

Capitolo 5

Acustica subacquea

(Silvano Buogo, Lucilla Di Marcoberardino)

Batimetrie di precisione mediante Multibeam Echosounder

Generalità

Lo stato dell'arte per i rilievi di precisione della batimetria del fondale marino è al giorno d'oggi basato sull'utilizzo di sonar multifascio, più comunemente denominati *Multibeam* dalla terminologia inglese MultiBeam EchoSounder (MBES). Questi sistemi sonar, nati negli anni Settanta per essere installati a bordo di grandi navi oceanografiche, hanno visto da allora un costante avanzamento delle loro prestazioni e, di pari passo, una riduzione dei loro costi e delle loro dimensioni, tanto che oggi è possibile installare dei MBES anche su natanti di pochi metri nonché a bordo di veicoli subacquei autonomi (Fig. 1). Attualmente i sistemi MBES rappresentano una parte rilevante del mercato dei sonar per applicazioni commerciali, scientifiche e militari, con i sistemi a fascio singolo relegati ad applicazioni particolari, come nel caso delle ecosonde a penetrazione, o di minore rilevanza come nel caso degli ecoscandagli.

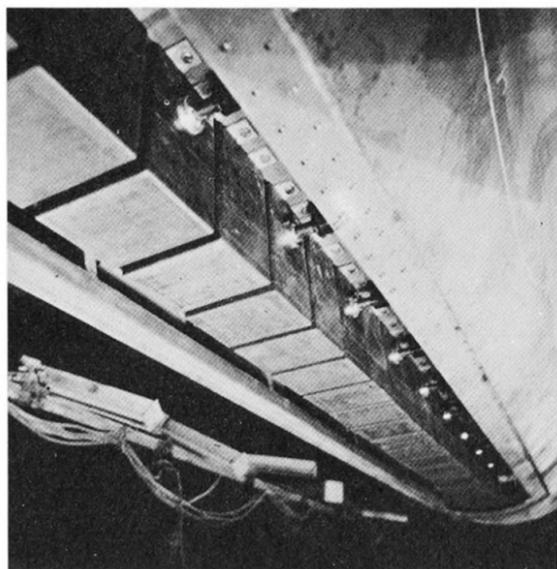


Fig. 1. Esempi di Multibeam Echosounder degli anni Settanta (sinistra) e di ultima generazione (destra) [1,2]

Esistono anche altri tipi di sistemi sonar, nati prima dei MBES, in grado di restituire immagini del fondale marino: i sistemi a scansione laterale (Side-Scan Sonar, SSS) e la loro recente evoluzione costituita dai sonar interferometrici. Questi sistemi presentano alcuni vantaggi rispetto ai MBES soprattutto in termini di semplicità costruttiva che si traducono in minore costo, minore complessità di installazione e d'uso e maggiore affidabilità. Tuttavia, le immagini prodotte con questi sistemi sono affette da un minor grado di precisione della posizione, quindi non sono adatte a produrre un dato accuratamente georeferenziato. I motivi di tale imprecisione sono soprattutto: 1) che le immagini sono ricostruite principalmente in base ai tempi di percorrenza di andata e ritorno dell'onda acustica e solo in misura minore e con un certo grado di ambiguità in base alle direzioni di arrivo; 2) che questi tipi di sonar, dovendo operare a ridotta altitudine dal fondale, sono per lo più trainati e non installati in modo fisso, così da far apparire una cospicua componente di indeterminazione della posizione del sensore rispetto all'unità di superficie, che di norma possiede il dato di posizione geografica di riferimento tramite GPS. Per questi motivi, tutte le batimetrie di precisione, ovvero la produzione di mappe della profondità dei fondali marini, sono al giorno d'oggi realizzate mediante MBES.

Caratteristiche

Un MBES è essenzialmente un ecografo dotato di due array, uno in trasmissione con fascio acustico fisso e uno in ricezione con fascio acustico orientabile per via elettronica con la tecnica del *beam steering* (vedi sezioni 5.8.1 e 6.4.4 nel testo). Dall'incrocio dei due fasci, entrambi a forma di ventaglio e disposti ortogonalmente tra loro, è possibile rilevare un segnale di ritorno proveniente da un'area di dimensioni ridotte, che costituisce la cella elementare (analoga al *pixel* di una foto digitale) dell'immagine finale (Fig. 2). Questa disposizione dei due array è comunemente detta a Croce di Mills, dal nome dell'astronomo australiano che la utilizzò per primo negli anni Cinquanta per la costruzione di un radiotelescopio. Tale disposizione consente di realizzare immagini di un'area mediante una sua scansione lungo le due coordinate angolari grazie all'uso di due interferometri lineari ortogonali tra loro, in maniera tecnicamente più semplice rispetto all'uso di un array bidimensionale come avviene comunemente in ottica. Il prezzo da pagare per questa semplificazione è che con un sistema a croce di Mills l'immagine non può essere prodotta istantaneamente ma solo dopo aver completato una scansione completa lungo entrambi gli angoli (cosa quasi sempre inaccettabile per un sistema di visione ottica, ma tollerabile per un sistema acustico data la velocità dell'onda enormemente più bassa, i cui effetti sono nettamente predominanti sulla possibilità di produrre immagini in tempo reale).

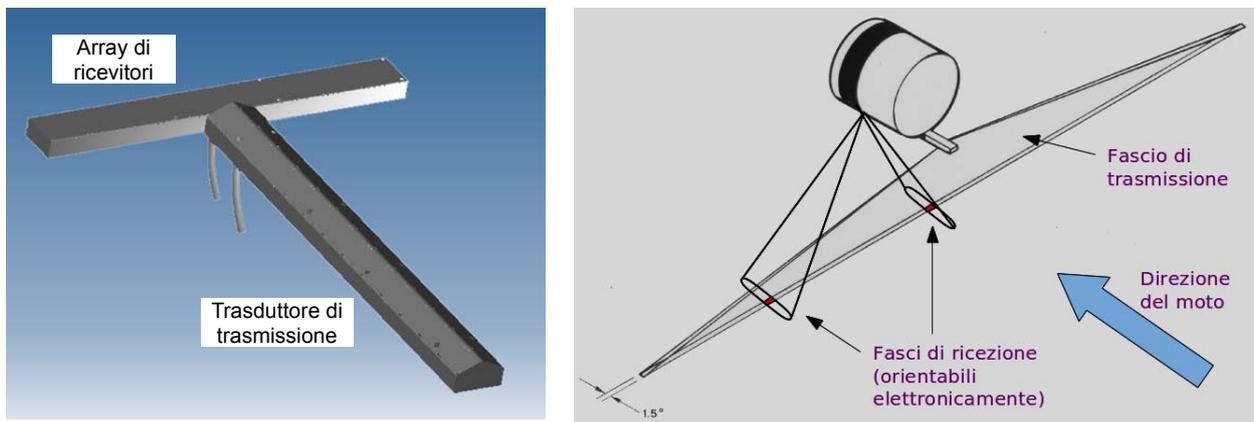


Fig. 2 Disposizione degli array in trasmissione e in ricezione di un sonar MBES (a sinistra) e dei relativi fasci acustici (a destra).

La copertura di un'area è garantita dal moto di traslazione dell'intero sistema lungo una linea di navigazione, e quindi del fascio fisso in trasmissione, combinato con la scansione continua del fascio in ricezione lungo un segmento ortogonale al moto (*swath*). La scansione avviene a passi discreti che possono essere equispaziati in angolo o in dimensione della cella: quest'ultima modalità semplifica la ricostruzione dell'immagine, compensando la maggiore estensione per divergenza geometrica dell'impronta acustica sul fondale (*footprint*) per grandi angoli a partire dalla verticale (*nadir*).

Come ogni sistema ecografico, i MBES emettono degli impulsi in forma di pacchetti d'onda (*ping*), generalmente a frequenza fissa, e ne ricevono l'eco di ritorno dovuta alla riflessione all'indietro (*backscattering*) da parte del fondale. Dal momento che questi sistemi servono principalmente a determinare con precisione la profondità del fondale, per avere la migliore risoluzione essi operano alle più alte frequenze acustiche possibili compatibilmente con la massima distanza operativa richiesta. In altri termini, la frequenza operativa di un MBES è scelta in modo che alla massima distanza richiesta l'assorbimento dovuto al mezzo non pregiudichi il rapporto segnale/rumore in ricezione. D'altronde, l'assorbimento da parte dell'acqua in mare è fortemente dipendente dalla frequenza (si veda par. 5.5 nel testo). Questo si traduce nella necessità di operare a frequenze anche molto diverse tra loro in base alle applicazioni, ovvero alle massime distanze operative. In Tab. 1 sono indicate le principali caratteristiche, incluse le frequenze operative, di alcuni sistemi MBES attualmente in uso.

Sounder type	Frequency (kHz)	Water depth (m)	Maximum width (m)	Total aperture (°)	Number of beams	Beam widths	Signal resolution (m)
Simrad EM120	12	50 → 11,000	20,000	144	191	1° * 2°	1.5–7.5
Simrad EM300	32	5 → 5,000	10,000	140	135	1° * 2°	0.5–3.75
Simrad EM1002	95	2 → 1,000	1,500	150	111	2.3° * 2.3°	0.15–1.5
Reson Seabat 8111	100	3 → 1,000	1,000	150	101	1.5° * 1.5°	0.05–0.25
Reson Seabat 8101	240	0.5 → 500	400	150	101	1.5° * 1.5°	0.015–0.15
Reson Seabat 8125	455	0.2 → 120	/	120	240	0.5° * 1°	0.01–0.2

Tab. 1 Caratteristiche di alcuni dei più rappresentativi MBES in uso: marca e modello, frequenza, intervallo di profondità operativa, massima larghezza dell'area insonificata, apertura angolare totale dei fasci acustici, numero di fasci, apertura angolare del singolo fascio, risoluzione lungo la distanza [3].

Limitazioni

Una limitazione intrinseca dei MBES, comune a tutti i sistemi acustici per immagini, è che il periodo di ripetizione dei *ping* non deve superare il valore dato dal tempo di andata e ritorno dell'onda, così da poter acquisire ed elaborare ogni segnale ricevuto in modo non ambiguo prima dell'arrivo del successivo. Questo tempo è proporzionale alla profondità del fondale, quindi elevate frequenze di ripetizione sono possibili solo per bassi fondali (piccole profondità). In aggiunta a questo requisito, per avere una copertura completa dell'area del rilievo, il moto della piattaforma che ospita il sonar (natante o veicolo) deve essere a velocità inferiore ad un valore limite in funzione dell'estensione longitudinale (lungo la direzione del moto) del *footprint*. Quest'ultimo è funzione dell'apertura longitudinale del fascio in trasmissione e, nuovamente, della profondità del fondale per via della divergenza del fascio. Ad esempio, consideriamo un valore tipico dell'apertura del fascio pari a 1 grado: l'estensione del *footprint* lungo il moto a 1000 metri di profondità risulta pari a circa 17,5 m, e questa distanza è percorsa da una nave che viaggia a 10 nodi (circa 5 m/s) in circa 3,4 s. Ciò significa che per avere copertura completa in queste condizioni il periodo di ripetizione degli impulsi deve essere minore questo tempo. Nello stesso intervallo di tempo, un'onda acustica in acqua percorre poco più di 5000 m, quindi alla velocità di 10 nodi la copertura completa di un fondale di 1000 metri è possibile. Lo stesso non avverrebbe, invece, se la velocità aumentasse oltre 25 nodi, o se la profondità del fondale aumentasse oltre 2500 metri, oppure se l'apertura angolare del fascio si riducesse a meno della metà (come nel caso di un sistema ad altissima definizione). Da tutto questo, risultano quindi valori limite correlati tra loro sia per la frequenza acustica, sia per il periodo di ripetizione degli impulsi (entrambi per via del tempo di percorrenza dell'onda), sia per la velocità del moto della piattaforma (per via della necessità di copertura completa dell'area).

I sistemi MBES più performanti sono dotati di una modalità chiamata *Multiping*, grazie alla quale è possibile aumentare il rateo di emissione degli impulsi oltre il valore limite sopra citato, e di conseguenza la velocità del moto, grazie a particolari tecniche di sincronizzazione tra i segnali.

Installazione

I sistemi MBES possono essere installati su natanti principalmente in due modi: a chiglia, in maniera permanente su navi espressamente dedicate al loro utilizzo, mediante aperture sul fondo della chiglia (come in Fig. 1) o più spesso in opportuni alloggiamenti (gondole) costruiti appositamente in modo da garantire il migliore allineamento possibile tra i piani dei due array; successivamente il montaggio avviene con la nave

in bacino avendo cura di allineare la gondola rispetto alla geometria della nave; a palo, in caso di utilizzi temporanei per i quali non è previsto o non è possibile realizzare un'installazione a chiglia, mediante il fissaggio del sistema all'estremità di un palo opportunamente rigido posto generalmente al fianco del natante.

Più raramente, nel caso di installazione su veicoli subacquei (ROV, *Remotely Operated Vehicle*), si usano montaggi su staffe o telai sufficientemente rigidi, eventualmente usando opportune appendici o superfici di protezione.

Un requisito fondamentale di ogni installazione di un MBES è che di esso si deve conoscere con elevata accuratezza la posizione relativa ad un punto di riferimento della piattaforma (nave o veicolo che sia). Il riferimento può essere la posizione dell'antenna del GPS a bordo, il baricentro della nave, o qualsiasi altro punto scelto convenzionalmente. Il motivo risiede nella necessità di georeferenziare il dato acquisito mediante MBES, cioè nell'assegnazione di coordinate geografiche alle mappe prodotte in termini di longitudine, latitudine e depressione. Ciò implica che siano noti i valori lungo le tre coordinate spaziali X , Y , Z degli scostamenti (comunemente denominati *offset*) del centro acustico del sistema rispetto al punto di riferimento. Questo avviene sempre ad ogni nuova installazione a chiglia e a palo utilizzando tecniche topografiche (mediante stazioni totali), e il dato di *offset* così ottenuto costituisce un importante elemento di correzione dei dati acustici grezzi per la produzione del dato finale.

Dal momento che un MBES opera mediante continue scansioni angolari di precisione, oltre alla conoscenza dei suoi valori di *offset* è necessario conoscere, istante per istante, la sua orientazione assoluta nello spazio. Ciò può non essere un compito banale a bordo di una nave, soggetta a movimenti angolari imprevedibili lungo i tre assi: principalmente rollio (*roll*), ma anche beccheggio (*pitch*) e imbardata (*yaw*). La mancata conoscenza di questi angoli porta inevitabilmente ad una distorsione dell'immagine prodotta e quindi ad una non corretta georeferenziazione. Per ovviare a questa necessità, tutti i sistemi MBES prevedono l'installazione di un sensore di moto (detto *Motion Reference Unit*, MRU) che misura con continuità i suddetti tre angoli, con precisione tipicamente di alcuni centesimi di grado e cadenze dell'ordine delle decine di Hz. Queste elevate caratteristiche sono raggiungibili grazie allo sviluppo di dispositivi altamente affidabili basati su tecniche laser a fibra ottica (denominati *Fiber Optic Gyroscope*, FOG) che hanno soppiantato i sistemi basati su giroscopi meccanici. In aggiunta alla misura degli angoli, grazie a degli accelerometri triassiali le MRU forniscono anche le accelerazioni, e mediante integrazione anche gli spostamenti, lungo le tre coordinate. Di questi, gli spostamenti lungo la coordinata verticale (*heave*) sono particolarmente critici perché hanno diretta influenza sul dato batimetrico e possono essere valutati tramite GPS solo con un'accuratezza piuttosto bassa, in genere non migliore del metro (mentre per le coordinate nel piano orizzontale i migliori ricevitori GPS hanno accuratezza anche del centimetro).

Un importante aspetto riguarda la sincronizzazione tra il dato prodotto dal sensore di moto MRU e l'acquisizione del dato ricevuto dall'array del MBES. I due sistemi devono essere sincronizzati con precisione adeguata, altrimenti il dato della MRU, ad esempio quello del rollio, se ricevuto in ritardo può apportare una correzione non in fase con il moto, e quindi peggiorare l'accuratezza del dato finale invece che migliorarla. Per fare in modo che le correzioni sia apportate in fase, i sistemi sono sincronizzati attraverso un segnale di clock di riferimento comune, generalmente proveniente da un apparato esterno di elevata precisione quale il ricevitore GPS di bordo.

Un ulteriore sensore ausiliario indispensabile per il funzionamento di un MBES è un misuratore della velocità del suono in acqua (le caratteristiche di questo tipo di sensore sono descritte nel testo in sez. 5.2). Questo sensore deve essere collocato in prossimità dell'array di ricezione, in modo da fornire il valore di velocità del suono al sistema affinché la deviazione elettronica del fascio (*beamsteering*) sia quella desiderata. Si ricorda infatti (si veda sez. 5.8,1 nel testo) che l'angolo di deviazione di un cosiddetto array fasato, come è quello di un MBES, è funzione dei tempi di ritardo assegnati ai suoi elementi, tempi che a loro volta dipendono dalla spaziatura tra gli elementi stessi (parametro fisso una volta realizzato l'array) e dalla velocità dell'onda (non nota a priori). Errori nella valutazione della velocità del suono in prossimità dell'array si traducono in un progressivo errore nel calcolo dell'angolo di ricezione dei segnali, e di conseguenza l'immagine prodotta presenta una distorsione via via crescente all'aumentare dell'angolo dal *nadir*, ovvero all'allontanarsi dalla linea di navigazione. Questo tipo di errore è particolarmente critico perché, a differenza degli errori sugli *offset*, non può essere corretto a posteriori una volta che il dato è stato acquisito: per questo motivo si utilizzano per questo scopo sonde di velocità particolarmente precise e affidabili. Per i modelli più performanti l'accuratezza dichiarata, con un certo ottimismo, dai costruttori

risulta essere addirittura di qualche cm/s (una parte su 10^5): tuttavia le caratteristiche reali sono quasi sempre sufficienti a contenere questo tipo di errore entro limiti accettabili tali da non prevalere sulle altre componenti di errore.

Un ultimo possibile effetto sulla qualità del dato da MBES è dovuto alla non omogeneità della velocità del suono lungo tutta la colonna d'acqua. Questo causa la rifrazione dell'onda (vedi sez. 2.7.1 e par. 5.3 nel testo) così come avviene per ogni mezzo non omogeneo, dunque i percorsi dell'onda non si possono più considerare rettilinei e la batimetria prodotta anche in questo caso risulta affetta da distorsioni. Questo effetto possiede in ambiente marino una marcata variabilità sia geografica sia temporale: quest'ultima poi a più scale, sia giornaliera, sia stagionale, per effetto degli scambi termici tra lo strato superficiale del mare, il sole e l'atmosfera. Data l'influenza di numerosi fattori per questo fenomeno, è inevitabile il ricorso ad una misura del cosiddetto profilo di velocità, al variare della profondità lungo tutta la colonna d'acqua, più volte durante l'esecuzione di una campagna di misure batimetriche. L'inserimento del corretto profilo di velocità consente ad un sistema MBES durante la fase di elaborazione del dato grezzo di compensare la rifrazione dovuta alle variazioni di velocità, ripristinando le corrette posizioni del *footprint* di ciascun fascio al variare dell'angolo di deviazione.

Calibrazione

Al termine delle operazioni di installazione di un MBES, prima dell'avvio di una campagna di misura e periodicamente durante il suo svolgimento, si effettuano delle operazioni di verifica e regolazione dei parametri per la correzione ottimale dei dati grezzi acquisiti. Si tratta essenzialmente di determinare i valori degli *offset* angolari, cosa che difficilmente può essere fatta con una misura diretta dell'orientazione degli array e che quindi si esegue tramite analisi di dati acquisiti secondo modalità specifiche. Queste operazioni rientrano complessivamente sotto il termine *Calibration*, e comprendono vari passi per raggiungere la migliore accuratezza possibile del dato finale. Ad esempio, per effettuare la *Roll offset calibration* si percorre una stessa linea di navigazione con fondale piatto nelle due direzioni opposte e si confrontano i dati, correggendo i parametri fino a che il dato è restituito correttamente in entrambi i casi. Per la *Pitch offset calibration* si individua un opportuno bersaglio sul fondale e, dopo aver eseguito le due linee in direzione opposta come nel caso precedente, si confronta la posizione del bersaglio che deve risultare coincidente. Questi passi, come altri che possono riguardare gli altri gradi di libertà del sistema, sono eseguiti mediante opportuni moduli inseriti nei software di gestione e visualizzazione del dato batimetrico che analizzano in maniera statistica i risultati fornendo i valori ottimali insieme al grado di dispersione dei dati, in modo da evidenziare eventuali problemi legati all'acquisizione del dato (si veda anche il seguente paragrafo).

Software di gestione e presentazione del dato

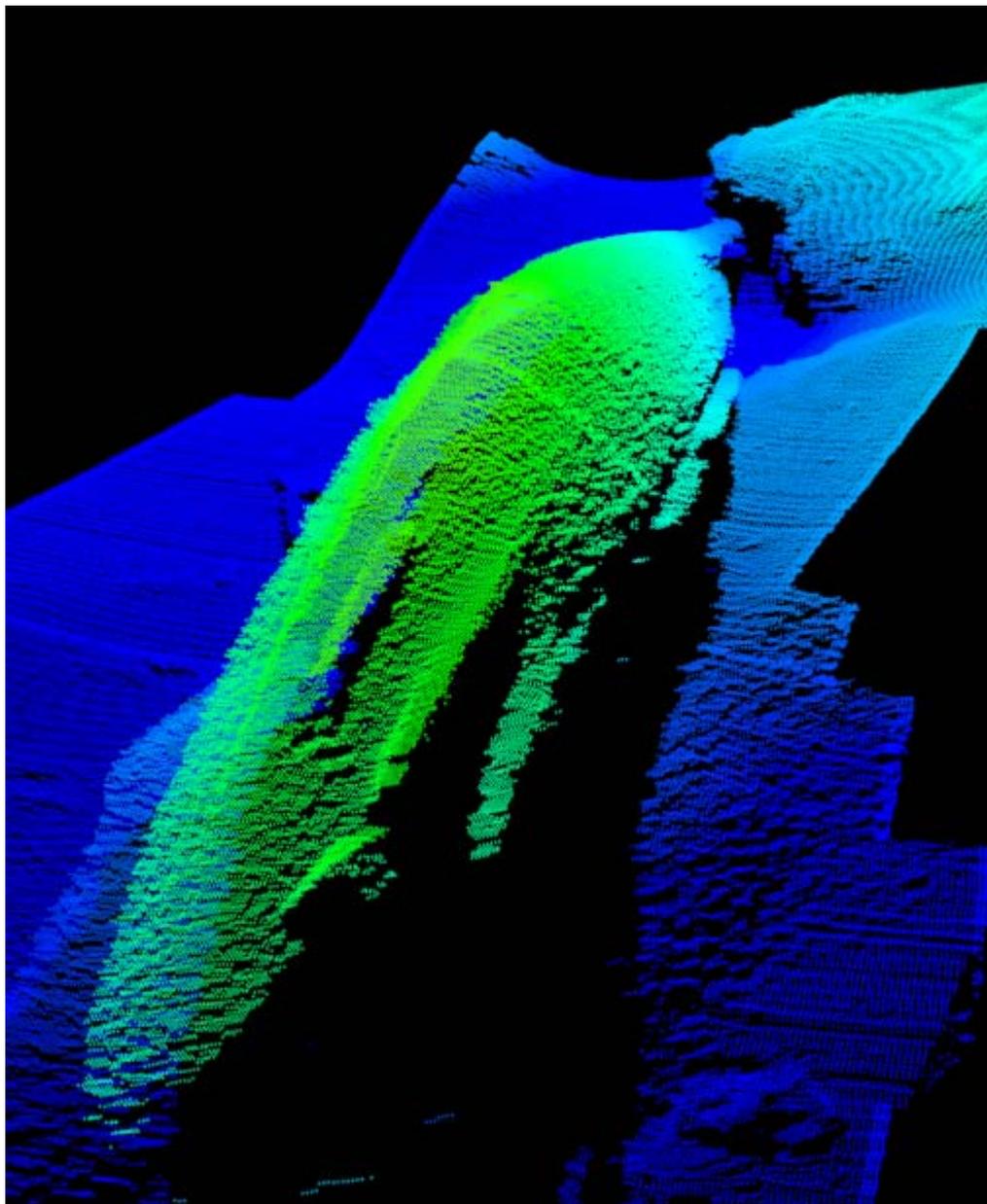
Come accennato alla fine del paragrafo precedente, esistono appositi software per la gestione del dato da MBES, dall'acquisizione del dato grezzo, al suo trattamento in base ai dati provenienti dai sensori ausiliari (MRU, sonda di velocità) e alla visualizzazione finale del dato sia in forma di scansione angolare (analogo al cosiddetto B-mode degli ecografi, si veda a questo proposito sez. 6.7.1 nel testo), sia di rappresentazione grafica tridimensionale. Questi software rappresentano un elemento determinante per la fruibilità del dato da MBES, che altrimenti sarebbe difficilmente gestibile a causa dell'elevato flusso di informazioni e della necessità di tenere conto di molte variabili simultaneamente (posizioni, assetti, velocità del suono).

Molte volte il dato MBES è affetto da rumore che può variare da punto a punto, in base al rapporto segnale/rumore ovvero all'intensità del segnale di *backscattering*, funzione dell'angolo di incidenza dell'onda sul fondo ma anche delle proprietà fisiche del fondale e della colonna d'acqua. Inoltre, quasi sempre una mappa della batimetria di un'area del fondale marino è ricostruita a partire da strisce corrispondenti a linee di navigazione che possono sovrapporsi, creando quindi zone in cui esistono più dati per uno stesso punto. Per questo motivo, i software più avanzati includono degli algoritmi di valutazione dell'incertezza del dato batimetrico basati sul grado di affidabilità del dato stesso, in modo che nella media effettuata su più dati sia possibile assegnare pesi diversi a dati acquisiti in condizioni diverse, e anche con strumentazione di tipo diverso. Questa valutazione prescinde totalmente dalle caratteristiche tecniche dei singoli apparecchi, MBES o sensori ausiliari, che al più possono quantificare un potere risolutivo del sistema in distanza o in angolo, ma non necessariamente possono tradursi semplicemente in una data accuratezza del dato batimetrico, che

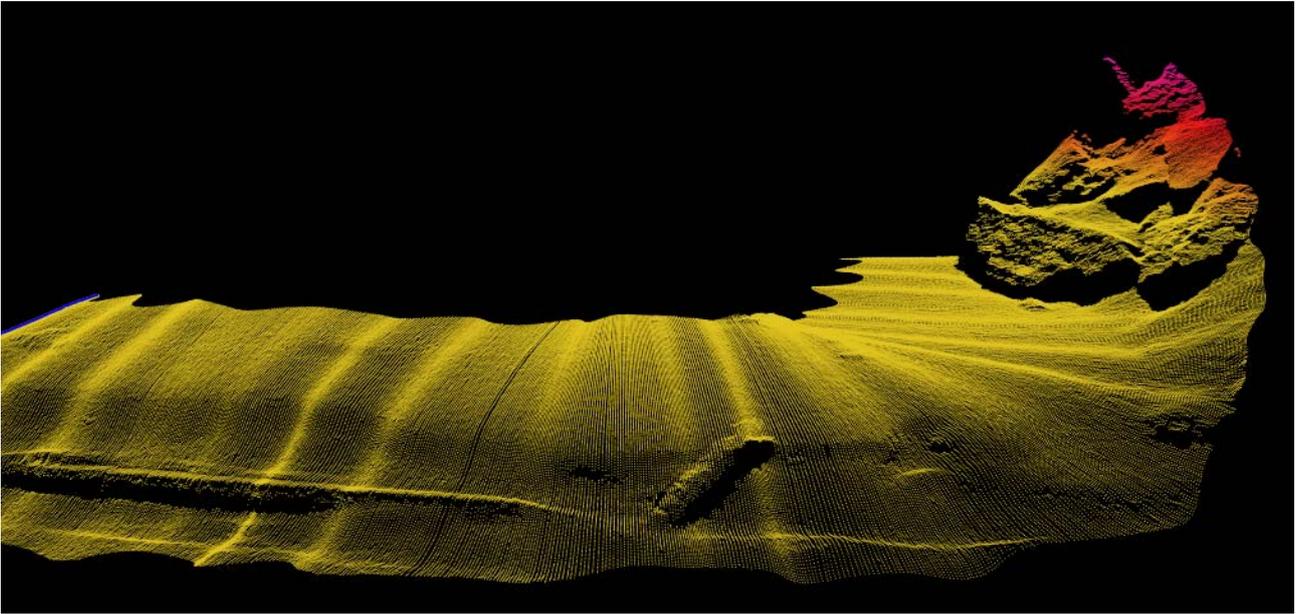
dipende in maniera complessa da un gran numero di fattori, come visto finora. Questo ultimo argomento, legato all'assegnazione di un'incertezza complessiva (o combinata) al dato batimetrico, costituisce attualmente un argomento di punta per studi e ricerche nel settore [4,5].

Esempi di immagini da rilievo MBES

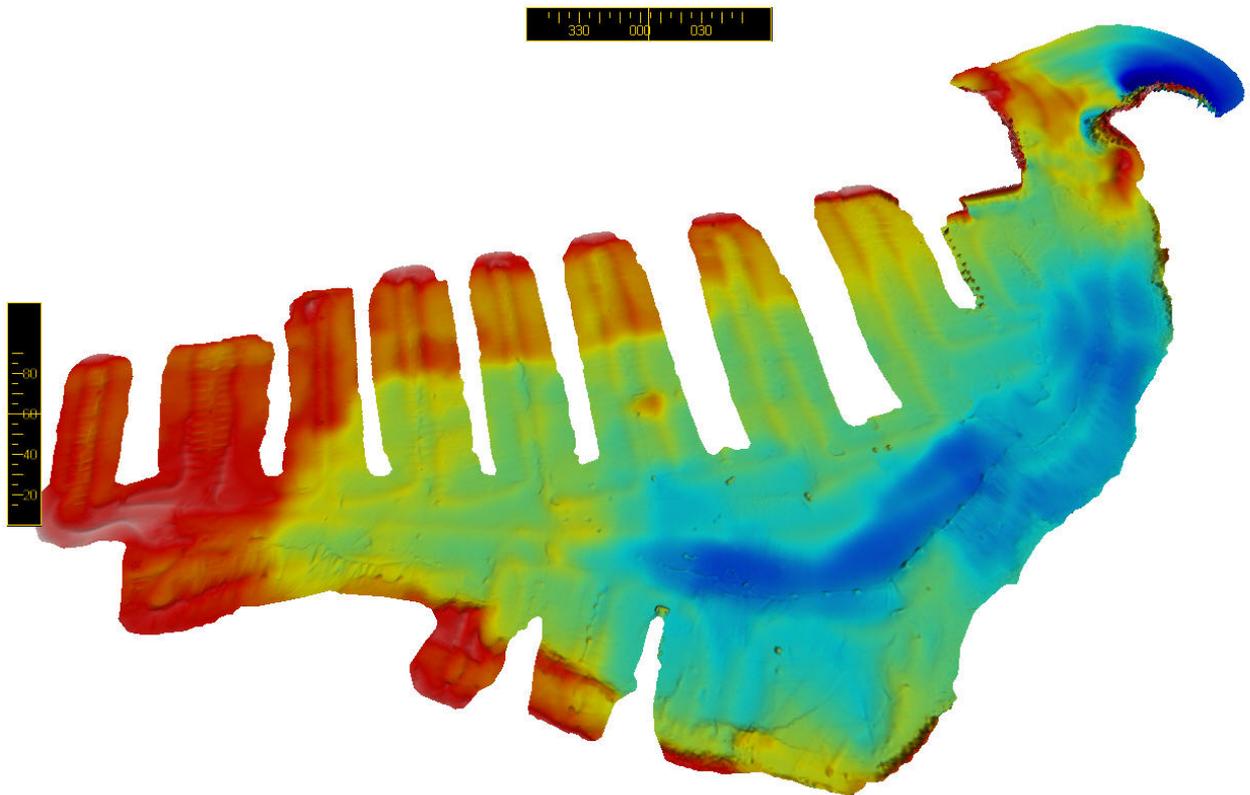
Le immagini che seguono sono riprodotte per gentile concessione di Ageotec Srl.



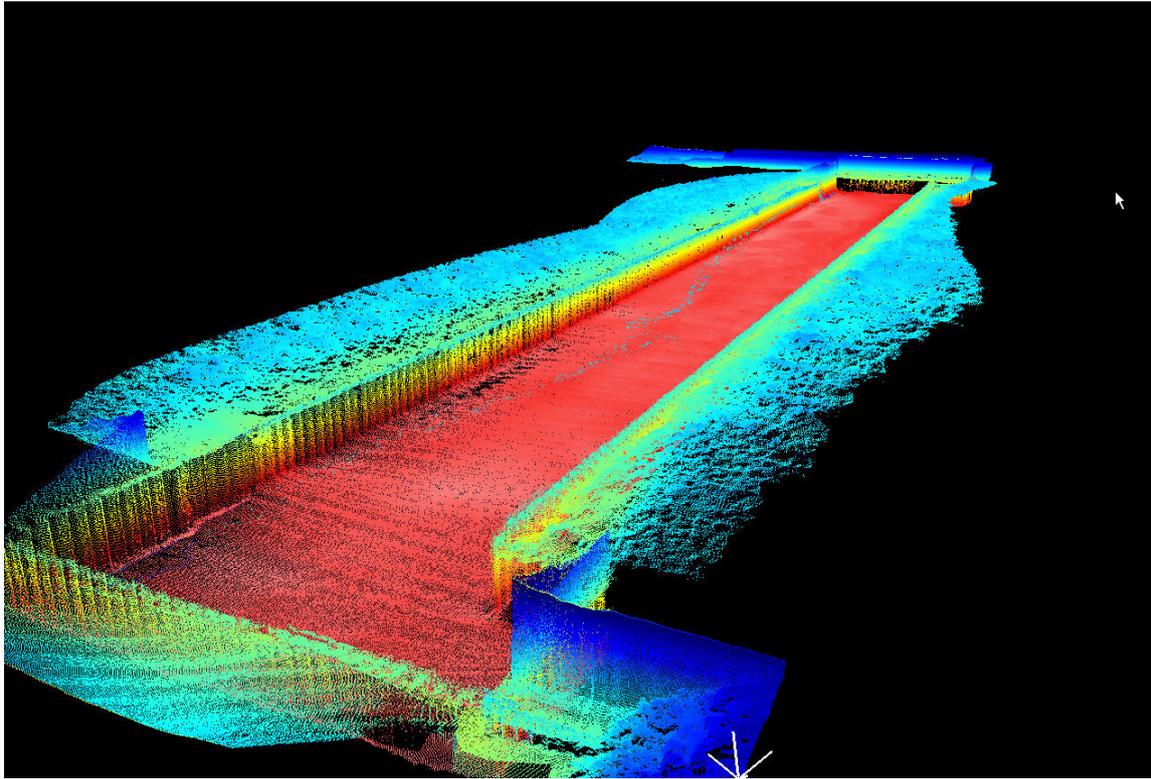
Imbarcazione affondata



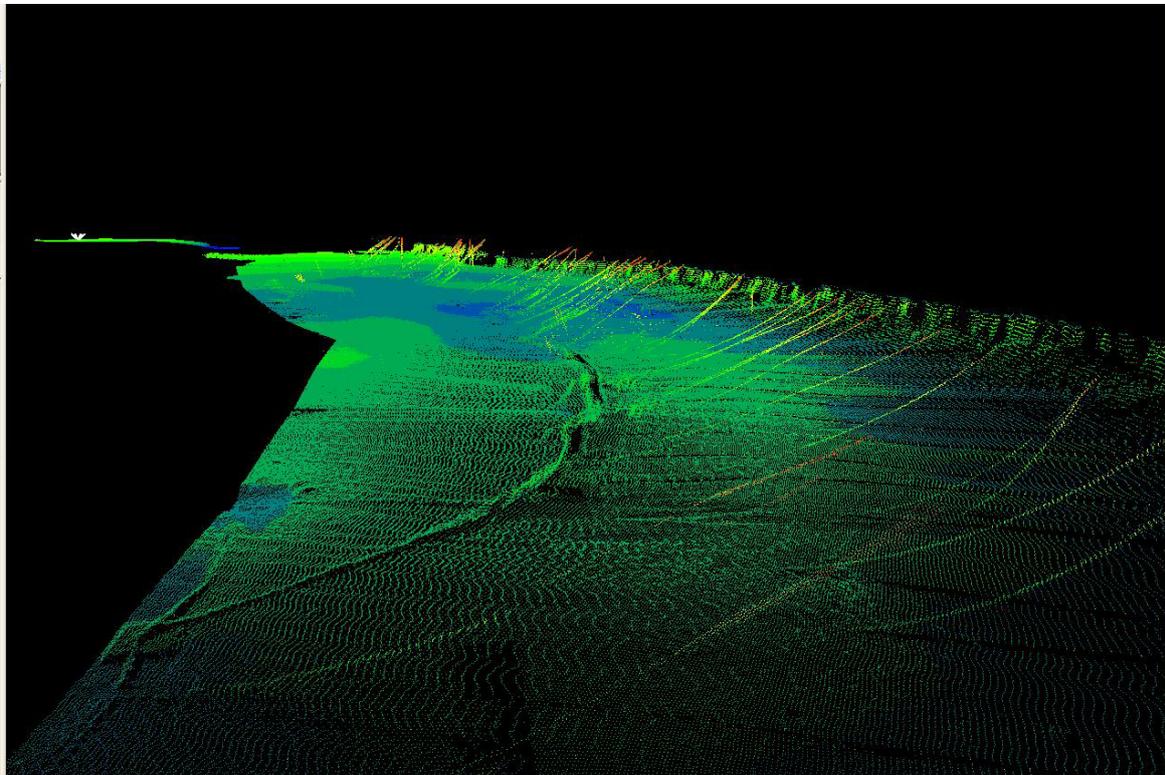
Condotta sottomarina (in primo piano in basso) e formazioni rocciose (sulla destra)



Batimetria di area portuale



Trincea sottomarina



Linee di ormeggio

Bibliografia

- [1] V. Renard, J.P. Allenou, *Sea Beam, Multi-beam echo-sounding in "Jean Charcot"*, International Hydrographic Review, LVI (1), 1979.
- [2] *Norbit iWBMSc Compact Integrated Wideband Multibeam Sonar*, <http://www.norbit.no>.
- [3] X. Lurton, *An introduction to Underwater Acoustics, principles and applications*, Springer, 2010.
- [4] B.R. Calder, *Automatic statistical processing of Multibeam Echosounder data*, International Hydrographic Review, vol. 4, n. 1, 2003.
- [5] A. Yuhui, R. Allen, *Combining interferometry soundings with angle uncertainty and signal to noise ratio into data processing for sea floor charting*, Oceans 2012 Conference Proceedings, <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANS.2012.6405088>.