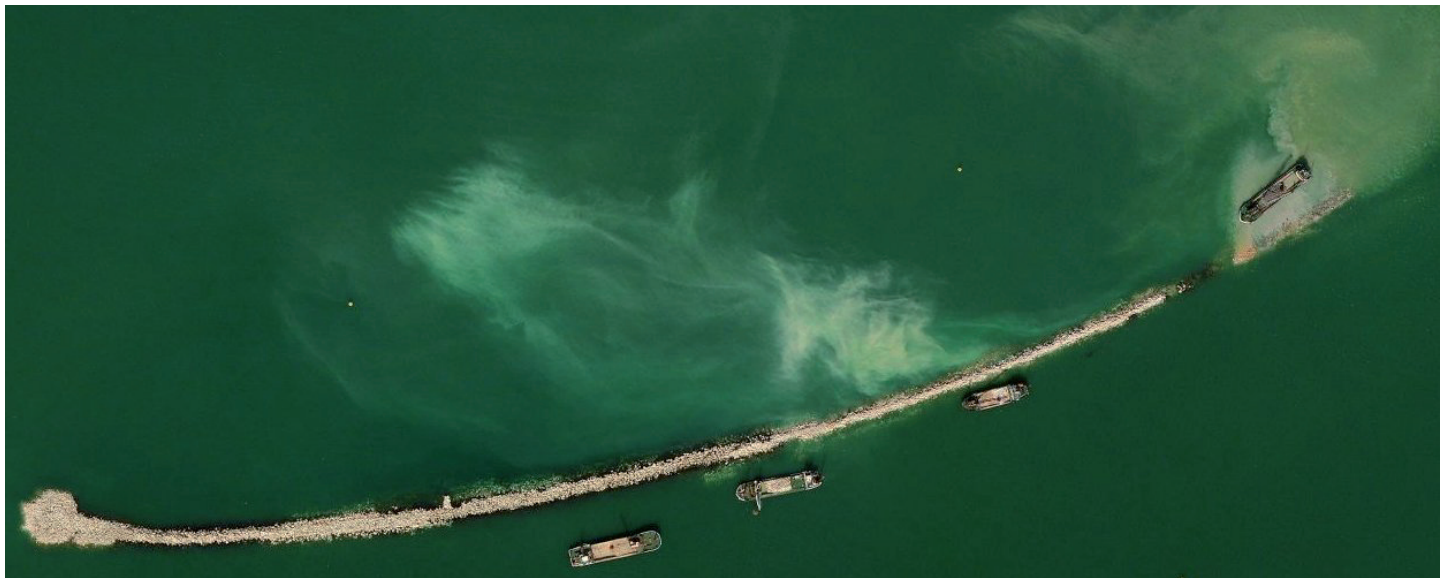


Nel contesto lagunare veneziano il monitoraggio della matrice acqua riveste una fondamentale importanza non solo, ovviamente, per gli aspetti idrodinamici (acqua alta, circolazione delle correnti di marea, moto ondoso), ma anche perché l'acqua costituisce il vettore di grandezze

(fisiche, chimiche e biologiche) fondamentali per il funzionamento dei processi ambientali. Il monitoraggio della matrice acqua attuato per i cantieri del MOSE pone particolare attenzione alla grandezza "torbidità", non solo come parametro collegato allo stress eventualmente subito

durante le operazioni di dragaggio dalle comunità vegetali ed animali presenti nell'area delle bocche, ma anche come indicatore della concentrazione di sedimenti che costituiscono la struttura fisica della laguna stessa e ne determinano la morfologia.



L'interazione fra correnti di marea, moto ondoso e sedimenti (indicata col termine di "idro-morfodinamica") influenza l'origine e l'evoluzione della tipica morfologia lagunare, costituita da barene, ghebi, canali, velme e

bassi fondali. Inoltre, nei processi idro-morfodinamici lagunari gioca un ruolo importante anche la matrice biologica, come nel caso della vegetazione alofila nelle barene o delle fanerogame in altre

zone; la presenza di aree a diverse coperture vegetale modifica gli scambi con il fondo (erosione/deposito) dei sedimenti convogliati dall'acqua, e dunque l'evoluzione della morfologia.

Scale spaziali e temporali

Le variazioni morfologiche della laguna si presentano con scale spaziali e temporali estremamente diverse: dagli spostamenti delle sabbie o delle erosioni localizzate nel corso di un ciclo di marea (ore), alle erosioni/depositi dei bassi fondali o dei canali dovute alla variabilità stagionale delle condizioni meteomarine (mesi), alle modificazioni di ampie zone del bacino a scala storica (decenni o secoli) per lo più dovute ad interventi antropici, alle modificazioni a scala geologica (secoli o millenni) legate ai cambiamenti climatici globali ed ai fenomeni geologici naturali.

Data l'estensione relativamente limitata dei cantieri e della durata dei lavori presso ciascuno di essi, si potrebbe ritenere che i loro effetti siano apprezzabili solo localmente e per periodi di tempo confrontabili con l'operatività dei cantieri stessi. Mentre questa ipotesi appare giustificata per quanto riguarda l'immediato impatto della torbidità creata dalle operazioni di dra-



Ubicazione delle stazioni per il monitoraggio della torbidità in continuo (punti rossi) ed aree di misura della torbidità tramite campagne (aree gialle) alle bocche di porto di Lido (a nord), Malamocco (in centro), Chioggia (a sud).

gaggio sulle popolazioni animali e vegetali, non lo è altrettanto per quanto riguarda l'influenza a lungo termine sulla morfodinamica lagunare. Infatti le perturbazioni sulla morfologia si propagano nel tempo e nello spazio di gran lunga più lentamente delle pertur-

bazioni sull'idrodinamica e sui sistemi biologici. Non si può escludere pertanto che la costruzione delle opere fisse del MOSE si faccia sentire sull'intero sistema lagunare dopo molti decenni e a distanza considerevole dalle bocche.

Modalità di monitoraggio



Il monitoraggio della Matrice Acqua dei cantieri del MOSE, sviluppatosi nell'arco di un decennio, è stato programmato in modo da poter valutare l'impatto sull'ambiente alle diverse scale spaziali e temporali, con l'ausilio, laddove necessario, di opportuni modelli matematici atti ad integrare tutte le informazioni raccolte.

Le misure di concentrazione di sedimenti nell'area circostante i cantieri, e della loro distribuzione granulometrica, sono state effettuate con tre diverse modalità: I) registrazione in continuo della torbidità, dal 2004 al 2015, in prefissate sta-

Misure di granulometria in situ con scatterometro laser, delle proprietà fisiche dell'acqua e prelievo di campioni con il sistema Rosette CTD.

zioni torbidimetriche, appartenenti ad una rete "fissa" e distribuita nell'area di interesse; II) rilevamento della concentrazione dei sedimenti sull'intera colonna d'acqua verticale, lungo transetti di particolare interesse, ripetuti nel corso di singoli eventi mareali o meteomarine; III) campagne di misura ad hoc, in vicinanza delle draghe durante le operazioni di dragaggio, per il controllo del rispetto dei limiti.

La misura della torbidità è stata integrata da una estesa serie di attività di studio dell'idrodinamica (misure di intensità e direzione della corrente, trasporto di sedimenti, modelli numerici) che hanno permesso di valutare l'andamento e le variazioni delle forzanti naturali nel sistema modificato dalla costruzione delle opere fisse.

Strumentazione

Le registrazioni in continuo nelle stazioni torbidimetriche sono state eseguite per mezzo di dispositivi ottici (sonde auto-registranti), opportunamente tarati, assicurando la manutenzione, verifica e pulizia della sonda con la necessaria frequenza.

Nelle sezioni di interesse e in vicinanza delle draghe, invece, i rilievi di torbidità e di velocità della corrente sono stati

eseguiti con dispositivi di tipo idro-acustico, basati sull'effetto Doppler, anch'essi opportunamente tarati: i profilatori verticali (ADCP) vengono installati su imbarcazioni la cui rotta viene localizzata via GPS, ed immersi in corrispondenza delle verticali prescelte, coprendo in tal modo l'intera sezione di interesse.

Lo strumento LISST (Laser in Situ Scatte-

ring and Transmissometry) è stato utilizzato per la misura della granulometria dei sedimenti in sospensione, sia in campo che in laboratorio. In specifiche attività di approfondimento è stato misurato il trasporto al fondo e in sospensione mediante campionatori realizzati per la stima del trasporto solido nella zona bentica ed epibentica (campionatori Helley-Smith).

Registrazione in continuo della torbidità

Le stazioni torbidimetriche hanno funzionato alle tre bocche di porto, in linea di massima contemporanea-

mente, nel periodo 2005-2015 (tabella sottostante). L'analisi delle serie temporali della torbidità ha permesso, per

	1/04/05 31/05/06	1/06/06 30/04/07	1/05/07 30/04/08	1/05/08 30/04/09	1/05/09 30/04/10	1/05/10 30/04/11	1/05/11 30/04/12	1/05/12 30/04/13	1/05/13 30/04/14	1/05/14 30/04/15
Stazioni lagunari										
LSN	X									
LSA		X	X	X						
LTP	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MAP	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CHP	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stazioni in bocca di porto										
LMR	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
LMR-2		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stazioni a mare										
LIM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MAM	X		X	X	X	X	X	X	X	X
CHM	X						X	X	X	X

Periodi di funzionamento dei torbidimetri alle tre bocche di porto: con la X si indica la presenza della stazione per ogni singolo anno.

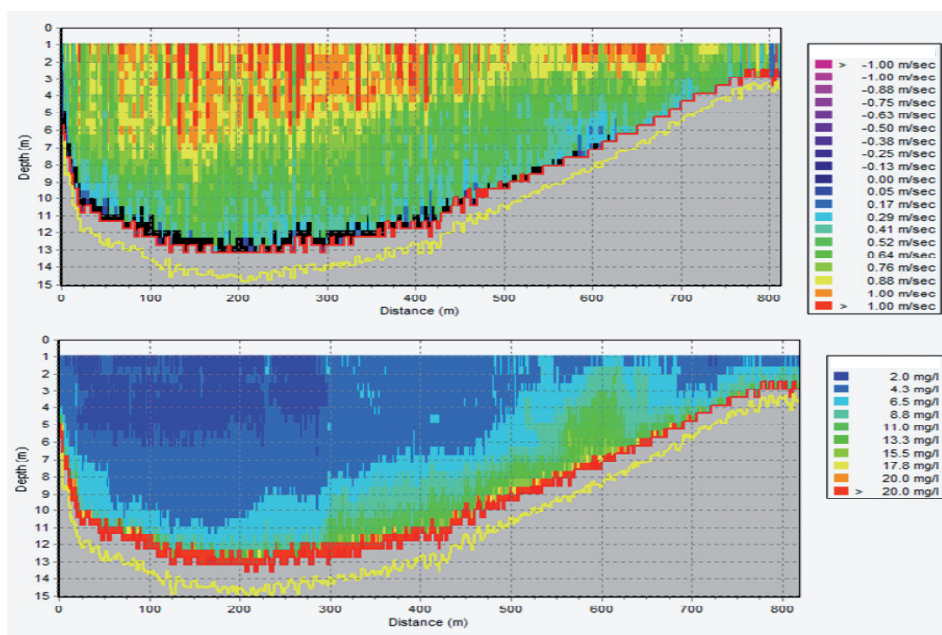
prima cosa, di valutare un valore di riferimento della variabile in "condizioni indisturbate", cioè in assenza di cantieri. Le registrazioni hanno permesso inoltre di fare un'indagine statistica estesa riguardante la variabilità spaziale e temporale della concentrazione nelle zone delle tre bocche. È stato quindi possibile valutare l'influenza delle diverse forzanti (correnti di marea, vento locale, moto ondoso in Adriatico) sulla concentrazione dei solidi sospesi e fornire interessanti informazioni sulla dinamica dei sedimenti attraverso le bocche.

Rilevamento su sezioni di interesse

Le misure con ADCP lungo specifiche sezioni, ripetute nel corso degli anni, permettono di rilevare l'idrodinamica e la concentrazione dei sedimenti, nonché di stimare le variazioni batimetriche a lunghi intervalli di tempo.

Nella figura a lato sono riportati a titolo di esempio la distribuzione istantanea della velocità della corrente e della concentrazione di sedimenti lungo una sezione del canale di Lido.

Sull'evoluzione morfologica alle diverse scale temporali e spaziali la distribuzione granulometrica del materiale che viene trasportato sul fondo e in sospensione ha grande rilevanza (figura a lato). Anche di queste grandezze è iniziato il necessario monitoraggio.



ADCP: distribuzione della velocità (in alto) e della concentrazione del particolato in sospensione (in basso) nella sezione trasversale della bocca di porto di Lido. Sono visibili le zone di massima velocità, al centro della sezione, e di massima concentrazione del materiale sospeso, in prossimità della sponda nord del canale di bocca (a destra nel grafico).

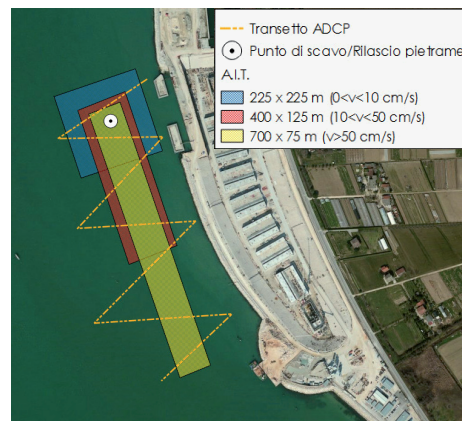
Rilievi per il controllo delle attività di dragaggio

L'analisi statistica dei dati raccolti nel corso del decennio nell'area di pertinenza delle bocche di porto in assenza e in presenza dell'attività di cantiere, associata a valutazioni di natura biologica ricavate dalla letteratura sull'argomento, ha permesso di individuare il valore di soglia della concentrazione (fissato pari a 30 mg/l) da non superare al di fuori di una limitata area (Area di Impatto Totale, AIT) opportunamente definita attorno alla sorgente del rilascio (draga o altre attività puntuali di cantiere). La definizione quantitativa dell'area di impatto totale è stata fatta per mezzo di un modello semplificato di dispersione che riproduce la configurazione della nube (o "plume") di sedimenti in vicinanza della sorgente, in relazione all'entità e modalità del rilascio e alle caratteristiche della corrente di marea (figura a lato).

Per verificare il rispetto della soglia di concentrazione, e quindi per suggerire le necessarie modifiche delle operazioni di dragaggio, nel corso dei lavori sono state eseguite numerose campagne di rilevamento, durante le quali è stato possibile misurare i livelli di concentrazione media verticale lungo un percorso a zig zag stabilito a partire dall'area di scavo/rilascio pietrame ed eseguito lungo la direzione di propagazione del pennacchio di torbida prodotto. Si veda, a titolo di esempio, l'immagine in prima pagina, ove è rappresentato un transetto di monitoraggio dell'attività della draga "S. Giusto", impegnata in operazioni di sca-

vo nel recesso di barriera in prossimità della Diga Sud nella bocca di porto di Chioggia. Il colore dei quadratini è indicativo del livello di concentrazione. È stato misurato un valore massimo, pari a 24.2 mg/l, nelle immediate vicinanze dell'area di lavoro al limite della AIT, ma il pennacchio di torbida si disperde rapidamente senza produrre situazioni di criticità.

Le indagini hanno consentito di rilevare in maniera efficace ed in tempo quasi reale condizioni di allerta circa i parametri fisici della colonna d'acqua, dando un feedback immediato sull'organizzazione e la condotta delle attività di cantiere. È stato così possibile adattare le modalità di lavorazione in modo da minimizzare gli impatti sull'ecosistema, quasi senza ripercussioni sulla tempistica delle attività di costruzione. Le violazioni del valore di soglia riscontrate nel corso delle 286 giornate di campagna effettuate si limitano ad alcune lavorazioni particolari attive solo durante intervalli di breve durata (scavi con draga idrorefluente a sfioro, refluitamento dei materiali per la costruzione



Esempio di forme dell'AIT in funzione della velocità della corrente.

dell'isola nuova, operazioni di rilascio di pietrame da imbarcazione con chiglia apribile). In nessun caso i superamenti si sono estesi al di fuori dell'area AIT, prossima alla draga. Per quanto riguarda gli aspetti investigati, si può evidenziare che le attività sinora eseguite per la realizzazione delle opere mobili hanno avuto, nel breve e medio periodo, un impatto minimo sugli ecosistemi limitrofi sia per durata che per intensità rispetto agli eventi di origine naturale.

	01/04/2005 31/05/2006	01/01/2006 30/04/2007	01/05/2007 30/04/2008	01/05/2008 30/04/2009	01/05/2009 30/04/2010	01/05/2010 30/04/2011	01/05/2011 30/04/2012	01/05/2012 30/04/2013	01/05/2013 30/04/2014	01/05/2014 30/04/2015
Numero stazioni attive	8	7	8	8	3	3	7	8	8	4
Numero dati validati	198.796	191.191	247.344	215.076	86.272	76.711	188.886	230.027	230.470	97.076
Numero superamenti soglia 30 mg/l	16.310	8.364	9.915	17.505	3.718	1.782	13.428	11.855	14.271	8.350
Frequenza dei superamenti	8,2%	4,4%	4,0%	8,1%	4,3%	2,3%	7,1%	5,2%	6,2%	8,6%
Frequenza superamenti con vento >10 m/s	7,2%	3,2%	3,1%	6,8%	4,2%	2,3%	5,0%	4,2%	3,9%	4,6%
Frequenza superamenti con vento <10 m/s	1,0%	1,2%	0,9%	1,3%	0,1%	0,0%	2,1%	0,9%	2,3%	4,0%

Numero stazioni per il rilevamento della torbidità in continuo attive, dati validati e numero di superamenti totali per ogni stazione per ogni anno di monitoraggio.

La frequenza dei superamenti è calcolata come rapporto tra il numero dei superamenti totali (con vento >10m/s e con vento <10m/s) e quello dei dati validati.



Giampaolo Di Silvio (UniPadova)

Franco Arena (OGS)

Emiliano Checchin (Selc)

Franco Costa (ISMAR-CNR)

Daniele Curiel (Selc)

Caterina Dabalà (CORILA)

Chiara Dall'Angelo (CORILA)

Loris Dametto (ISMAR-CNR)

Valentina Defendi (ISMAR-CNR e CORILA)

Stefano Donà (ISMAR-CNR)

Riccardo Fiorin (LagunaProject)

Francesco Fracassi (CORILA)

Miroslav Gacic (OGS)

Giorgio Gelsi (OGS)

Giuliano Lorenzetti (ISMAR-CNR e CORILA)

Vèdrana Kovacevic (OGS)

Gian Franco Magris (ISMAR-CNR)

Roberto Malfassi (OGS)

Giorgia Manfè (ISMAR-CNR e CORILA)

Francesca Manfrin (ISMAR-CNR)

Marino Meneghin (ISMAR-CNR)

Matteo Morgantini (CORILA)

Federico Riccato (LagunaProject)

Ruggero Ruggeri (ISMAR-CNR)

Francesco Simionato (ISMAR-CNR)

Giovanni Venier (CORILA)

Luca Zaggia (ISMAR-CNR)

Lavoro svolto per conto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Provveditorato Interregionale per le OO.PP. Veneto - Trentino Alto Adige - Friuli Venezia Giulia - tramite il Consorzio Venezia Nuova, coordinato da CORILA.

CORILA Palazzo Franchetti, S. Marco 2847, 30124 Venezia, www.corila.it

Quest'opera è distribuita con Creative Commons Attribution 4.0 International License



Rete di stazioni fisse per la misura della torbidità in continuo



Stazioni di misura alle tre bocche di porto: bocca di Lido in alto, bocca di Malamocco al centro e bocca di Chioggia in basso.

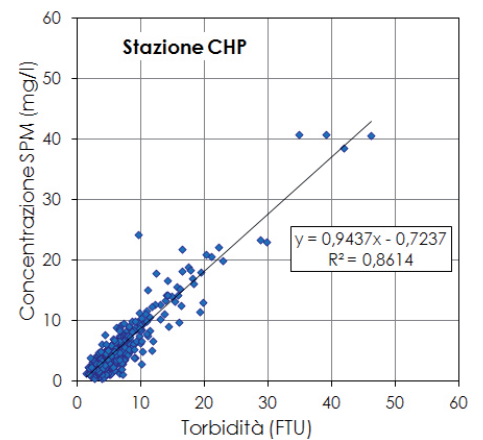
Il rilevamento in continuo della torbidità (riduzione della trasparenza dell'acqua dovuta alla presenza di sostanze in sospensione) è iniziato a maggio 2005. La rete di misura è costituita da stazioni fisse la cui ubicazione e numero hanno subito poche modifiche durante le attività, in funzione dell'evoluzione e dello sviluppo dei cantieri.

Le stazioni, alloggiate presso postazioni mareografiche esistenti (con strutture diverse a seconda della profondità del fondale) posizionate nei canali delle tre bocche di porto, all'interno della laguna e in mare, sono equipaggiate con sonde multiparametriche autoregistranti e acquisiscono dati di pressione, temperatura, conducibilità e torbidità ogni 15 minuti.

I dati sono scaricati con frequenza all'incirca settimanale contemporaneamente ad un prelievo di campioni d'acqua per la calibrazione e ad un'accurata pulizia sia dei sensori che del corpo della sonda. Entrambi, infatti, sono soggetti a fenomeni di copioso accumulo di materiale macroscopico (residui di piante acquatiche e macroalghe, breve stazionamento di organismi marini) o a crescita progressiva di alghe e organismi (fouling). I dati di torbidità (espressa in FTU) vengono validati con una procedura matematica di filtrazione e, in caso di deriva dovuta a fouling, con una correzione dell'andamento della serie temporale. Essi vengono quindi convertiti in valori che esprimono la concentrazione del materiale in sospensione (SPM, espresse in mg/l) con una calibrazione effettuata mediante relazioni di regressione, ottenute correlando le concentrazioni rilevate in laboratorio nei campioni d'acqua e la torbidità registrata dallo strumento nello stesso istante del prelievo.



Sonda della stazione LTP, in bocca di Lido, prima (a sinistra) e dopo la pulizia (a destra) (18/07/2013).



Relazione di regressione fra la torbidità registrata dalla sonda (stazione CHP, in bocca di porto di Chioggia) ed i corrispondenti valori di concentrazione di materiale in sospensione (SPM) nei campioni d'acqua prelevati in concomitanza agli interventi di manutenzione.

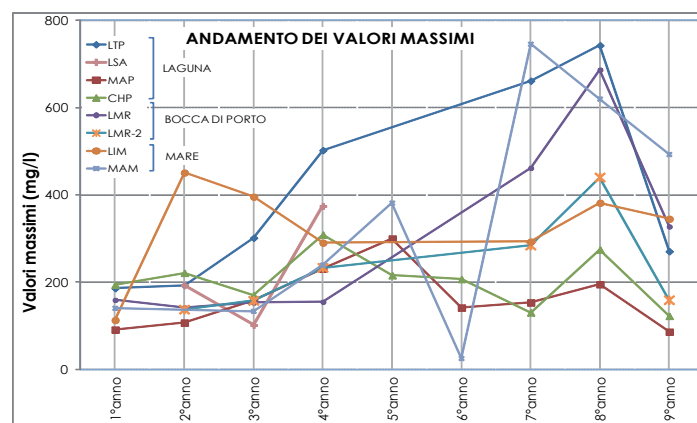
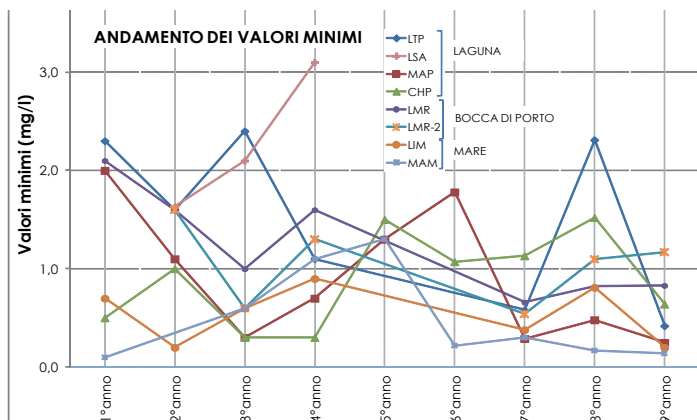
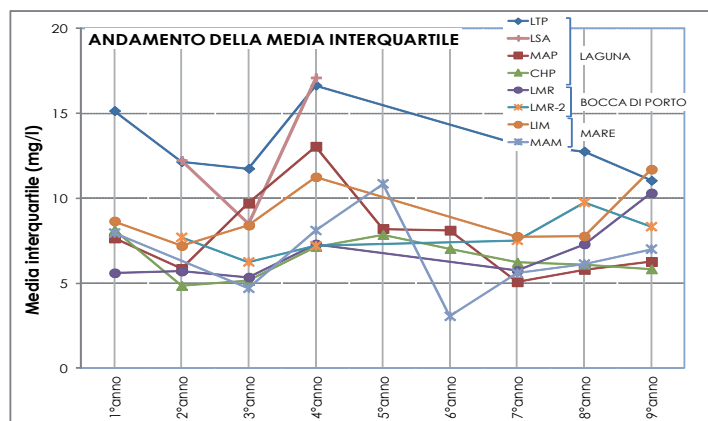
Variabilità spaziale e temporale

Nei tre grafici della pagina successiva si riportano alcuni valori statisticamente significativi della torbidità (valori annuali minimi, massimi e media interquartile) registrati nelle varie stazioni di misura durante l'intero periodo di monitoraggio 2005-2014. La torbidità naturale è dipendente dagli eventi meteorologici in laguna e in mare

(risospensione del materiale di fondo), nonché influenzata dagli apporti fluviali (dal bacino scolante e dai corsi d'acqua maggiori) e dai processi biologici (fioriture algali); i grafici quindi evidenziano una marcata variabilità tanto spaziale (da stazione a stazione) quanto temporale (di anno in anno). Pur nell'ampia variabilità, nei diagram-

mi spiccano alcune stazioni caratterizzate da valori consistentemente maggiori delle altre: segnatamente le stazioni della bocca di Lido maggiormente influenzate dal trasporto litoraneo. Non appare invece evidente alcuna sistematica tendenza nel corso del decennio ad una crescita o decrescita in funzione del tempo.

Andamento dei valori di torbidità annuali minimi, massimi e delle medie interquartili registrati nelle stazioni di misura i fisse durante i singoli anni di monitoraggio.



8 stazioni
9 anni di misura
1.508.300 dati rilevati

Superamenti del valore di soglia: attività di dragaggio o eventi naturali?

Per un controllo quantitativo della torbidità artificiale eventualmente generata dalle attività di dragaggio, mediante l'elaborazione statistica delle serie temporali disponibili, è stato individuato un valore di soglia della concentrazione del materiale solido sospeso, pari a 30 mg/l, da non superare all'esterno di un'area d'impatto totale AIT (non superiore a 50.000 m²), la cui configurazione più o meno allungata risulta dipendere dalla velocità della corrente (si veda scheda "Monitoraggio della torbidità indotta dalle attività di dragaggio").

Col rispetto di tali condizioni si ha ragionevole certezza che l'influenza del dra-

gaggio sull'ambiente circostante sia confrontabile con quella esercitata da alcuni eventi naturali (temporali, mareggiate) di accettabile frequenza.

La tabella riporta, a titolo di esempio, il numero degli eventi in cui è stato superato il valore di soglia segnalato dai torbidimetri fissi più vicini alla draga Astra nel secondo semestre del 2006. Sebbene questo semestre sia stato il periodo di più intensa attività di dragaggio, il numero di eventi in cui è stato superato dai torbidimetri è percentualmente irrisorio.

Il rispetto della massima zona di impatto è stato verificato in corso d'opera

anche attraverso ispezioni dirette con torbidimetri imbarcati (si veda scheda "Monitoraggio della torbidità indotta dalle attività di dragaggio"). Sono state altresì impartite istruzioni alla Direzione Lavori per limitare convenientemente, nelle condizioni di mare più critiche, l'utilizzo delle draghe.

Oltre al monitoraggio e al controllo della torbidità artificiale eventualmente generata dall'attività di dragaggio, i dati raccolti dai torbidimetri sono stati utilizzati per la caratterizzazione delle tendenze naturali della laguna (si veda scheda "Turbidità in continuo e dinamica dei sedimenti").

	LMR-2	LMR	LSA
Numero di dati validati	16070	16470	14484
Numero di eventi con C > 30 mg/l	23	17	119
Numero di eventi in cui non si hanno informazioni sulla draga	2	0	23
Numero di eventi certamente non attribuibili alla draga	21	15	85
Numero di eventi possibilmente attribuibili alla draga	0	2	11

Numero di eventi nel corso dei quali, nel periodo giugno-dicembre 2006, si è superato il valore soglia in concomitanza con i lavori della draga Astra presso la bocca di Lido, in un numero totale di 5136 ore.



La draga idrorefluente a sfioro Astra in opera presso la bocca di porto di Lido.

Torbidità in continuo e dinamica dei sedimenti

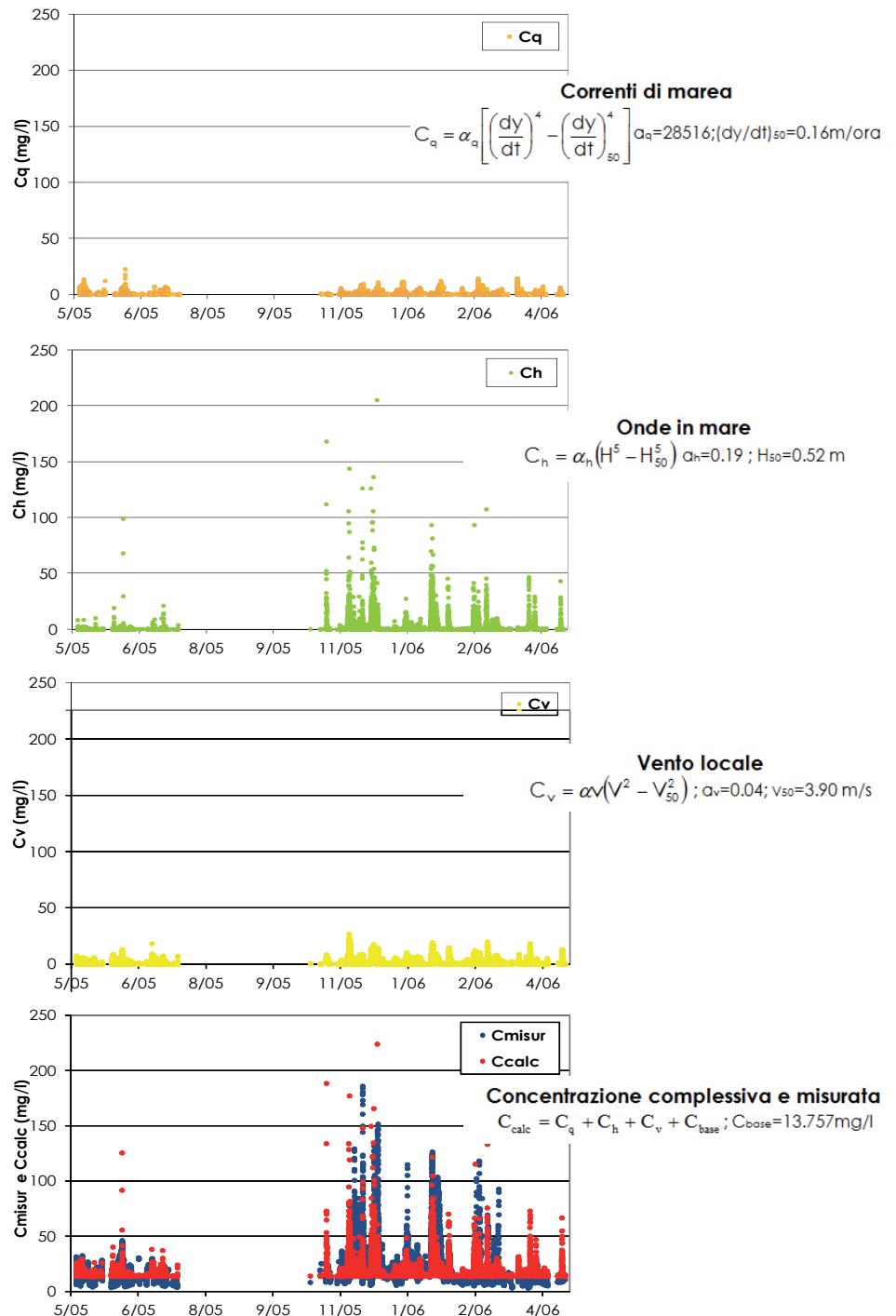
Ad integrazione della scheda "Rete di stazioni fisse per la misura della torbidità in continuo", che fornisce indicazioni statistiche sulla variabilità spaziale e temporale di questa grandezza, nella presente scheda si mettono in evidenza i meccanismi di sollevamento e trasporto dei sedimenti che determinano da un lato l'entità della loro concentrazione nelle zone delle bocche di porto, dall'altro i flussi netti attraverso alcune sezioni significative di queste zone.

Concentrazioni e forzanti esterne

Allo scopo di valutare quantitativamente tali meccanismi, alla serie cronologica della concentrazione misurata in ciascuna stazione torbiometrica sono stati associati i corrispondenti valori della velocità del vento v e dell'altezza H del moto ondoso in mare (registrate alla piattaforma oceanografica del CNR) e della corrente di marea (stimata attraverso il gradiente (dy/dt) del livello rilevato dalle stazioni mareografiche in prossimità delle bocche). Assumendo la concentrazione locale $C(t)$ come grandezza additiva, si è ipotizzata la seguente espressione per il suo valore istantaneo:

$$C(t) = C_q(t) + C_h(t) + C_v(t) + C_{base}$$

somma delle tre componenti rispettivamente dovute alle correnti di marea, alle onde di mare anche in assenza di vento (swell), alle onde di vento locale. Il quarto termine, qui assunto costante, rappresenta la media degli effetti "non spiegati" dalla formula: p.es altre sorgenti di torbidità, errori di misura e, soprattutto, il fatto che la concentrazione rilevata dal torbidimetro non dipende esclusivamente dalle forzanti idrodinamiche ma anche



dal trasporto dei sedimenti provenienti dalle zone circostanti.

I grafici qui riportati a titolo di esempio, si riferiscono al torbidimetro LTP e al periodo di misura "aprile 2005-maggio 2006". Essi riportano l'andamento cronologico delle tre componenti della concentrazione calcolata e della loro somma, nonché la concentrazione complessiva misurata. Le grandezze

con pedice 50 rappresentano il valore medio della rispettiva serie cronologica. I coefficienti α_q , α_h , α_v , e il valore C_{base} sono specifici del torbidimetro considerato (LTP, 2005-2006).

È da notare come il valore complessivo di $C(t)$ risulti prevalentemente correlato alla presenza di onde in mare, rispetto al solo vento locale e alle correnti di marea.

L'evoluzione morfologica su lungo periodo degli ambienti lagunari dipende in misura sostanziale dai flussi netti di sedimenti, prevalentemente in sospensione, che si stabiliscono fra le diverse componenti della laguna (canali, bassifondi, barene), nonché tra la laguna e il mare. Si tratta di un lento ma continuo processo di adattamento per cui ad ogni variazione delle forzanti esterne (eustatismo, subsidenza, apporto fluviale, escursione di marea, condizioni meteo marine, vento locale) i flussi netti di sedimenti tendono a modificarsi in modo da riportare il bilancio netto verso lo zero.

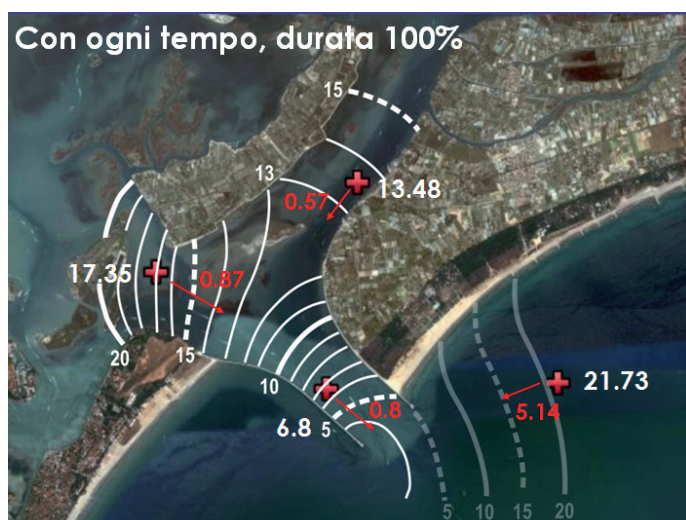
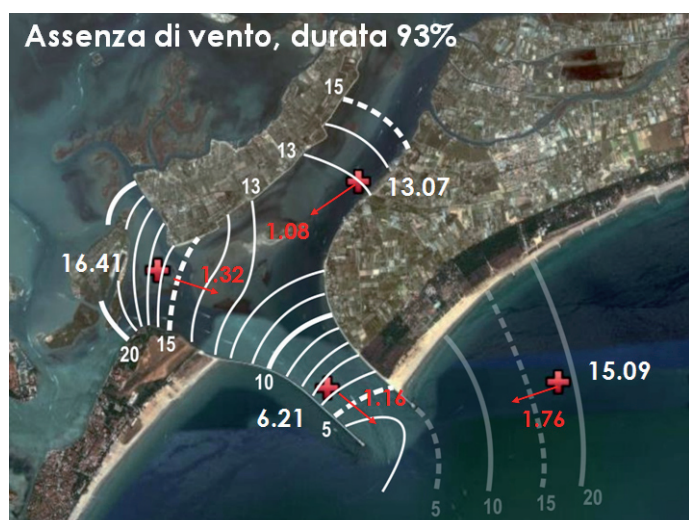
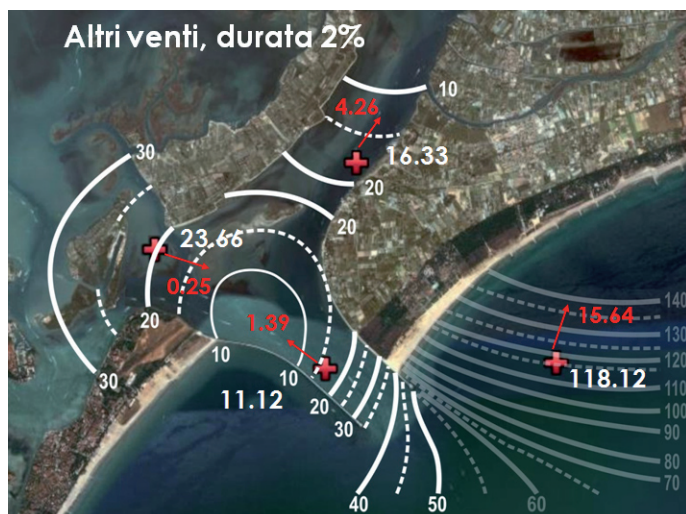
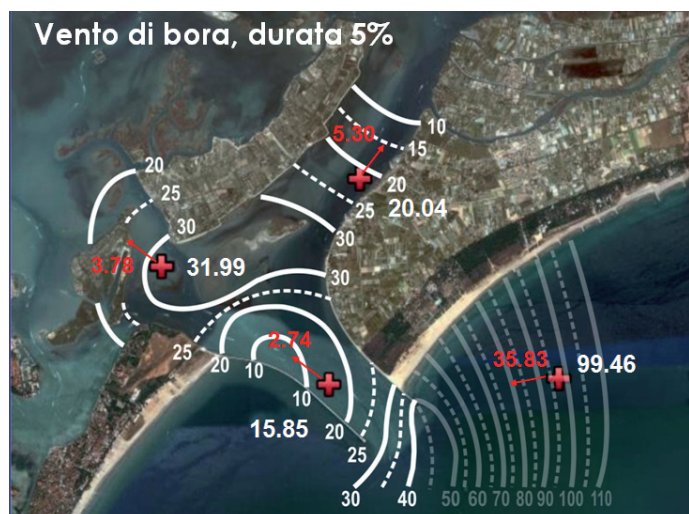
Per le valutazioni qui riportate sono state utilizzate le registrazioni in continuo effettuate per mezzo di torbidimetri ottici alla bocca di Lido nel periodo "giugno 2006-maggio 2007". Nelle figure viene rappresentata, per diverse condizioni di vento, la distribuzione spaziale della concentrazione media (mg/l) nella bocca di Lido, nonché il flusso netto di sedimenti in ciascuna stazione torbiometrica,

espresso come differenza fra la concentrazione media (mg/l) entrante e uscente. Una stima del flusso netto espresso in $m^3/anno$ si ottiene moltiplicando questa differenza per il volume di marea scambiato ogni anno attraverso la sezione del torbidometro. Tale volume è pari circa a $S \times H$, in cui S (m^2) è la superficie del bacino lagunare intercettato dalla sezione stessa e H = circa 700 m è la somma totale annua dell'escursione di marea. È interessante osservare come i flussi netti siano generalmente orientati nella direzione del gradiente negativo della concentrazione media, segnalando così un comportamento globale di tipo dispersivo da parte delle alternate correnti di marea ("dispersione intermareale").

Le quattro condizioni di vento esaminate sono così definite:

1. vento di Bora (direzione compresa fra 0° e $90^\circ N$ e velocità superiore a 10 m/s);
2. altri venti (da qualsiasi direzione con velocità superiore a 10 m/s);
3. assenza di vento (cioè velocità inferiore a 10 m/s);
4. con ogni tempo (conglobando le tre condizioni precedenti).

Durante gli eventi di bora le concentrazioni risentono del risollevarsi dei sedimenti da parte del moto ondoso in Adriatico, mentre è praticamente irrilevante il risollevarsi da parte delle correnti di marea: in queste condizioni il flusso netto è prevalentemente entrante in laguna, favorito anche dal cospicuo trasporto litoraneo lungo il Cavallino. In presenza di altri venti il flusso netto entrante in laguna è meno elevato, con addirittura una lieve componente uscente attraverso i canali S.Nicolò e S.Erasmo. In totale assenza di vento, infine, le concentrazioni, praticamente controllate dalle sole correnti di marea, sono piuttosto basse mentre il flusso netto si presenta dovunque in uscita. Tale situazione, restando praticamente immutata, per la lunga durata delle calme, non differisce qualitativamente dalla condizione complessiva "ogni tempo".

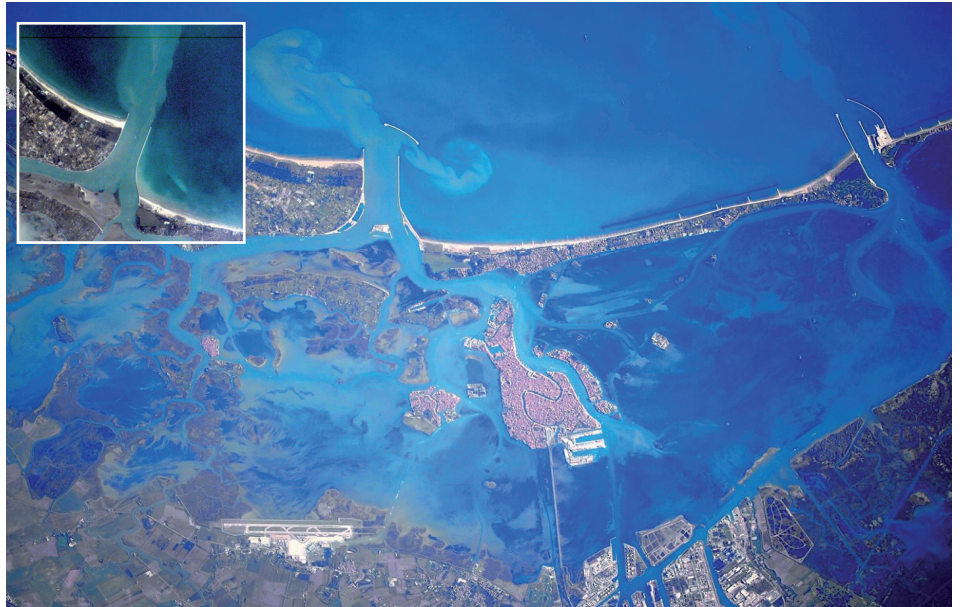


L'idrodinamica e il trasporto di sedimenti alle bocche di porto

La realizzazione del MOSE ha comportato modifiche importanti nelle zone delle bocche di porto. Queste trasformazioni influiscono sicuramente sull'idrodinamica locale e il trasporto solido; nel medio e lungo periodo, si potrebbero verificare dei cambiamenti sia della morfoidrodinamica degli ambienti limitrofi, quali i litorali o il delta mareale interno ed esterno alla laguna, sia sulla morfologia delle stesso canale di bocca. Queste trasformazioni dovranno essere in futuro oggetto di un continuo monitoraggio anche ai fini della gestione ottimale e sostenibile delle opere stesse.

Il Piano di monitoraggio dei cantieri ha previsto, sin dalle fasi iniziali, una estesa serie di indagini per il monitoraggio delle condizioni idrodinamiche e del trasporto solido nelle aree oggetto degli interventi.

L'idrodinamica ed il trasporto solido in sospensione sono studiati con metodologie acustiche (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler) che permettono di descrivere con sufficiente dettaglio



Venezia e la sua laguna in una immagine ripresa nel 2015 dalla Stazione Spaziale Internazionale. Si evidenzia la particolare configurazione del flusso alla bocca di porto di Lido in seguito alla realizzazione del frangiflutti a mare, denominato lunata, e la differenza rispetto alla situazione antecedente (riquadro).

ed in maniera speditiva le caratteristiche del flusso e la sua variabilità spaziotemporale, evidenziando anche peculiarità quali fenomeni di turbolenza a grande e media scala.

Le indagini sono effettuate con misure, ripetute in diverse condizioni di marea e meteo marine, su sezioni di interesse localizzate in prossimità dei recessi di

barriera e in sezioni interne alla laguna. Altre misure sono effettuate nelle sezioni più esterne dei tre canali di bocca, in corrispondenza delle stazioni per la misura in continuo del flusso con ADCP, e nell'area immediatamente al di fuori delle bocche in corrispondenza ai frangiflutti (lunate) per lo studio della nuova configurazione del getto uscente.



Posizione dei transetti di misura (linee a tratteggio) investigati nella bocca di porto di Chioggia durante la campagna del 20/03/2015.

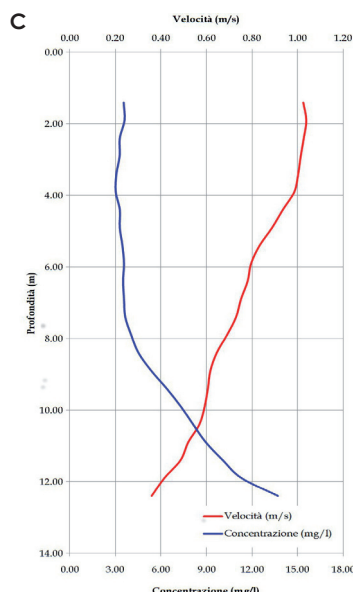
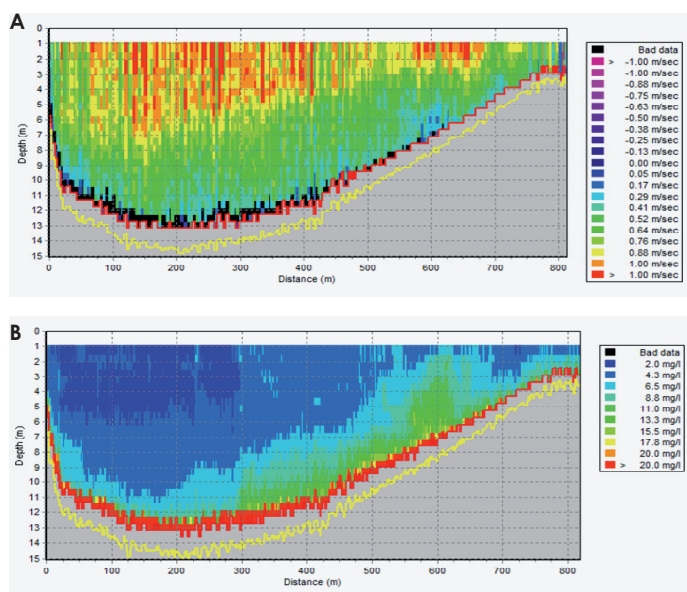
Una serie di misure sperimentali, effettuate con strumentazione oceanografica (sonde CTD e torbidità) simultaneamente all'acquisizione con gli strumenti acustici per la misura del flusso, permette di ottenere informazioni sulle proprietà acustiche della colonna d'acqua (densità). Con queste informazioni, insieme alla concentrazione del particolato solido in sospensione, determinata su campioni d'acqua, viene calibrato un algoritmo per la conversione dei dati acustici rilevati dagli ADCP in stime della concentrazione del particolato

in sospensione.

Diventa quindi possibile ottenere mappe bidimensionali (figura sottostante) della concentrazione del materiale sospeso per tutta la sezione investigata con la stessa rapidità e con lo stesso livello di dettaglio delle misure di flusso. Con percorso adeguato dell'imbarcazione è possibile anche effettuare una ricostruzione tridimensionale della distribuzione del carico sospeso, come avviene nel caso del monitoraggio delle attività di dragaggio alle bocche di porto.



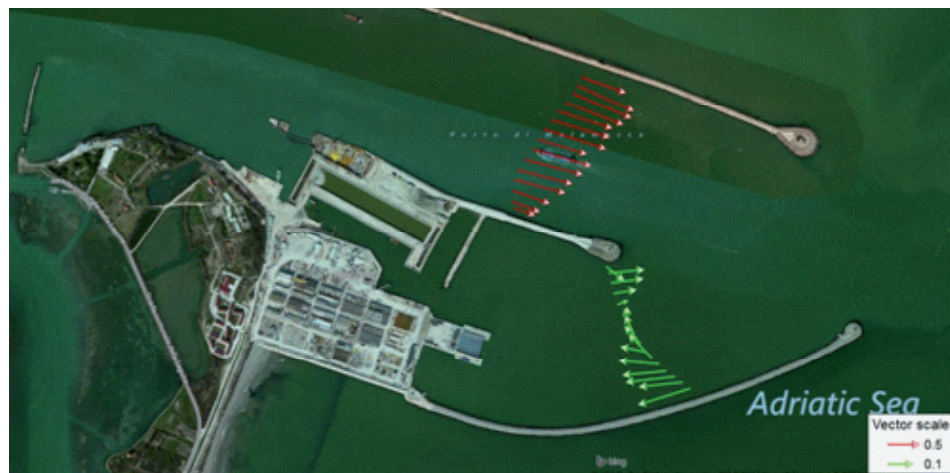
Il sistema di misura dei parametri idrologici, costituito da campionario a rosette e sonda CTD (a sinistra), ed il profilatore acustico Doppler (ADCP, a destra), utilizzato per la misura di velocità e direzione della corrente lungo il profilo verticale.



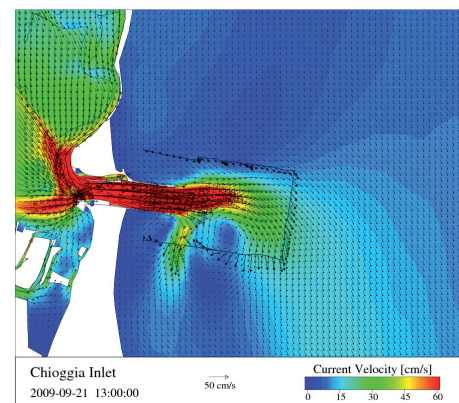
Configurazione del campo di velocità (A) e distribuzione del particolato solido in sospensione (B) nella sezione principale della bocca di porto di Lido in condizioni di marea di sizigia. Le differenti colorazioni lungo la sezione corrispondono a diverse velocità e concentrazioni del materiale sospeso (rosso: maggiori velocità e concentrazioni, blu: velocità e concentrazioni minori). C: profili verticali della velocità di corrente (linea rossa) e della concentrazione del materiale in sospensione (linea blu) al centro della stessa sezione.

Le conoscenze ottenute costituiscono importanti informazioni di base sulla configurazione del campo di moto e del trasporto solido nel sistema delle bocche a marea. Queste informazioni sono di grande utilità per la calibrazione e validazione di modelli matematici per la previsione

di processi morfodinamici sul medio e lungo periodo e consentono di effettuare analisi statistiche per evidenziare eventuali variazioni nell'idrodinamica e nel trasporto solido causate dalla realizzazione delle opere o dalle trasformazioni indotte dalla loro presenza.



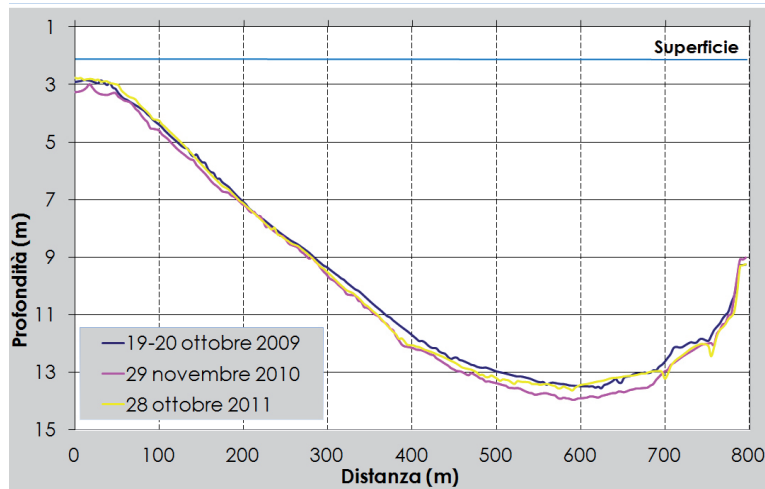
Configurazione del campo di corrente come velocità media sulla verticale e direzione (evidenziate con vettori proporzionali all'intensità) presso la bocca di porto di Malamocco. È evidente la struttura vorticoso all'interno del bacino di evoluzione della Conca di Navigazione.



Simulazioni della circolazione in marea uscente per le bocche di porto di Chioggia effettuate con il modello SHYFEM da CNR-ISMAR. Sono riportate, per confronto, le velocità di corrente (in nero) determinate sperimentalmente durante le indagini in campo ed utilizzate per la calibrazione del modello teorico.

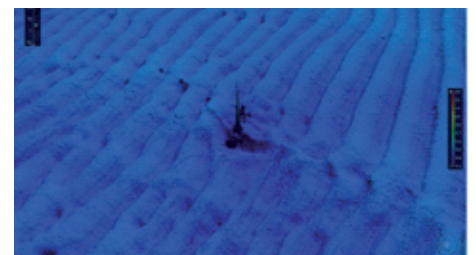
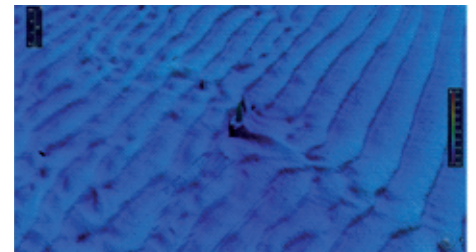
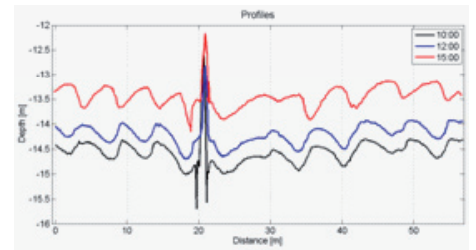
Evoluzione dei fondali delle bocche di porto, forme di fondo e habitat mapping

Lo studio dell'idrodinamica del sistema delle bocche a marea della laguna di Venezia mediante strumentazione acustica presenta una serie di vantaggi fra cui la disponibilità di informazioni dettagliate circa le strutture del campo di corrente alle diverse scale (turbolenze, vorticosità, asimmetrie del flusso etc.) e del trasporto di sedimenti, altrimenti impossibili da evidenziare. Una ricaduta particolarmente interessante di queste indagini è la disponibilità di dati batimetrici per le sezioni investigate. Durante il periodo di monitoraggio dei cantieri per la realizzazione delle opere di difesa dalle acque alte della laguna di Venezia, alcune sezioni delle bocche di porto sono state oggetto di una intensa serie di misure ripetute nel tempo, ed è quindi possibile utilizzare i dati batimetrici registrati dalla strumentazione impiegata (Profilatori Acustici Doppler, ADCP) per valutazioni preliminari circa le variazioni batimetriche intervenute nell'intervallo di osservazione.

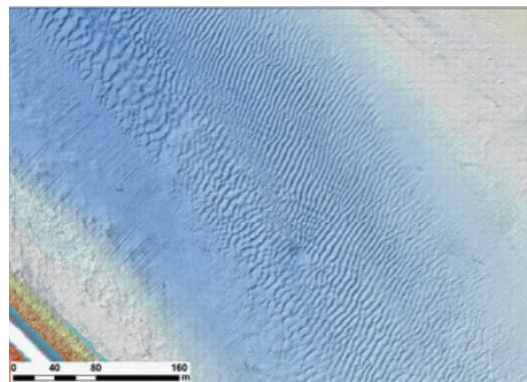
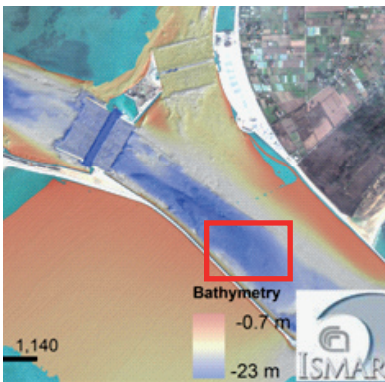


Variazioni batimetriche nel canale della bocca di porto di Lido nel periodo Ottobre 2009 – Novembre 2011. È evidenziata con diversi colori la morfologia della sezione del canale nei diversi periodi.

Quando si considera una sezione del canale di bocca è importante ricordare che il fondale di una bocca tidale è un ambiente estremamente dinamico dove forme di fondo, generate e modellate dalle correnti di marea, possono determinare una variabilità della morfologia locale su scale temporali anche molto brevi quali il singolo ciclo di marea. CNR-ISMAR sta studiando con tecnologie d'avanguardia (quali Multibeam ad alta risoluzione) la dinamica e l'evoluzione delle forme di fondo nei canali della laguna di Venezia e nelle sue bocche di porto. In corrispondenza a queste ultime sono state riconosciute nel fondale una molteplicità di forme (campi di dune, scours etc.) alcune delle quali sono oggetto di studi finalizzati alla conoscenza della loro evoluzione anche in funzione delle correnti.



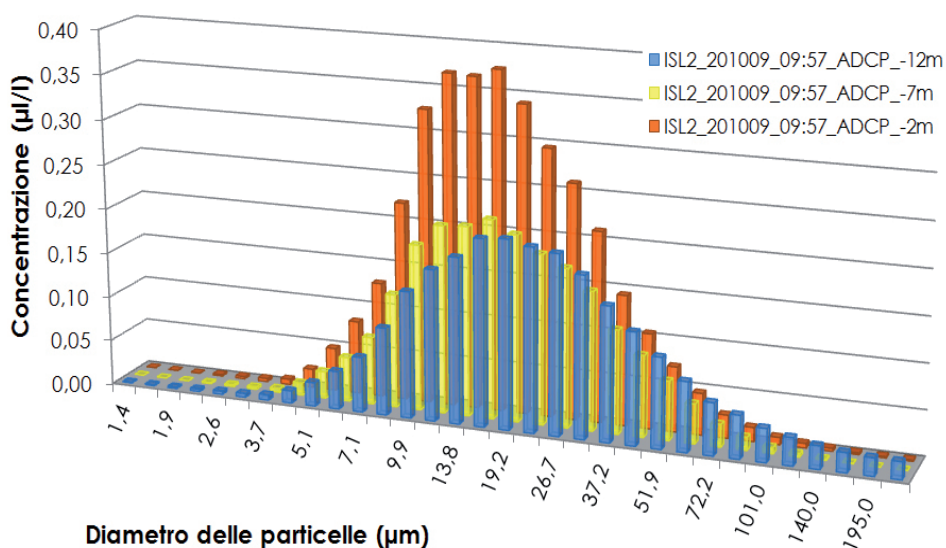
Movimenti ed evoluzione della morfologia delle forme di fondo al variare della direzione ed intensità della corrente in un semiciclo di marea.



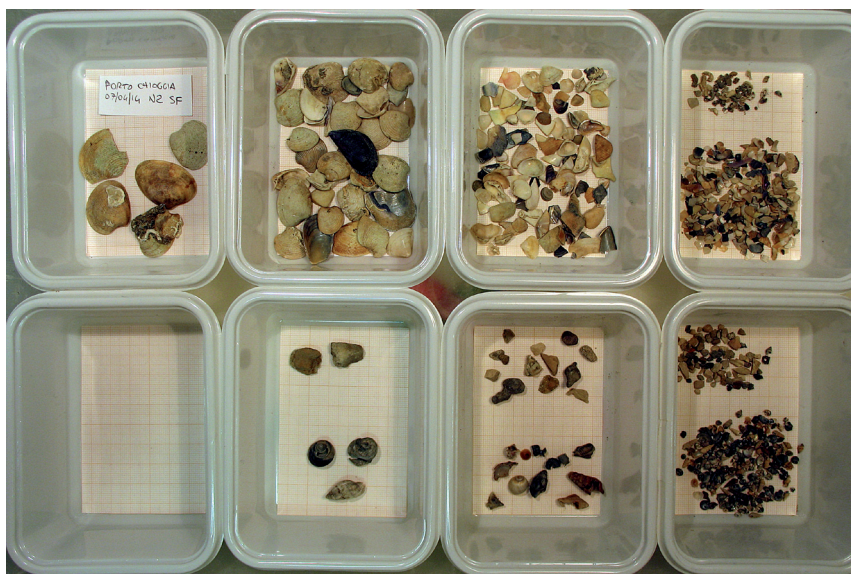
Batimetria del fondale della bocca di porto di Lido (a sinistra) e, a destra, dettaglio dell'area evidenziata in rosso. Nelle immagini sono visibili le opere del sistema MOSE già realizzate al fondo (a Treporti i cassoni già posati nel recesso di barriera e a S. Nicolò il recesso di barriera ultimato) e i campi di dune che caratterizzano la parte più dinamica dei fondali della bocca tidale.

In questo tipo di indagini è anche molto importante conoscere le caratteristiche dei materiali trasportati dalle correnti. Questa indagine è stata resa possibile dall'utilizzo di uno strumento (LISST, Laser In Situ Scattering and Transmissometry) che consente la determinazione della distribuzione granulometrica dei materiali in sito, nella colonna d'acqua, o in laboratorio, su campioni d'acqua prelevati in campo. Tale sofisticata strumentazione è stata utilizzata in Italia per la prima volta in modo esteso. Le analisi granulometriche del particolato sospeso sono state effettuate in tutte le campagne di monitoraggio a partire dall'anno 2006; è quindi disponibile un database esteso sulle proprietà dei materiali trasportati nei diversi ambiti e in diverse condizioni di marea, nei 200 giorni di campagna effettuati, su un totale di 341 giorni di campagna effettuati nei 10 anni di monitoraggio.

Data l'importanza delle proprietà dei fondali nell'evoluzione morfodinamica dei stessi e degli habitat associati, il CNR-ISMAR ha attivato una linea di ricerca proprio su questo specifico argomento con l'obiettivo di giungere ad una serie di criteri per la micro-mappatura dell'habitat dei fondali e per lo studio dell'evoluzione delle forme di fondo a diverse scale temporali.



Lo strumento per la misura delle granulometrie in sito e nei campioni d'acqua LISST (in alto). Nel grafico (in basso) gli istogrammi di frequenza della concentrazione volumetrica, per ciascuna classe dimensionale, ottenuti dalle analisi al LISST per il materiale in sospensione alla bocca di porto di Lido.



I materiali che ricoprono parte dei fondali della bocca di porto di Chioggia. Il detrito grossolano, in prevalenza gusci di bivalvi, condiziona il trasporto dei sedimenti e viene studiato con immagini subacquee e campionamenti per la caratterizzazione dei materiali.

Monitoraggio della torbidità indotta dalle attività di dragaggio

Il dragaggio dei fondali è un'operazione irrinunciabile per la fruizione delle aree costiere interessate dalla presenza umana, sia per quanto riguarda lo sviluppo e il mantenimento di interessi economici legati alla portualità, sia per gli interventi ingegneristici destinati alla protezione delle coste.

Tuttavia le attività di dragaggio hanno delle ripercussioni sull'ambiente marino, fra cui inevitabilmente, un aumento temporaneo della risospensione di sedimenti lungo la colonna d'acqua. L'entità e l'estensione della regione interessata dall'impatto (nube o *plume*) dipendono dalla profondità e dalla morfologia dell'area (ad esempio, la sezione del canale navigabile). Altri fattori che influenzano l'impatto sono il tipo di impianto di dragaggio e la sua modalità di utilizzo, le proprietà intrinseche dei materiali dragati (fra cui granulometria, contenuto organico e contenuto d'acqua dei sedimenti) e le variabili ambientali quali correnti, maree, moto ondoso.

Tale aumento può avere effetti negativi a breve e a lungo termine sugli or-

ganismi acquatici in quanto può modificare la possibilità di movimento, la disponibilità di cibo o le capacità respiratorie ma può causare anche la riduzione della profondità di penetrazione della radiazione fotosintetica, risorsa chiave per la crescita e per la vita degli organismi fotosintetici (come, ad es., le fanerogame marine).

Nel corso degli interventi di realizzazione delle opere mobili per la difesa dalle acque alte della laguna di Venezia, sono state utilizzate diverse tipologie di impianti di dragaggio, in relazione alle diverse esigenze di cantiere. Le più comuni sono le draghe a grappo montate su di un'imbarcazione o su pontone, le draghe idrorefluenti e le draghe idrorefluenti a sfioro.

Il programma di monitoraggio adottato per i cantieri del MOSE è prevalentemente ispirato ai criteri dei protocolli definiti a livello internazionale per il monitoraggio degli impatti delle attività di dragaggio^{1, 2}. Alcune procedure sono state tuttavia adattate al caso specifico dello scavo in un canale confinato fra moli foranei, in presenza di forti correnti di marea e con attività di scavo e/o rilascio di materiale sciolto o pietra-

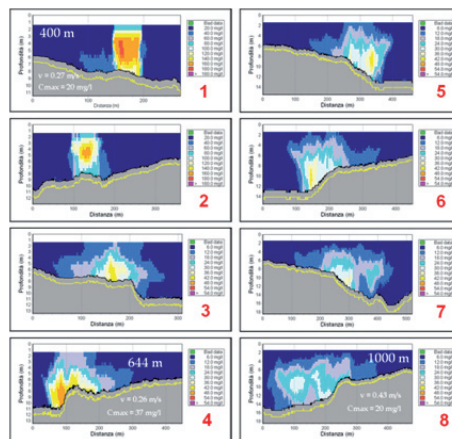
me anche in prossimità dei margini. Le indagini per la valutazione dell'impatto si basano sulla esecuzione di una tomografia acustica della nube di ma-



Le principali tipologie mezzi di dragaggio impiegate in laguna di Venezia durante la realizzazione delle opere mobili per la difesa dalle acque alte. Dall'alto: draga a benna (clamshell), draga idrorefluente (suction dredger), draga idrorefluente a sfioro (trailing suction hopper dredger).



La draga idrorefluente a sfioro "Astra", ripresa dall'alto col braccio di scavo immerso dal fianco dell'imbarcazione, durante una fase di lavoro alla bocca di porto di Lido. A sinistra sono riportate le sezioni trasversali della nube di materiale sospeso a distanza crescente dal punto di scavo. Le differenti colorazioni lungo la sezione corrispondono a diversi quantitativi di materiale solido in sospensione (Rosso: maggiori concentrazioni, Blu: minori concentrazioni).



teriale disperso durante lo scavo o durante le operazioni di rilascio pietraframe e trasportato dalla corrente. Nella pratica questa operazione viene effettuata intersecando il *plume* con percorsi idonei a definirne la sua estensione spazio-temporale (transetti; figura pagina successiva) e determinando le concentrazioni in sospensione nell'intorno dell'area di scavo e a valle della stessa. I transetti vengono estesi lateralmente e longitudinalmente fino ad uscire dal *plume* in modo da rilevare valori di concentrazione prossimi a quelli naturalmente presenti nell'area in condizioni imperturbate. I risultati di queste indagini sono utili alla definizione dell'impatto della specifica lavorazione, in termini di volume e portata solida media rilasciati, e costituiscono la base di riferimento per la segnalazione di eventuali livelli di allarme.



Draga a grappo, operazioni di scavo materiale dal recesso di barriera presso la bocca di porto di Chioggia. Il sedimento risospeso dalla draga viene trasportato in sospensione dalle correnti generando il pennacchio di torbida.



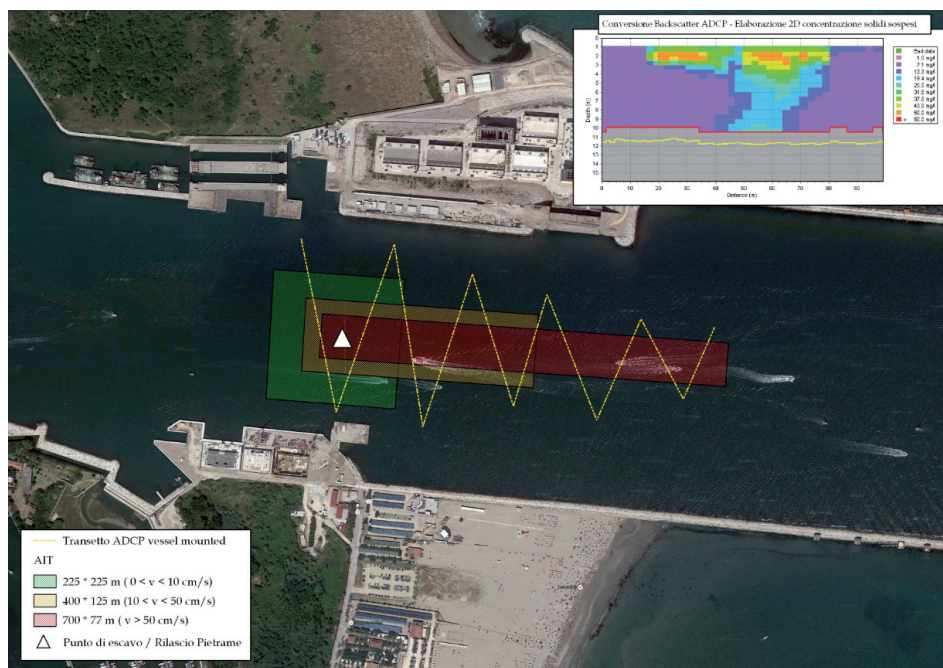
L'ambiente della prateria di fanerogame è particolarmente importante per la laguna; qui si vede il mollusco *Pinna nobilis*, iscritto nell'elenco delle specie protette.

Su quali basi si definiscono i livelli di allarme per l'ambiente acquatico?

Nel corso del primo anno di monitoraggio le elaborazioni statistiche effettuate su dati di torbidità, misurati sia in stazioni fisse alle bocche di porto sia durante numerose campagne da imbarcazione, hanno consentito di studiare l'andamento delle concentrazioni del particolato in sospensione in condizioni naturali e in presenza di perturbazioni. Sulla base di considerazioni legate all'andamento dei valori naturali, agli effetti sull'ecosistema del carico in sospensione e alle modalità di dispersione del *plume* di materiale risospeso dalle lavorazioni si è quindi stabilito un valore limite di sicurezza (valore di soglia) della concentrazione del materiale sospeso, pari a 30 mg/l.

Questo valore può essere superato solo all'interno di una zona il più possibile ristretta intorno alla draga, definita "area di impatto totale" (AIT). Gli studi condotti in campo hanno infatti dimostrato che la concentrazione dei sedimenti sospesi diminuisce rapidamente in funzione della distanza della draga e della granulometria dei materiali. L'AIT è stata perciò definita in maniera dinamica: si tratta di una cella di area pari a 50.000 m² le cui dimensioni lineari, larghezza (dimensione misurata lungo la direzione perpendicolare alla corrente) e lunghezza (dimensione misurata lungo la direzione della corrente), sono variabili in funzione della velocità della corrente (identificabile in maniera approssimativa in funzione del livello di marea).

Rispettando il limite di 30 mg/l all'esterno dell'AIT si ha ragionevole certezza che l'impatto della risospensione dei sedimenti sull'ambiente circostante sia minimo: tale valore è infatti confrontabile, per durata ed intensità, con quello dovuto alla concentrazione che può essere raggiunta con accettabile frequenza nel corso di eventi naturali (temporali, mareggiate e correnti di marea) e lo si può considerare di intensità moderata. Si tratta in pratica di ammettere valori di torbidità che determinano una modificazione tollerabile rispetto alla situazione indisturbata dell'ecosistema.



Bocca di porto di Chioggia: individuazione della AIT con punto di escavo o rilascio pietrame e valutazione della intensità e direzione di corrente. A maggior intensità di corrente corrisponde una maggior allungamento della AIT. In giallo un transecto per lo studio della propagazione del pennacchio di torbida. In basso: sistema per il prelievo di campioni d'acqua (Rosette®) e di acquisizione dei principali parametri idrologici (sonda multiparametrica).

