

## Monitoraggio morfologico di aree al largo della costa emiliano-romagnola da cui è stata prelevata la sabbia utilizzata per il ripascimento del litorale regionale

Margherita Aguzzi<sup>1</sup>, Nunzio De Nigris<sup>1</sup>, Gianna Fabi<sup>2</sup>, Sarine Manoukian<sup>2</sup>,  
Mentino Preti<sup>1</sup>, Renato Tedeschi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente (ARPA), Largo Caduti del Lavoro, 6  
40127 Bologna, Italy - maguzzi@arpa.emr.it

<sup>1</sup>Istituto di Scienze Marine (ISMAR) - CNR - 60125 Ancona, Italia - s.manoukian@ismar.cnr.it

<sup>2</sup>Geomarine S.a.s. - Via Guidi ¾, 60019 Senigallia (AN), Italia - info@geomarine.it

### Riassunto

Scopo del lavoro è lo studio dell'impatto determinato sul fondale del mare Adriatico settentrionale dal prelievo di 800.000 m<sup>3</sup> di sabbia nel 2002 e 815.000 m<sup>3</sup> nel 2007 da 3 aree appartenenti a 2 dossi (A e C1) distanti circa 46 e 57 km dalla costa, giacenti rispettivamente alle profondità di circa 34 e 39 m.

Entrambi i dossi sono attribuibili a cordoni litoranei relitti e la sabbia è stata utilizzata per il ripascimento delle spiagge in erosione del litorale emiliano-romagnolo.

Le 3 aree sono state oggetto di diverse campagne di monitoraggio geofisico mediante ecoscandaglio (singlebeam e multibeam) e side scan sonar nel periodo 2001-2009, prima, durante e dopo le operazioni di dragaggio. I rilievi hanno permesso di riscontrare, da un lato, il rispetto dell'area di prelievo prevista dal progetto da parte della draga e, dall'altro, le modificazioni apportate al fondale.

Nel 2002 la sabbia è stata prelevata da una sola area del dosso C1 (C1P02), mentre nel 2007 da 2 aree distinte appartenenti al dosso C1 e al dosso A (C1P07 e AP07).

I rilievi hanno evidenziato che la draga ha operato seguendo rotte circolari e che gli approfondimenti del fondale hanno raggiunto punte di 2 m nel dosso C1 e di 3 m nel dosso A.

Nelle 3 aree, il monitoraggio non ha evidenziato significative attenuazioni nel tempo dei solchi prodotti dal dragaggio.

Confrontando i DTM delle aree oggetto di prelievo ottenuti con i rilievi eseguiti prima e dopo il dragaggio, è stata riscontrata una buona corrispondenza con i volumi realmente dragati nelle 2 aree di prelievo del 2007 e un leggero scostamento in quella del 2002. La differenza di risultato può essere attribuita ai diversi strumenti utilizzati per i rilievi di prima pianta e fine lavori nell'area C1P02.

**Parole chiave:** Multibeam, Side Scan Sonar, dragaggio, sabbie relitte, ripascimento, Adriatico settentrionale.

### Abstract

*The aim of this study is to assess the impact of environmental dredging activities on the seabed in the North Adriatic Sea. The operations involved the removal of 800,000 m<sup>3</sup> of sand in 2002 and 815,000 m<sup>3</sup> in 2007 from three areas belonging to two rises, A and C1, located at 46 km and 57 km offshore and at a mean depth of 34 m and 39 m respectively.*

*Both rises are part of relict sandbars and the sand was used for eroded beach nourishment along the Emilia-Romagna coast.*

*Geophysical surveys using singlebeam and multibeam echosounders and side-scan sonar were carried out in all the three areas between 2001 and 2009, before, during, and after dredging activities.*

*The acoustic investigations were an effective tool to verify the observance of the extraction area by the dredging company, in accordance to the project, and to identify any changes on the seafloor.*

*In 2002 sand was removed only from one area of C1 (C1P02), while in 2007 two different areas belonging to C1 and A (C1P07 and AP07) were involved in the extraction activities.*

*The surveys showed that the dredge worked following circular tracks and that the maximum deepening picks reached 2 m and 3 m in C1 and A respectively.*

*No significant attenuation of the dredging tracks was recorded over time in the three areas.*

*A comparison of the different DTM obtained before and after the dredging activities pointed out a good matching of the actual volume removed in both 2007 extraction areas and a slight shifting in the 2002 area. The observed variance for C1P02 can be due to the different acoustic equipments used during the first field surveys and at the end of the dredging operations.*

**Keywords:** Multibeam, Side Scan Sonar, dredging, relict sand, nourishment, northern Adriatic.

**Introduzione**

Nell’ambito di due progetti di messa in sicurezza di tratti critici del litorale emiliano-romagnolo mediante ripascimento con sabbie sottomarine effettuati dalla Regione Emilia-Romagna nel 2002 e nel 2007, denominati di seguito rispettivamente Progettone 1 e 2, l’Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente (ARPA) ha

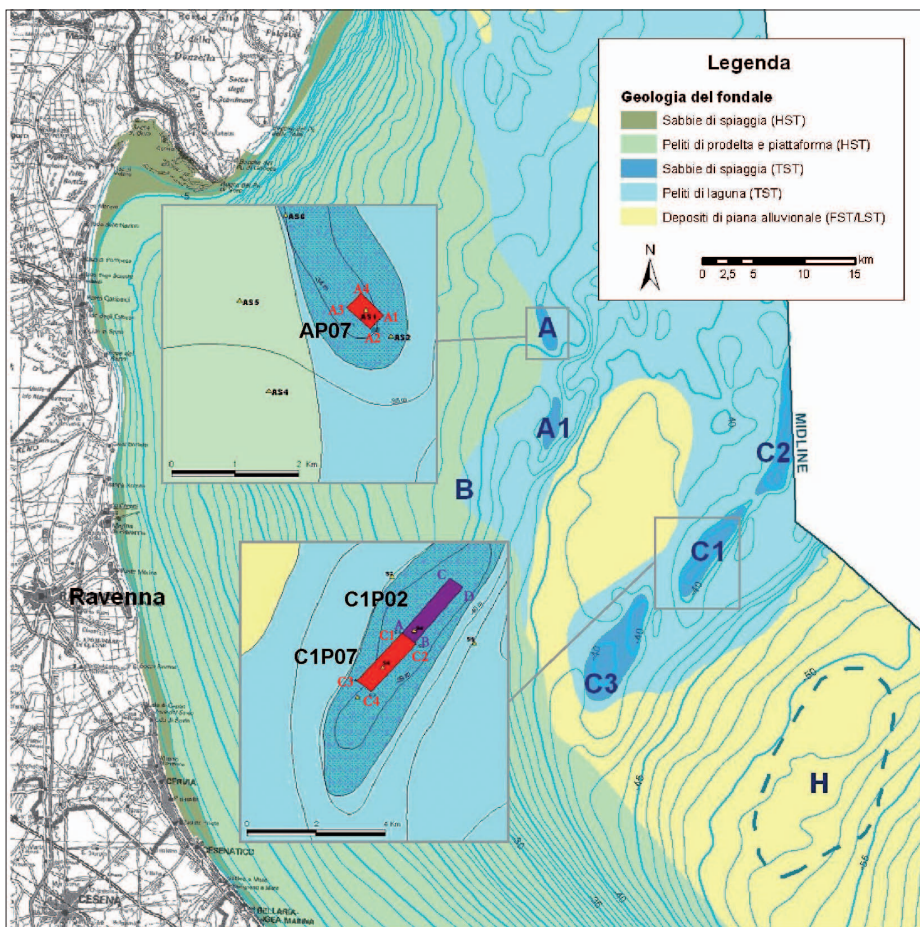


Figura 1 - Ubicazione delle aree oggetto di prelievo nel 2002 e 2007 (C1P02, C1P07, AP07) sulla carta geologica della piattaforma nord adriatica (modificata da Fabbri et al., 2001). A, A1, B, C1, C2, C3 e H: accumuli sabbiosi sottomarini.

ricevuto l'incarico di individuare le aree di prelievo in mare Adriatico delle sabbie e di eseguirne il monitoraggio fisico e ambientale successivi allo sfruttamento.

Nel 2002 sono stati prelevati 800.000 m<sup>3</sup> di sabbia da un'area (di seguito C1P02) collocata sul dosso C1, mentre nel 2007 815.000 m<sup>3</sup> da due aree appartenenti al dosso C1 e al dosso A, denominate C1P07 e AP07.

Queste tre aree di prelievo sono state scelte sulla base di dati acquisiti nell'ambito di una serie di campagne di ricerca in mare condotte nel 2000 da ARPA in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Scienze Marine (ISMAR) di Bologna (Fig. 1; Correggiari et al., presente volume).

Per il monitoraggio fisico, volto allo studio dell'impatto indotto sul fondale dalle operazioni di prelievo, ARPA si è avvalsa del supporto del Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Scienze Marine (ISMAR) di Ancona che ha svolto una serie di campagne di rilevamento geofisico nel periodo 2002-2004 e nel periodo 2006-2009.

Nel presente articolo si riportano i risultati ottenuti a partire dai rilievi Multibeam (MBES) e Side Scan Sonar (SSS) effettuati sulle tre aree oggetto di dragaggio.

I due sistemi impiegati forniscono informazioni dettagliate sulla batimetria e il backscatter del fondale marino utili per la definizione della zona circoscritta alle operazioni di dragaggio, verificare l'impatto fisico e ottenere informazioni sugli attributi morfologici del fondale.

### **Inquadramento geologico e stratigrafico.**

Le aree in esame si collocano nella porzione settentrionale del bacino Adriatico a 46 e 57 km circa dalla costa emiliano-romagnola.

Il fondale dell'Alto Adriatico è costituito da depositi di età tardo-quadernaria ed è caratterizzato da un gradiente notevolmente basso.

L'evoluzione della successione stratigrafica presente nella zona è strettamente legata alle fluttuazioni eustatiche tardo-quadernarie che, come dimostrato da calibrizioni in aree del Mediterraneo centrale, presentano un andamento piuttosto complesso (Fairbridge, 1961; Antonioli et al., 2004; Lambeck et al., 2004; Fairbanks, 1990; Correggiari et al., 1996; Asioli et al., 2001).

Tali depositi sono oggetto di studio da oltre 40 anni (Brambati et al., 1967; 1973; Colantoni et al., 1979; 1990; Idroser, 1985; 1990; Trincardi et al., 1994, Correggiari et al., 1996 a,b; 2001; 2005 a, b; Fabbri et al., 2001; Cattaneo e Steel, 2003).

Nell'ambito dei sopraccitati Progettone 1 e Progettone 2, ARPA Emilia-Romagna, in collaborazione con ISMAR CNR di Bologna, ha condotto ulteriori studi volti alla caratterizzazione sedimentologica e stratigrafica di dettaglio di una serie di accumuli sabbiosi trasgressivi presenti al largo della costa regionale (Correggiari et al., presente volume; ARPA, 2009), al fine di individuare le aree più idonee al prelievo della sabbia.

Le aree in esame nel presente studio sono collocate sulla sommità di due di questi accumuli sabbiosi (dossi A e C1 Fig. 1) ascrivibili a cordoni litorali sommersi. Tali corpi sedimentari rappresentano "relitti" di spiagge antiche (8-11.000 anni fa) depositate durante la migrazione verso terra della linea di riva ed in seguito annegate (Penland et al., 1988; Swift, 1975).

La deposizione e l'annegamento di questi sistemi sono avvenuti nell'ambito di una fase trasgressiva (18.000-5.500 anni fa) legata all'instaurarsi in condizioni climatiche temperate, successiva a una fase climatica glaciale di caduta e stazionamento basso del livello del mare (125.000-18.000 anni fa FST/LST, Fig. 1, Fairbanks, 1989; Trincardi et al., 1996; Correggiari et al., 2001; Cattaneo et al., 2003; 2004; 2007).

Queste unità trasgressive affioranti al largo della costa regionale, si estendono nel sottosuolo della Pianura Padana (TST, Fig. 1; Colantoni et al., 1979; Belknap e Kraft, 1981; Trincardi et al., 1994; Cattaneo e Trincardi, 1999; Amorosi et al., 1999; 2003; 2005; Preti, 1999; 2003; Bondesan et al., 1995; Correggiari et al., 1996 a, b; 2002; Stefani, 2005; Storm et al., 2008) e giacciono al di sotto di depositi progradanti di stazionamento alto del livello del mare (5.500 anni fa-Attuale HST, Fig. 1) composti prevalentemente da unità fangose di prodelta, estese verso il largo per 35-40 km (Correggiari et al., 2001; 2005 a, b).

Il dosso C1, oggetto di dragaggio sia nel 2002 che nel 2007, è collocato alla profondità di circa 39 m e alla distanza di 57 km dalla costa. I carotaggi eseguiti sul dosso hanno portato alla luce una successione sedimentaria con tendenza trasgressiva costituita da argille lagunari basali, con intercalazioni torbose, e sabbie

fini pulite e ben classate di spiaggia sommersa chiuse al tetto da una unità a base erosiva formata da sabbie bioclastiche di ravinement affioranti all'interfaccia acqua/sedimento. Le sabbie raggiungono uno spessore massimo maggiore di 3 m e il diametro medio è di 0,171 mm (Correggiari et al., presente volume).

Il dosso A è stato oggetto di prelievo nel 2007. Esso si trova 46 km al largo della costa regionale, a 34 m di profondità ed è caratterizzato da una successione sedimentaria con tendenza trasgressiva del tutto simile a quella riscontrata nell'area C1. Le sabbie giacciono al di sotto di una coltre pelitica dello spessore di poche decine di centimetri che rappresenta la parte più distale del cuneo fangoso di prodelta del Po, presentano un diametro medio lievemente superiore a quelle del dosso C1 (0,177 mm) (Correggiari et al., presente volume).

### Materiali e metodi

I rilievi batimetrici del fondale sono stati effettuati tramite il sistema MBES in dotazione alla M/R "Tecno-pesca II" di proprietà del CNR-ISMAR di Ancona.

L'area oggetto di dragaggio nel 2002, collocata sul dosso C1 (C1P02), è stata rilevata anche con metodologia SSS C-Max CM 800 102/325 kHz.

Nell'ambito del Progetto 1, i rilievi acustici dell'area C1P02 sono stati effettuati durante le operazioni di dragaggio (Aprile 2002; Fabi et al., 2002) e a distanza di 7 (Dicembre 2002; Fabi et al., 2003), 18 (Novembre 2003; Fabi et al., 2004) e 31 mesi (Dicembre 2004; Fabi et al., 2005). Nel Giugno 2009, a 7 anni dalla fine dei lavori, ARPA ha deciso di ripetere il rilievo di quest'area per verificare eventuali modificazioni del fondale (Tab. 1).

Da progetto il sito di prelievo delle sabbie, di forma rettangolare (area C1P02; Fig. 1), ha un'estensione di 1 km<sup>2</sup>, con i lati di 500 m x 2000 m e presenta le seguenti coordinate geografiche WGS84:

- A Lat 44°28'33,96"; Long 13°01'08,76"
- B Lat 44°28'23,52"; Long 13°01'23,08"
- C Lat 44°29'24,36"; Long 13°02'15,00"
- D Lat 44°29'14,64"; Long 13°02'30,84"

Ad eccezione del primo rilievo, effettuato in concomitanza con le operazioni di dragaggio, l'area effettivamente monitorata è stata estesa alle dimensioni di 3200 m x 1580 m, per garantire una visione del fondale circostante i lavori.

Nel 2007, nell'ambito del Progetto 2, sono stati prelevati 815.000 mc di sabbia da 2 aree distinte: una, denominata C1P07, collocata sul dosso C1 a sud di quella sfruttata nel 2002 e una collocata sul dosso A (AP07, Fig. 1). Particolare attenzione è stata rivolta al monitoraggio degli impatti indotti dal dragaggio su quest'ultimo dosso, dove le sabbie, a differenza del C1, non sono affioranti all'interfaccia acqua sedimento, ma giacciono al di sotto di una coltre pelitica spessa alcuni decimetri.

Le due aree (AP07, C1P07) sono state oggetto di una campagna di caratterizzazione nel 2006, prima dell'intervento e di un secondo rilievo nel Luglio 2007, a 1 mese di distanza dal dragaggio (Tab. 1).

Nel Giugno 2009, è stato eseguito un ulteriore rilievo batimetrico sull'area AP07, a 2 anni dal dragaggio del 2007 (Tab. 1).

L'area C1P07, utilizzata nell'ambito del Progetto 2, presenta forma rettangolare con lati di 1.900 x 550 m, e ha le seguenti coordinate geografiche WGS84:

- C1 Lat 44°28'33,96"; Long 13°01'08,76"
- C2 Lat 44°28'36,00"; Long 13°01'26,40"
- C3 Lat 44°27'39,60"; Long 13°00'25,20"
- C4 Lat 44°27'50,40"; Long 13°00'07,20"

L'area di dragaggio del 2007 AP07, ha dimensioni decisamente inferiori rispetto alla precedente (500 x 300 m) ed è definita dalle seguenti coordinate geografiche WGS84:

- A1 Lat 44°39'28,80"; Long 12°48'57,60"
- A2 Lat 44°39'36,00"; Long 12°49'12,00"
- A3 Lat 44°39'21,60"; Long 12°49'22,80"
- A4 Lat 44°39'14,40"; Long 12°49'12,00"

In entrambi i casi sono state monitorate aree con estensioni maggiori di quelle previste dal progetto di dragaggio (per la AP07= 1050 x 750 m; per la C1P07= 2550 x 950 m). Inoltre, sia per l'area AP07 che

per l'area C1P07, il rilievo è stato concluso eseguendo un transetto perpendicolare a quelli precedenti per un'ulteriore verifica della correttezza dei dati acustici.

Infine, ARPA ha utilizzato i dati batimetrici di prima pianta (precedenti al dragaggio) e seconda pianta (successivi al dragaggio) per produrre i DTM delle tre aree interessate dal prelievo di sabbia allo scopo di calcolare la quantità di sedimento asportato da ciascuna zona.

Per quel che riguarda l'area C1P02, è stata utilizzata come prima pianta un rilievo singlebeam effettuato da ISMAR CNR di Bologna nel Maggio 2001, perché il rilievo multibeam effettuato nello stesso periodo, commissionato da ARPA a una impresa privata nell'ambito di questo progetto di monitoraggio, è risultato non idoneo per il calcolo dei volumi in quanto acquisito in condizioni di mare agitato.

**Tabella 1 - Cronologia dei rilievi multibeam (quello del Maggio 2001 è un single-beam) realizzati nelle 3 aree di prelievo della sabbia.**

Area di dragaggio	Data rilievo ecoscandaglio	Fase operativa
C1P02	Maggio 2001	caratterizzazione
C1P02	Aprile 2002	in corso d'opera
C1P02	Dicembre 2002	post opera
C1P02	Novembre 2003	post opera
C1P02	Dicembre 2004	post opera
C1P02	Giugno 2009	post opera
C1P07	Novembre 2006	caratterizzazione
C1P07	Luglio 2007	post opera
AP07	Novembre 2006	caratterizzazione
AP07	Luglio 2007	post opera
AP07	Giugno 2009	post opera

### **Metodologia di rilievo MBES**

L'MBES è un ecoscandaglio multifascio ad alta risoluzione che lavora ad una frequenza di 300 kHz (può operare in acque basse da meno di 1 m sino a oltre 150 m di profondità) garantendo una copertura del fondo pari al 100%. Tale sistema, che risponde a tutti gli standard suggeriti dall'*International Hydrographic Organization* (IHO, 1998; 2008), consta di tre parti (Fig. 2):

- una stazione di controllo;
- una o due teste sonar (trasduttori) montate sulla chiglia della M/N da ricerca TecnoPesca II (Figg. 2b, 2c) e dotate di due differenti array, uno per la trasmissione e uno per la ricezione dei dati;
- un'unità di elaborazione centrale: pilota i due array della testa sonar per la formazione dei fasci in trasmissione e in ricezione, riconosce il fondale e gestisce l'interfaccia con il sistema di posizionamento DGPS, la girobussola e l'unità MRU (Motion Reference Unit) per la correzione di beccheggio e rollio.

Durante i monitoraggi tra il 2002 e il 2004, è stato utilizzato il modello Kongsberg EM3000 a singola testa sonar. Per ogni ciclo di misura il sistema genera in trasmissione un fascio acustico (ping) ampio 130°, mentre in ricezione vengono formati 127 fasci (beam) di 1,5°, a ciascuno dei quali corrispondono altrettanti punti di misure batimetriche. Questo sistema consente di coprire sezioni ampie sino a quattro volte la profondità, con una cadenza di 25 scansioni al secondo.

Nel 2007 il sistema è stato sostituito col nuovo e più avanzato modello Kongsberg EM3002 a singola testa. A differenza del precedente, l'EM3002 è in grado di utilizzare 254 beam. Infine, nel monitoraggio del 2009 il sistema è stato integrato con una seconda testa sonar raddoppiando il numero del beam (508) e incrementando il fascio acustico da 130° a 200°, arrivando a coprire sezioni ampie sino a dieci volte la profondità.

L'MBES è connesso a un sistema di posizionamento satellitare differenziale DGPS collegato a un satellite geostazionario, a una girobussola e a una sonda per misure della velocità del suono lungo l'intera colonna d'acqua che viene calata in mare prima dei rilevamenti ed è indispensabile per ottenere la corretta distanza

tra l'oggetto battuto (fondale, banchine, ecc.) e la testa sonar. Questa misurazione viene eseguita più volte durante il giorno a causa della variabilità della densità dell'acqua con la temperatura. Durante l'acquisizione dei dati acustici l'imbarcazione ha mantenuto una velocità media di 3,5 nodi compiendo dei transetti paralleli tra di loro previamente stabiliti.

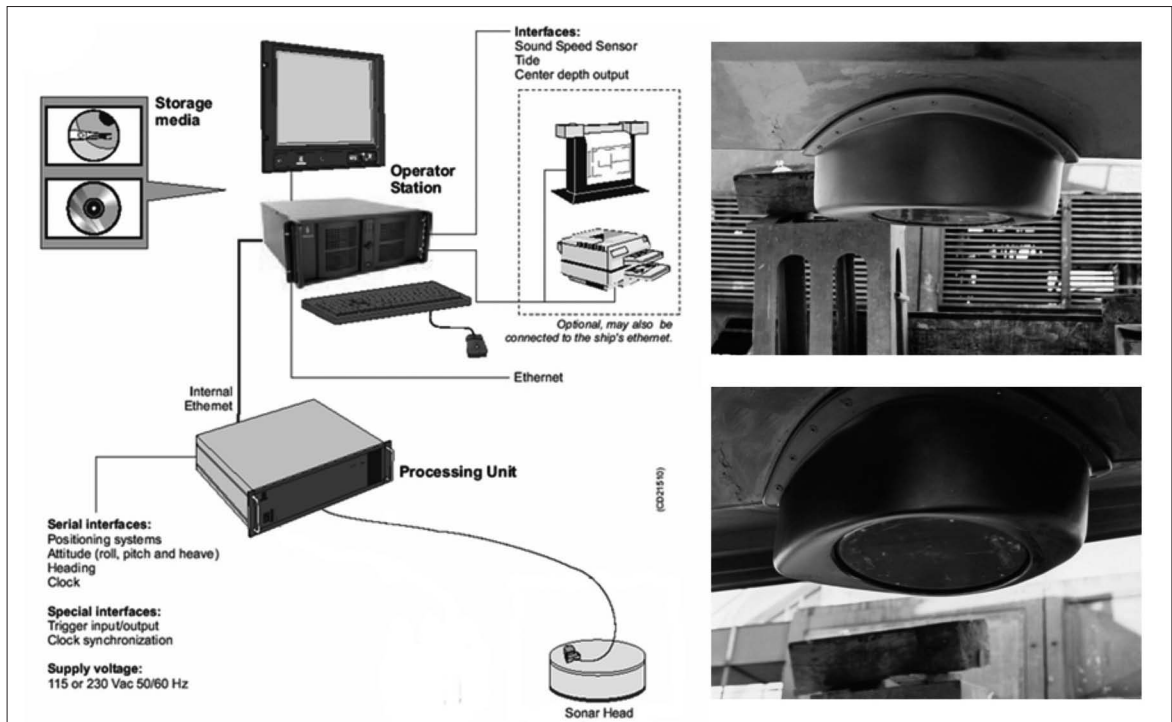


Figura 2 - Schema del sistema MBES EM3000, da “Multibeam echo sounder – The new generation high performance shallow water multibeam” Kongsberg Maritime AS, in dotazione alla M/N da ricerca “Tecnopesca II” (a) e testa sonar (trasduttore) montata sulla chiglia della motonave (b, c).

Seguendo tale schema di navigazione e impostando il cono di acquisizione del trasduttore a 90°, la sovrapposizione del dato di acquisizione è risultata del 5-10%, garantendo la totale copertura dell'area richiesta. Il post-processing dei dati registrati è stato condotto utilizzando i software Neptune (Simrad) e CARIS HIPS&SIPS che hanno permesso di correggere i posizionamenti palesemente errati, apportare la correzione dei dati di marea forniti dall'APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici di Roma e applicare filtri statistici alle misure batimetriche. Per la realizzazione grafica è stato utilizzato il software C-Floor (Roxar) che ha consentito di effettuare un'ulteriore elaborazione dei dati concernente, ad esempio, la scala di grandezza e l'intervallo batimetrico da applicare alla cartografia. Inoltre, utilizzando il medesimo software si sono realizzate alcune sezioni di computo sia perpendicolari che longitudinali ai transetti di navigazione confrontando i profili ottenuti dai diversi monitoraggi.

**Metodologia di rilievo SSS**

L' SSS è un sistema di rilevamento che permette di identificare le diverse litologie presenti sul fondale marino (sabbie, ghiaia, roccia, fango, Posidonia, Cymodocea, ecc.) sulla base della diversa risposta acustica che danno questi litotipi (Fig. 3). Il sistema sonar si avvale della tecnologia 'digitale' avanzata per produrre immagini SSS ad alta risoluzione e viene utilizzato anche per la ricerca di oggetti dispersi sul fondale (es. relitti).

Il SSS si avvale di due componenti principali (Fig. 4):

- unità di acquisizione a bordo;
- tow-fish in mare.

Il sistema di acquisizione a bordo si compone di:

- sistema di registrazione digitale workstation integrata;
- drive magneto-ottico;
- stampante laser per immagini SSS (Alden 9315CTP);
- drive di backup formato exabyte.

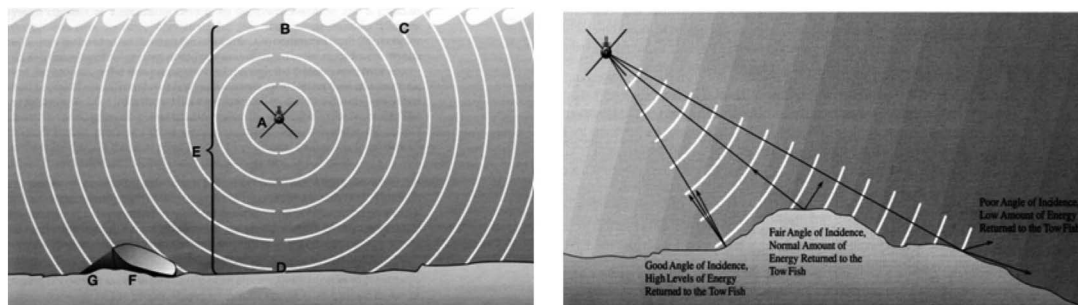


Figura 3 - Tecnologia SSS, da "Sound Underwater Images – A guide to the generation and interpretation of Side Scan Sonar data" J. P. Fish e H. A. Carr.

Il sistema a mare tow-fish consiste invece di 2 trasduttori a doppia frequenza LF-HF 105-325 KHz (bassa ed alta risoluzione).

Durante l'acquisizione SSS sono stati utilizzati una bassa frequenza (105 KHz) e un range laterale di 100 m per ciascun canale. La scelta è ricaduta su questi parametri sia per ottenere le migliori immagini, sia per uniformità di acquisizione con il rilievo MBES. I dati acquisiti sono stati successivamente processati ed elaborati presso gli uffici della Geomarine S.a.s. utilizzando il software OCTOPUS 461.

Il sistema di posizionamento dell'SSS ha lavorato con una unità di ricezione SkyFix a 12 canali operante a bordo del mezzo navale a cui sono state collegate due antenne, una per il GPS e l'altra per le correzioni differenziali. La posizione di bordo è stata determinata mediante la ricezione dei segnali GPS, trasformate in coordinate geografiche, alle quali sono state successivamente applicate le correzioni differenziali ricevute tramite il satellite Inmarsat. La posizione di bordo così corretta è stata inviata al computer di navigazione attraverso una porta seriale. L'accuratezza della posizione dipende da diversi fattori (atmosferici, militari) e varia da 0,5 a 3,0 m.

Il sistema di navigazione del SSS soddisfa solitamente le richieste di comunicazione sia con i sensori di fix sia con le periferiche del computer e l'interfaccia modulare è adattabile a qualsiasi combinazione di input dai sensori esterni per permettere un'elaborazione in tempo reale. Il software di navigazione permette di eseguire rilievi su linee di indagine con fix predefiniti, il cui numero può essere incrementato o diminuito di qualsiasi valore e può gestire due sistemi di posizionamento, inclusi GPS, DGPS, sistemi range/range e range/bearing.

Per un accurato posizionamento satellitare il software di navigazione opera usando il DGPS, mentre una trasformazione a 7 parametri permette la traslazione del posizionamento al datum locale. Le opzioni del

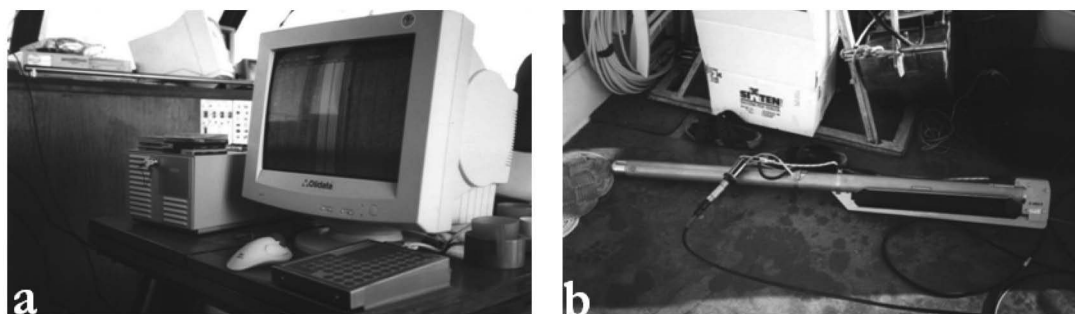


Figura 4 - Componenti principali del sistema SSS: unità di acquisizione a bordo (a) e tow-fish (b).

software facilitano la registrazione dei dati DGPS bruti per una successiva elaborazione, ottenendo una posizione finale estremamente accurata e nel contempo permettendo di configurare le informazioni sullo schermo del navigatore e del pilota. È stato infatti possibile definire l'immagine grafica della nave e creare file archivio delle linee di rilievo, delle linee di costa e altri parametri relativi alla navigazione. Per il controllo di qualità, alla fine di ogni linea è anche possibile stampare istogrammi di deviazione dalla rotta, di distanze tra i fix, di intervallo tra i fix o di qualità dei dati di navigazione.

I file di registrazione possono successivamente essere trasferiti in linguaggio SEG-P1/P2, UKOOA o ASCII definiti dall'utente.

**Metodologia di analisi ed elaborazione dati**

I dati dei rilievi MBES effettuati tra il 2001 e il 2009 sulle tre aree sono stati sottoposti ad analisi per eliminare le eventuali anomalie, quindi si è proceduto alla loro elaborazione per ricavare i DTM di ciascuna area. In totale sono stati ottenuti 6 DTM dell'area C1P02, 2 dell'area CP07 e 3 dell'area AP07. A partire da questi sono state ottenute carte batimetriche, carte delle differenze di quota e sezioni longitudinali e trasversali. Allo scopo di verificare se il fondale di ciascuna area abbia subito delle variazioni nei periodi successivi alle operazioni di dragaggio, è stato effettuato un confronto preliminare qualitativo tra le carte batimetriche e tra le sezioni e una successiva analisi quantitativa consistente nel calcolo delle differenze di quota sulla base dei DTM.

Nei casi in cui sono state riscontrate significative variazioni di quota, è stata effettuata l'analisi statistica delle stesse (media e deviazione standard) che ha fornito elementi aggiuntivi utili a individuare le cause dei cambiamenti di quota (processi naturali, metodo di rilievo, ecc.).

Infine, per calcolare il volume di sabbia prelevata dalla draga nell'ambito dei due interventi, è stata effettuata la differenza dei DTM delle tre aree ottenuti dai rilievi precedenti e subito successivi al dragaggio.

Per l'area C1P02, come già accennato, sono stati utilizzati il rilievo antecedente i lavori effettuato con singlebeam (con maglie rettangolari di 300x500 m) da ISMAR-CNR di Bologna e il rilievo multibeam (con maglie di 1x1 m) acquisito da ISMAR-CNR di Ancona dopo il prelievo. Mentre, per le aree AP07 e C1P07, sono stati impiegati due rilievi multibeam a maglia di 1x1 m eseguiti da ISMAR CNR di Ancona.

**Risultati dei rilievi eseguiti nel periodo 2001-2009 sull'area C1P02**

Nel Maggio 2002 una draga della capacità di 6.000 m<sup>3</sup> ha prelevato 800.000 m<sup>3</sup> di sabbia dall' area C1P02, collocata sul dosso C1.

Tra le tre aree dragate questa zona è stata la più studiata. Nell'arco di 8 anni (2001-2009) sono state effettuate 6 compagne di rilievo batimetrico.

L'area è situata su un fondale compreso tra 38,75 m e 39,25 m di profondità. Le operazioni di dragaggio, rappresentate da linee circolari (Fig. 5), sono state effettuate prevalentemente all'interno della zona assegnata. Le quote registrate con la prima campagna di monitoraggio variavano generalmente da 39,50 a 40,50 m, raggiungendo solo in alcuni punti della parte centrale dell'area i 41,00 - 41,25 m. Mediamente è stata quindi rispettata la quota di approfondimento prevista dal progetto.

L'analisi qualitativa delle carte batimetriche e dei profili ottenuti dai rilievi di monitoraggio eseguiti tra il 2002 e il 2009 ha evidenziato una serie di variazioni di quota che in un primo momento sono state ricondotte a una leggera attenuazione delle asperità del fondale.

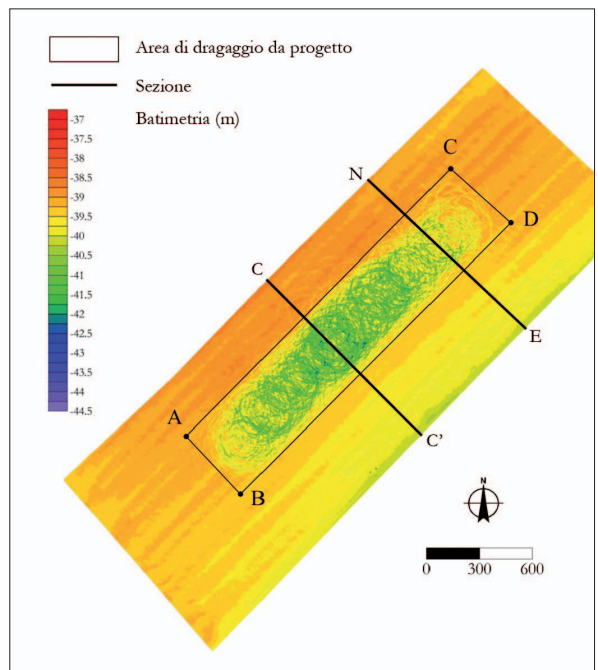


Figura 5 - Area C1P02: carta batimetrica del Dicembre 2002.



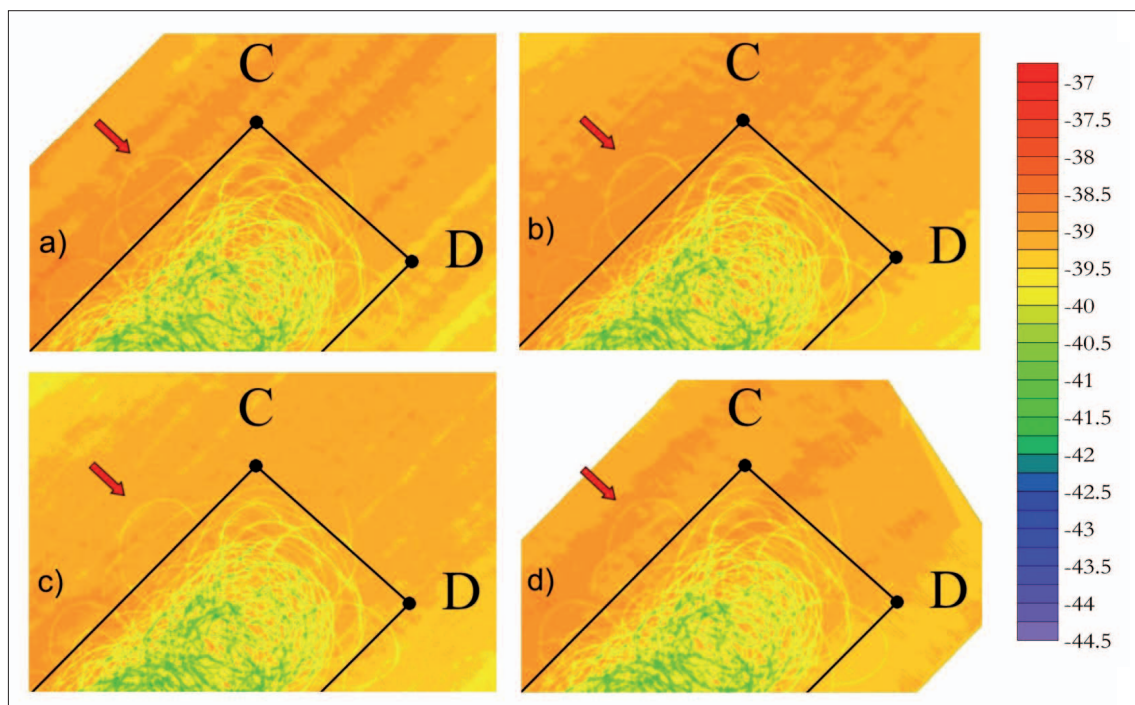


Figura 6 - Area C1P02: particolari delle carte batimetriche a) Dicembre 2002, b) Novembre 2003, c) Dicembre 2004, d) Giugno 2009 nell'intorno del vertice C. Il confronto dettagliato delle 4 carte non evidenzia attenuazioni dei solchi di dragaggio nel periodo 2002-2009 (scala batimetrica in metri).

Questa prima interpretazione è stata però smentita da vari elementi di seguito esposti.

Dal confronto dettagliato delle 4 carte batimetriche ottenute dai rilievi effettuati dopo la fine del dragaggio (Fig. 6) risulta che le tracce lasciate dalla draga non diminuiscono nel tempo, ma risultano di volta in volta più o meno marcate.

In corrispondenza dei fondali esterni all'area dragata, quindi rimasti invariati negli anni di indagine, le carte delle differenze di quota evidenziano delle variazioni paragonabili a quelle rilevate nella zona di dragaggio. Sui fondali esterni tali variazioni appaiono come linee colorate che si sviluppano lungo la direzione del rilievo (Fig. 7)

Inoltre, i profili rilevati nei diversi periodi risultano in molti tratti paralleli tra loro e/o leggermente traslati lateralmente (Fig. 8). In particolare, si osservano anomali incrementi di quota in corrispondenza degli alti morfologici.

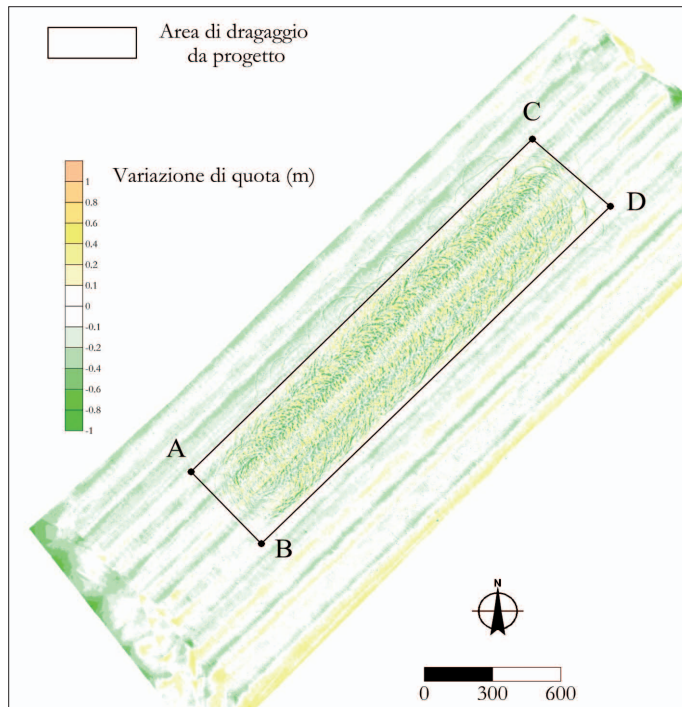
L'insieme di queste valutazioni porterebbero quindi a concludere che negli anni successivi al prelievo il fondo non abbia subito variazioni significative.

Per avvalorare ulteriormente questa considerazione si è deciso di effettuare l'analisi statistica della variazione di quota calcolata tramite la differenza dei diversi DTM.

La media e la deviazione standard della variazioni di quota sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2 - Media e deviazione standard delle variazioni di quota misurate tramite confronto tra i DTM ottenuti a partire dai rilievi multibeam effettuati sull'area C1P02 dopo il dragaggio.

Rilievi a confronto	Media delle variazioni di quota (cm)	Deviazione standard (cm)
2002-2003	- 1,3	± 18
2003-2004	- 6,3	± 16
2004-2009	+6	± 18
2002-2009	- 1	± 21



La media delle variazioni di quota è poco superiore al centimetro tra il 2002 e il 2003 e di circa 6 cm tra il 2003-2004 e 2004-2009; la relativa deviazione standard si mantiene su valori compresi tra  $\pm 16$  e  $\pm 19$ . La media delle variazioni di quota è di un solo centimetro se si confronta il rilievo 2002 con quello del 2009, mentre la deviazione standard è di  $\pm 21$  cm.

In sintesi, quindi, sia l'analisi qualitativa che quantitativa inducono a concludere che il fondale dragato nel 2002 non ha subito significative variazioni nell'arco dei successivi 7 anni di monitoraggio e che le variazioni di quota riscontrate sono attribuibili all'errore insito nella metodologia di rilievo impiegata. L'analisi dettagliata delle immagini SSS, ottenute con i rilievi effet-

Figura 7 - Area C1P02: carta delle differenze di quota tra il rilievo del Dicembre 2002 e quello del Dicembre 2004.



Figura 8 – Area C1P02: confronto tra i profili del fondale in corrispondenza delle sezioni CC (in alto) e NE (in basso). L'ubicazione delle tracce di sezione è riportata in Figura 5.

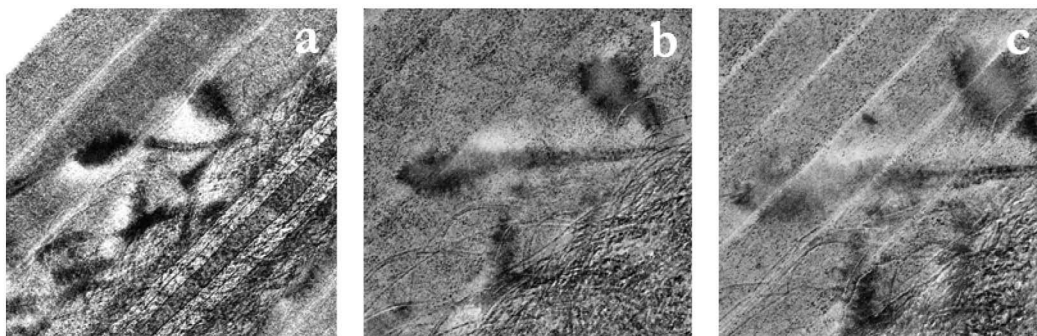


Figura 9 - Riflessione acustica di accumuli rilevati dal SSS. Viene riportata la medesima porzione di rilievo effettuata nell'inverno 2002 (a), nell'inverno 2003 (b) e nell'inverno 2004 (c).

tuati nell'ambito del Progettone 1, e l'interpretazione comparativa degli elaborati cartografici creati nelle diverse fasi di monitoraggio integrati con i risultati ottenuti con il sistema MBES consentono di individuare anche piccoli accumuli di materiale nella zona esterna all'area di dragaggio (Fig. 9).

Infine, allo scopo di calcolare il volume di sabbia dragato dall'area C1P02, è stata effettuata la differenza tra i DTM relativi ai rilievi effettuati prima e dopo le operazioni di dragaggio. Come già accennato, per questa elaborazione sono stati utilizzati: il rilievo antecedente i lavori effettuato con singlebeam da ISMAR-CNR di Bologna e il rilievo multibeam acquisito da ISMAR-CNR di Ancona dopo il prelievo. A un primo confronto, è stato riscontrato uno sfalsamento generalizzato nelle quote dei due rilievi dell'ordine di 60 cm. Per eliminare tale sfalsamento, presumibilmente legato alla marea, è stata effettuata una correzione dei DTM facendo combaciare le quote in corrispondenza dei fondali esterni all'area dragata.

Dal calcolo è risultato che dall'area C1P02 nel 2002 sarebbero stati estratti 926.000 m<sup>3</sup> di sabbia, quindi circa 126.000 m<sup>3</sup> in più di quanto misurato (800.000 m<sup>3</sup>) dalla Direzione Lavori sulle spiagge oggetto di ripascimento, ai fini del pagamento dell'impresa che ha eseguito i lavori.

È ipotizzabile che tale differenza, pari al 16%, tra i due risultati sia dovuto al fatto che per le due campagne di monitoraggio presi in esame siano stati adottati strumenti e metodologie di rilievo differenti.

#### Risultati dei rilievi eseguiti sull'area AP07 (2006-2009) e sull'area C1P07 (2006-2007)

Nell'ambito del Progettone 2 (2007), sono stati prelevati in totale 815.000 m<sup>3</sup> di sabbia dall'area AP07, collocata sul dosso A tra 34,15 e 34,80 m di profondità (Fig. 10), e dall'area C1P07, situata sul dosso C1 su un fondale compreso tra 39,20 e 40,75 m di profondità (Fig. 11).

Durante la campagna di monitoraggio eseguita a 1 mese dal dragaggio, quelle che prima erano due aree con un fondale uniforme e regolare presentano ora una marcata irregolarità.

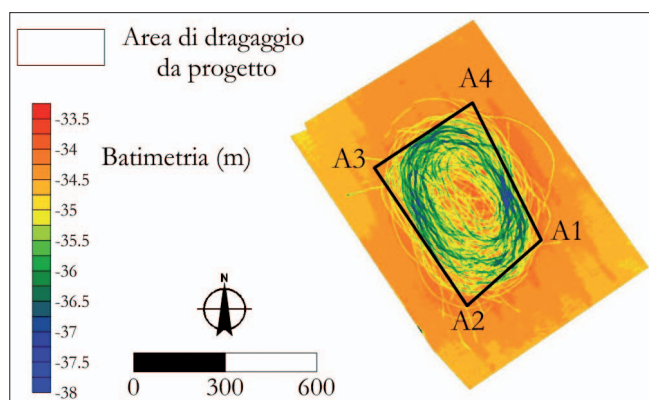


Figura 10 - Area AP07: carta batimetrica del Luglio 2007.

Sebbene la maggior parte delle operazioni sia avvenuta all'interno delle zone designate A1A2A3A4 e C1C2C3C4, stabilite come limite di prelievo delle sabbie, sono state registrate diverse fuoriuscite lungo tutto il perimetro delle due aree (Figg. 10 e 11). Queste risultano particolarmente marcate sui versanti NW-NE dell'area AP07, dove raggiungono distanze anche superiori a 110 m dal limite della zona assegnata. Ciò va ragionevolmente messo in relazione con la modesta superficie dell'area (500 x 300 m). Le fuoriuscite osservate per l'area C1P07 sono più contenute rispetto a quelle rilevate attorno all'area AP07 ad eccezione del lato a NE, ubicato proprio a ridosso dell'area utilizzata per il

prelievo di sabbie nel 2002. Qui le linee circolari che rappresentavano le tracce del dragaggio effettuato nel 2002 appaiono fuse con quelle del 2007.

Le quote di approfondimento variano generalmente da 35 m a 37 m per l'area AP07 con picchi massimi intorno ai 37,50 m, mentre per l'area C1P07 da 40,50 m a 41,25 m, con picchi massimi intorno ai 41,75 m. I solchi lasciati dalla draga nell'area AP07 raggiungono quindi profondità maggiori (3 m) che nell'area C1P07 (2 m).

A differenza dell'area C1P07, che è stata monitorata soltanto prima e dopo il prelievo, l'area AP07 è stata oggetto di una ulteriore campagna di monitoraggio nel 2009.

Dall'analisi delle carte batimetriche e dei profili ricostruiti sull'area AP07 non sono state riscontrate significative modificazioni del fondale nei 2 anni successivi alle operazioni di prelievo. Questa ipotesi è confermata anche dalle differenze di quota tra i rilievi di prima e dopo le operazioni di dragaggio, i quali non mostrano significative variazioni di profondità del fondale. Infine, la differenza dei DTM delle aree AP07 e C1P07 ottenuti dai rilievi multibeam acquisiti prima e dopo e il dragaggio ha permesso di calcolare il volume di materiale prelevato dalla draga.

I rilievi effettuati prima e dopo il dragaggio delle aree AP07 e C1P07 risultavano altimetricamente allineati, quindi non è stato necessario effettuare le correzioni di quota come per l'area C1P02 per procedere al calcolo dei volumi prelevati dalle due aree. Infatti, le zone esterne all'area di prelievo presentano delle variazioni di quota trascurabili.

Secondo il calcolo dei volumi, dall'area C1P07 sono stati dragati  $614.800 \text{ m}^3$  di sabbia, dall'area AP07  $201.400 \text{ m}^3$ , per un prelievo totale di  $816.200 \text{ m}^3$  di materiale. In questo caso il valore calcolato con questa metodologia è molto prossimo al quello misurato dalla Direzione Lavori sulle spiagge oggetto di ripascimento, pari a  $815.346 \text{ m}^3$  (differenza 0,1%).

La corrispondenza dei risultati suggerirebbe che rilievi MBES accurati e dettagliati possono essere utilizzati come base di verifica dei volumi di sabbia dragati.

### Conclusioni

Nell'ambito dei monitoraggi successivi a due interventi di ripascimento con sabbie sottomarine che hanno comportato il prelievo, nel 2002 e nel 2007, di  $1.615.000 \text{ m}^3$  di sabbie da 3 aree (C1P02, AP07, C1P07) collocate sul fondale del mare Adriatico settentrionale, i rilievi batimetrici con multibeam hanno messo in evidenza come il dragaggio abbia prodotto una marcata irregolarità del fondo marino nelle aree interessate dal prelievo.

L'azione del dragaggio è rappresentata da solchi circolari che evidenziano come la maggior parte delle operazioni sia avvenuta all'interno delle zone indicate dai due progetti esecutivi, alcune fuoriuscite sono state riscontrate lungo il perimetro delle due aree sfruttate nell'ambito dell'intervento del 2007 (AP07 e C1P07). Mentre il sistema MBES ha evidenziato in dettaglio le alterazioni batimetriche del fondale, l'SSS è stato in grado di porre in risalto alcuni piccoli accumuli di materiale fuori dell'area di prelievo indicandone la diversa litologia in comparazione con il sedimento superficiale circostante.

Il monitoraggio post-intervento è stato condotto solo sulle aree C1P02, che è stata indagata per una durata

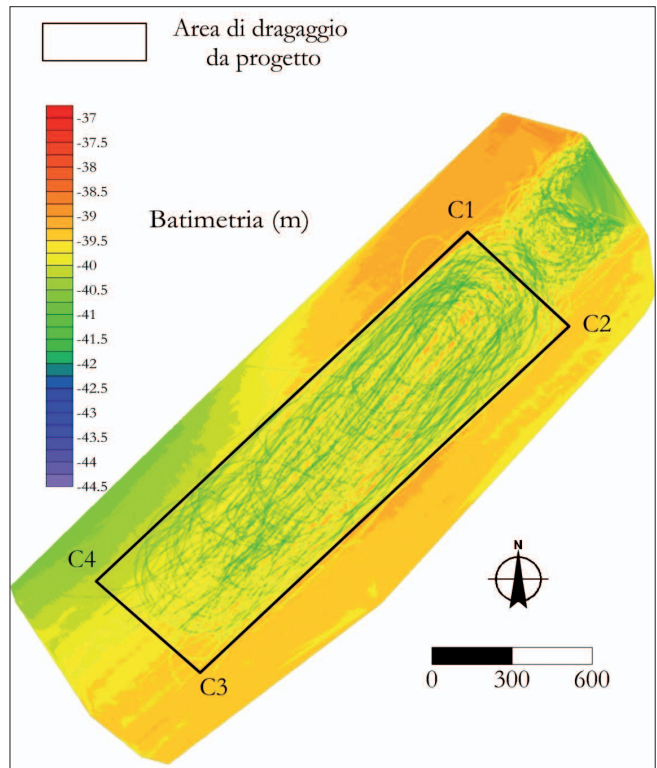


Figura 11 - Area C1P07: carta batimetrica del Luglio 2007.

di 8 anni, e sull'area AP07, che è stata studiata per 2 anni. Sull'area C1P07 sono stati effettuati solo i rilievi prima e dopo il dragaggio.

Nell'area C1P02, dragata nel 2002, i rilievi di monitoraggio post-intervento hanno evidenziato inizialmente delle variazioni di quota che dopo una approfondita analisi qualitativa e quantitativa sono state definite non significative e presumibilmente imputabili al metodo di rilievo in mare. In sintesi, nell'area C1P02 a 7 anni di distanza dal dragaggio il fondale non ha subito sostanziali modificazioni.

Anche nell'area AP07, a due anni dal prelievo, i rilievi non mostrano particolari attenuazioni dei solchi di dragaggio.

Tra le varie elaborazioni, ARPA ha calcolato anche la quantità di sedimento prelevato da ciascuna area sulla base dei rilievi in mare e conseguentemente lo scostamento dai volumi di dragaggio quantificati con i rilievi effettuati sulle spiagge dalla Direzione Lavori, in accordo con l'impresa che ha eseguito il lavoro di dragaggio, trasporto e scarico delle sabbie sulla spiaggia.

Per quanto riguarda l'area C1P02, il volume ottenuto dal confronto dei rilievi eseguiti sull'area dragata è superiore del 16% a quello della sabbia portato a ripascimento fornito dalla Direzione lavori.

Per le aree AP07 e C1P07, invece, si è riscontrato una sostanziale coincidenza tra i due risultati (differenza 0,1%).

Va detto però che la differenza di volume calcolata nell'area C1P02 potrebbe essere stata determinata dalla differente modalità e strumentazione utilizzata per i due rilievi messi a confronto (singlebeam il primo, mil-tibeam il secondo).

Nel complesso, i risultati ottenuti rendono concreta la possibilità di poter considerare tale approccio un utile sistema di verifica dei volumi di ripascimento, normalmente misurati a terra o sulla draga per quantificare l'importo dovuto all'impresa esecutrice.

In sintesi, i rilievi effettuati nell'arco di 8 anni da ARPA sulle aree di prelievo della sabbia in Mare Adriatico, e le successive analisi ed elaborazioni dei dati hanno permesso di fornire risposte ai seguenti aspetti:

- rispetto dell'area di prelievo indicata nel progetto esecutivo da parte della draga;
- forma ed entità delle modificazioni determinate dalle operazioni di dragaggio sul fondale;
- riduzione nel tempo delle asperità lasciate dalla draga sul fondale;
- verifica di eventuali processi di sedimentazione;
- calcolo dei volumi prelevati.

L'entità pratica e scientifica dei risultati ottenuti dimostra quindi la validità del monitoraggio e dei metodi e degli strumenti impiegati.

### Ringraziamenti

Si ringraziano per la collaborazione i Sigg.ri Giampaolo Gaetani e Antonio Marziali imbarcati sulla M/R "Tecnopescia II" di proprietà del C.N.R.-I.S.MAR. di Ancona impiegata per lo svolgimento delle indagini. Si ringrazia inoltre ISMAR CNR di Bologna per aver fornito il rilievo single-beam del Maggio 2001 relativo all'area C1P02.

### Bibliografia

- ARPA Emilia-Romagna (2009) - *Ricerca di depositi sabbiosi in adriatico settentrionale e stima dei volumi disponibili. 7° Campagna, Interventi di messa in sicurezza di taluni tratti critici del litorale emiliano-romagnolo, interessati da erosione e subsidenza, mediante ripascimento con sabbie sottomarine*. Regione Emilia-Romagna
- Fabi G. e Marini M. (2002) - *Monitoraggio dell'area destinata al prelievo di sabbie al largo di Ravenna*. ARPA Emilia Romagna, II Rapporto. 26 pp.
- Fabi G., Manoukian S. e Tedeschi R. (2003) - *Monitoraggio dell'area destinata al prelievo di sabbie al largo di Ravenna*. ARPA Emilia Romagna, III Rapporto. 10 pp.
- Fabi G., Manoukian S. e Tedeschi R. (2004) - *Monitoraggio dell'area destinata al prelievo di sabbie al largo di Ravenna*. ARPA Emilia Romagna, IV Rapporto. 17 pp.
- Fabi G., Manoukian S. e Tedeschi R. (2005) - *Monitoraggio dell'area destinata al prelievo di sabbie al largo di Ravenna*. ARPA Emilia Romagna, V Rapporto. 25 pp.
- IHO (1998) - *IHO Standards for Hydrographic Surveys*. Special Publ., 44. 25 pp.
- Amorosi A., Severi P., Roveri M., Correggiari A., Preti M., Tomassetti C., Tarocco P., Colalongo M.L., Pasini

- G., Vaiani S.C., Fusco F., Marchesini L., Spadafora E., Cibin U., Zuffa G.G., Dinelli E. (1999) - *Note illustrative della Carta Geologica D'Italia alla scala 1:50.000*: Foglio 223 Ravenna. pp. 144.
- Antonioli F., Lambeck K., Amorosi A., Belluomini G., Correggiari A., Devoti S., Demuro S., Monaco C., Marocco R., Pagliarulo R., Orrù P., Silenzi S. (2004) - *CLIMEX Maps of Italy*. In: F. Antonioli, C. Margottini, G.B. Vai (Eds.), *Litho-palaeoenvironmental maps of Italy during the last two climatic extremes 1:1,000,000*. Lac, Firenze, 23/14-15: 1567-1598.
- Asioli A., Trincardi F., Lowe J.J., Ariztegui D., Langone L., Oldfield F. (2001) - *Sub-millennial climatic oscillations in the Central Adriatic during the last deglaciation: paleoceanographic implications*. *Quaternary Science Reviews*, 20/11: 33-53.
- ARPA-Regione Emilia-Romagna (2001) - *Relazione specialistica. Progetto esecutivo. Ricerca e individuazione dell'area di prelievo in mare. Intervento di messa in sicurezza dei tratti critici del litorale emiliano romagnolo mediante ripascimento con sabbie sottomarine*, pp. 43.
- ARPA-Regione Emilia-Romagna (2006) - *Relazione specialistica. Progetto esecutivo. Individuazione dell'area di prelievo in mare. Interventi di messa in sicurezza di taluni tratti critici del litorale emiliano-romagnolo, interessati da erosione e subsidenza, mediante ripascimento con sabbie sottomarine*. pp. 32.
- Belknap D.F. e Kraft (1981) - *Preservation potential of transgressive coastal lithosomes on the U.S. Atlantic shelf*. *Mar. Geol.*, 42: 429-442.
- Brambati A. e Venzo G.A. (1967) - *Recent sedimentation in the Northern Adriatic Sea between Venice and Trieste*. *Studi Trentini Scienze Naturali*, 44: 202-274.
- Bondesan M., Favero V, Vinals M.J. (1995) - *New evidence on the evolution of the Po-delta coastal plain during the Holocene*. *quaternary international*, 29-30: 105-110.
- Brambati A., Bregant D., Lenardon G., Stolfa D. (1973) - *Transport and sedimentation in the Adriatic Sea*. *Museo Friulano St. Nat.*, 20: 1-160.
- BEACHMED-e (2006) - *Operazione Quadro Regionale, La gestione strategica della difesa dei litorali per uno sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo*. Sito internet: <http://www.beachmed.it>
- Cattaneo A. e Trincardi, F. (1999) - *The late-Quaternary transgressive record in the Adriatic epicontinental sea: basin widening and facies partitioning*. In: Bergman, K.M., Snedden, J.W. (Eds.), *Isolated Shallow Marine Sand Bodies: Sequence Stratigraphic Analysis and sedimentologic Interpretation*. SEPM Special Publication, 64: 127-146.
- Cattaneo A., e Steel R.J. (2003) - *Transgressive deposits: a review of their variability*. *Earth Science. Reviews* 62: 187-228.
- Cattaneo A., Coreggiari A., Langone L., Trincardi F. (2003) - *The Late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf: sediment pathways and supply fluctuations*. *Marine Geology* , 193: 161-191.
- Cattaneo A., Trincardi F., Langone L. Asioli A. e Puig P. (2004) - *Cliniform generation on Mediterranean margins*, *Oceanography*, 174: 104-117.
- Cattaneo A., Trincardi F., Asioli A., Correggiari A. (2007) - *The western adriatic shelf cliniform: Energy-limited bottomset*. *Continental Shelf Research*; 27 (3-4):506-25.
- Colantoni P., Gallignani P., Lenaz R. (1979) - *Late Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic continental shelf*. *Marine Geology*, 33: 41-50.
- Colantoni P., Preti M., Villani B. (1990) - *Sistema deposizionale e linea di riva olocenica sommersi in Adriatico e al largo di Ravenna*. *Giornale di Geologia*, 52: 1-18.
- Correggiari, A., Field M. E., Trincardi F. (1996a) - *Late Quaternary transgressive large dunes on the sediment-starved Adriatic shelf*. In: De Batist M., Jacobs P. (Eds.), *Geology of Siliciclastic Shelf Seas*. Geological society special publication, 117: 155-169.
- Correggiari A. Roveri M. Trincardi F. (1996b) - *Late-Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic Sea*. In: *Late-Glacial and early Holocene climatic and environmental changes in Italy*. *Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences*, 9: 697-704.
- Correggiari A., Trincardi F., Langone L., ROVERI M. (2001) - *Styles of failure in heavily-sedimented high-stand prodelta wedges on the Adriatic shelf*. *Journal of Sedimentary Research*, 71: 218-236.
- Correggiari A., Cattaneo A., Trincardi F. (2005a) - *Depositional patterns in the Late-Holocene Po delta system*. In: Bhattacharya J.P., Giosan L. (Eds.), *Concepts, Models and Examples*, SEPM Special Publication, 83: 365-392.

- Correggiari A., Cattaneo A., Trincardi F. (2005b) - *Depositional The modern Po Delta system: Lobe switching and asymmetric prodelta growth*. Marine Geology, 222-223: 49-74.
- Correggiari A., Cattaneo A., Carrà D., Penitenti D., Preti M., Trincardi F. (2002) - *Offshore sand for beach restoration: North Adriatic shelf examples*. In: Erosion litorale en Mditerrane occidentale: dynamique, diagnostic et remdes. Tangeri, Marocco, 18-21 Settembre 2002, CIESM Workshop n. 18: 79-82.
- Fabbri A., Argnani A., Bortoluzzi G., Correggiari A., Gamberi F., Ligi M., Penitenti D., Roveri M. e Trincardi F. (2001) - *Note Illustrative della Cartografia Geologica dei mari italiani scala 1:250.000: Foglio NL 33-10 Ravenna*.
- Fairbanks R.G. (1989) - *A 17,000-year glacio-eustatic sea level record—influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-sea circulation*. Nature, 342: 637-642.
- Fairbanks R.G. (1990) *The age and origin of the Younger Dryas climate event in Greenland ice core*. Paleoceanography, 5: 937-948.
- Fairbridge R.W. (1961) *Eustatic changes in sea level*. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. , 45: 1656-1666.
- IDROSER Spa (1985) - *Ricerca di depositi sabbiosi sul fondo del Mare Adriatico da utilizzare per il ripascimento delle spiagge in erosione*.
- IDROSER Spa (1990) - *Ricerca di depositi sabbiosi sul fondo del Mare Adriatico da utilizzare per il ripascimento delle spiagge in erosione. 2° Campagna di ricerca*.
- Lambeck K., Antonioli F., Purcell A. e Silenzi S. (2004) *Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs*. Quat.Sc. Rev., 23: 1567-1598.
- Malanotte Rizzoli P. e Bergamasco A. (1983) - *The dynamics of the coastal region of the northern Adriatic Sea*. Journal of Physical Oceanography, 13: 1105-1130.
- Nummendal D. e Swift D.J.P. (1987) - *Transgressive stratigraphy at sequenze-bounding unconformities: some principles derived from Holocene and Cretaceous example*. In: Nummendal D., Pilkey O.H., Howard S.D., (Eds.) , Sea level fluctuation and Coastal Evolution. SEPM Special Publication, 41: 241-260.
- Ori, G.G., Roveri, M., Vannoni F. (1986) - *Plio-Pleistocene sedimentation in the Apenninic-Adriatic fore-deep (Central Adriatic sea, Italy)*. In: Allen, P.A., Homewood, P. (Eds.), Foreland Basins. IAS Special Publication, 8: 183-198.
- PENLAND S., BOYD R., SUTER J. R. (1988) - *Transgressive depositional systems of the mississipi delta plain: a model for barrier shoreline shelf sand evolution*. Journal of Sedimentary Petrology, 58 (6): 932-949.
- Preti M. (2002) - *Ripascimento di spiagge con sabbie sottomarine in Emilia-Romagna*. Studi costieri, 5: 107-134.
- Rizzini A. (1974) - *Holocene sedimentary cycle and heavy mineral distribution, Romagna-Marche coastal plain, Italy*. Sedimentary Geology, 11: 17-37.
- Swift D.J.P. (1975) - *Barrier-island genesis: evidence from the central Atlantic shelf: Eastern U.S.A.*. Sedimentary Geology, 14: 1-43.
- Stefani M. e Vincenzi S. (2005) - *The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system*. Marine Geology, 222-223: 19-48.
- Storms J.E.A., Weltje G.J., Terra G.J., Cattaneo A., Trincardi F. (2008) - *Coastal dynamics under conditions of rapid sea-level rise: Late Pleistocene to Early Holocene evolution of barrier-lagoon systems on the northern Adriatic shelf (Italy)*. Quaternary Science Reviews, 27: 1107-1123.
- Trincardi F., Correggiari A., Roveri M. (1994) - *Late Quaternary transgressive erosion and deposition in a modern epicontinental shelf: The Adriatic Semienclosed Basin*. Geo-Marine Letters, 14: 41-51.
- Walker R.G. (1992) - *Facies, facies models and modern stratigraphic concepts*. In: Walker R.G., Jams N.P. (Eds.), Facies Models-Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada Publications: 1-14.

**Ricevuto il 19/07/2007, accettato il 02/08/2010.**