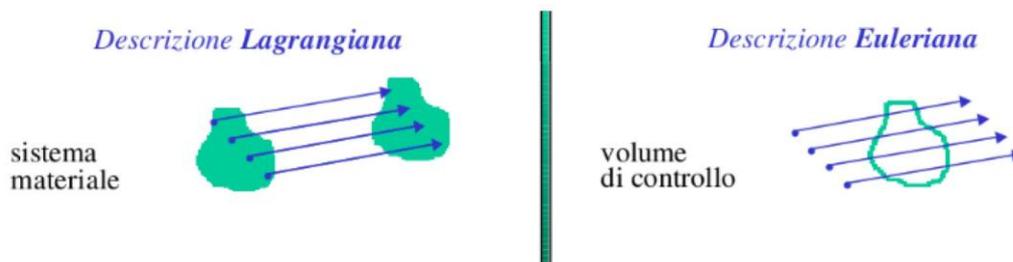
$$Q = Q_s + Q_b + Q_e + Q_h \quad (7)$$

I quattro contributi rappresentano altrettanti processi fisici:

- $Q_s$  è il flusso di energia solare attraverso la superficie del mare (short-wave radiation).  $Q_s$  presenta un'elevata variabilità giornaliera e stagionale: i suoi valori dipendono da lunghezza del giorno, elevazione del sole, assorbimento da parte dell'atmosfera, copertura nuvolosa, riflessione alla superficie;
- $Q_b$  è il flusso netto di calore tra atmosfera e mare, in base alla legge di Stefan-Boltzmann (long-wave radiation): è dato dalla differenza tra il flusso di energia irraggiato dalla superficie, a temperatura  $T_s$ , proporzionale a  $T_s^4$ , dalla legge di Stefan, e il flusso ricevuto dall'atmosfera, a temperatura  $T_a$ , proporzionale a  $T_a^4$ .  $Q_b$  non presenta notevoli variazioni giornaliere o stagionali, né forti variazioni con la latitudine;
- $Q_e$  è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera attraverso i processi di evaporazione e condensazione: è proporzionale al gradiente della concentrazione di vapore acqueo sopra la superficie del mare alla velocità del vento  $W$ ;
- $Q_h$  è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera per conduzione e convezione. Questo termine è proporzionale al gradiente di temperatura nello strato atmosferico sopra la superficie del mare e come  $Q_e$  dipende dalla velocità del vento  $W$ , che è intesa come scala per l'effetto della turbolenza.

### 2.3. I MODELLI DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI

Per lo studio della dispersione del materiale sedimentario sono stati implementati due approcci, uno euleriano e uno lagrangiano. L'approccio lagrangiano identifica un sistema materiale (particella, insieme di particelle, corpo rigido, ecc.) e ne segue gli spostamenti nello spazio; in ogni istante e per ogni punto materiale sono descritti i valori delle grandezze di interesse e la posizione del punto medesimo, ottenendo una completa descrizione spazio-temporale del campo. Nella descrizione Euleriana, viceversa, si identifica un riferimento geometrico (punto, volume) fisso nello spazio, e se ne descrive i valori delle grandezze di interesse in ogni istante; a causa del movimento, però, i diversi valori per i diversi tempi sono riferiti a punti materiali (particelle fluide) diversi (Fig. 2).



**Fig. 2** – Rappresentazione grafica dell'approccio lagrangiano ed euleriano (<http://www.diiar.polimi.it/frenz/MdF/dispense/MdFparteB.pfd>).

Questi due metodi sono complementari: il modello lagrangiano ben si presta alla descrizione della dispersione spaziale dei materiali in sospensione, mentre quello euleriano può fornire indicazioni sia sulla dispersione che sull'accumulo del sedimento depositato nell'area di sversamento.

#### 2.3.1 Modello lagrangiano di trasporto dei sedimenti

Il modello idrodinamico SHYFEM è corredato di un modulo lagrangiano che permette di seguire nello spazio i movimenti di singole particelle.

Il moto della singola particella  $k$  viene descritto attraverso la variazione della sua posizione nello spazio. Gli spostamenti  $dX$ ,  $dY$  e  $dZ$  sono quindi dovuti alle velocità di corrente  $u$ ,  $v$ ,  $w$  nelle tre direzioni, alle fluttuazioni turbolente  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  e ai moti verticali generati dai processi di sprofondamento  $w^b$ :

$$\frac{\partial X_k}{\partial t} = u + u^i \quad (8)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} = v + v^i \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_k}{\partial t} = w + w^i + w^b \quad (10)$$

I campi di corrente  $u$ ,  $v$  e  $z$  vengono forniti dal modello idrodinamico ad ogni intervallo temporale. Le fluttuazioni turbolente,  $u^i$ ,  $v^i$ ,  $w^i$ , vengono calcolate con il metodo Random Walk in funzione del coefficiente di diffusione orizzontale che viene calcolato mediante lo schema di Smagorinsky (1963) secondo la seguente equazione:

$$K_H = K \Delta x^2 \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

dove  $K$  è un parametro che varia tra 0,2 e 0,4.

In questo studio, dovendo simulare materiale sedimentario, ad ogni particella è stata assegnata una dimensione granulometrica a cui è stata associata una velocità di sprofondamento  $w^b$  appropriata.

### 2.3.2 Modello euleriano di trasporto dei sedimenti

In questo caso la dinamica del materiale in sospensione viene descritto dall'equazione 6. Alla superficie e al fondo le condizioni di contorno dell'equazione 6 per i sedimenti sono:

$$+\nu_{v,top} \frac{\partial S_{top}}{\partial z} + w_s S_{top} = FS \quad z=\text{superficie del primo livello} \quad (12)$$

$$-\nu_{v,bot} \frac{\partial S_{bot}}{\partial z} + w_s S_{bot} = ED \quad z=\text{fondo dell'ultimo livello}$$

dove  $FS$  è la quantità di sedimento sversata in superficie ed  $ED$  è il flusso netto di sedimento tra fondale marino e colonna d'acqua, calcolato come differenza tra tra deposizione e risospensione. Tale termine viene calcolato dal modello Sedtrans05 (Neumeier *et al.*, 2008).

Sedtrans05 non solo calcola i parametri dello strato limite, ma predice anche lo sviluppo delle forme di fondo e i tassi di trasporto solido, sia come carico di fondo sia in sospensione, per sabbie e sedimenti coesivi. Il modello matematico Sedtrans05 può

essere usato per predire il tasso di trasporto e la direzione di sabbia o fango in condizioni di corrente stazionaria oppure onde e correnti combinate, al di fuori della zona di frangenza delle onde. Sedtrans05 adotta la teoria di Grant e Madsen (1986) dello strato limite al fondo per calcolare la velocità di taglio al fondo e il profilo di velocità.

### **3. APPLICAZIONE DEL MODELLO**

#### **3.1. LA GRIGLIA DI CALCOLO**

Il modello a elementi finiti deve essere supportato da una griglia a struttura irregolare su cui far avvenire la simulazione. I file di griglia sono strutturati in modo da poter rappresentare in un piano cartesiano la struttura geometrica e la batimetria di un dato bacino attraverso punti, detti nodi, linee ed elementi triangolari variabili per dimensioni e forma. Il file di griglia è composto da due matrici consecutive, una che definisce i nodi e l'altra gli elementi tramite numero, coordinate e tipologia.

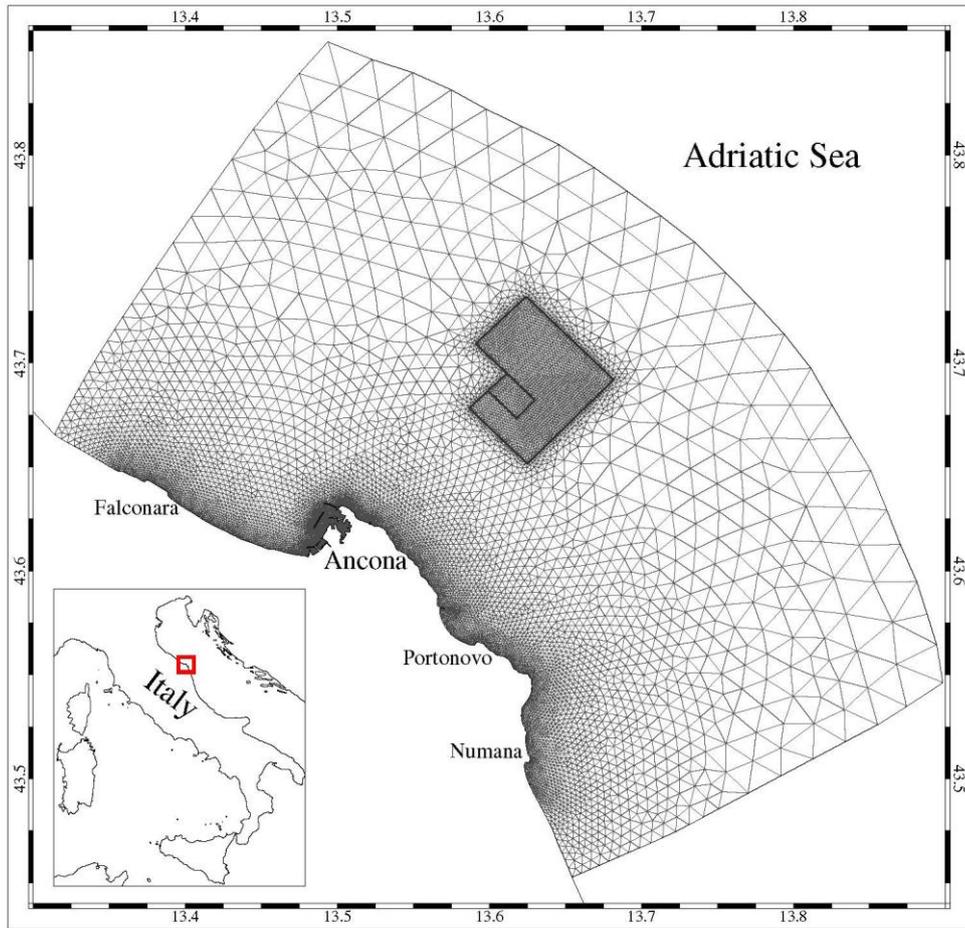
La griglia di calcolo utilizzata in questo studio rappresenta una parte della costa marchigiana (circa da Senigallia a Civitanova Marche) che comprende il porto di Ancona e si estende verso mare fino alla batimetria dei 55 m (circa 20-25 km dalla costa). La griglia di calcolo è stata ottenuta suddividendo l'area di interesse in 27036 elementi triangolari per descrivere la geometria della costa e nel dettaglio la zona portuale. Grazie alla differente dimensione degli elementi è stato possibile aumentare la risoluzione nella zona portuale fino a poche decine di metri. Nella zona di sversamento la risoluzione della griglia è di circa 150 m.

La griglia numerica di calcolo è mostrata in Fig. 3.

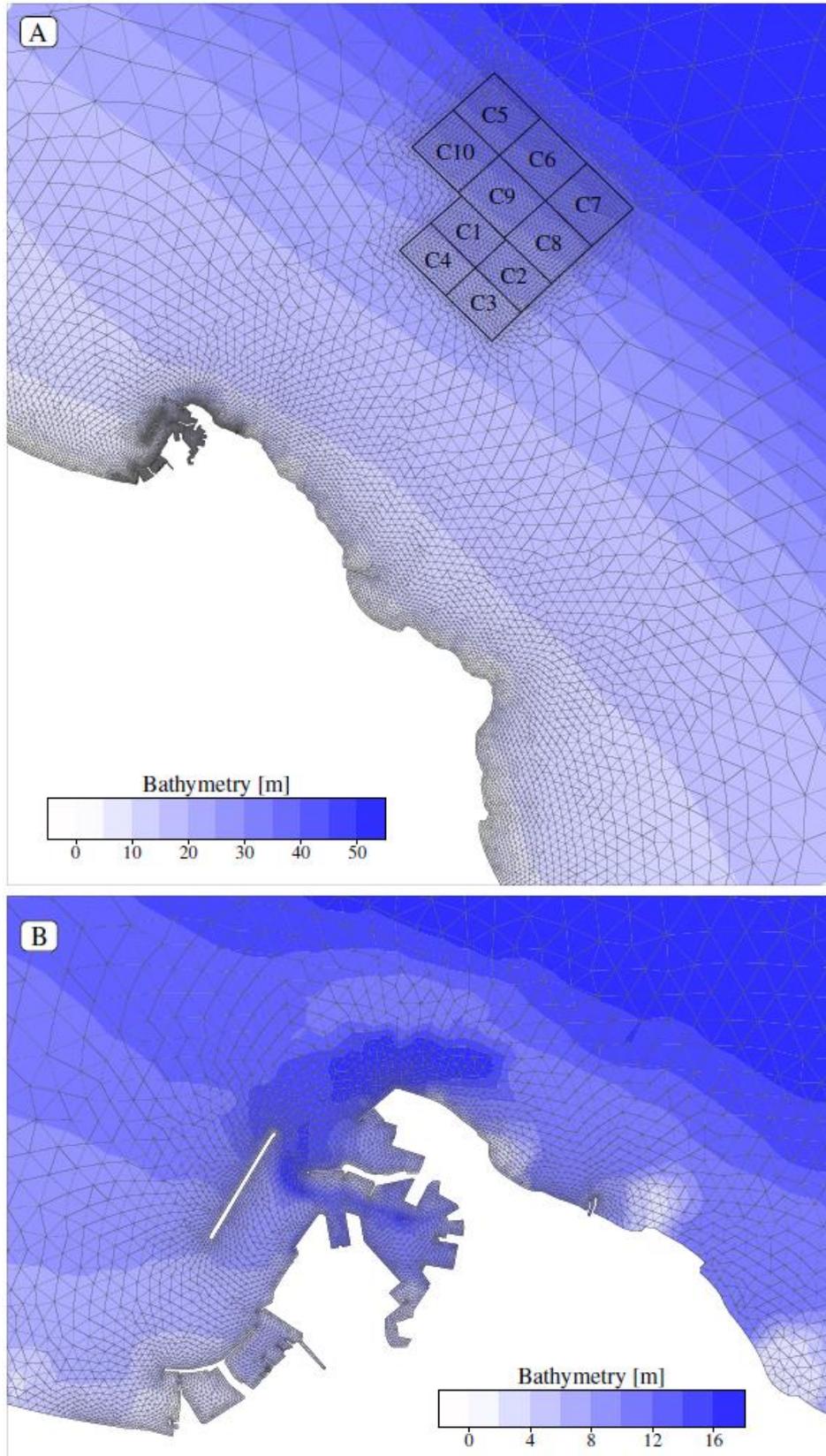
Sugli elementi della griglia di calcolo è stata interpolata la batimetria della zona ottenuta dall'unione dei seguenti dataset:

- rilievo del fondale della zona del porto di Ancona eseguita dall'Istituto Idrografico della Marina nel 2011;
- rilievo del fondale della Baia di Mezzavalle eseguito dal CNR-ISMAR UOS Ancona nel 2003;
- batimetria del mare Adriatico tramite il portale EMODnet (European Marine Observation and Data Network) e di proprietà del CNR-ISMAR (Trincardi *et al.*, 2013).

La batimetria così ottenuta è mostrata in Fig. 4 con sovrapposta la griglia di calcolo.



**Fig. 3** - Griglia computazionale agli elementi finiti utilizzata in questo studio. Il poligono grigio nella zona a mare indica la zona predisposta allo sversamento dei sedimenti dragati.



**Fig. 4** - Batimetria della zona di interesse (A) e particolare della zona portuale di Ancona (B). Alla batimetria è sovrapposta la griglia di calcolo.

### 3.2. SET-UP DELLE SIMULAZIONI

Al fine di descrivere la circolazione idrodinamica e la dispersione dei sedimenti nelle zone costiere antistante la zona portuale di Ancona sono state effettuate le simulazioni annuali per gli anni 2014 e 2015.

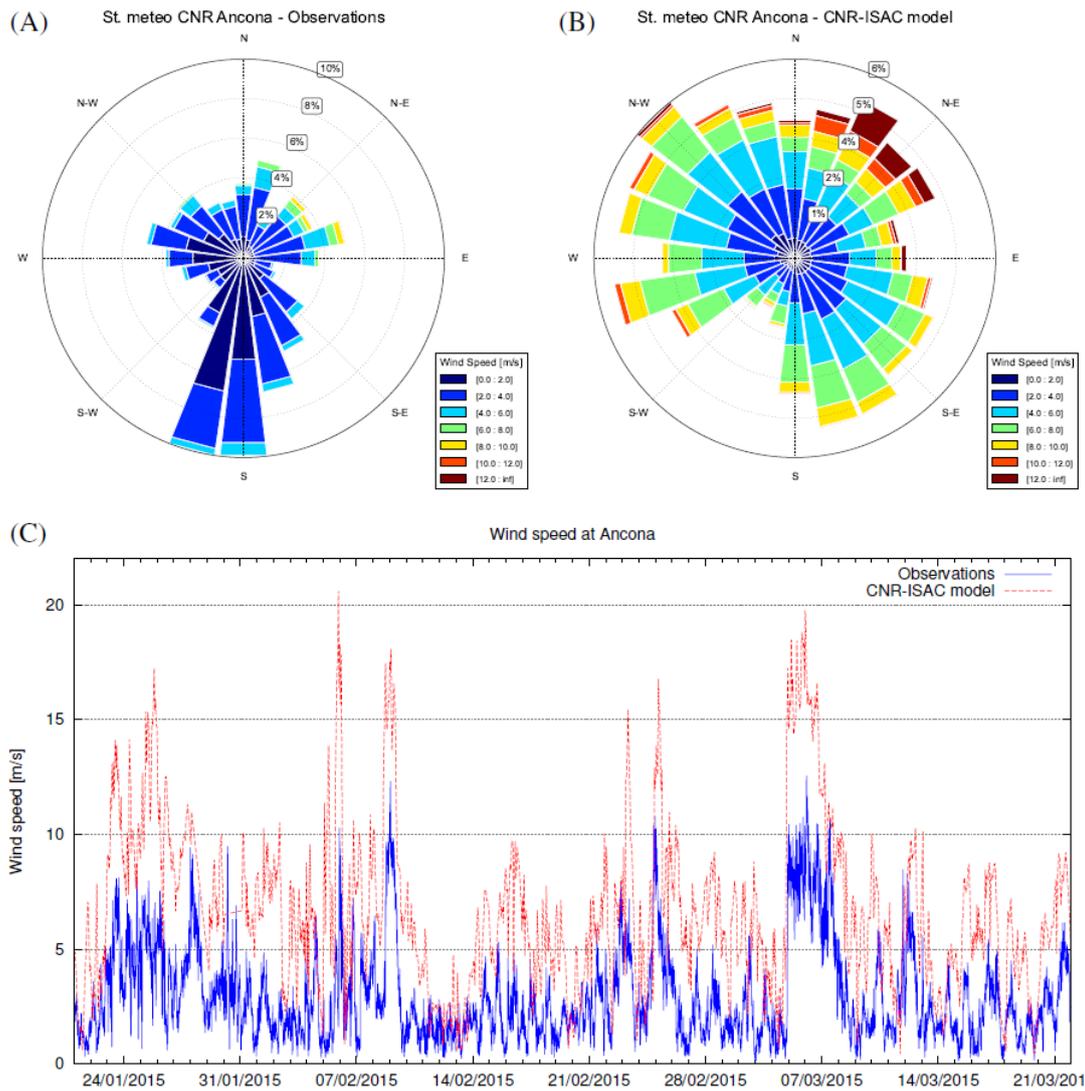
Il modello è stato forzato alla superficie del mare dai campi di vento, pressione atmosferica, pioggia e flussi di calore ottenuti dal modello meteorologico MOLOCH del CNR-ISAC avente una risoluzione spaziale di circa 1,5 km.

Per verificare l'attendibilità del modello meteorologico utilizzato per forzare il modello idrodinamico, i risultati del modello MOLOCH sono stati confrontati con i valori di intensità e direzione del vento misurati dalla stazione meteo installata sul tetto del CNR-ISMAR UOS Ancona nel Porto di Ancona e dalla stazione meteo-marina ubicata in mare aperto a circa 1,5 mn a Nord di Senigallia. Per quest'ultima stazione di misura è stato fatto anche un confronto tra la temperatura dell'aria misurata e quella simulata dal modello meteorologico a 2 m dal suolo. Entrambe le stazioni di misura sono gestite dal CNR-ISMAR UOS Ancona. Nelle Figg. 5 e 6 sono riportati i confronti tra i dati di vento osservati e simulati a 10 m dalla superficie nelle due stazioni sopracitate.

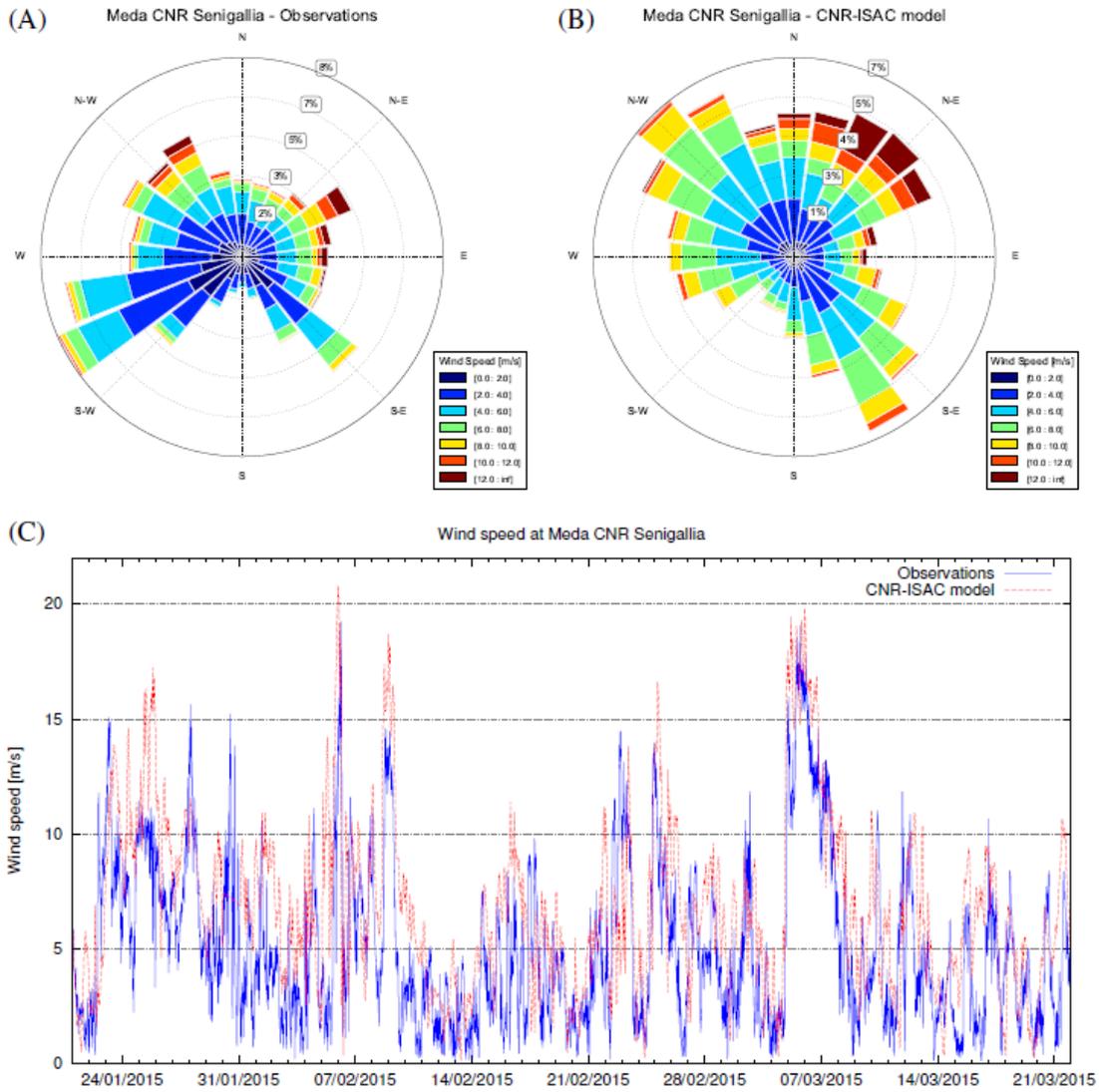
Dal confronto con le misure emerge che il modello sovrastima il vento nella stazione di Ancona. Va tenuto conto che la stazione di misura sita sul tetto dell'istituto CNR-ISMAR si trova in una zona edificata in cui possono essere presenti effetti locali che influenzano la direzione del vento e ne attenuano l'intensità. Come mostrato in Fig. 6, il modello ben rappresenta i regimi di vento che caratterizzano la zona di mare aperto antistante Senigallia. In questa località il modello riproduce correttamente la variazione temporale dell'intensità del vento. Una leggera sovrastima del modello può essere dovuta al fatto che il modello fornisce i risultati a 10 m dalla superficie, mentre la stazione di misura si trova a circa 6,5 m dalla superficie del mare.

In Fig. 7 viene riportato il confronto tra i valori di temperatura dell'aria osservati presso la stazione meteo-marina CNR-ISMAR Meda Senigallia e i valori simulati dal modello meteorologico per la stessa località. Il modello meteorologico ben riproduce l'andamento stagionale della temperatura dell'aria. Da notare una leggera sottostima della variabilità giornaliera di tale parametro.

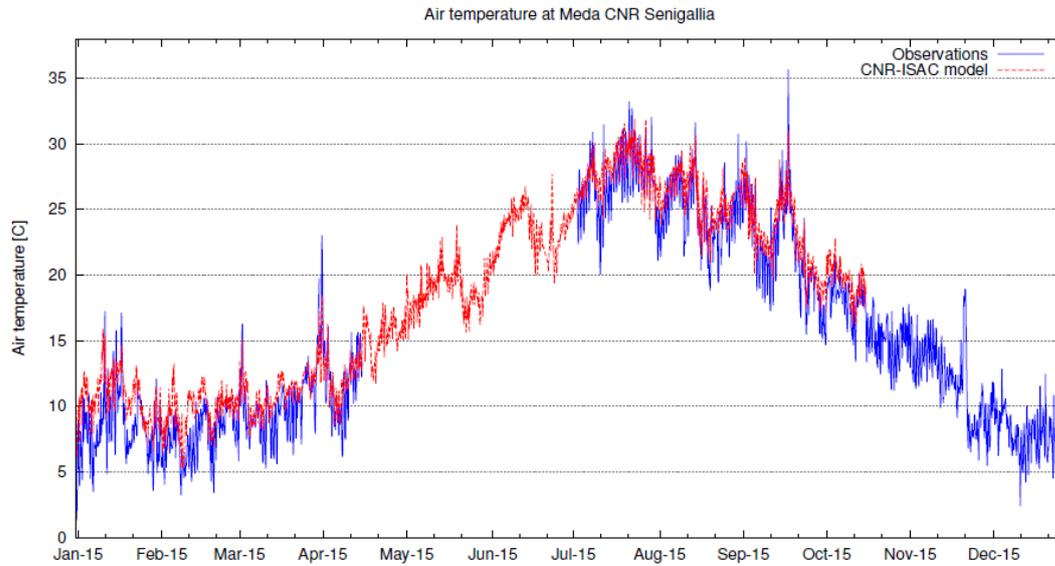
Il coefficiente di attrito per il vento nel modello idrodinamico è stato impostato a un valore di  $2,5 \cdot 10^{-3}$  (Bellafiore *et al.*, 2008; Ferrarin *et al.*, 2010).



**Fig. 5** - Rosa dei venti ottenuta dalle osservazioni registrate dalla stazione di misura CNR-ISMAR ad Ancona (A) e rosa dei venti ottenuta dai risultati del modello meteo per la stessa località (B). Nel pannello C viene riportato il confronto tra l'intensità del vento osservata e simulata.



**Fig. 6** - Rosa dei venti ottenuta dalle osservazioni registrate dalla stazione di misura CNR-ISMAR Mede di Senigallia (A) e rosa dei venti ottenuta dai risultati del modello meteo per la stessa località (B). Nel pannello C viene riportato il confronto tra l'intensità del vento osservata e simulata.



**Fig. 7** - Temperatura dell'aria misurata dalla stazione meteo-marina CNR-ISMAR Meda di Senigallia e simulata dal modello MOLOCH per la stessa località.

Le condizioni al contorno sono fornite da una applicazione del modello SHYFEM a tutto il mare Adriatico. Tale modello a scala maggiore fornisce le informazioni relative al livello del mare, alla struttura tridimensionale delle velocità della corrente, della salinità e della temperatura del mare. Il modello numerico SHYFEM è stato calibrato e validato per l'Adriatico in precedenti studi scientifici pubblicati (Bellafiore *et al.*, 2008; Bellafiore e Umgiesser, 2010). In ogni caso stata effettuata una validazione dei risultati del modello del bacino Adriatico con misure disponibili.

L'accuratezza di tale modello oceanografico è stata valutata in base alla corretta riproduzione dei livelli, mediante il confronto con osservazioni di 7 mareografi (Trieste, Venezia, Ravenna, Ancona, San Benedetto del Tronto, Ortona e Isole Tremiti) gestiti dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca dell'Ambiente (ISPRA, <http://www.mareografico.it>). Per analizzare la capacità del modello di riprodurre il segnale mareale in Adriatico, le serie temporali dei dati disponibili e i risultati del modello sono stati analizzati con un programma di analisi armonica. La performance del modello mareale è stata valutata dall'analisi della distanza vettoriale per ognuna delle componenti mareali considerate calcolata come:

$$d_{i,j} = \sqrt{(a_{i,j}^o \cos g_{i,j}^o - a_{i,j}^m \cos g_{i,j}^m)^2 + (a_{i,j}^o \sin g_{i,j}^o - a_{i,j}^m \sin g_{i,j}^m)^2} \quad (13)$$

dove  $a$  è l'ampiezza (cm) e  $g$  la fase (gradi) della componente mareale. L'indice  $i$  si riferisce alla stazione di misura, l'indice  $j$  si riferisce alla componente mareale. L'apice  $o$

indica le misure e l'apice  $m$  indica i risultati del modello matematico. Per ognuna della componenti mareali considerate l'errore quadratico medio è definito come:

$$RMS_j = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N d_{i,j}^2} \quad (14)$$

dove  $N$  è il numero di stazioni e  $d_{i,j}$  è la differenza vettoriale definita dall'equazione (13) per ognuna delle stazioni  $i$ . I risultati dell'analisi per ogni stazione di misura considerata sono presentati in Tab. 1.

I risultati dell'analisi statistica dimostrano un accordo soddisfacente delle costanti armoniche simulate rispetto a quelle empiriche ricavate dalle osservazioni. La differenza vettoriale media (RMS) è inferiore a 1 cm per ognuna delle componenti armoniche considerate.

I risultati del modello SHYFEM di tutto il mare Adriatico sono stati inoltre confrontati con le misure della temperatura del mare (alla profondità di 2 m dalla superficie) e della velocità della corrente (alla profondità 7 m dal fondo) registrati dalla stazione meteo-marina della Meda Senigallia. Presso tale stazione sono stati registrati dati di corrente dal 19/03/2015 al 22/11/2015 a due quote, i cui baricentri erano a 7 m e a 3 m di profondità dal fondo (Fig. 8).

**Tab. 1** - Analisi statistica delle componenti semi-diurne e diurne per tutti i mareografi considerati. I risultati dell'analisi sono forniti in termini di differenza vettoriale (Eq. (13)) e RMS (Eq. (14)). I valori sono espressi in cm.

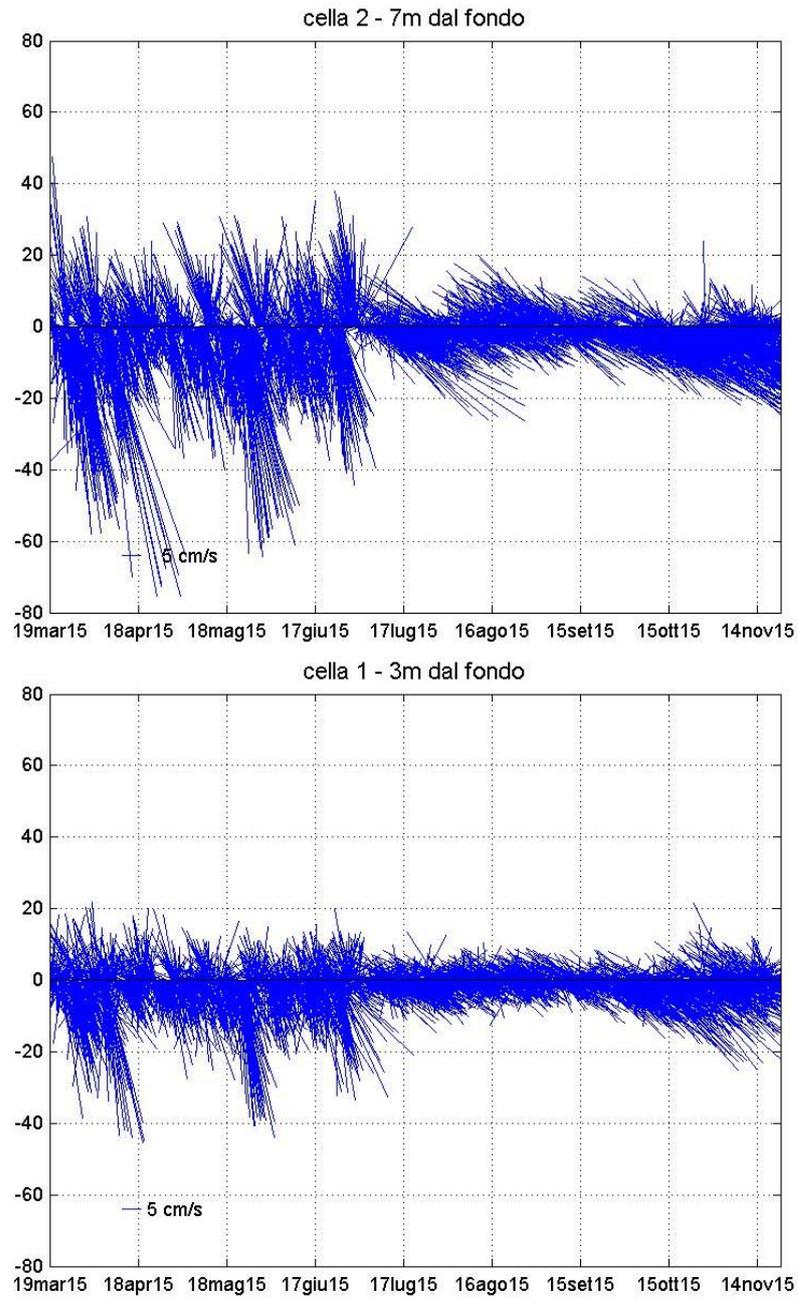
| Mareografo      | Semi-diurne |      |      |      | Diurne |      |      |
|-----------------|-------------|------|------|------|--------|------|------|
|                 | M2          | S2   | N2   | K2   | K1     | O1   | P1   |
| Trieste         | 1,12        | 0,80 | 0,46 | 0,94 | 0,75   | 0,62 | 0,64 |
| Venezia         | 1,23        | 0,69 | 0,39 | 1,07 | 0,77   | 1,00 | 0,46 |
| Ravenna         | 1,38        | 0,88 | 0,11 | 0,83 | 0,18   | 0,97 | 0,18 |
| Ancona          | 0,70        | 0,40 | 0,11 | 0,20 | 0,25   | 0,47 | 0,41 |
| S. Benedetto T. | 0,25        | 0,13 | 0,06 | 0,18 | 0,43   | 0,13 | 0,32 |
| Ortona          | 0,73        | 0,37 | 0,22 | 0,38 | 0,35   | 0,26 | 0,30 |
| I. Tremiti      | 1,00        | 0,53 | 0,22 | 0,38 | 0,50   | 0,15 | 0,27 |
| RSM             | 0,98        | 0,60 | 0,27 | 0,65 | 0,51   | 0,62 | 0,40 |

I dati di corrente registrati nelle due celle hanno mostrato un andamento piuttosto irregolare, con bruschi cambiamenti di direzione ma con una prevalenza dell'intensità nella direzione Sud. Le intensità più elevate (superiori a 50 cm/s) si sono registrate nella cella 2 a fine marzo, a metà aprile e a fine maggio. Da fine giugno a inizio luglio l'intensità di corrente è stata registrata intorno a 40 cm/s per poi mantenersi entro i 20-30 cm/s fino

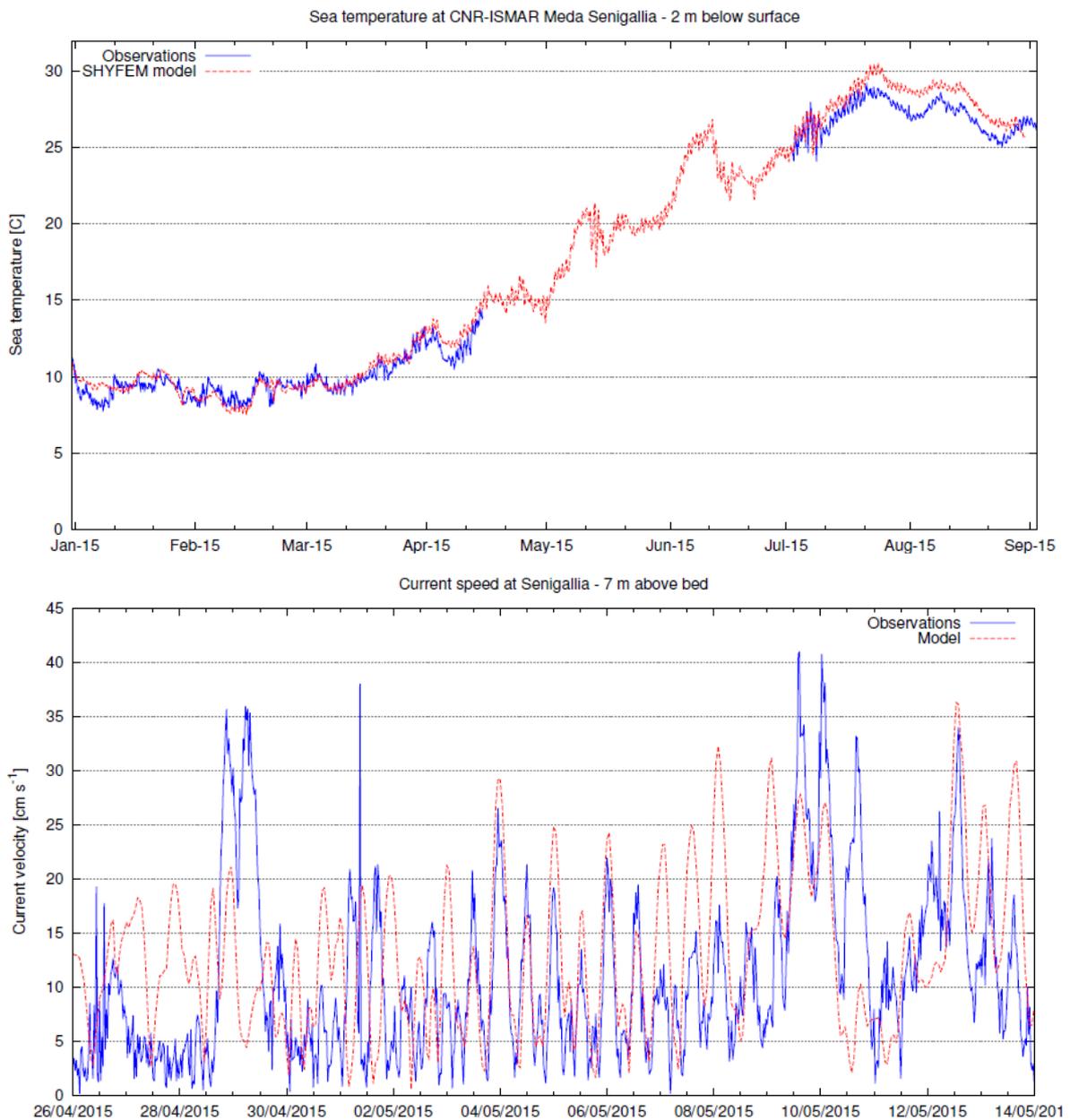
a fine registrazione. La cella 1 ha mostrato un andamento di corrente simile alla cella 2 ma di intensità più bassa: da inizio registrazione fino a metà luglio l'intensità di corrente non ha mai superato 50 cm/s mentre per il restante periodo l'intensità di corrente si è mantenuta entro i 20-30 cm/s.

Per il confronto tra osservazioni e risultati modellistici sono stati considerati tutti i dati disponibili; a titolo di esempio si rimanda alla Fig. 9 dove sono illustrati i confronti per un periodo limitato di tempo.

Il modello idrodinamico del mare Adriatico simula correttamente l'evoluzione della temperatura del mare, anche se si evidenzia una sovrastima del modello di circa 1,5°C durante il mese di agosto 2015. Simula con un buon grado di accuratezza la corrente registrata presso la Meda Senigallia riproducendo l'oscillazione mareale ma tende a sottostimare l'intensità massima della corrente durante eventi meteo-marini significativi (es.: 29 aprile e 10 maggio).



**Fig. 8** - Stickplot in cm/s della corrente (dati ogni 10 minuti) a 7 m e a 3 m dal fondo registrata dal correntometro ADCP dal 19/03/15 al 22/11/15.



**Fig. 9** - Confronto tra osservazioni (linea blu continua) e risultati del modello idrodinamico (linea rossa tratteggiata) della temperatura dell'acqua e dell'intensità della corrente alla Meda Senigallia.

### 3.3. CALIBRAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO

Per la calibrazione del modello idrodinamico sono state effettuate delle simulazioni numeriche della propagazione della marea per il periodo 1 giugno - 31 agosto 2015 (92 giorni con 10 giorni di tempo di aggiustamento). Il parametro idrodinamico calibrato è il coefficiente di attrito al fondo, considerato omogeneo su tutto il dominio di calcolo. Al fine di valutare la capacità del modello nel riprodurre la dinamica mareale è stata effettuata

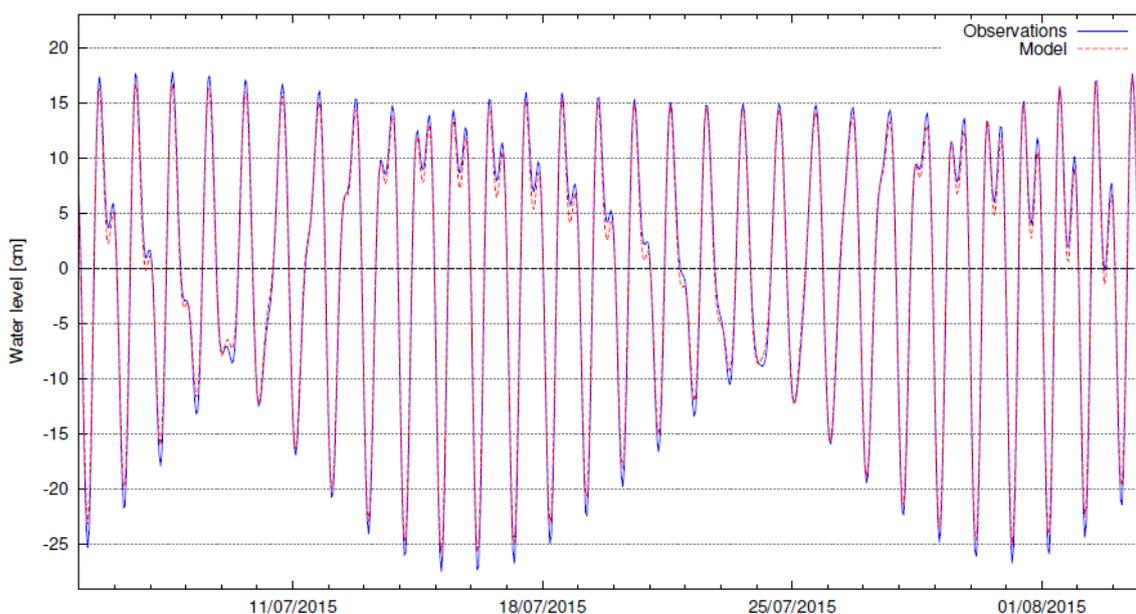
l'analisi armonica del livello del mare registrato nel Porto di Ancona dal mareografo delle Rete Mareografica Nazionale e dei risultati del modello.

La calibrazione è stata effettuata utilizzando l'algoritmo di ottimizzazione automatico PRICE che, tramite simulazioni ripetute, trova il parametro di attrito al fondo che minimizza l'errore tra le costanti armoniche ottenute dalle osservazioni e quelle estratte dai risultati del modello. Alla fine del processo di calibrazione la differenza tra modello e misure è inferiore a 0,05 cm e 0,5 gradi per le ampiezze e le fasi rispettivamente delle principali componenti armoniche (Tab. 2). Il coefficiente di attrito al fondo ottenuto dal processo di calibrazione risulta essere eguale a  $3,5 \cdot 10^{-3}$ .

In Fig. 10 viene mostrato il confronto tra il livello di marea osservato e simulato da cui si evince che il modello ben riproduce il segnale mareale nella zona di interesse.

**Tab. 2** - Ampiezze e fasi delle principali componenti armoniche semi-diurne della marea ottenute dalle misure e dalle simulazioni di calibrazione ad Ancona. Vengono anche riportate le differenze tra modello e misure.

| Costante armonica | Ampiezza (cm) |       |      | Fase (gradi) |        |       |
|-------------------|---------------|-------|------|--------------|--------|-------|
|                   | Obs           | Mod   | Diff | Obs          | Mod    | Diff  |
| M2                | 6.85          | 6,88  | 0,03 | 304,20       | 304,26 | 0,06  |
| S2                | 3.72          | 3,72  | 0,00 | 318,33       | 318,27 | -0,06 |
| N2                | 1.16          | 1,16  | 0,00 | 310,10       | 310,46 | 0,36  |
| K2                | 0,77          | 0,77  | 0,00 | 323,28       | 323,04 | -0,24 |
| K1                | 11,35         | 11,36 | 0,01 | 71,97        | 71,98  | 0,01  |
| O1                | 3,38          | 3,39  | 0,01 | 59,60        | 59,59  | -0,01 |
| P1                | 4,44          | 4,33  | 0,00 | 66,19        | 66,14  | -0,05 |



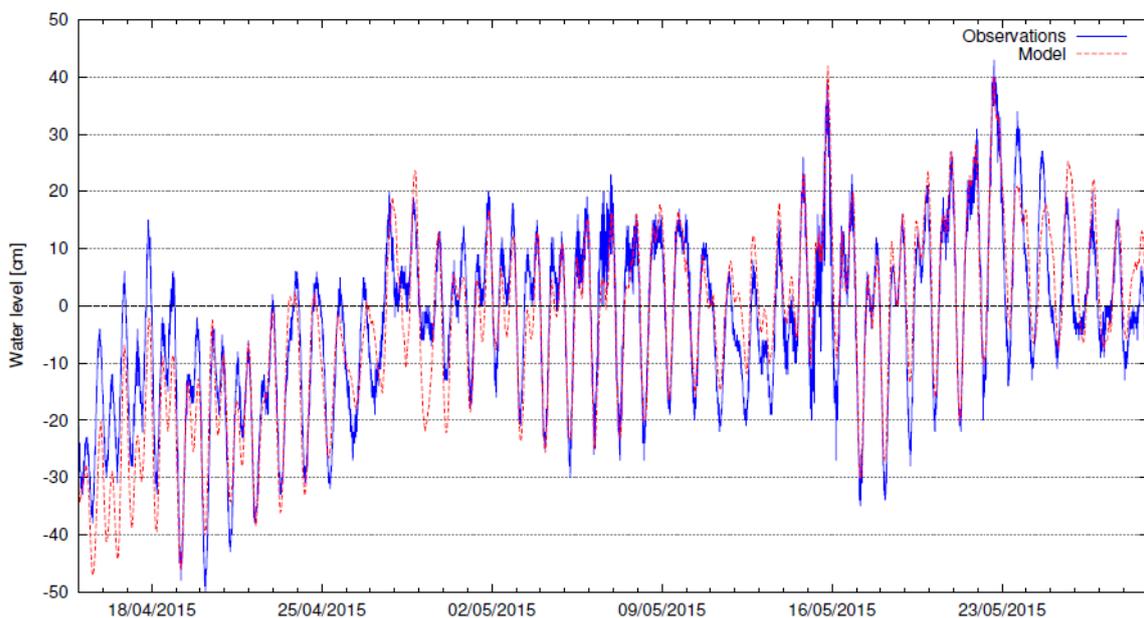
**Fig. 10** - Confronto tra livello di marea osservato (linea rossa continua) e simulato dal modello idrodinamico (linea blu tratteggiata) ad Ancona.

### 3.4. VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO

Una volta calibrato, il modello idrodinamico è stato validato confrontando i risultati numerici con le osservazioni di:

- livello del mare ad Ancona;
- corrente marina misurate in 2 diverse località:
  - Ancona Porto, alla profondità di 1 m dal fondo;
  - Baia di Portonovo, alla profondità di 4 m dal fondo;
- profili di temperatura dell'acqua e salinità in diverse stazioni di misura nel Porto di Ancona e nella zona di sversamento.

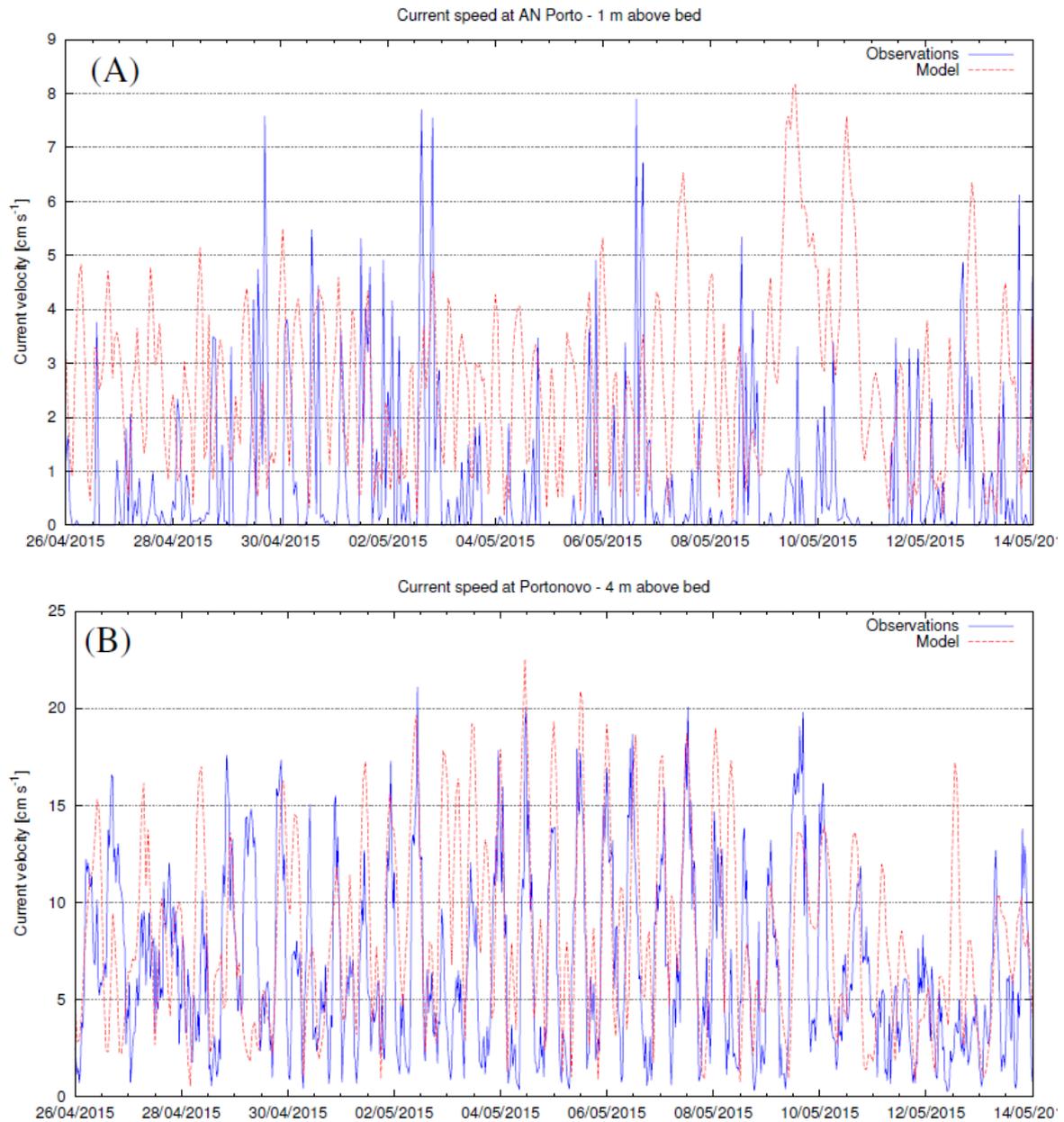
Confrontando i risultati numerici con il livello del mare osservato dal mareografo di Ancona risulta che il modello ha, per questa variabile, un errore quadratico medio di 8 cm e un coefficiente di correlazione di 0,85. L'evoluzione nel tempo del livello osservato e simulato viene riportato in Fig. 11. Ne risulta che il modello riproduce in modo soddisfacente l'andamento del livello del mare modulato dalla marea e dalle forzanti meteorologiche.



**Fig. 11** - Confronto tra le osservazioni (linea blu continua) e risultati del modello idrodinamico (linea rossa tratteggiata) del livello del mare ad Ancona.

I confronti tra le osservazioni e i risultati numerici per le due stazioni correntometriche sopracitate sono riportati in Fig. 12. Il modello descrive una variazione della corrente al fondo nella zona del Porto di Ancona con valori nell'ordine di  $5 \text{ cm s}^{-1}$ . Tale fluttuazione periodica non è stata registrata dal correntometro posizionato a circa 1 m dal fondo. Le

osservazioni sono caratterizzate in questo sito di misura da variazioni ad alta frequenza non attribuibili alla marea.



**Fig. 12** - Confronto tra osservazioni (linea blu continua) e risultati del modello idrodinamico (linea rossa tratteggiata) dell'intensità della corrente ad AN Porto (A) e Baia di Portonovo (B).

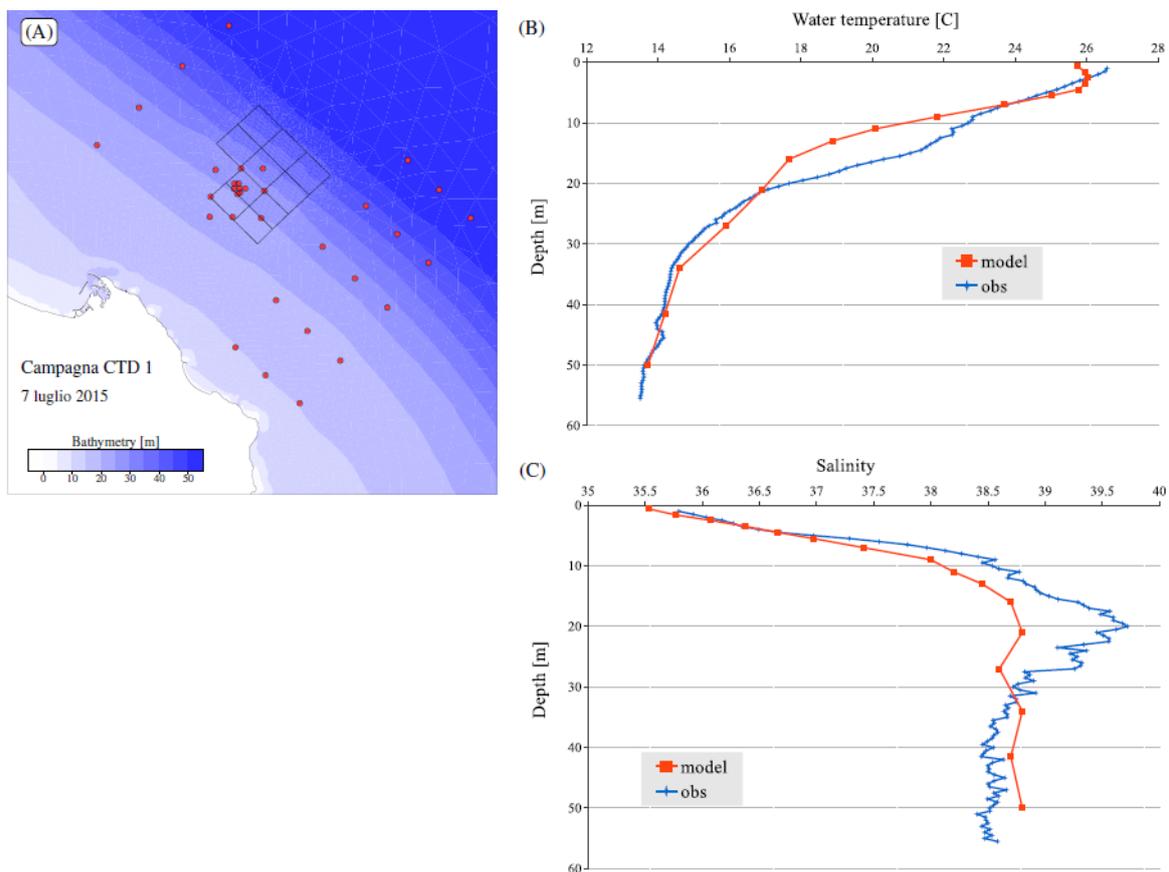
Nella Baia di Portonovo sia le osservazioni che le simulazioni riproducono una corrente marina caratterizzata da una fluttuazione periodica legata alla forzante mareale e avente valori di picco nell'ordine di 10-20 cm s<sup>-1</sup> (Fig. 12B).

I risultati del modello sono stati elaborati per ottenere i profili di temperatura del mare e salinità da confrontare con quelli osservati nella colonna d'acqua tramite sonda

multiparametrica SeaBird SBE durante due campagne di misura:

- 7 luglio 2015: osservazioni nei 34 punti di misura indicati con pallini rossi in Fig. 13;
- 13 luglio 2015: osservazioni in 12 punti nella zona di sversamento e in 13 punti nella zona del Porto di Ancona e adiacente zona costiera (pallini blu e rossi rispettivamente in Fig. 14A).

La circolazione idrodinamica media simulata dal modello SHYFEM per i giorni di campionamento viene mostrata in Fig. 15.

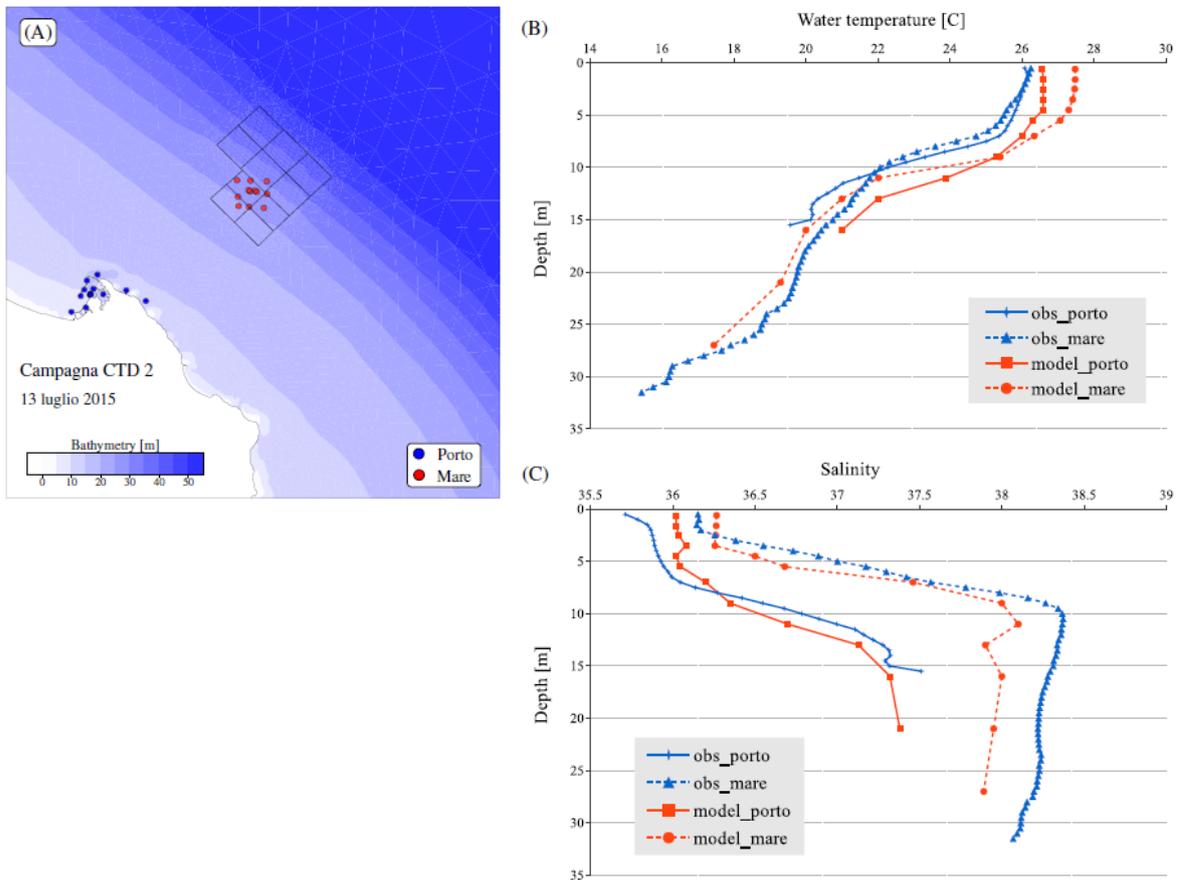


**Fig. 13** - Ubicazione delle stazioni di misura della campagna del 7 luglio 2015 (A) e confronto tra osservazioni (linea blu) e risultati del modello idrodinamico (linea rossa) del profilo medio della temperatura dell'acqua (B) e salinità (C).

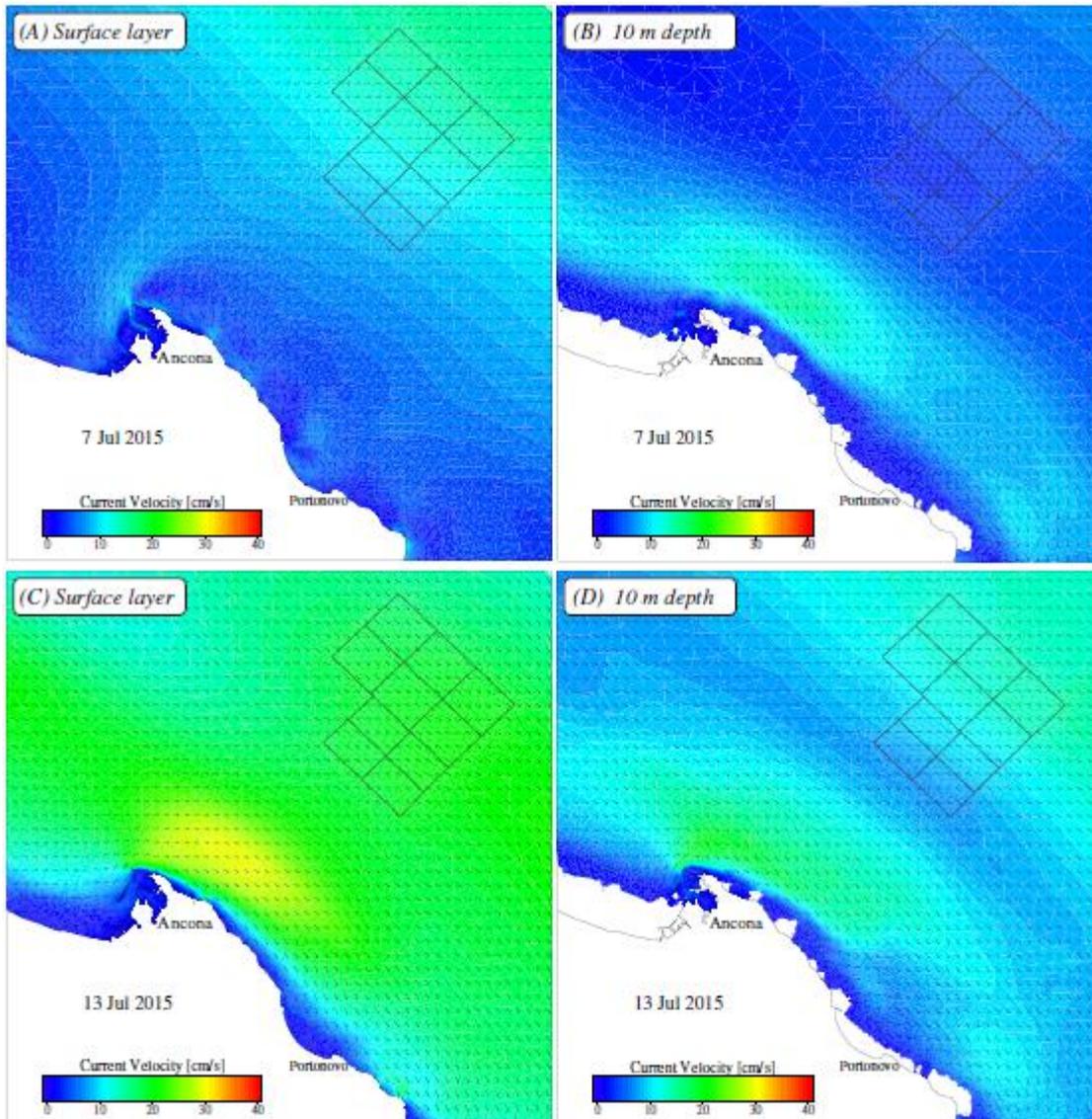
Dal confronto con le misure del 7 luglio risulta che il modello numerico sovrastima la temperatura del mare di circa 2°C nella zona del termocline (tra 10 e 20 m di profondità) e sottostima la salinità di circa 1 tra i 15 e i 25 m di profondità. Nel caso del 13 luglio 2015 il modello sovrastima la temperatura dello strato superficiale del mare di circa 1°C, mentre sottostima di circa 0,5 la salinità nello strato sottostante l'alocline.

Per concludere possiamo affermare che complessivamente il modello simula

correttamente la dinamica della circolazione e il grado di stratificazione della colonna d'acqua nella zona di interesse.



**Fig. 14** - Ubicazione delle stazioni di misura della campagna del 13 luglio 2015 (A) e confronto tra osservazioni (linee blu) e risultati del modello idrodinamico (linee rossa) dei profili medi della temperatura dell'acqua (B) e salinità (C) nella zona del Porto (linee continue) e di sversamento (linee tratteggiate).



**Fig. 15** - Correnti medie in superficie e a 10 m di profondità simulate dal modello SHYFEM per i giorni 7 (A e B) e 13 (C e D) luglio 2014.

#### 4. DESCRIZIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI METEOMARINI

I risultati della simulazione idrodinamica sono stati analizzati al fine di caratterizzare la circolazione nella zona di interesse. Come prima analisi sono stati estratti i valori di velocità della corrente in due punti del dominio di calcolo:

- **A** - all'interno dell'area di sversamento;
- **B** - nella zona di escavo a ridosso del molo.

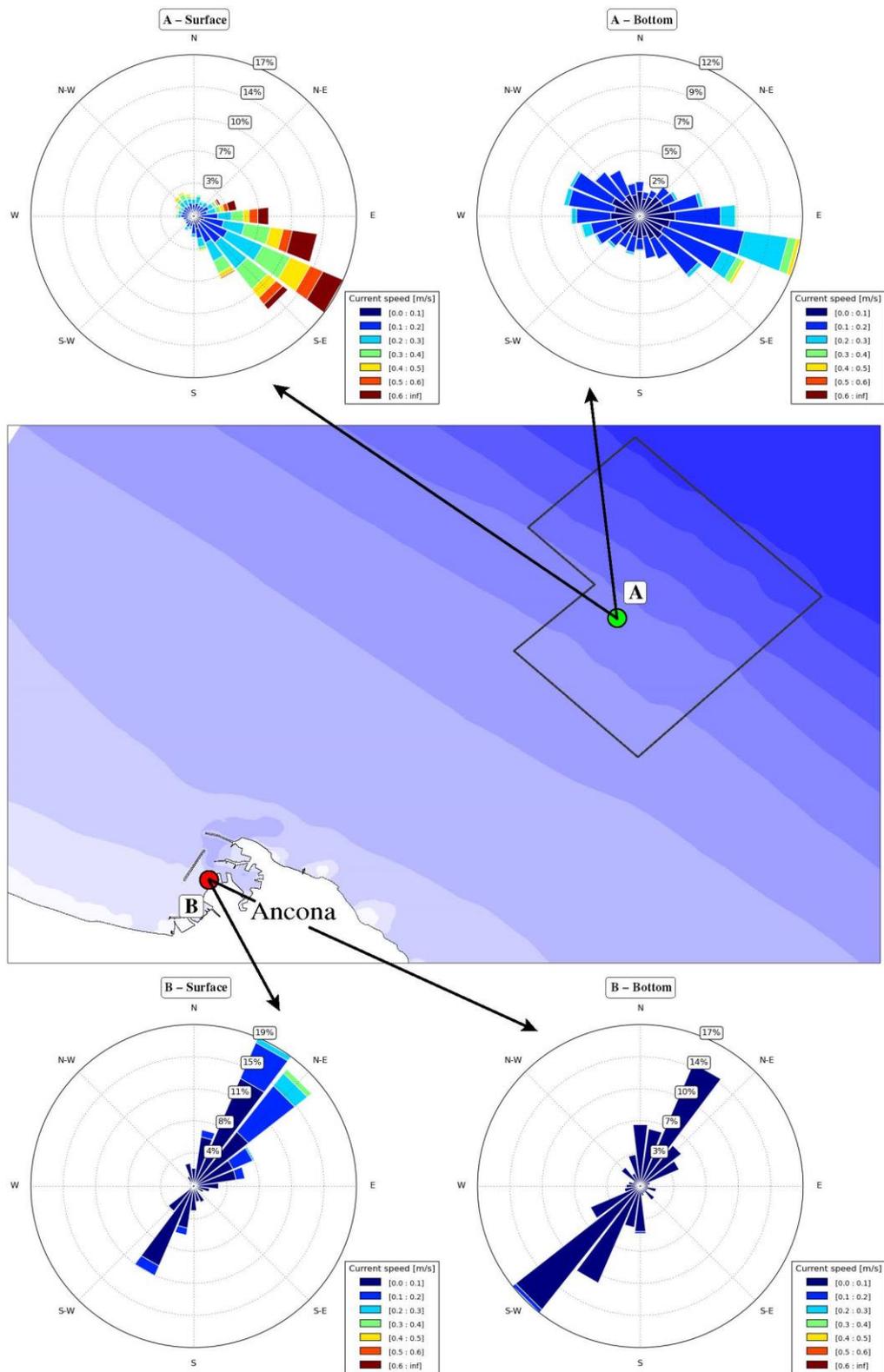
L'ubicazione dei due siti selezionati assieme ai grafici della velocità della corrente (sia in superficie che al fondo) sono mostrati in Fig. 16.

La corrente superficiale nella zona di sversamento è chiaramente caratterizzata da direzione di propagazione verso Est-Sud-Est con intensità che superano i  $60 \text{ cm s}^{-1}$ . Tali risultati corrispondono alle osservazioni di Budillon *et al.* (2002) e confermano il ruolo predominante della corrente proveniente da Nord-Ovest alimentata dalle acque dolci del Po e degli altri fiumi del Nord Adriatico. Ne consegue che l'intensità di questa corrente è funzione della quantità di acqua dolce sversata in Nord Adriatico e dalle condizioni di stratificazione della colonna d'acqua.

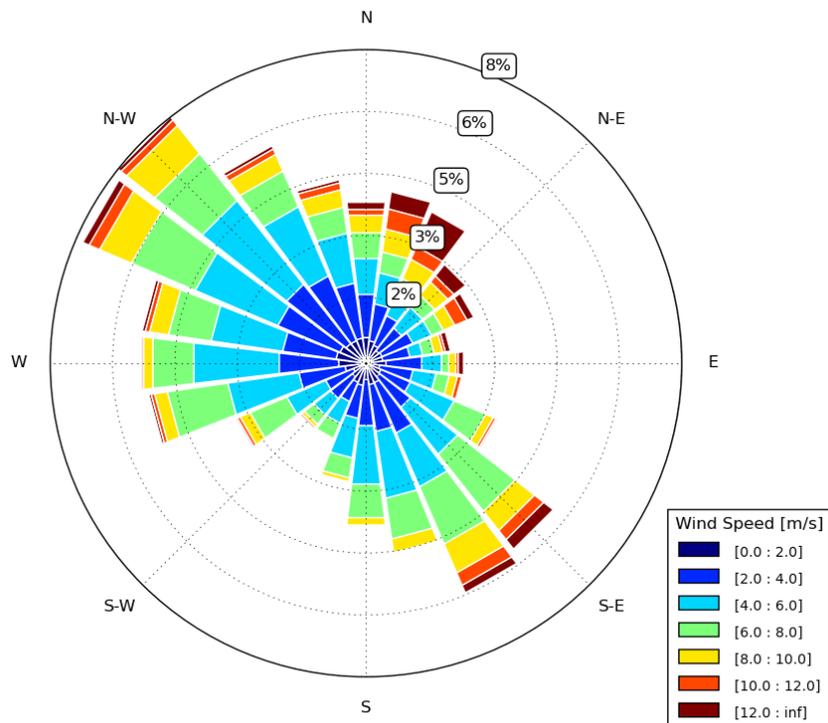
Anche al fondo si riscontra una corrente prevalente avente direzione di propagazione Est-Sud-Est, sebbene con intensità inferiore a quella in superficie. Da notare, inoltre, l'effetto più marcato al fondo della corrente, di modesta intensità, generata dalla marea identificabile da una circolazione anche in direzioni Ovest-Nord-Ovest. L'orientamento di questi due regimi di corrente generati dalla marea corrisponde alle ellissi mareali delle principali costanti armoniche presentate da Budillon *et al.* (2002).

Nella zona di escavo la corrente in superficie è caratterizzata da una direzione di propagazione prevalente verso Nord-Est e risulta ovviamente allineata alla morfologia dei moli del porto. In superficie la corrente raggiunge raramente intensità superiori a  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Al fondo è evidente l'effetto della corrente di marea che genera una circolazione anche verso Sud-Ovest.

Rispetto a questi andamenti predominanti bisogna tenere presente che l'effetto locale del vento può modificare in modo significativo la dinamica della corrente superficiale. Al fine di identificare un insieme di scenari meteo-marini caratteristici è stato quindi analizzato il vento utilizzato per forzare il modello idrodinamico. Il diagramma del vento del modello meteorologico MOLOCH estratto in un sito a circa 10 km al largo del Porto di Ancona viene mostrato in Fig. 17.



**Fig. 16** - Diagrammi della direzione e intensità della corrente estratta dai risultati modellistici alla superficie e al fondo in due punti del dominio di calcolo: A = nell'area di sversamento, B = nella zona di escavo.



**Fig. 17** - Rosa dei venti estratti dal modello meteorologico MOLOCH in un sito a circa 10 km al largo del Porto di Ancona. I dati sono rappresentati per direzione di provenienza.

Si possono identificare tre regimi di vento predominanti e quindi determinare quattro scenari meteo-marini:

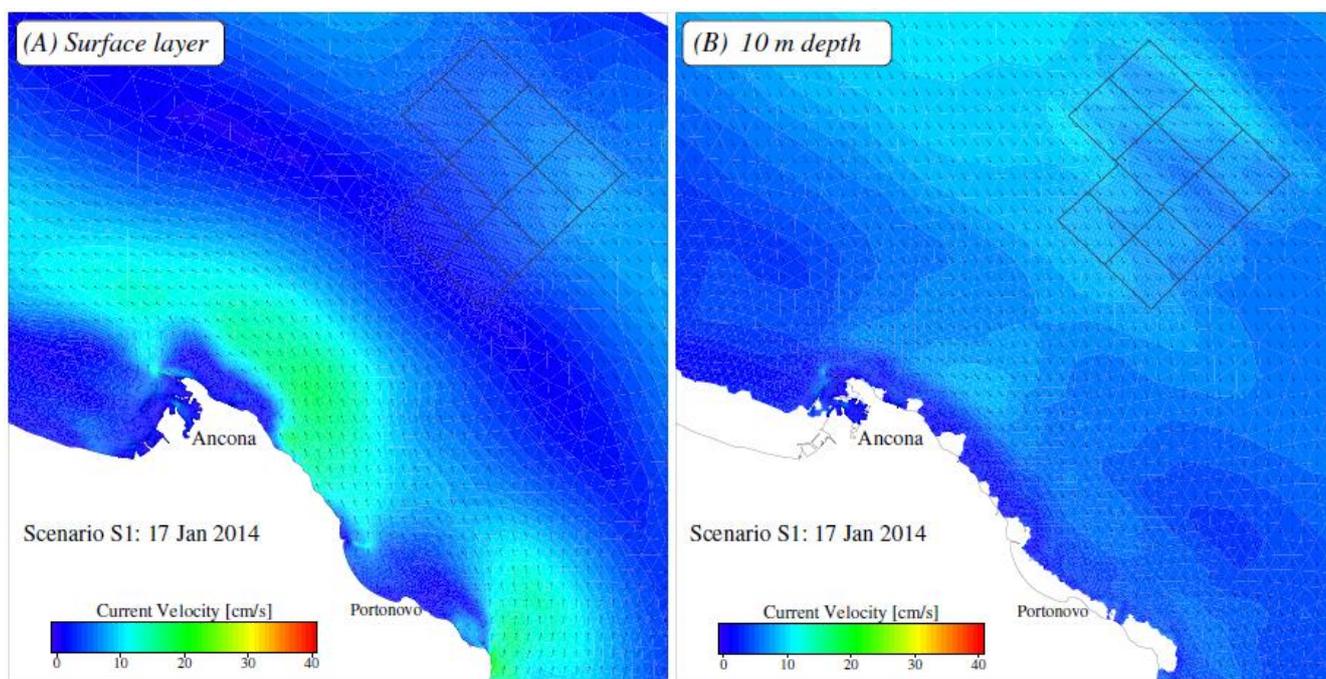
- S1 - calma di vento;
- S2 - vento di Bora (da Nord-Nord-Est);
- S3 - vento di Scirocco (da Sud-Est);
- S4 - vento di Maestrale (da Nord-Ovest).

Non essendo possibile creare degli scenari sintetici, data la complessità della circolazione nella zona di indagine, per ognuno di questi regimi di vento è stato individuato un evento caratteristico nel 2014 per cui viene investigata la dispersione del materiale sedimentario. Rispetto alla relazione intermedia del progetto (Fabi *et al.*, 2015) sono stati selezionati degli scenari differenti caratterizzati da durata e intensità superiori.

Per lo **scenario S1** (calma di vento) è stato selezionato il giorno 17 gennaio 2014 durante il quale l'intensità media del vento era di 6 nodi. La dinamica della circolazione in quel periodo viene rappresentata in Fig. 18 dalle mappe della corrente media in superficie e a 10 m di profondità.

In assenza di vento la circolazione è caratterizzata da una debole corrente costiera e modulata dalla marea. In media la circolazione nella zona di sversamento, sia in superficie (Fig. 18A) che al fondo Fig. 18B), aveva intensità di circa  $10 \text{ cm s}^{-1}$  e direzione

da Nord-Ovest a Sud-Est. Nella zona costiera adiacente al Porto di Ancona si registravano deboli correnti marine (intensità inferiore a  $10 \text{ cm s}^{-1}$ ) dirette a Nord-Ovest e verso Sud-Est a 10 m di profondità.



**Fig. 18 - Scenario S1** - Correnti medie del giorno 17 gennaio 2014: (A) correnti superficiali; (B) correnti a 10 m di profondità.

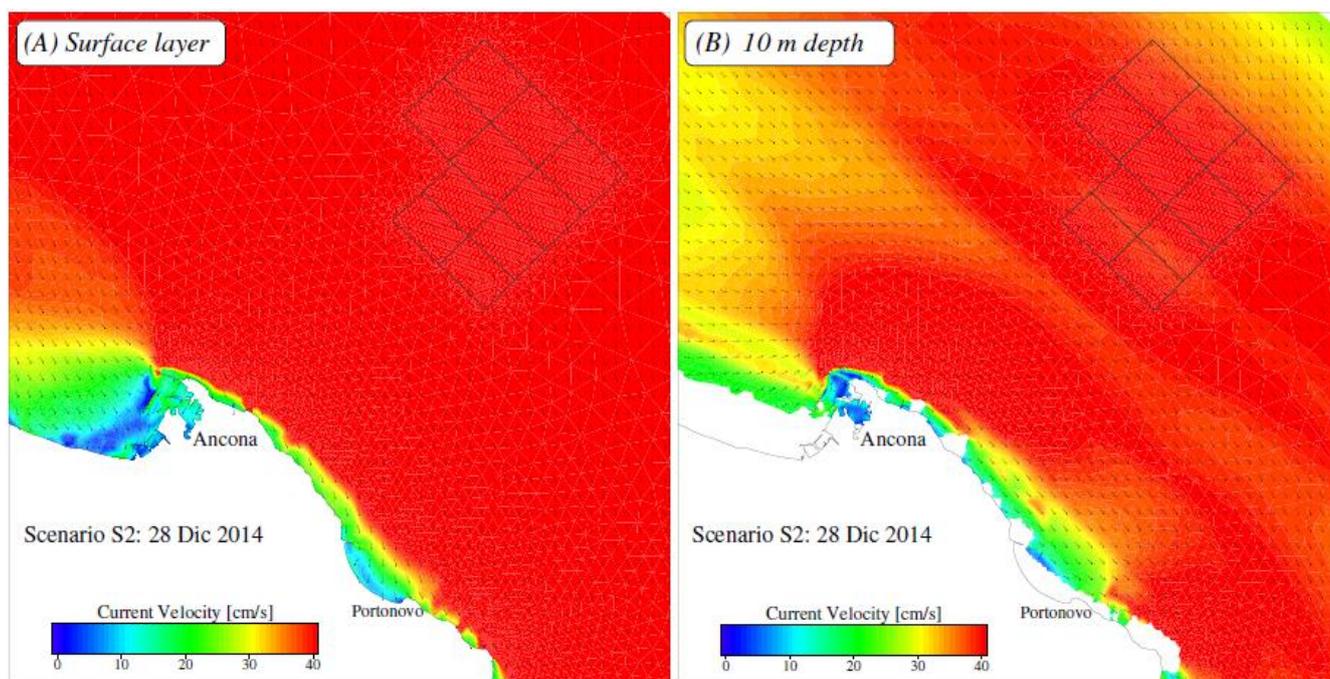
Per lo **scenario S2** (vento di Bora) è stato selezionato il giorno 28 dicembre 2014 durante il quale il vento aveva intensità media di 26 nodi. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 19 dalle mappe della corrente media sul periodo considerato.

Durante il giorno 28 dicembre le correnti superficiali avevano in media direzione verso Sud/Sud-Est e intensità superiore ai  $40 \text{ cm s}^{-1}$ . A 10 m di profondità le correnti avevano direzione prevalente verso Sud-Est e intensità tra i  $30$  e  $40 \text{ cm s}^{-1}$ . Lungo costa la corrente era diretta generalmente verso Sud-Est. Secondo le previsioni meteo marine del sistema Cassandra del CNR-ISMAR ([www.ismar.cnr.it/kassandra](http://www.ismar.cnr.it/kassandra)) le onde significative hanno raggiunto in corrispondenza di questo evento altezze di circa 4 m e quindi il mare aveva forza 5, secondo la scala Douglas (agitato).

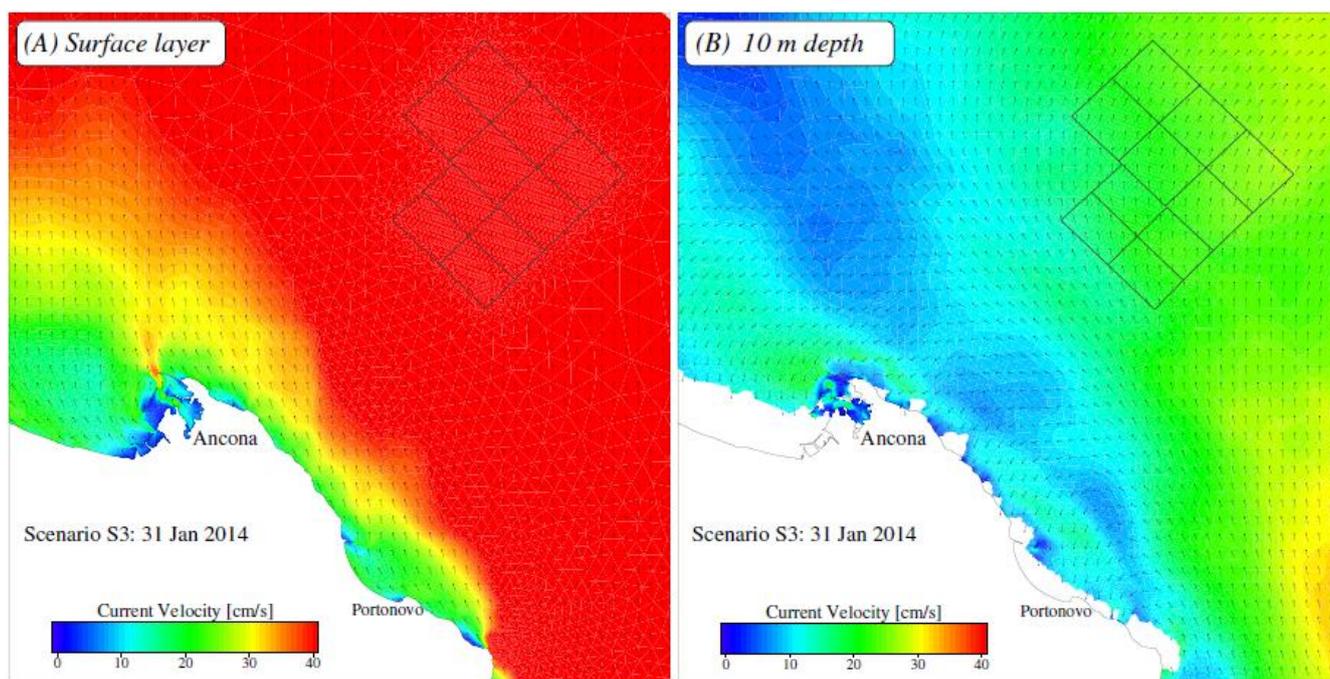
Per lo **scenario S3** (vento di Scirocco) è stato selezionato il giorno 31 gennaio 2014 durante il quale il vento aveva intensità media di 16 nodi. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 20 dalle mappe della corrente media.

Le correnti medie superficiali create dal vento di Scirocco erano generalmente dirette verso Nord/Nord-Ovest, con intensità superiore a  $40 \text{ cm s}^{-1}$  nella zona di sversamento. Al

fondo erano presenti correnti medie nella zona di sversamento dirette verso Nord/Nord-Est e aventi intensità di circa  $25 \text{ cm s}^{-1}$ . Nella zona costiera le correnti in prossimità del fondo erano orientate generalmente perpendicolarmente alla linea di costa. Le onde durante questo evento hanno raggiunto i 5 m di altezza significativa e quindi il mare aveva forza 6 (molto agitato).



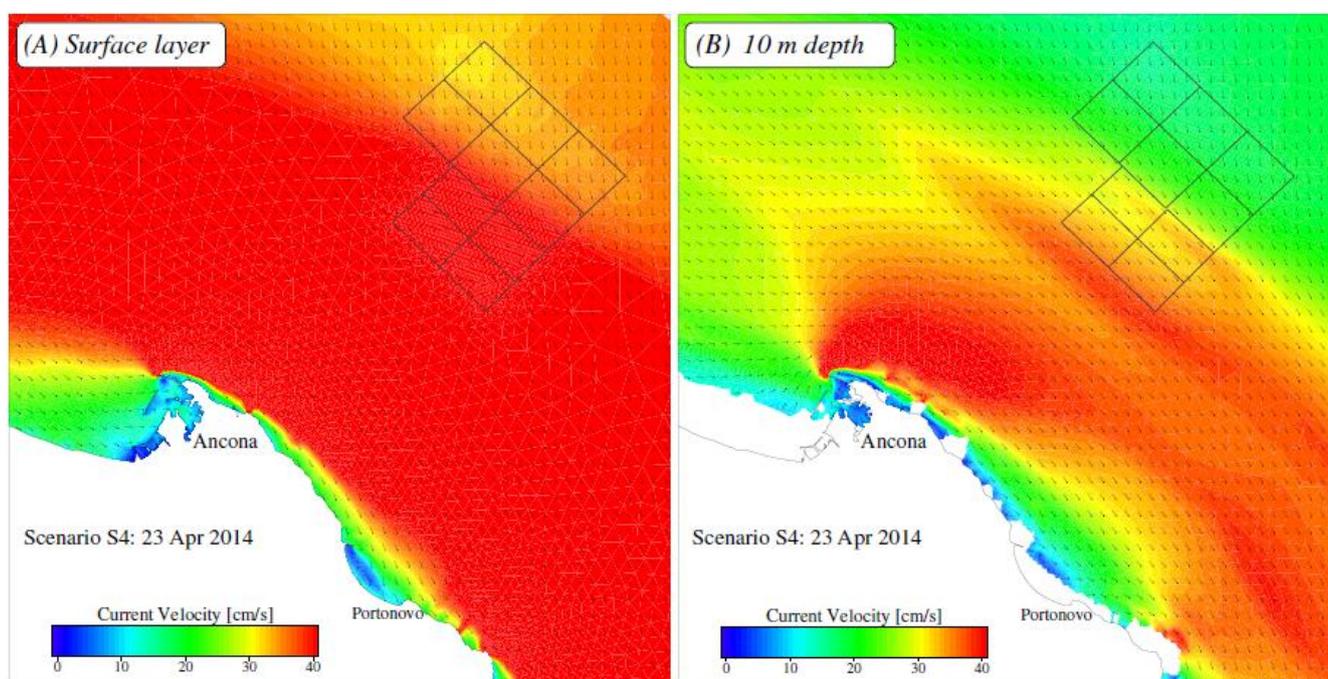
**Fig. 19** - Come la fig. 18 ma per lo Scenario 2. Correnti medie del giorno 28 dicembre 2014.



**Fig. 20** - Come la fig. 18 ma per lo Scenario 3. Correnti medie del giorno 31 gennaio 2014.

Per lo **scenario S4** (vento di Maestrale) è stato considerato il giorno 23 aprile 2014 durante il quale il vento aveva intensità media di 15,5 nodi. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 21 dalle mappe della corrente media.

Nel periodo selezionato è stata evidenziata una forte corrente superficiale che interessava tutta la zona costiera, con direzione media di propagazione verso Sud-Est e intensità di circa  $35 \text{ cm s}^{-1}$ . A 10 m di profondità la corrente presentava una struttura simile a quella di superficie, ma intensità di circa  $20\text{-}30 \text{ cm s}^{-1}$  nella zona di sversamento. Da notare una forte accelerazione della corrente nella zona costiera esterna ai moli portuali. Le onde durante questo evento hanno raggiunto 1,5 m di altezza significativa e quindi il mare aveva forza 4 (molto mosso).



**Fig. 21** - Come la fig. 18 ma per lo Scenario 4. Correnti medie del giorno 23 aprile 2014.

## 5. SCENARI DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI

Il modello lagrangiano è stato utilizzato per descrivere la possibile dispersione dei sedimenti marini sia nella zona di escavo che nell'area di sversamento a mare.

La composizione granulometrica dei sedimenti risospesi considerata in questo studio è:

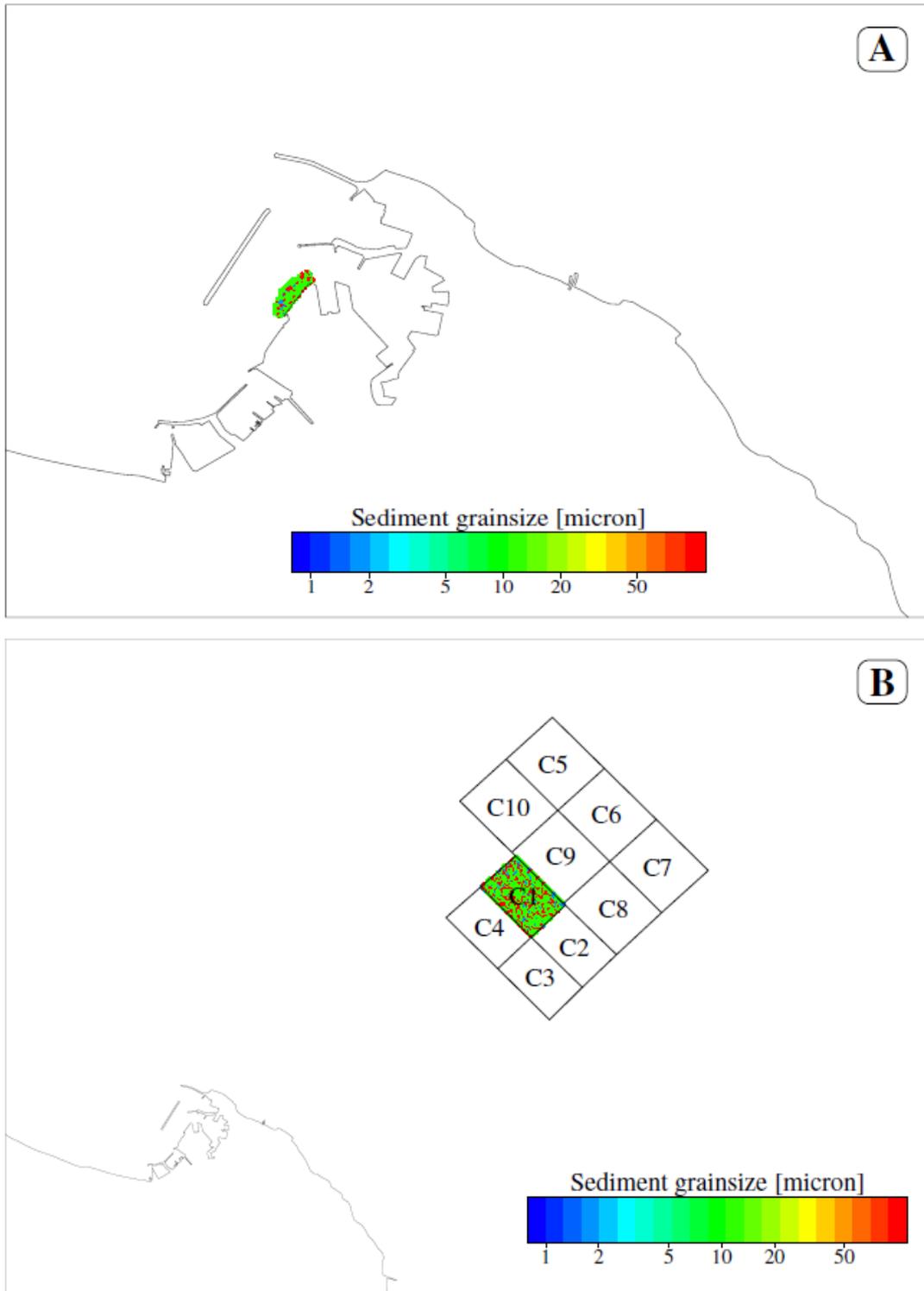
- argilla, 7,5%;
- silt, 66,5%;
- sabbia fine, 26,0%.

Si fa notare che viene qui simulata solo la *plume* di dispersione dei sedimenti messi in sospensione durante i lavori. Per quanto riguarda le operazioni di sversamento non viene quindi rappresentata la dinamica dei sedimenti che dalla nave depositano compatti al fondo, ma solo la dispersione di quella parte di granuli di sedimenti che vengono messi in sospensione. Tale quantità di materiale, che forma la *plume* di dispersione, può avere concentrazioni varie che dipendono dalla tipologia del materiale stesso e dalle modalità di sversamento. La metodologia utilizzata, tramite la simulazione di particelle lagrangiane, ben si presta a descrivere la dinamica del materiale in sospensione, indipendentemente dalla quantità di sedimento effettivamente sospeso. Tale approccio può considerarsi conservativo in quanto lo scopo dello studio è simulare la dispersione massima delle particelle di sedimento.

Le particelle simulate in questo studio, sia nella zona di escavo e di sversamento, erano caratterizzate da una distribuzione granulometrica corrispondente a quella dei sedimenti lavorati.

La distribuzione delle particelle rilasciate nell'area di escavo e in quella di sversamento viene mostrata in Fig. 22. Il colore dei traccianti lagrangiani rappresenta la dimensione delle particelle di sedimento.

Per simulare la dispersione del sedimento durante la fase di escavo vengono rilasciate le particelle in un'area del porto a ridosso della banchina 26 (Fig. 22A). Per simulare la dispersione del sedimento durante la fase di sversamento vengono rilasciate le particelle in ognuna delle celle indicate in Fig. 4 (in Fig. 22B viene mostrato l'esempio della cella C1). Nella zona di escavo il modello rilascia 1000 particelle all'ora dalle ore 7 alle ore 19 del giorno selezionato lungo tutta la colonna d'acqua. Nell'area di sversamento vengono rilasciate 1000 particelle ogni 4 ore dalle ore 9 alle ore 18 del giorno selezionato solo nello strato superficiale (3 sversamenti al giorno).



**Fig. 22** - Distribuzione delle particelle lagrangiane rilasciate nella zona di escavo (A) e nell'area di sversamento C1 (B). Il colore indica la dimensione granulometrica delle particelle di sedimento.

## 5.1. DISPERSIONE NELLA ZONA DI ESCAVO

La dispersione dei sedimenti per gli scenari meteomarinari selezionati viene presentata in Fig. 23 a 40 ore dall'inizio delle operazioni di escavo, quando le particelle sono depositate al fondo.

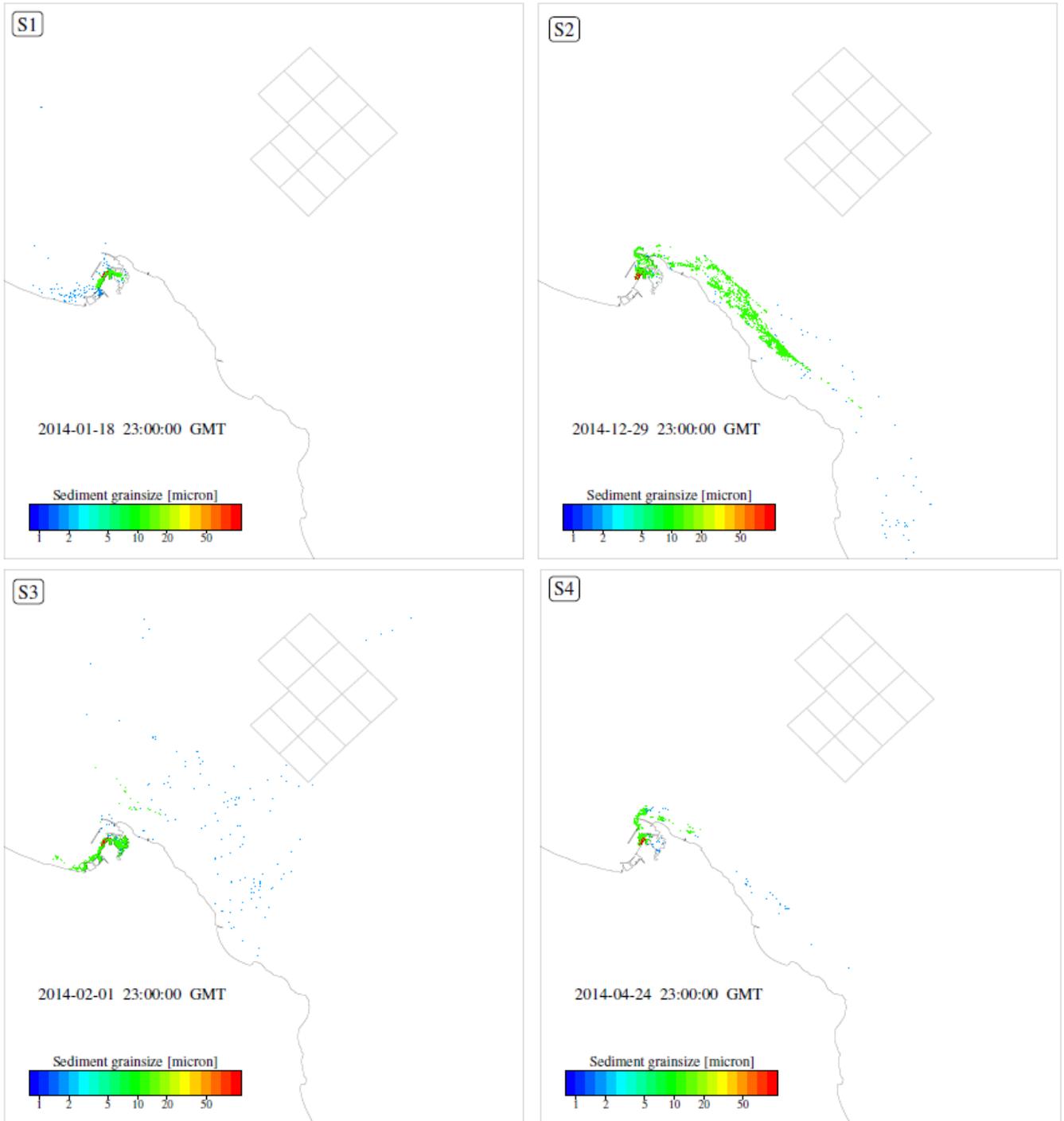
In generale si osserva che i sedimenti più grossolani depositano ovviamente in prossimità della zona di lavoro, mentre sedimenti più fini vengono trasportati dalle correnti marine. La maggior parte dei sedimenti siltosi risospesi durante le operazioni di dragaggio rimangono nella zona portuale, ma una parte di essi, in condizioni di corrente elevata, viene trasportata nell'area sita al di fuori dei moli portuali e lungo la costa Sud. I sedimenti argillosi vengono facilmente tenuti in sospensione dalle correnti e trasportati al di fuori della zona portuale, generalmente verso Sud.

Nello specifico si può osservare che nel caso di calma di vento (Fig. 23 - S1) le deboli correnti mareali comportano la sedimentazione della maggior parte dei sedimenti in sospensione nella zona portuale. Alcune particelle di sedimento fino vengono trasportate al di fuori dell'area portuale in direzione Nord.

Nello scenario del 28 dicembre (scenario S2, vento di Bora, Fig. 23 - S2) la forte corrente costiera (in superficie: intensità superiore ai  $40 \text{ cm s}^{-1}$ ; sul fondo:  $30\text{-}40 \text{ cm s}^{-1}$ ) trasporta parte delle particelle siltose e argillose lungo costa verso Sud-Est verso il Promontorio del Conero.

Nel caso di vento di Scirocco (scenario S3) le particelle sabbiose e siltose sedimentano nelle zone più interne del porto, mentre la corrente superficiale, se particolarmente forte (in superficie: intensità superiore ai  $40 \text{ cm s}^{-1}$ ; sul fondo intensità di  $25 \text{ cm s}^{-1}$ ), trasporta le particelle fini fuori dal porto verso Nord per poi essere trasportate verso Sud-Est dalla corrente al fondo (Fig. 23 - S3).

Le particelle rilasciate il giorno 23 aprile (scenario S4, vento di Maestrone, Fig. 23 - S4) vengono trasportate dalle correnti fuori dai moli e successivamente verso Sud-Est lungo costa. Si ricorda che per questo scenario nel giorno scelto la corrente (superficiale e di fondo) aveva un'intensità di  $25\text{-}30 \text{ cm s}^{-1}$ .



**Fig. 23** - Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane nella zona portuale per i diversi scenari a 40 ore dall'inizio delle operazioni di escavo. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.

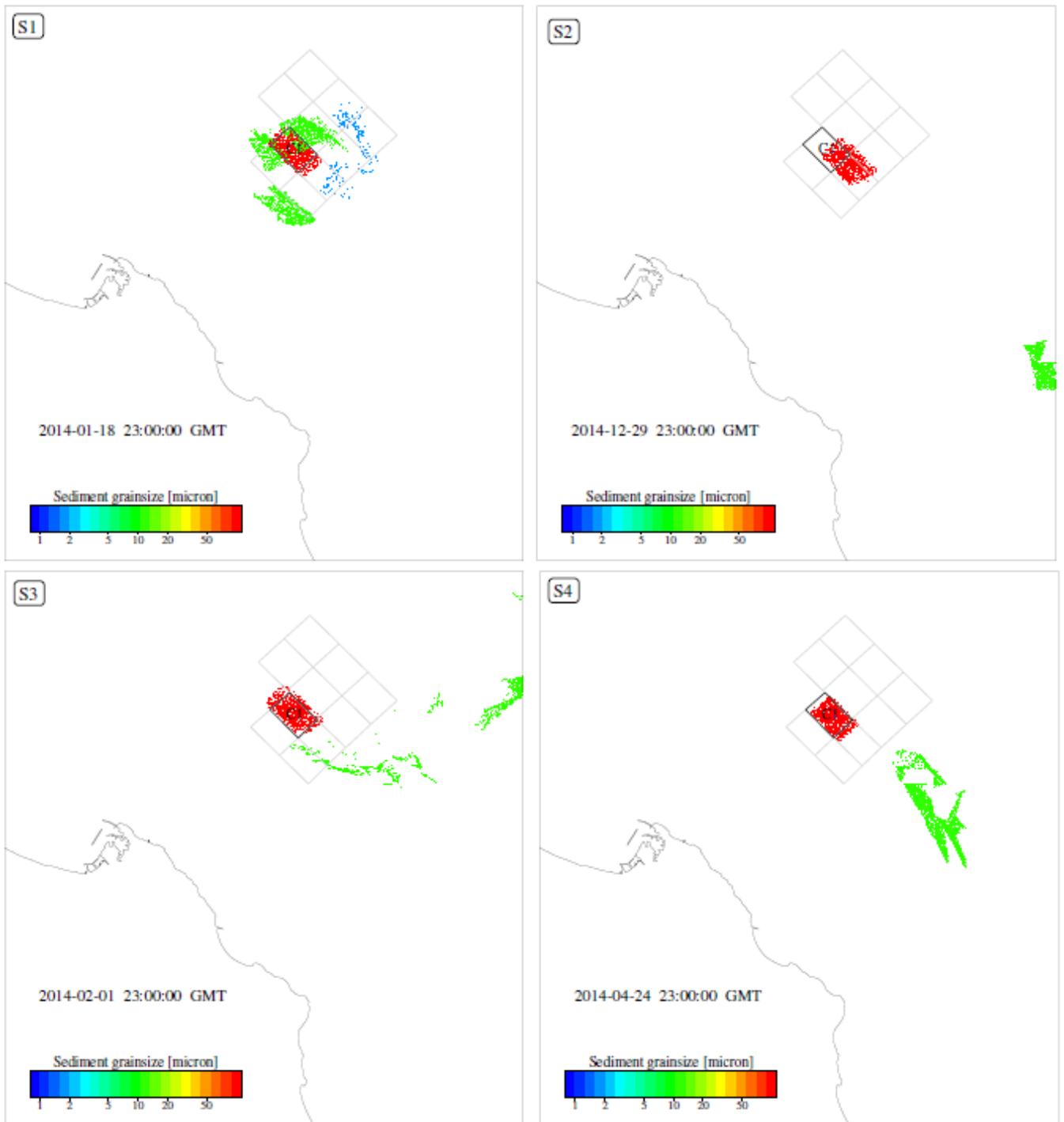
## 5.2. DISPERSIONE NELLA ZONA DI SVERSAMENTO

Vengono di seguito presentati i risultati delle simulazioni numeriche delle particelle rilasciate nella zona di sversamento (Figg. 24 - 33). Per ognuna delle celle di sversamento (C1 - C10) viene mostrato, per ogni scenario, la distribuzione delle particelle sversate dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento, quando le particelle sono depositate al fondo.

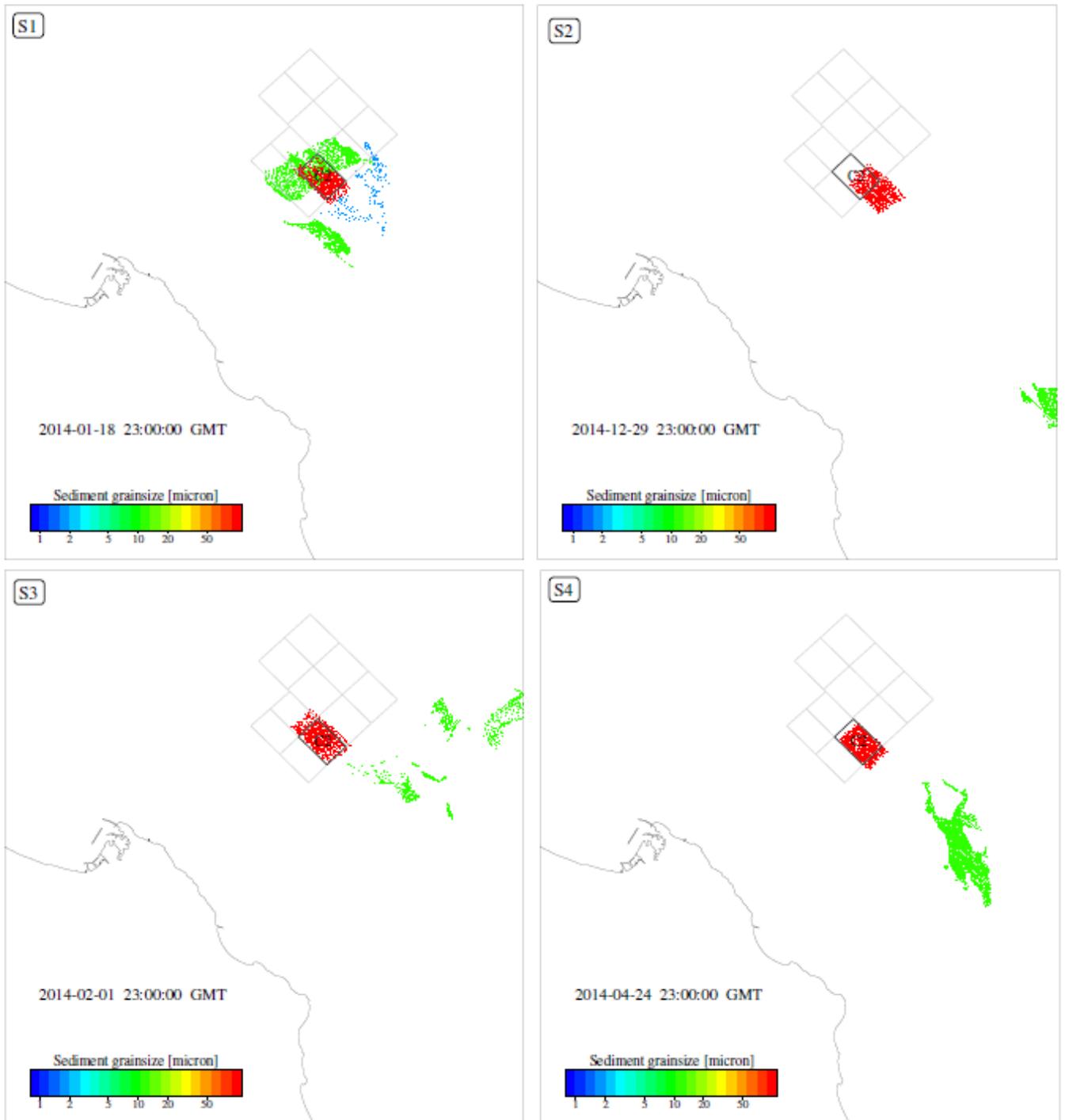
Per lo scenario S1 (calma di vento) si può notare che le deboli correnti fanno sì che la maggior parte dei sedimenti in sospensione (anche le particelle fini) depositano all'interno o in prossimità dell'area di sversamento.

Negli altri scenari i sedimenti grossolani (sabbie) depositano in buona parte nell'area di sversamento, mentre le correnti marine trasportano i sedimenti più fini generalmente verso Sud-Est. Fa eccezione lo scenario con vento di Scirocco (S3) in cui i sedimenti in sospensione vengono trasportati verso Nord-Est.

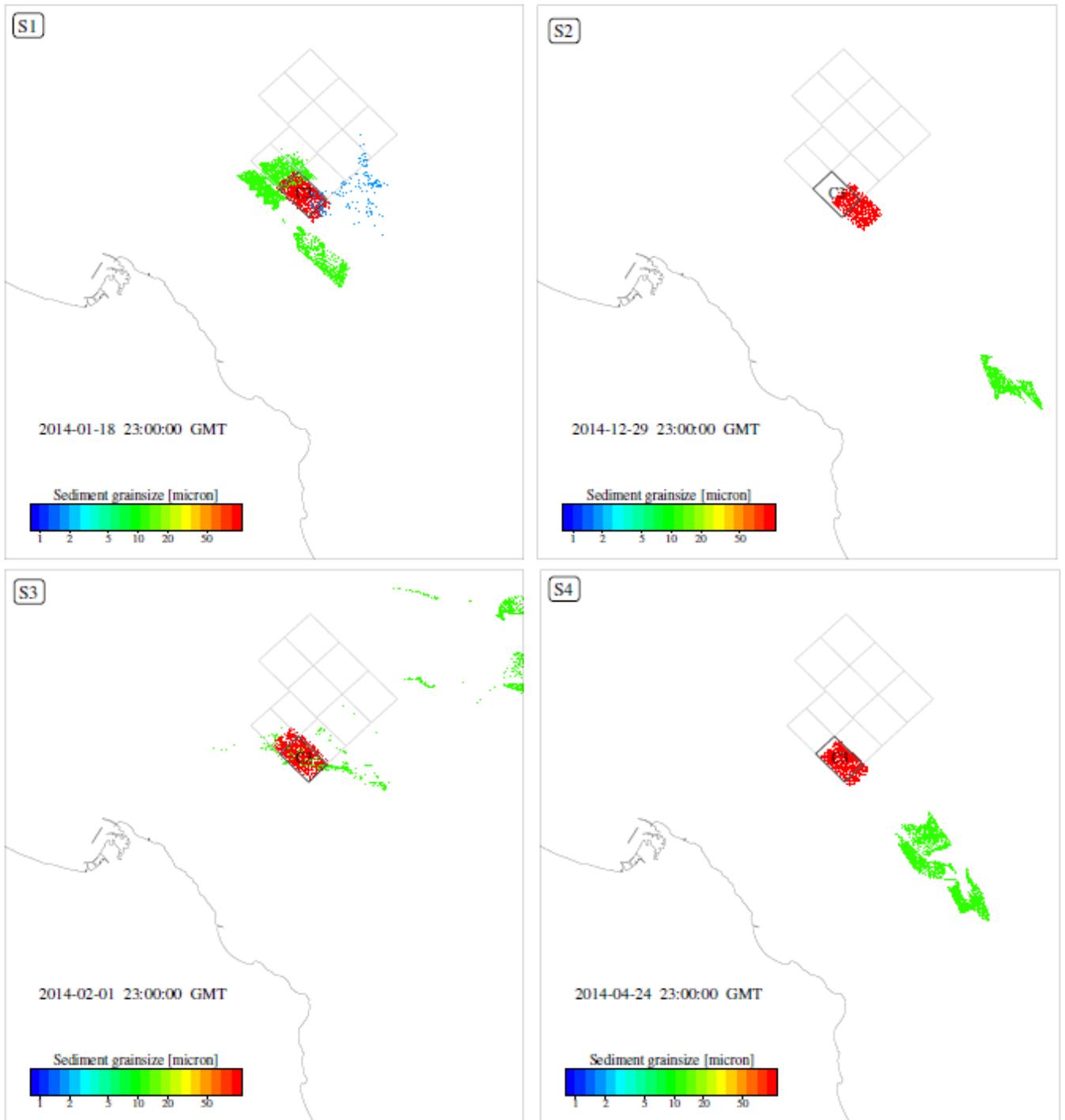
Solitamente i sedimenti argillosi vengono trasportati in queste situazioni al di fuori del dominio mostrato nelle figure. In ogni caso non si identifica mai un trasporto dei sedimenti dalla zona di sversamento verso la zona costiera.



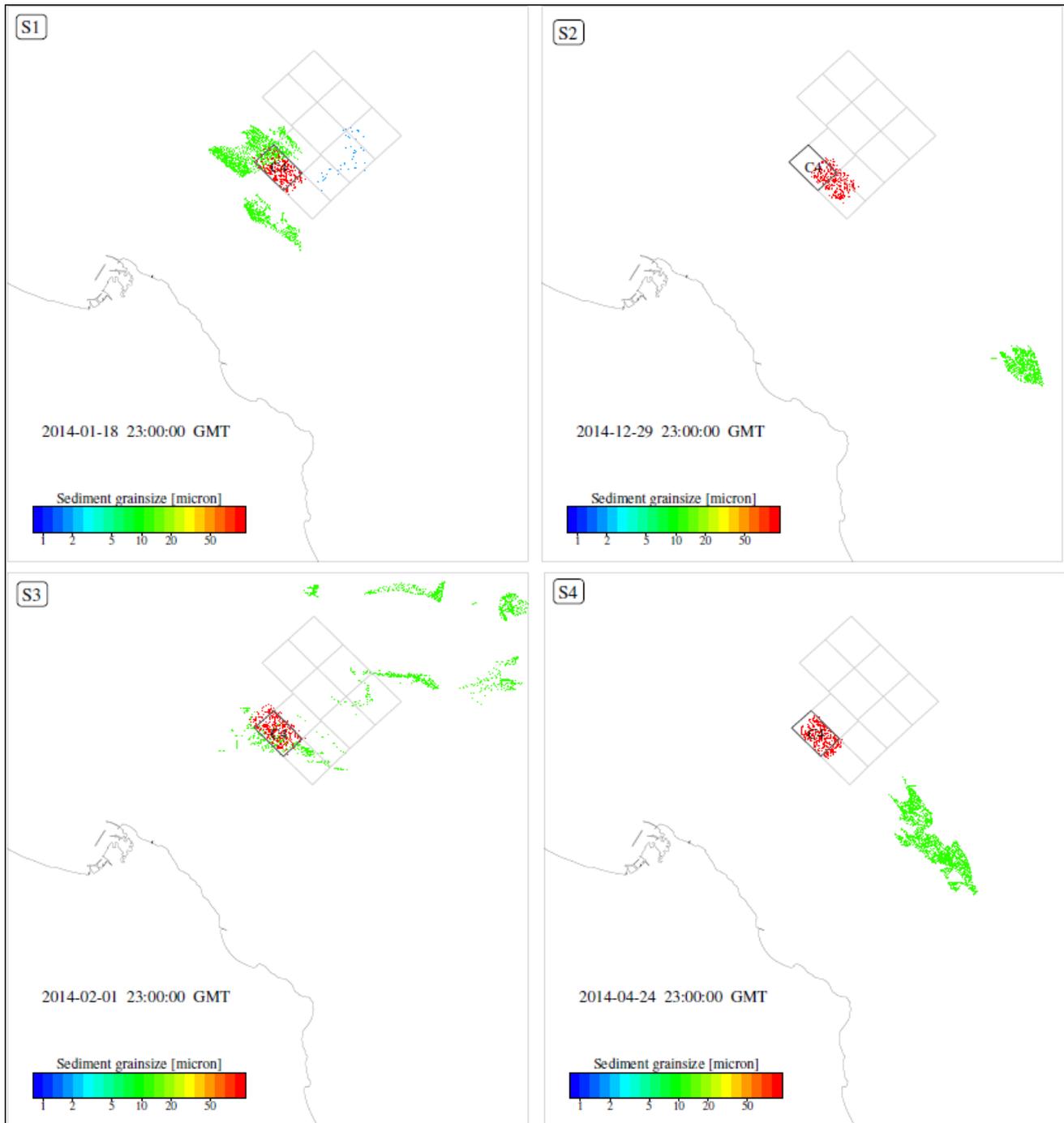
**Fig. 24 - Cella C1:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomari dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



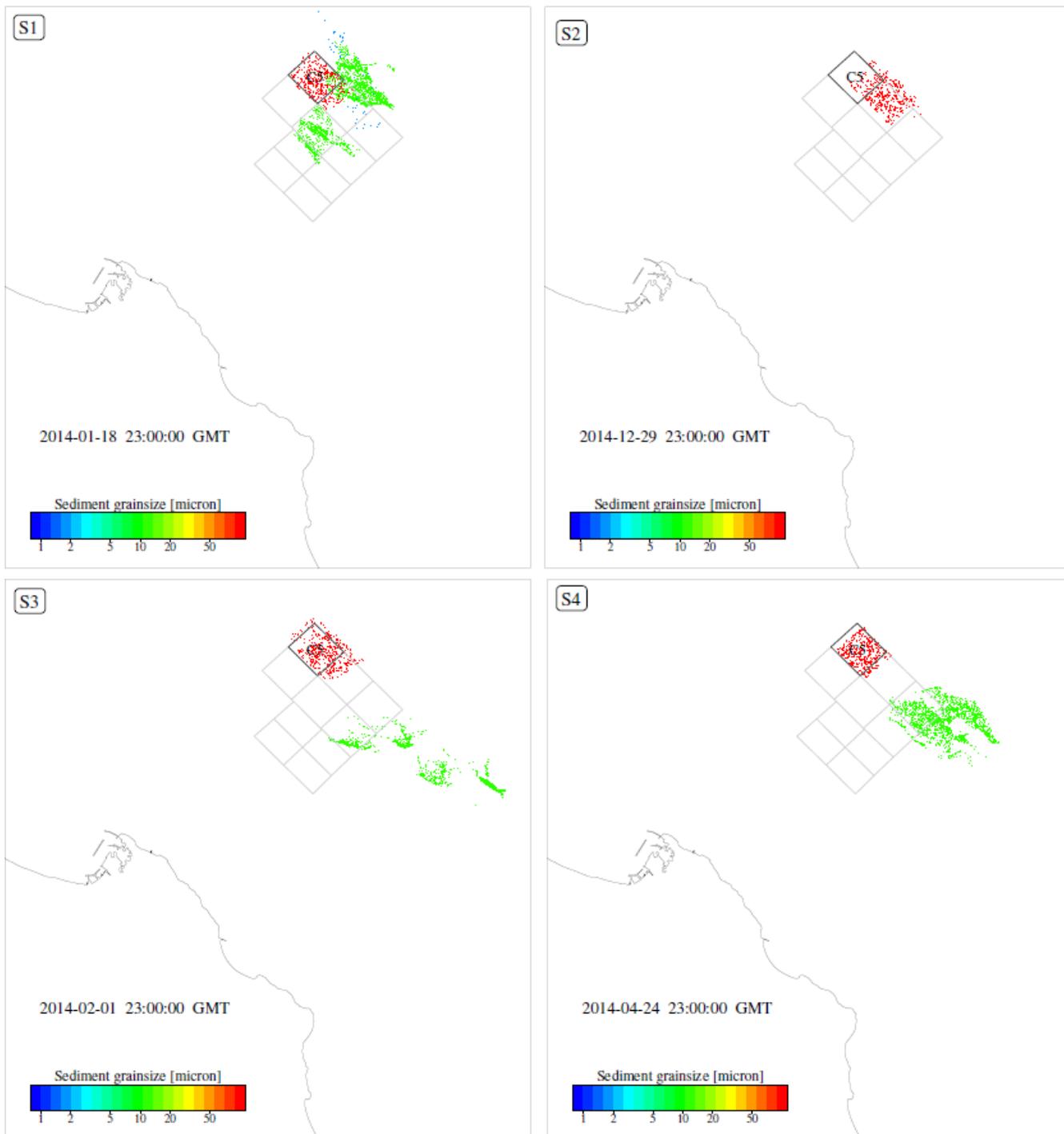
**Fig. 25 - Cella C2:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomarini dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



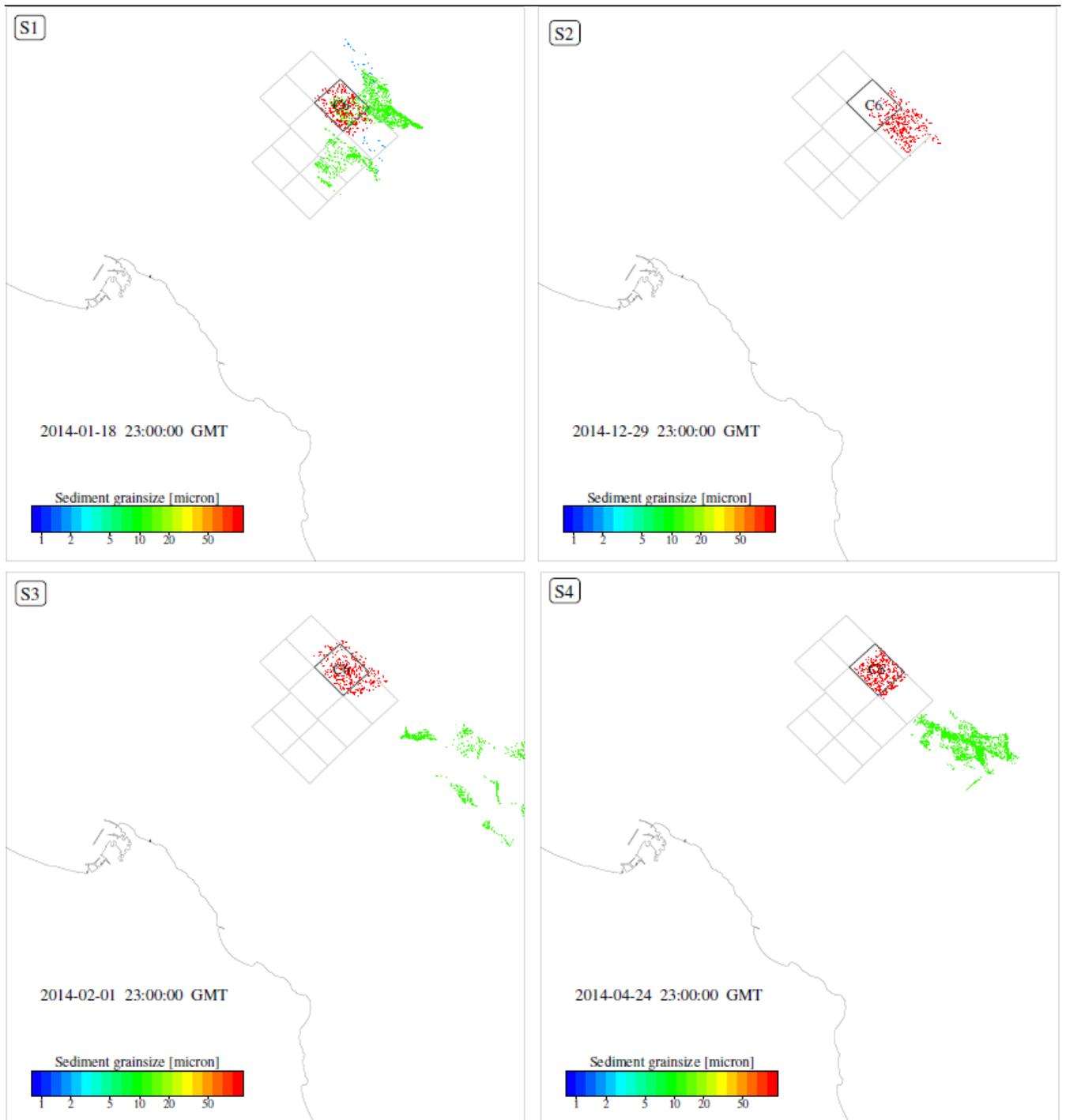
**Fig. 26 - Cella C3:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomari dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



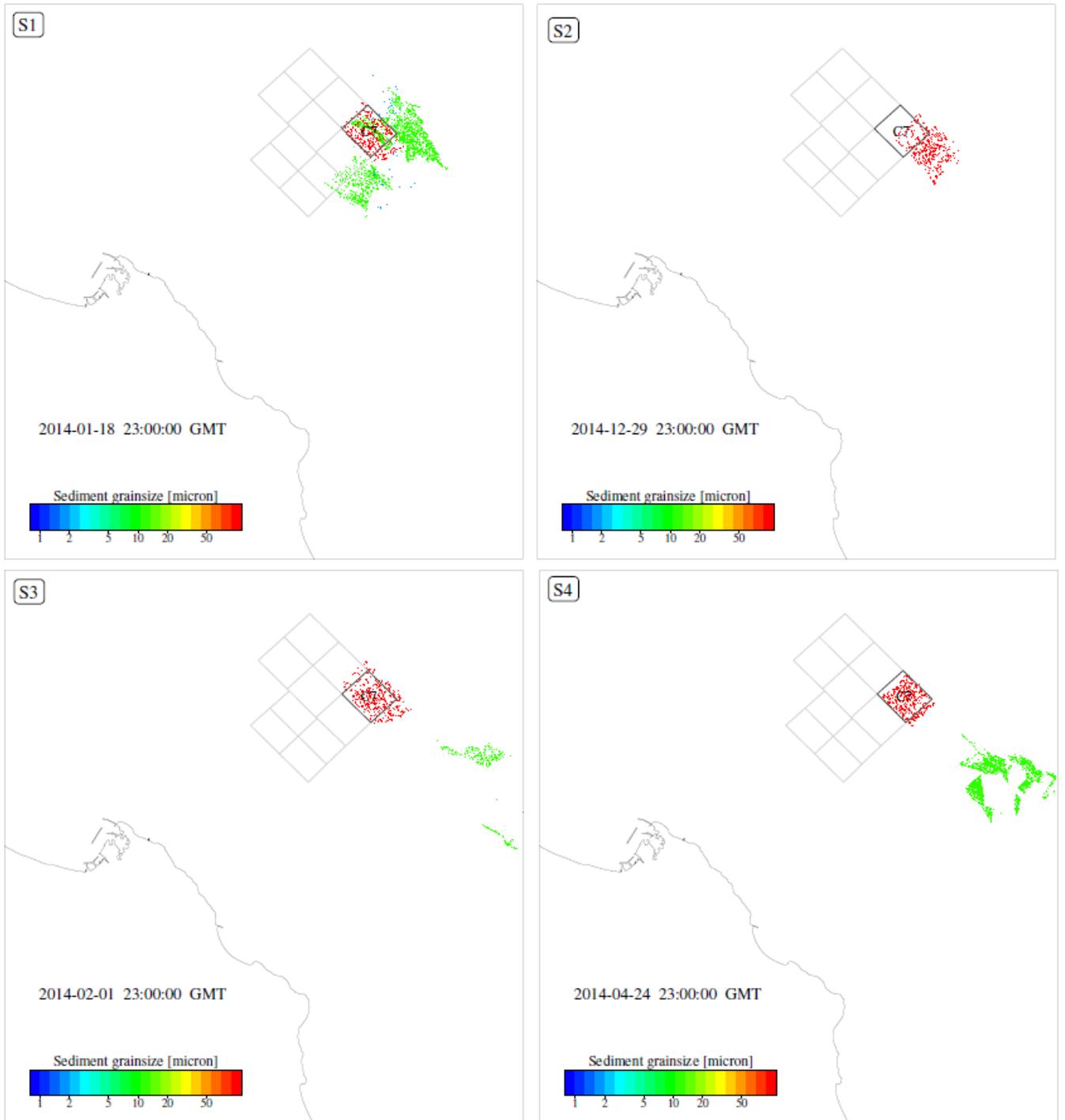
**Fig. 27 - Cella C4:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomarini dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



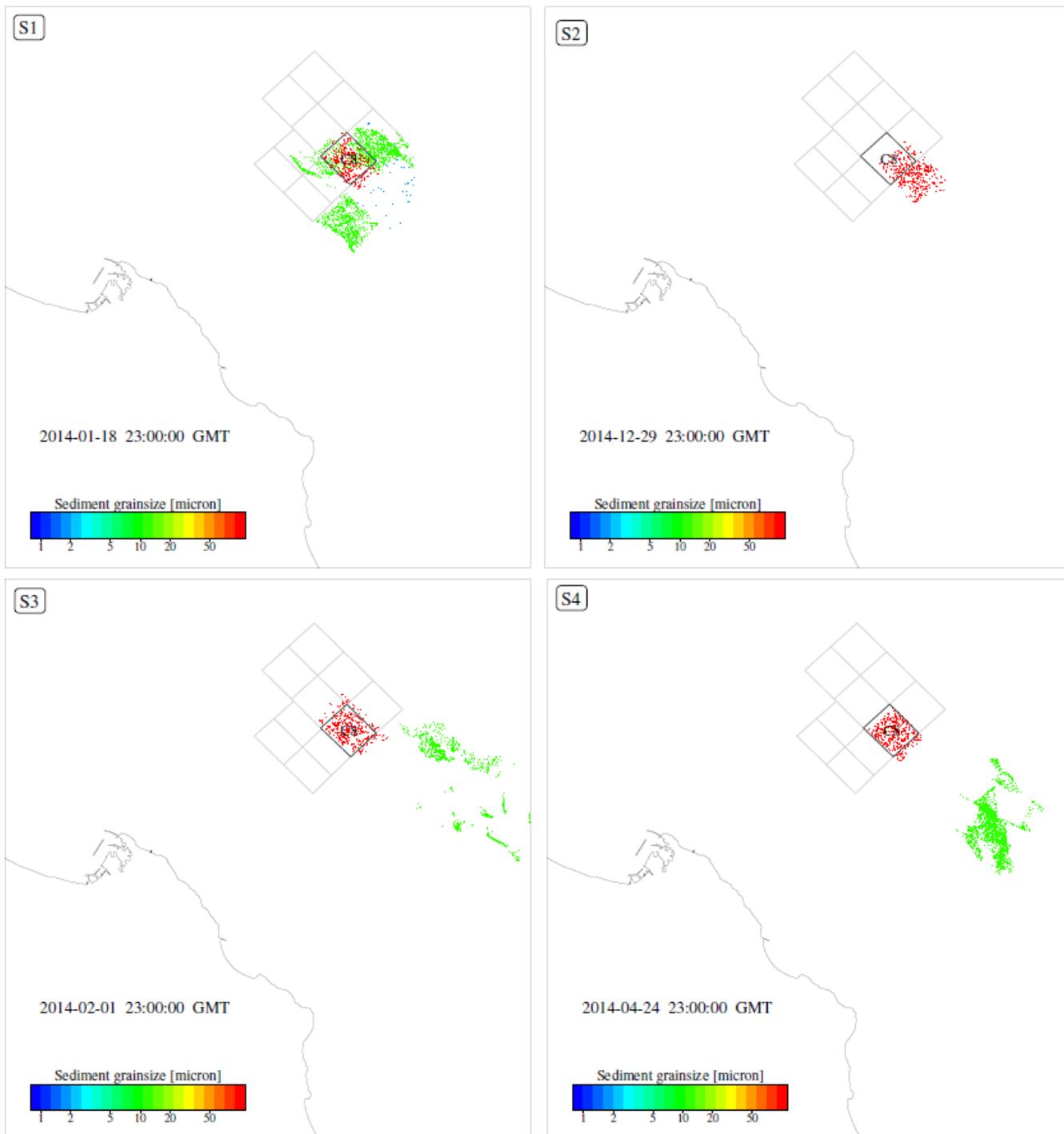
**Fig. 28 - Cella C5:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomari dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



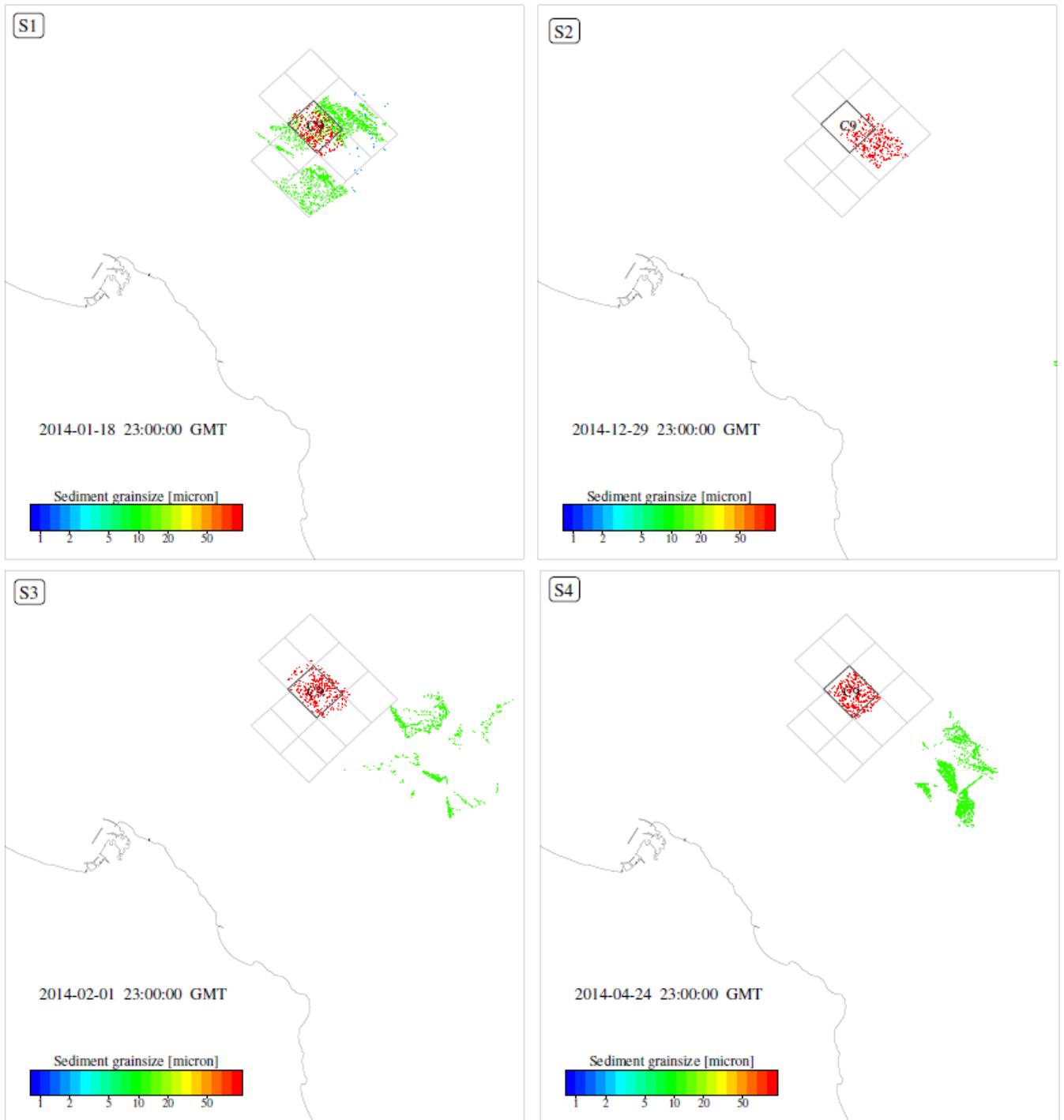
**Fig. 29 - Cella C6:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomari dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



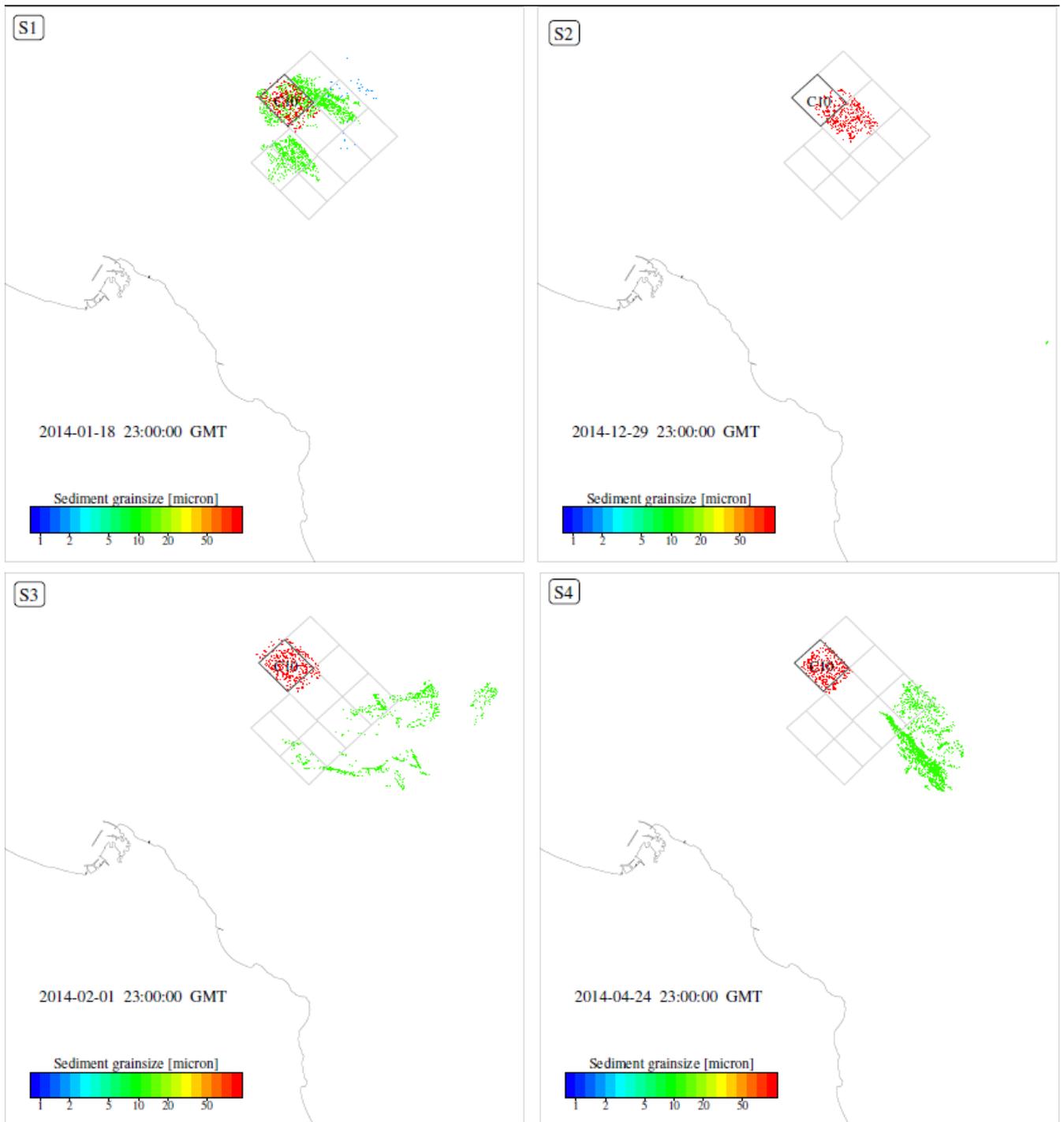
**Fig. 30 - Cella C7:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomarini dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



**Fig. 31 - Cella C8:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomarini dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



**Fig. 32 - Cella C9:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomarini dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.



**Fig. 33 - Cella C10:** Mappe di distribuzioni delle particelle lagrangiane rilasciate nei diversi scenari meteomarinari dopo 40 ore dall'inizio dello sversamento. S1 = calma di vento; S2 = vento di Bora; S3 = vento di Scirocco; S4 = vento di Maestrale.

## 6. CONCLUSIONI

In questo rapporto tecnico è stato dimostrato che gli strumenti modellistici applicati sono idonei per descrivere la potenziale dispersione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo nel porto di Ancona e di sversamento in mare aperto.

Il modello idrodinamico è stato calibrato e validato con le osservazioni disponibili di livello del mare, velocità della corrente e profili di temperatura dell'acqua e salinità; esso descrive in modo soddisfacente la dinamica della circolazione marina nella zona di interesse e, grazie all'alta risoluzione, anche le correnti nelle zone del Porto di Ancona.

In tutti gli scenari analizzati non è stata evidenziata alcuna deposizione del materiale sversato a mare lungo la costa e in prossimità del Promontorio del Conero.

I sedimenti risospesi durante le operazioni di escavo possono essere invece trasportati lungo costa solo in presenza di vento e correnti estremi, durante i quali è comunque improbabile se non impossibile operare a mare per le condizioni meteo-marine avverse.

## 7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bellafiore, D., 2009. *Study of the circulation processes in the northern Adriatic sea - coastal area and Venice lagoon inlets*. Ph.D. thesis. University of Bologna, Department of Geophysics. Bologna, IT.
- Bellafiore, D., Umgiesser, G., 2010. Hydrodynamic coastal processes in the North Adriatic investigated with a 3D finite element model. *Ocean Dyn.* 60, 255–273.
- Bellafiore, D., Umgiesser, G., Cucco, A., 2008. Modelling the water exchanges between the Venice Lagoon and the Adriatic Sea. *Ocean Dyn.* 58, 397–413.
- Bergamasco, A., Oguz, T., Malanotte-Rizzoli, P., 1999. Modeling dense water formation and winter circulation in the northern and central Adriatic Sea. *J. Mar. Syst.* 20, 279–300.
- Blumberg, A., Mellor, G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Pages 1–16, in: Heaps N.S. (Ed.), *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. AGU, Washington, DC.
- Brown, J.M., Souza, A.J., Wolf, J., 2010. An 11-year validation of wave- surge modelling in the Irish Sea, using a nested POLCOMS-WAM modelling system. *Ocean Model.* 33, 118–128.
- Budillon, G., Grilli, F., Ortona, A., Russo, A., Tramontin, M., 2002. An Assessment of Surface Dynamics Observed Offshore Ancona with HF Radar. *Mar. Ecol.* 23, 21–37.
- Burchard, H., Petersen, O., 1999. Models of turbulence in the marine environment - a comparative study of two equation turbulence models. *J. Mar. Syst.* 21, 29–53.
- Crise, A., Cavazzon, F., Malačić, V., Querin, S., 2003. Circolazione Indotta dal Vento di Bora nel Golfo di Trieste: Studio Numerico in Condizioni di Stratificazione. in: *La difesa idraulica del territorio 2003*.
- Cushman-Roisin, B., Korotenko, K., Dietrich, D.E., 2005. Simulation and Characterization of the Adriatic Sea Mesoscale Variability. *J. Geoph. Res. - Oceans Special Adriatic Sea Issue*.
- Fabi G., Ferrarin C., Spagnolo A., 2015. *Modellizzazione della diffusione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo e di sversamento in mare aperto - Lavori di escavo per adeguamento dei fondali antistanti il primo tratto della Banchina 26 del Porto di Ancona e simulazioni su tutte le celle dell'area di sversamento*. Rapporto per l'Autorità Portuale di Ancona. 46 pp.
- Ferrarin, C., Cucco, A., Umgiesser, G., Bellafiore, D., Amos, C.L., 2010. Modelling fluxes of water and sediment between the Venice Lagoon and the sea. *Cont. Shelf Res.* 30, 904–914.
- Franco, P., Jeftic, L., Rizzoli, P.M., Michelato, A., Orlic, M., 1982. Descriptive model of the northern adriatic. *Oceanol. Acta* 5.
- Grant, W.D., Madsen, O.S., 1986. The continental shelf bottom boundary layer. *Annual Review of Fluid Mechanics* 18, 265–305.
- Kim, S.Y., Yasuda, T., Mase, H., 2008. Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves. *App. Oc. Res.* 30, 311–322.
- Neumeier, U., Ferrarin, C., Amos, C.L., Umgiesser, G., Li, M.Z., 2008. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters. *Comput. Geosci.* 34, 1223–1242.
- Oddo, P., Pinardi, N., 2008. Lateral open boundary conditions for nested limited area models: A scale selective approach. *Ocean Mod.* 20, 134–156.
- Oddo, P., Pinardi, N., Zavatarelli, M., 2005. A numerical study of the inter- annual variability of the Adriatic Sea. *Sci. Total Environ.* 353, 39–56.
- Orlić, M., Gacic, M., Violette, P.E.L., 1992. The currents and circulation of the Adriatic Sea. *Oceanol. Acta* 15, 109–124.
- Polli, S., 1960. La propagazione delle maree nell'Adriatico. *Atti del IX Convegno dell'Associazione Geofisica Italiana*, Roma, 1959. Also: *Publ. Ist. Talassogr.* 370, 11 pp.

- Pullen, J., Doyle, J.D., Hodur, R., Ogston, A., Book, J.W., 2003. Coupled ocean-atmosphere and nested modeling of the Adriatic Sea during winter and spring 2001. *J. Geoph. Res. - Oceans*, 108. doi:10.1029/2003JC001780
- Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T.W., Liao, J.M., Ou, S.H., Umgiesser, G., Zanke, U., 2009. On the development and verification of a 2d coupled wave-current model on unstructured meshes. *J. Mar. Syst.* 78, S244–S254.
- Sherwood, C.R., Carnie, S., Cavaleri, L., Chiggiato, J., Das, H., Doyle, J.D., Harris, C.K., Niedoroda, A.W., Pullen, J., Reed, C.W., Russo, A., Sclavo, M., Signell, R.P., Traykowski, P., Warner, J.C., 2004. Sediment Dynamics in the Adriatic Sea Investigated with Coupled Models. *Oceanography* 17, 58–69.
- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.* 91, 99–152.
- Tomasin, A., Pirazzoli, P.A., 1999. The Seiches in the Adriatic Sea. *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti* CLVII, 299–316.
- Trincardi, F., Campiani, E., Correggiari, A., Fogliani, V.M., Remia, A., 2013. Bathymetry of the Adriatic Sea: The legacy of the last eustatic cycle and the impact of modern sediment dispersal. *Journal of Maps* 10, 151 – 158.
- Umgiesser, G., 1997. Modelling the Venice Lagoon. *Inter. J. Salt Lake Res.* 6, 175–199.
- Umgiesser, G., 2000. *SHYFEM Finite Element Model for Coastal Seas - User Manual - version 4.56*. Pp. 26.
- Umgiesser, G., Bergamasco, A., 1995. *Outline of a Primitive Equations Finite Element Model*. Rapporto e Studi, Istituto Veneto of Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, XII, 291–320.
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *J. Mar. Syst.* 51, 123–145.
- Zampato, L., Umgiesser, G., Peron, F., 1998. *Sviluppo di un modello di scambio termico all'interfaccia acqua-aria nella Laguna di Venezia*. Technical Report 221. ISDGM/CNR. Venice. 33 pp.
- Zavatarelli, M., Pinardi, N., Kourafalou, V.H., Maggiore, A., 2002. Diagnostic and prognostic model studies of the Adriatic Sea general circulation: Seasonal variability. *J. Geoph. Res. - Oceans* 107. doi.org/10.1029/2000JC000210

### ***Ringraziamenti***

*Si ringrazia il CNR-ISAC per aver gentilmente fornito i campi di meteorologici del modello MOLOCH. Si ringraziano inoltre la Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia, l'ARPA-Veneto e l'ARPA Emilia Romagna per aver fornito i dati di portata dei principali fiumi del Nord Adriatico.*