

## **Batimetria *multibeam*: sviluppo e possibili applicazioni**

Alessandro Bosman, Daniele Casalbore

CNR, Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Area della Ricerca di Roma 1, Montelibretti  
Via Salaria Km 29,300, Monterotondo (RM), Tel. 06.90672595 - Fax 06.90672733, alessandro.bosman@cnr.it

### **Riassunto**

In questi ultimi dieci anni la batimetria *multibeam* si è rivelata come uno dei mezzi più efficaci per mappare ed interpretare le morfologie sommerse sia in ambito marino che in acque interne (fiumi e laghi), ampliando notevolmente le conoscenze dei processi geologici attivi come frane, faglie, eruzioni sottomarine, fuoriuscita di fluidi ecc.. Recentemente tale tecnica geofisica è stata utilizzata con successo anche per ricerche archeologiche e per la mappatura degli habitat naturali, nonché per una prima valutazione dei rischi naturali e antropici in aree marine. L'obiettivo di questo lavoro è illustrare l'efficacia di tale metodologia e fornire alcuni esempi di applicazioni *multibeam* ad alta risoluzione, che spaziano dall'archeologia sino all'individuazione di geo-rischi marini.

### **Abstract**

In the last decade, multibeam bathymetry has revolutionized our ability to interpret seabed morphology in subaqueous environments, such as marine and inland waters (rivers and lakes), greatly widening our knowledge on the geological processes that sculpture the seafloor, such as landslides, faults, submarine eruptions, fluid escapes etc.. In recent times, multibeam bathymetry has been also efficiently used for archeological studies and habitat mapping as well as for a first geo-hazard assessment in marine areas.

The aim of the paper is to show some applications of multibeam data to archeological studies such as Tiber River in Rome and for a first mapping of marine geohazard features along the Italian coasts.

### **Introduzione**

In quest'ultimo decennio, il crescente sfruttamento delle risorse naturali in acque sempre più profonde, la presenza di infrastrutture ubicate sui fondali (cavi, fibre ottiche, condotte ecc.), nonché la maggiore importanza economica e sociale delle aree costiere-marine, ha portato ad un'intensa diffusione ed utilizzo di sistemi ecometrici multifascio allo scopo di mappare le aree marine in tempi relativamente brevi e a costi contenuti.

La mappatura batimetrica *multibeam* ha aumentato notevolmente le conoscenze dei lineamenti morfologici presenti sui fondali e dei processi geologici che agiscono in tali ambienti, coinvolgendo diversi settori disciplinari come la geologia-geofisica marina, l'ingegneria marittima, l'archeologia, la geodesia ecc..

La possibilità di ottenere DEM ad alta risoluzione e precisione, insieme a misure di riflettività dei fondali, rappresenta oggi un mezzo unico ed insostituibile per lo studio ed il monitoraggio ambientale, l'individuazione dei geo-rischi marini, la progettazione di opere marittime e il loro monitoraggio, sino all'individuazione di siti archeologici.

### **Metodologia d'indagine**

La tecnologia *multibeam* si basa sull'emissione di un fascio di onde acustiche, caratterizzate da un'elevata frequenza (da decine a centinaia di kHz), molto ampio nel piano trasversale alla rotta (tra

60° e 120°) e stretto nel piano ad essa parallelo (da 0.5° a 6°). Le onde diffratte dal fondo marino sono registrate da un trasduttore ortogonale (apertura 0.5°-2°) all'emettitore dopo un tempo che dipende dalla distanza percorsa e dalla velocità del suono nella colonna d'acqua. I fondali sono quindi insonificati in maniera omogenea, ottenendo una semina di punti quotati (*soundings*) con risoluzione decrescente (*footprint size*) all'aumentare delle profondità.

L'impiego dell'ecoscandaglio multifascio prevede una complessa architettura del sistema d'acquisizione, costituita da: 1) un sistema di posizionamento GPS con correzione differenziale (DGPS, RTK e/o PPK), 2) un sensore inerziale per la definizione dei parametri di assetto dell'imbarcazione (*roll, pitch e heave*), 3) una girobussola per l'orientamento del sistema (*yaw*), 4) due trasduttori per l'emissione e la ricezione degli impulsi acustici, 5) un sistema software e hardware per la gestione ed il controllo dell'acquisizione dei dati, 6) una sonda di velocità del suono per il calcolo del profilo di velocità lungo la colonna d'acqua per il ri-tracciamento (*ray tracing*) delle onde acustiche, 4) una stazione mareografica in sito per le correzioni delle escursioni di marea.

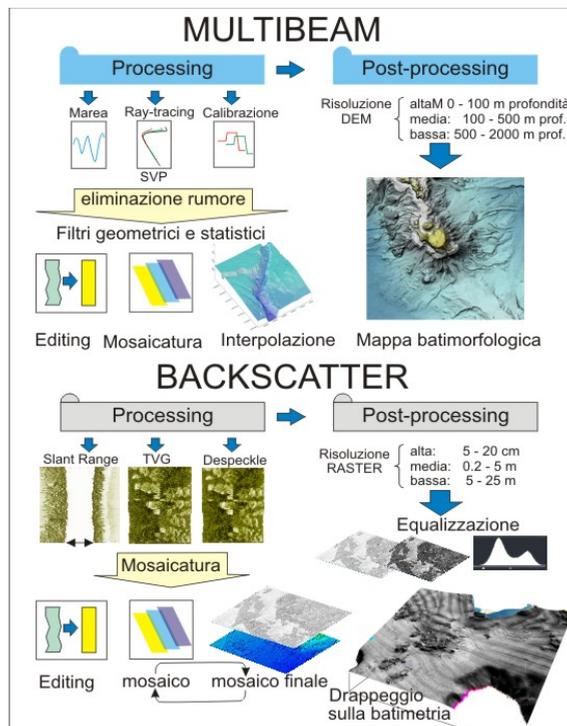


Figura 1 – Diagrammi di flusso per l'elaborazione dei dati ecometrici multifascio per la generazione di DEM e mosaici di riflettività (backscatter) del fondale.

Attraverso l'elaborazione dei punti quotati si ottengono Modelli di Elevazione del terreno (DEM), rappresentabili sotto forma di superfici 3D, rilievi ombreggiati e isobate. In funzione delle tecniche di posizionamento, delle profondità d'investigazione, delle frequenze impiegate dai sensori di emissione e ricezione, nonché degli standard di elaborazione utilizzati e dalla metodologie di acquisizione (calibrazione dei sensori ecometrici, determinazione degli offset strumentali, stato del mare, ecc..), si otterranno modelli digitali del terreno a bassa, media ed alta risoluzione.

In generale la risoluzione dei DEM decresce all'aumentare del battente d'acqua (distanza sorgente fondo mare) e alla conseguente diminuzione della frequenza del segnale acustico emesso, problema

in parte risolto abbassando la sorgente a poche decine di metri dal fondo con sistemi autonomi profondi (AUV - *Autonomous Underwater Vehicle*).

Nei sistemi *multibeam* più recenti, è possibile registrare anche l'ampiezza dei segnali ricevuti (*backscatter* o riflettività del fondo), che fornisce importanti informazioni sulla distribuzione superficiale dei sedimenti ivi presenti (sedimenti fini, medi e grossolani). Il trattamento dei punti quotati e delle riflettività dei fondali comportano complesse fasi di elaborazione realizzate con software commerciali e non. Uno schema esemplificativo delle principali fasi di elaborazione dei segnali è illustrato in figura 1.

### Posizionamento nei rilievi batimetrici multibeam

Uno degli aspetti più critici nei rilievi geofisici marini consiste nelle tecniche di posizionamento dei natanti, che in questi ultimi hanno subito un notevole sviluppo nell'ambito delle indagini marino-costiere. Comunemente nelle indagini geofisiche a mare sono utilizzate correzioni differenziali con precisioni stimate a pochi metri (misure di codice). Negli ultimi anni però lo sviluppo di sensori ecometrici ad elevata capacità risolutiva ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) ha reso necessario l'impiego di precisioni sempre maggiori, comunemente impiegate nella geodesia terrestre. Attualmente una delle più utilizzate tecniche di posizionamento di alta precisione dei natanti in ambito marino-costiero risulta essere la modalità RTK (misure di fase) che consente di raggiungere precisioni dell'ordine centimetrico/decimetrico sul piano orizzontale e verticale. Tali correzioni possono essere trasmesse per mezzo di modem GSM, stazioni radio UHF o mediante protocollo NTRIP. Tuttavia l'utilizzo di suddette correzioni ha evidenziato come in molti casi si possano verificare problemi legati alla trasmissione dei segnali con conseguente perdita della precisione (*FLOAT* – ambiguità di fase non fissata ad intero) e, conseguente aumento dei tempi nelle fasi dell'acquisizione.

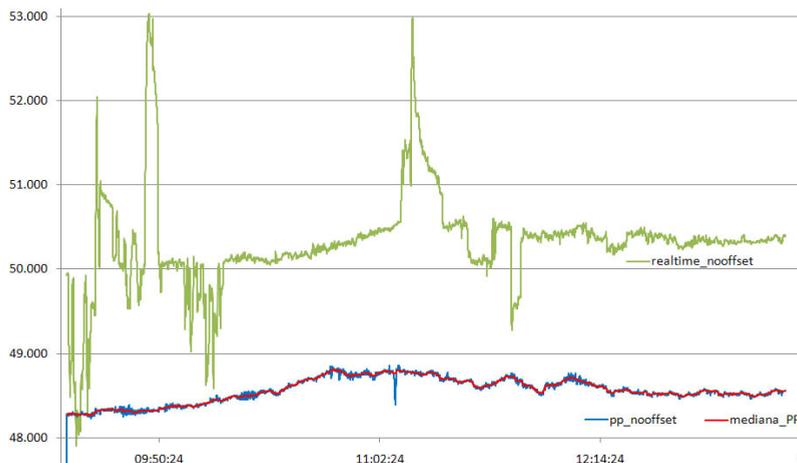
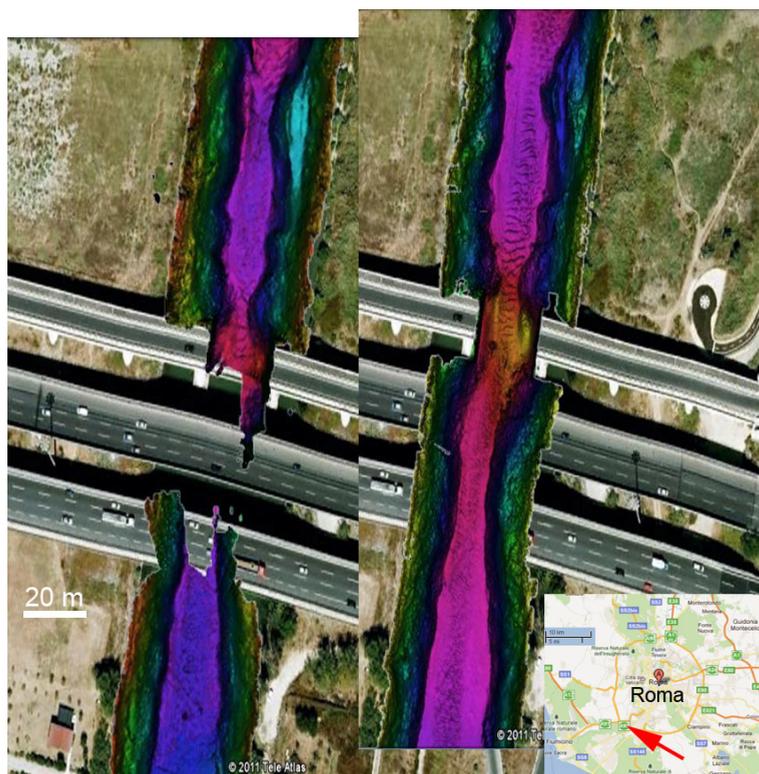


Figura 2 – Comparazione delle quote ellissoidiche in modalità RTK (verde) e post elaborate (blu) durante un rilievo morfobatimetrico. I dati post elaborati sono stati successivamente trattati con mediana mobile a 2 minuti e utilizzati per la correzione mareografica.

La precisione ottenibile tramite posizionamento GPS, indipendentemente dalle metodologie e tecniche di rilievo adottate, è fortemente condizionata dal numero di satelliti tracciati e dalla qualità dei segnali ricevuti. Un basso numero di satelliti visibili, o interruzioni nella ricezione dei segnali (*cycle-slips*), portano ad una diminuzione di precisione nel posizionamento. Questi problemi possono essere riscontrati in fase di rilievo, specialmente nelle zone con visibilità di cielo limitata spesso presenti in prossimità di coste alte (isole vulcaniche, falesie ecc.) o in aree fluviali per la presenza di argini, alberi e ponti, il cui l'attraversamento da parte dell'imbarcazione causa una

interruzione nella ricezione dei segnali dei satelliti tracciabili. Tale problema è stato in parte superato mediante le tecniche di *post-processing* attraverso l'utilizzo di software dedicati (Leica LGO, Trimble GTO), che consentono di elaborare i dati in tempi relativamente brevi con congruenza e continuità della soluzione, con una diminuzione del rumore e assenza di discontinuità, migliorando significativamente la qualità del dato (Fig. 2), ma soprattutto, accorciando drasticamente i tempi d'acquisizione che possono tradursi anche nel 30-50% del tempo impiegato con conseguente risparmio dei costi.



*Figura 3 – Comparazione tra due rilievi ecometrici ad alta risoluzione (10 cm), realizzati in prossimità dell'alveo Tiberino presso il GRA (Ponte Mezzocammino) attraverso la tecnica tradizionale RTK a sinistra e post-processing con sistema POSMV e POSPac a destra.*

Attualmente tra i software commerciali più diffusi e affidabili dedicati all'elaborazione per applicazioni marine e/o acque interne ricordiamo il POSPac che, oltre a fornire tempi relativamente brevi di calcolo, permette di ottenere una copertura batimetrica continua anche in aree con scarsa visibilità dei satelliti a precisioni accettabili. A titolo di esempio, in figura 3 è illustrata la comparazione tra due rilievi ecometrici multifascio ad alta risoluzione acquisiti nell'alveo Tiberino con tradizionale tecnica RTK (sinistra nel 2006) e *post-processing* mediante il sistema d'acquisizione POSMV e software POSPac (destra nel 2011). È evidente la continuità delle morfologie sull'immagine di destra in presenza di tre tratti stradali che interrompevano la ricezione dei segnali dai satelliti, e l'assenza di dati batimetrici a sinistra, acquisiti in modalità tradizionale.

### Batimetria multibeam e applicazioni archeologiche

La tecnologia *multibeam* ad alta risoluzione ha recentemente avuto una grande espansione nel campo delle ricerche archeologiche in ambito marino, lacustre e fluviale, in quanto consente di ottenere in acque poco profonde un'elevatissima risoluzione e densità dei punti quotati (centinaia di punti per metro quadro), che possono essere utilizzati per una ricostruzione dettagliata delle morfologie sommerse e delle strutture antropiche ivi presenti (Fig. 4).

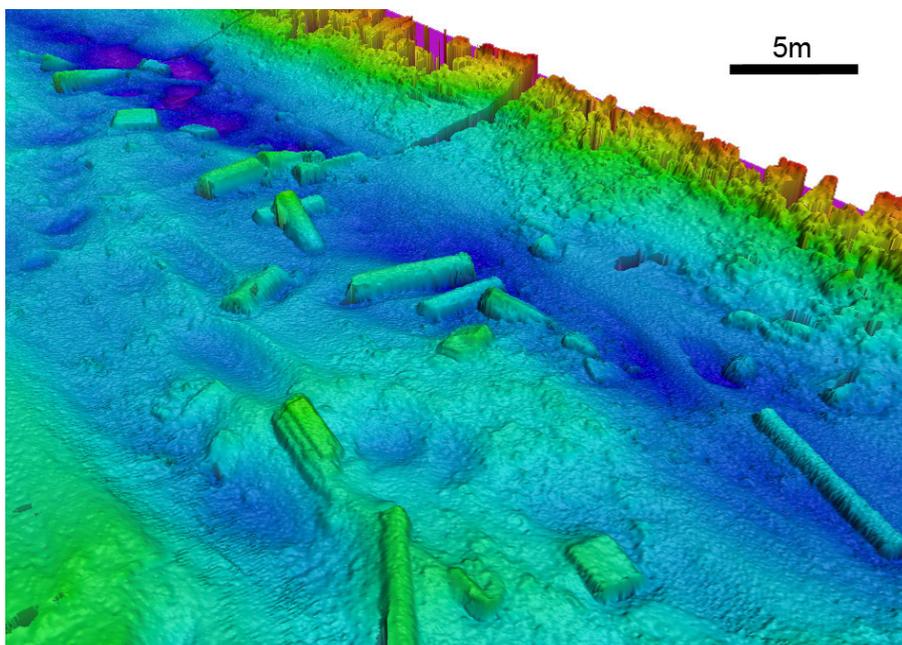


Figura 4 – Colonne e blocchi individuati sul fondo fiume Tevere all'altezza dell'Isola Sacra.  
La colonna ubicata in basso a destra ha un'estensione di circa 7 m (DEM ottenuto a 5 cm di risoluzione con copertura ottenuta da tre strisciate).

Recenti indagini geofisiche realizzate nell'ambito di due progetti di studio nell'alveo Tiberino (2006 - 2011), hanno permesso di ricostruire per la prima volta in continuità l'assetto batimorfologico del fiume Tevere dalla foce (Fiumara Grande e Fiumicino) sino a Ponte del Grillo per una distanza complessiva di circa 80 km (Bernabini et al. 2006, 2007, 2008).

I dati batimetrici sono stati raccolti utilizzando due sensori ecometri ad alta risoluzione Reson SeaBat 8125 e 7125 (455 - 400 kHz), utilizzando il trasduttore sia in modalità standard (illuminazione verso il basso) sia in modalità a testa girata (rotazione a dritta di 30°), in modo da insonificare i fondali sino ad una profondità di pochi centimetri.

La generazione di DEM, a risoluzioni compresa tra 5 e 20 cm, ha rivelato per la prima volta strutture archeologiche nel braccio del Tevere a NE dell'Isola Sacra attribuibili a colonne di epoca romana giacenti sul fondo ad una profondità di 5-7 m, in alcuni casi sovrapposte l'una all'altra (Fig. 4). Le colonne presentano lunghezze variabili da 3 a 7 m e diametri pari a circa 1 m, ed interrompono la regolare forma dell'alveo tiberino.

Nello stesso settore d'indagine, in prossimità del porto di Traiano (Fig. 5) in riva destra, sono state individuate per un tratto di circa 200 m dei depositi di blocchi rilevati di circa 7 m, equidistanziati di circa 20 m. L'integrazione con i risultati ottenuti da campagne d'indagine di magnetometria a terra (Keay S. et al., 2005), ha permesso di attribuire tali strutture ad un approdo di imbarcazioni direttamente collegate a dei magazzini di epoca romana.

Altre importanti strutture antropiche individuate attraverso i rilievi batimetrici eseguiti sono: a) strutture di fondazioni facenti parte della chiusura meridionale delle Mura Aureliane nei pressi del quartiere Testaccio di Roma ed in prossimità del Ponte Sisto, b) la presenza di strutture attribuibili a edifici termali realizzati durante l'Impero di Adriano nel tratto di Lungotevere di Pietra Papa.

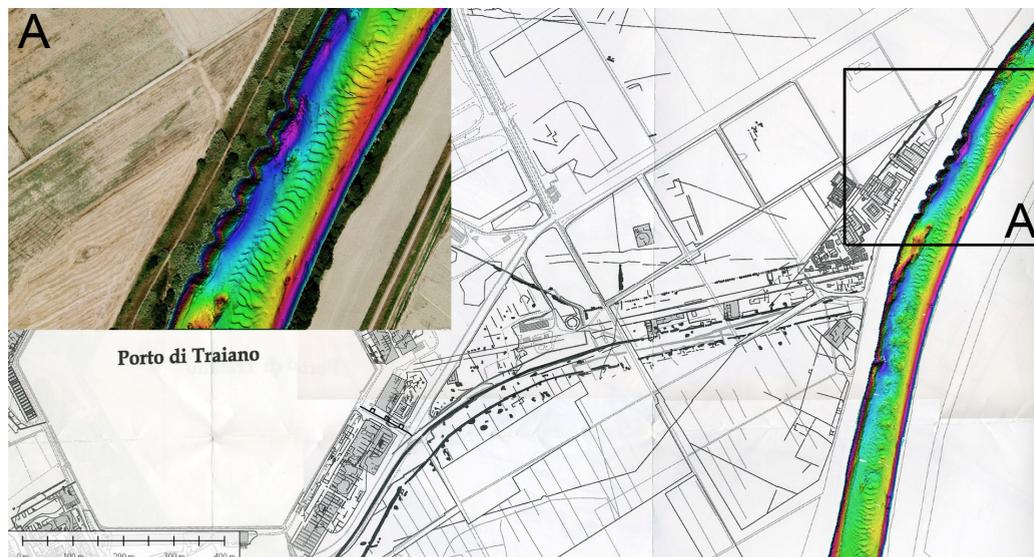


Figura 5 – Integrazione dei dati batimetrici multibeam e carta interpretativa dei rilievi magnetometrici di Keay S. (2005). In riva destra si osservano dei depositi di blocchi equidistanziati 20 m per una lunghezza di circa 200 m, attribuibili a strutture di approdo di epoca Romana.

### Geologia Marina e geo-rischi marini

Nell'ambito delle attività di Geologia Marina la tecnologia *multibeam* ha avuto un ruolo predominante in questi ultimi anni, abbracciando numerosi campi di ricerca e applicazioni che comprendono la mappatura estensiva di aree ancora non note, l'individuazione dei geo-rischi marini, sino al monitoraggio ambientale in particolari zone ritenute critiche in termini di pericolosità.

Numerosi studi sono stati condotti per la mappatura estensiva dalle aree di piattaforma alle scarpate continentali, evidenziando la presenza di diffusi e attivi processi morfo-sedimentari che possono comportare rilevanti rischi per le infrastrutture e le popolazioni che vivono lungo la fascia costiera. Fenomeni d'instabilità gravitativa a piccola media e grande scala (Twichell et al., 2009; Chiocci et al., 2011; Casalbore et al., 2011<sup>a</sup>), evoluzione retrogressiva delle testate di canyon lungo costa (Casalbore et al., 2011<sup>b</sup>), migrazione di forme di fondo all'interno di canyon (Smith et al., 2007), fagliazioni che arrivano in superficie (Gökasan et al., 2001), costituiscono solo alcuni esempi degli elementi di pericolosità presenti sui fondali (Fig. 6). In particolare l'utilizzo della batimetria ad alta risoluzione si è rivelata particolarmente idonea ed efficace per lo studio di apparati vulcanici insulari e non, ove le tradizionali tecniche di sismica monocanale hanno scarso successo o risultano totalmente inefficaci a causa delle elevate pendenze (20-40°) ed elevata impedenza acustica dei fondali dovuta alla presenza di substrato vulcanico e/o materiale grossolano (Bosman et al., 2009; Casalbore et al., 2010). È inoltre importante sottolineare come, rilievi multitemporali in aree estremamente attive, come ad esempio i vulcani insulari italiani (Stromboli, Vulcano ed Etna) o il margine continentale calabro, risultino particolarmente efficaci nell'identificare e monitorare l'evoluzione morfologica dei versanti sommersi e delle morfologie ivi presenti. Un esempio recente di tali studi è rappresentato dall'evento di frana-maremoto avvenuto nel dicembre del 2002 in corrispondenza della porzione sommersa della Sciara del Fuoco presso l'isola di Stromboli (Chiocci

et al., 2008<sup>a</sup>). In questo caso, la possibilità di avere un rilievo batimetrico acquisito circa 1 anno prima di tale evento, ha permesso di quantificare i volumi della frana e di comprenderne i principali meccanismi di innesco e sviluppo attraverso la comparazione con i dati ecometrici acquisiti successivamente all'evento. L'esecuzione di rilievi ripetuti nel tempo ha permesso inoltre di monitorare l'evoluzione della nicchia sottomarina generata dalla frana al fine di ottenere importanti indicazioni sulla pericolosità associata a tali eventi (Chiocci et al., 2008<sup>b</sup>, Baldi et al., 2008). Studi analoghi sono stati condotti anche per una frana sottomarina che ha interessato recentemente i piloni di attracco di uno stabilimento chimico (fig. 6a) ubicato nei pressi di Punta Alice nella Calabria Ionica (Casalbone et al., 2011<sup>c</sup>).

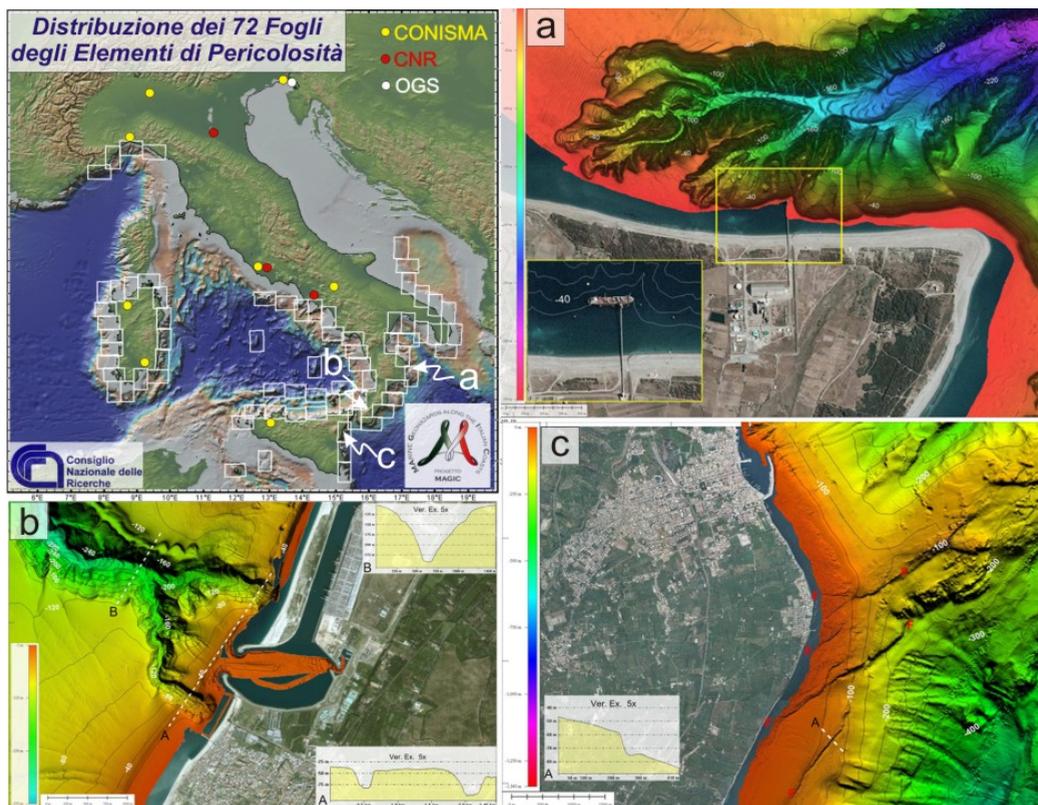


Figura 6 – Ubicazione dei 72 Fogli degli elementi di pericolosità dei mari italiani in fase di completamento; a) Testata del canyon di Madonna di Mare presso Pta Alice in arretramento sulla linea di riva; b) biforcazione della testata del canyon di Gioia Tauro in prossimità del porto omonimo; c) faglie attive lungo la dorsale Riposto che ribassano i versanti emersi e sommersi di decine di metri lungo il fianco nord-orientale dell'Etna.

L'efficacia di tale metodologia per lo studio di eventi di instabilità sottomarina ha portato ad una attiva collaborazione tra il Dipartimento della Protezione Civile e la quasi totalità della comunità scientifica dei Geologi Marini per la realizzazione di un progetto a scala nazionale coordinata dal Prof. F.L. Chiocci per la prima mappatura morfobatimetrica dei mari italiani (*MAGIC: Marine Geohazard along the Italian Coasts*).

Numerose istituzioni afferenti al Consiglio Nazionale delle Ricerche (IGAG, ISMAR e IAMC), a nove Dipartimenti Universitari (Univ. di Roma Spienza, Univ. di Palermo, Univ. Di Cagliari, Univ.

di Sassari, Univ. Di Milano Bicocca, Univ. del Sannio, Univ. di Trieste, Univ. di Genova), consorziati all'interno del CoNISMa (Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del Mare) e all'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale di Trieste, sono attivamente coinvolte nell'acquisizione elaborazione ed interpretazione di dati batimetrici ad alta risoluzione per la produzione della prima Mappa degli Elementi di Pericolosità dei Fondali Marini Italiani, costituita da 72 Fogli in scala 1:50.000 (Fig. 6), che includono diverse tipologie di carte tematiche, in modo da comprendere i diversi aspetti connessi alla pericolosità geologica e le differenti scale a cui essa può essere investigata e rappresentata. Questo imponente dataset batimetrico esteso in aree non note, oltre ad ampliare le conoscenze sui processi geologici presenti nei nostri mari, rappresenterà una base di riferimento sia per la pianificazione di indagini più approfondite, sia per la gestione di situazioni di emergenza in mare.

### **Conclusioni**

La mappatura batimetrica multibeam ad alta risoluzione rappresenta oggi uno metodi più efficaci nelle prospezioni geofisiche marine, con numerosi campi d'applicazione nelle scienze naturali, dalla geologia alla biologia, oltre che nei settori dell'ingegneria (infrastrutture marittime, reperimento di inerti e dragaggi), dell'archeologia (individuazione di siti) e della geodesia (analisi di deformazioni). Essa rappresenta quindi una base imprescindibile per qualsiasi operazione di approfondimento conoscitivo delle zone costiere e profonde e delle acque interne, per l'individuazione dei geo-rischi marini naturali e antropici e per la gestione di situazioni di emergenza.

### **Bibliografia**

Baldi P, Bosman A, Chiocci FL, Marsella M, Romagnoli C, Sonnessa A, (2008), Integrated subaerial-submarine morphological evolution of the Sciara del Fuoco after the 2002 landslide. In: *The Stromboli Volcano: An Integrated Study of the 2002-2003 Eruption*, AGU Geophysical Monograph Series, Vol 182 (S. Calvari, S. Inguaggiato, G. Puglisi, M. Ripepe, M. Rosi, Eds.), pp. 171-182. ISBN 978-0-87590-447-4.

Bernabini M, Bosman A, Chiocci FL, Macelloni L, Orlando L, (2006), First MultiBeam and High Resolution Reflection Seismics Survey on the Tiber River Lower Course. *European Association of Geoscientists & Engineers Near Surface 2006, 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 4-6 September 2006, Helsinki, Finland.

Bernabini M, Bosman A, Chiocci FL, Macelloni L, Mazzoni A, Orlando L, Geitalia (2007), Multibeam and High-resolution seismic reflection on the Tiber River. *Sesto Forum Italiano di Scienze della Terra*. Rimini, 12-14 settembre 2007. Vol 2, 2007 ISSN 1972-1552 pp.

Bernabini M, Bosman A, Orlando L, (2008), Indagini in acqua. *Geofisica per l'archeologia possibilità e limiti*. Atti del convegno Roma, 10 dicembre 2008, Palazzo Massimo, pp. 57-66.

Bosman A, Chiocci FL, Romagnoli C, (2009), Morpho-structural setting of Stromboli volcano revealed by high resolution bathymetry and backscatter data of its submarine portions. *Bulletin of Volcanology*. 71, pp. 1007 – 1019.

Casalbore D, Romagnoli C, Bosman A, Chiocci FL (2011<sup>a</sup>), Potential tsunamigenic landslides at Stromboli Volcano (Italy): Insight from marine DEM analysis. *Geomorphology*, Volume 126, Issues 1-2, 1 March 2011, Pages 42-50.

Casalbore D, Chiocci FL, Scarascia Mugnozza G, Tommasi P, Sposato A. (2011<sup>b</sup>) Flash-flood hyperpycnal flows generating shallow-water landslides at Fiumara mouths in Western Messina Strait (Italy). *Marine Geophysical Researches* Volume 32, Pages 257–271

Casalbore D, Bosman A, Chiocci FL (2011<sup>c</sup>), Study of recent small-scale landslides in geologically active marine areas through repeated multi-beam surveys: examples from the Southern Italy, in *Submarine Mass Movements and Their Consequences, "Advances in Natural and Technological Hazards Research" Series*, Vol. 34 (ISBN 978-94-007-2161-6).

Chiocci FL, Coltelli M, Bosman A, Cavallaro D, (2011), Continental Margin Large-Scale Instability Controlling the Flank Sliding of Etna Volcano. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 305, Issues 1-2, 1 May 2011, Pages 57-64.

Chiocci FL, Romagnoli C, Bosman A, (2008<sup>a</sup>), Morphologic resilience and depositional processes due to the rapid evolution of the submerged Sciara del Fuoco (Stromboli Island) after the December 2002 submarine slide and tsunami. *Geomorphology* 100, 356-365. doi:10.1016/j.geomorph.2008.01.008.

Chiocci FL, Romagnoli C, Tommasi P, Bosman A, (2008<sup>b</sup>), The Stromboli 2002 tsunamigenic submarine slide: characteristics and possible failure mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 113, B10102, doi:10.1029/2007JB005172.

Gökasan A, Alpar B, Gazioglu C, Yasar Yücel Z, Tok B, Dogan E, Güneysu C, (2001), Active tectonics of the Izmit Gulf (NE Marmara Sea): from high resolution seismic and multi-beam bathymetry data. *Marine Geology*, 175, 273-288, doi: 10.1016/S0025-3227(01)00133-5.

Keay S, Millett M, Paroli L, Strutt K, (2005), Portus. *Archaeological monographs of the British School at Rome*. Direzione Generale per i Beni Archeologici.

Smith DP, Kvitek R, Iampietro PJ, Wong K, (2007), Twenty-nine months of geomorphic change in upper Monterey Canyon (2002-2005). *Marine Geology*, Volume 236, Pages 79-94.

Twichell DC, Chaytor JD, Ten Brink US, Buczkowski B, (2009), Morphology of late Quaternary submarine landslides along the U.S. Atlantic continental margin. *Marine Geology*, Volume 264, Pages 4-15.