

Rilievi multibeam per il monitoraggio morfo-batimetrico della coltivazione di bacini di cava sottofalda

Simone Busoni (*), Roberto Francese (**), Massimo Giorgi (**), Aldino Bondesan (***)

(*) Provincia di Treviso, Settore Ecologia e Ambiente, Via Cal di Breda n. 116, 31100 Treviso, sbusoni@provincia.treviso.it

(**) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, OGS, Borgo Grotta Gigante 42/C, Sgonico (TS), rfrancese@inogs.it; mgiorgi@inogs.it

(***) Università di Padova, Dipartimento di Geoscienze, Via Gradenigo 6, 35131 Padova (Italy), aldino.bondesan@unipd.it, +39-049-8274085, +39-0421-326532

Riassunto

Il lavoro descrive le basi teoriche e le metodologie operative dei rilievi morfo-batimetrici dei fondali di una serie di cave sottofalda ubicate nel settore occidentale del territorio provinciale di Treviso. Le misure sono state effettuate con un dispositivo MBES (Multi Beam Echo Sounder) installato a bordo di un'imbarcazione, predisposta per gli scopi del progetto, dotata di sistema di navigazione e di posizionamento GPS (Global Positioning System) differenziale. I rilievi hanno riguardato un totale di 20 unità lacustri, appartenenti a 13 bacini, ubicati nella fascia di media pianura compresa tra Treviso e Castelfranco Veneto.

Abstract

This paper describes the theoretical basis and operational methods of morpho-bathymetric surveys of the seabed in a series of inundated quarries located in the western part of the province of Treviso. The measurements were performed with a MBES device (Multi Beam Echo Sounder) installed on board of a boat, prepared for the purposes of the project, with a differential GPS navigation and positioning system. The surveys covered a total of 20 quarries, from 13 basins, located in the plain between Treviso and Castelfranco Veneto.

Parole chiave: rilievo morfobatimetrico, *Multi Beam Echo Sounder* (MBES), cave

Inquadramento generale

La porzione della pianura padana compresa nel territorio della provincia di Treviso è caratterizzata dalla presenza di sistemi sedimentari aventi la morfologia a ventaglio tipica dei conoidi alluvionali, il cui apice si pone in corrispondenza degli sbocchi delle vallate prealpine, percorse durante le fasi glaciali del Quaternario dai ghiacciai del Piave e del Brenta [Fontana A. *et alii* (2004)].

I materiali solidi trasportati dai corsi d'acqua, in particolare durante le fasi di arretramento delle lingue glaciali, hanno dato luogo al materasso alluvionale che presenta una composizione stratigrafica peculiare, frutto del processo deposizionale alla sua stessa origine: interamente ghiaioso nella parte apicale prossima ai rilievi prealpini, si arricchisce, spostandosi verso la costa adriatica, in frazioni più fini (limoso – argillose) sino a interdigitarsi con i depositi marini e lagunari.

La struttura della pianura trevigiana è solitamente distinta in una zona di alta pianura, formata dalle porzioni apicali dei conoidi alluvionali, dove si rinvengono materiali prevalentemente grossolani (ciottoli pluricentrici, ghiaia in percentuale anche del 30% e sabbia) in spessori di centinaia di metri (almeno 300 nella parte più a ridosso dei rilievi), a cui segue una zona detta di media pianura, in cui la minore capacità di trasporto solido dei corsi d'acqua porta alla comparsa delle prime e via

via più frequenti lingue limoso – argillose a scapito dei termini a granulometria più grossolana, alla quale succede la bassa pianura, la parte più distale dei conoidi, caratterizzata dall'alternanza di materiali fini (limi e argille) con sabbie più o meno limose [Dal Prà *et alii* (1976) e Dal Prà *et alii* (1977)].

Questo assetto del sottosuolo riverbera sull'idrogeologia della pianura trevigiana, contraddistinta da un importante acquifero freatico alloggiato entro i depositi di alta e media pianura, al quale si sostituisce, dopo la cosiddetta “fascia delle risorgive” (dove l'acqua di falda viene spontaneamente a giorno), una struttura a falde confinate tra loro sovrapposte.

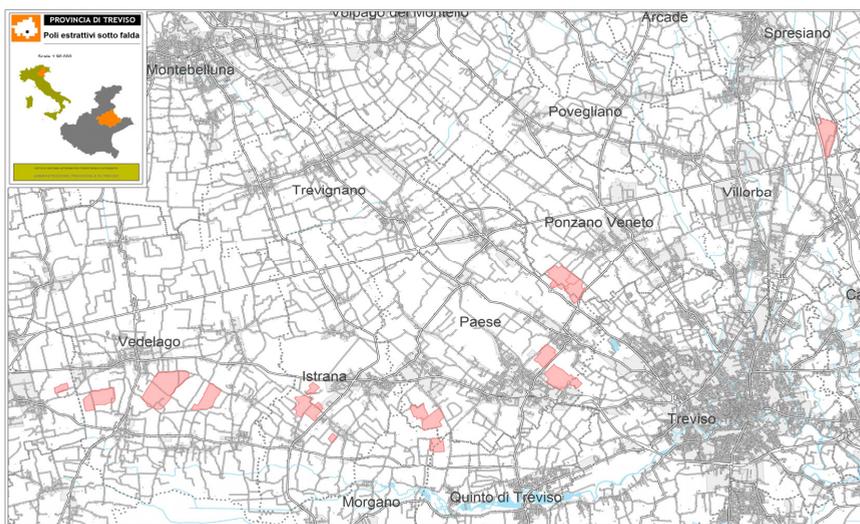


Figura 1. Ubicazione dei bacini investigati nella pianura trevigiana.

Nella zona di alta e media pianura, per l'elevata presenza di depositi grossolani, si concentra l'attività estrattiva di ghiaia e sabbia che assume, a livello regionale, notevole rilevanza (37 cave attive su 96 censite in Regione). Nelle cave di media pianura, dove il livello freaticometrico si trova più prossimo alla superficie, le profondità di scavo sono tali da superare il livello superiore della falda, in forza di autorizzazioni precedenti all'apposizione dello specifico divieto oggi vigente, con il risultato che in molte cave si formano veri e propri laghi, profondi talvolta svariate decine di metri.

In questa situazione, lo svolgimento dell'attività di controllo di competenza della Amministrazione Provinciale rappresenta una vera sfida alle difficoltà tecniche e operative che inevitabilmente si presentano nell'effettuare un rilievo batimetrico. Costi elevati e lentezza esecutiva hanno reso di fatto sinora irrealizzabile una campagna sistematica di controllo da parte degli uffici provinciali. È nata, quindi, la necessità di sperimentare un metodo di misurazione della batimetria e della morfologia dei fondali di cava che, oltre a essere rapido ed economicamente accessibile, fosse in grado di assicurare sia un'alta risoluzione, sia un'elevata attendibilità del dato finale.

I rilievi hanno riguardato un totale di 20 laghi di cava, appartenenti a 13 bacini estrattivi, ubicati principalmente nella fascia di media pianura compresa tra Treviso e Castelfranco Veneto (Figura 1). La superficie media di ciascun lago di cava è risultata pari a 136'100 m², con valori che variano da un massimo di circa 415'000 m² a un minimo di 23'300 m².

Metodologia di misura

Per le ragioni suddette, la scelta del metodo di rilevamento della morfologia del fondale si è basata sull'impiego del sistema *Multi Beam Echo Sounder* (MBES).

Strumentazione e cenni di teoria del metodo

Il sistema MBES rappresenta l'evoluzione del classico sonar batimetrico (*Single Beam Echo Sounder* – SBES). Si tratta di uno strumento capace di gestire simultaneamente molteplici energizzazioni e ascoltare ritorni su angoli anche superiori al centinaio di gradi. Il sistema MBES può essere descritto come un *sonar* acustico che rileva le distanze (noti il tempo di ritorno e la velocità del suono in acqua) tra la sorgente e il fondale o qualsiasi altro bersaglio presente sopra il fondale stesso. Il sistema si basa su un trasduttore composto da una serie di ricevitori che rilevano l'eco di ritorno del suono emesso dal trasmettitore dopo la riflessione da parte del fondale. Nel complesso si tratta di un sistema simile a quello del rilevamento *laser* da piattaforma aerea.

Nell'esecuzione del rilievo è stato impiegato un sistema RESON Sea Bat 8125 capace di misurare simultaneamente 240 fasci *sonar* su una apertura angolare di 120 gradi e con una frequenza di energizzazione massima di 40 Hz.

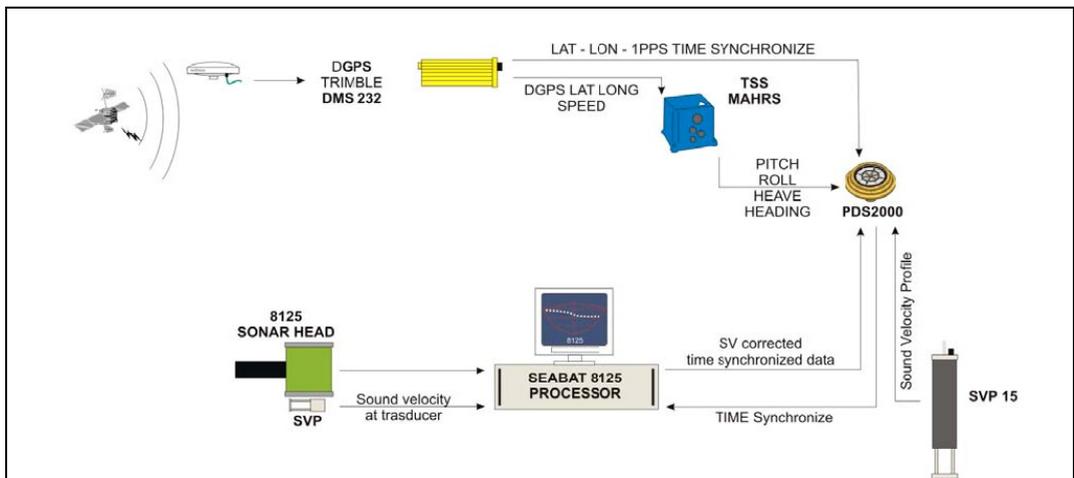


Figura 2. Schema di funzionamento del multibeam impiegato per il progetto (elaborata da E. Gordini modificato da L. Facchin, R. Romeo).

L'intero sistema è piuttosto articolato, in relazione alla necessità di conoscere per ciascuna energizzazione la posizione spaziale e l'orientamento della "testa" radiante (*Sonar Head* in Figura 2). Il segnale in uscita dal trasduttore ha una frequenza centrale di 455 KHz che consente di ottenere dei ritorni sino ad una profondità massima di 120 m. In condizioni ottimali la risoluzione verticale nominale risulta pari a 0.006 m mentre la risoluzione orizzontale, con una spaziatura tra i singoli fasci pari a 0.5 gradi, risulta di 0.025 m. L'apertura angolare di 120 gradi del fascio radiante consente di realizzare uno *swath* di copertura la cui larghezza, su un fondale piatto, è di circa 3.5 volte la distanza tra il trasduttore e il fondo (sostanzialmente pari alla profondità dello specchio d'acqua al di sotto dell'imbarcazione). In presenza di fondali inclinati (come nel caso dei bacini di cava sottofalda), lo *swath* copre una fascia di maggior larghezza con una leggera diminuzione del potere risolutivo orizzontale, che rimane comunque di ordine centimetrico.

Gli altri componenti più importanti del sistema, oltre all'ecoscandaglio Sea Bat 8125, sono:

1. un dispositivo GPS differenziale Trimble DSM 232 su rete Omnistar HP;
2. un'unità inerziale (IMU – *Inertial Measurement Unit*) TSS MAHRS (*Meridian Attitude & Heading Reference System*);
3. una sonda per la misura del profilo verticale della velocità di propagazione del suono nella colonna d'acqua.

I dati in uscita dai diversi sensori di posizione, di orientamento e di velocità vengono gestiti simultaneamente mediante un apposito *software* di controllo (RESON PDS2000) che, oltre all'analisi in tempo reale dei dati, consente (in virtù della ricezione del segnale GPS) di percorrere con l'imbarcazione traiettorie di misura pre-impostate.

Procedure di acquisizione e rete di misura

Il sistema utilizzato ha permesso di rispondere positivamente alle esigenze di certezza sulla posizione della apparecchiatura di misurazione, tramite dispositivi GPS, e sulla univocità tra la lettura strumentale effettuata e il bersaglio "illuminato", rapporto tutt'altro che scontato quando si impiegano piattaforme di acquisizione soggette a svariati movimenti non controllabili a priori, attraverso una complessa procedura di calibrazione che sarà illustrata nel seguito.

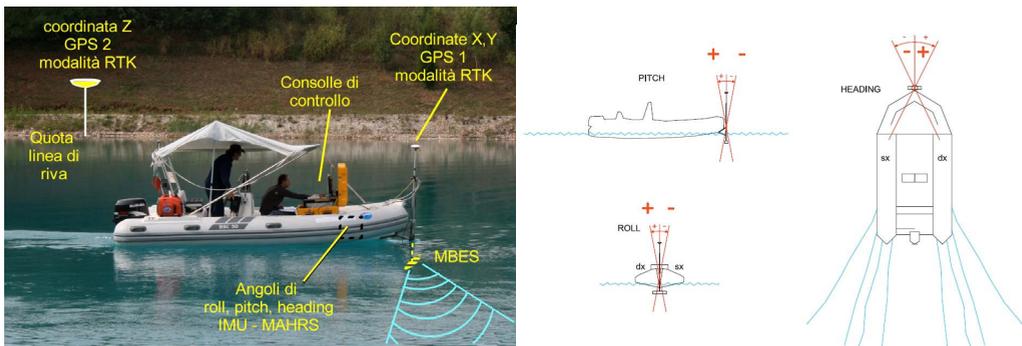


Figura 3a (sinistra). Sistema di misura impiegato per il progetto montato su natante; fig. 3b (destra) – Schema degli angoli di roll/pitch ed heading di un sensore installato su imbarcazione.

Per il rilievo dei fondali di cava il sistema MBES, è stato installato a bordo di un'imbarcazione predisposta e ottimizzata per il rilievo (Figura 3a). In particolare, per gli scopi del progetto, è stato realizzato uno specifico supporto frontale, montato nella zona di prua della chiglia, che consentisse il movimento e la rotazione della "testa" in fase di installazione o durante il superamento di cavi di ormeggio e trazione delle draghe galleggianti (*redinger*), spesso presenti a pelo d'acqua. La "testa" propriamente detta viene infilata su un tubo metallico, a sua volta inserito nella guida del supporto frontale descritto in precedenza. All'estremità superiore del tubo in metallo e, quindi, sulla verticale della "testa", è stata installata una prima antenna GPS per il rilievo in continuo della posizione planimetrica del centroide del sistema MBES. Questo primo dispositivo GPS (Trimble DMS 232) riceve la correzione differenziale dalla rete FUGRO Omnistar HP e consente di ottenere, in tempo reale, la posizione planimetrica della "testa", con una precisione di ordine decimetrico.

Un secondo dispositivo GPS (Trimble R7 GNSS), in configurazione differenziale *master/rover*, è stato utilizzato per il rilievo plani-altimetrico dei capisaldi di cava e della quota zero del rilievo MBES, posta in corrispondenza della linea di riva esistente il giorno del rilievo. La stazione base durante il rilievo dei bacini orientali è stata ubicata sul caposaldo OGS sito in comune di Morgano (zona sud – est del territorio provinciale) e collegata al *rover* per mezzo della rete di telefonia cellulare. Le misure sono state successivamente effettuate con base libera nella zona di cava, "agganciata" alla rete regionale Trimble via rete di telefonia cellulare e contemporaneamente in collegamento via radio con il *rover* per la trasmissione in tempo reale (RTK – *Real Time Kinematic*) delle correzioni differenziale. La precisione di questo secondo rilievo è risultata uguale o inferiore al centimetro. Per ragioni di consistenza, il dato GPS, acquisito come Latitudine/Longitudine riferite all'ellissoide nativo (WGS84), è stato convertito in coordinate metriche utilizzando la proiezione UTM33, sia per la visualizzazione che per la pre-elaborazione del dato. Le quote sono

state invece trasformate da ellissoidiche in ortometriche impiegando un modello geoidico di elevato dettaglio della pianura veneto-friulana.

Nella fase iniziale del rilievo sono stati misurati i parametri geometrici del sistema di rilevazione, calcolando gli *offset* orizzontali e verticali esistenti tra GPS, IMU e MBES, determinando, inoltre, la profondità della “testa” rispetto alla superficie dell’acqua.

Questi parametri sono stati inseriti nel *software* (PDS2000) di controllo sia della navigazione che dell’acquisizione. Il medesimo *software* ha ricevuto ed elaborato in tempo reale anche i dati di posizione derivanti dalla lettura del segnale GPS e di assetto dell’imbarcazione ottenuti con la lettura della IMU.

Calibrazione

La posizione della “testa” nel corso delle misurazioni è affetta da un errore di posizione dovuto sia all’imperfetta installazione sull’imbarcazione (componente “statica”), sia ai movimenti del natante stesso durante la navigazione (componente “dinamica”); questo errore di posizione è rappresentato mediante gli angoli di *roll*, *pitch* e *heading* (Figura 3b).

Lo scopo della fase di calibrazione della strumentazione è determinare l’orientamento spaziale della “testa” installata su una imbarcazione ipoteticamente ferma, stimando una terna “statica” degli angoli di *roll*, *pitch* e *heading*. Nel caso in cui la “testa” sia perfettamente orizzontale e con l’asse maggiore ortogonale all’asse dell’imbarcazione, i tre angoli assumono un valore pari a 0 gradi.

La stima della componente statica di *roll*, *pitch* e *heading* viene eseguita effettuando una serie di scansioni di calibrazione; nella fase iniziale del rilievo essa viene stimata grossolanamente e inserita nel *software* di gestione del sistema, per essere successivamente ricalcolata in modo fine durante le procedure di elaborazione del dato.

Il valore dell’angolo di *pitch* viene stimato acquisendo i dati lungo due linee, alla stessa velocità e sulla stessa rotta ma con direzione opposta, di una porzione del fondale dove sia presente una struttura ben evidente e di dimensioni tali da poter essere rilevata dal sistema MBES. Lo spostamento apparente della struttura, in avanti o indietro, in uno *swath* rispetto all’altro, consente di determinare questo angolo.

Per stimare il valore dell’angolo di *roll*, si acquisiscono i dati, sempre da due linee in direzione opposta e alla stessa velocità lungo la medesima rotta, ma di un fondale possibilmente piatto (condizione non frequente nei laghi di cava). La traslazione in quota del fondo in uno *swath* rispetto all’altro consente di ottenere una stima del valore dell’angolo di *roll*.

Per la stima dell’angolo di *heading*, infine, si acquisiscono i dati lungo due rotte tra loro parallele, identificando chiaramente un bersaglio da “illuminare”, prima sul lato sinistro e poi sul lato destro delle due diverse linee di acquisizione. La stima del valore di *heading* si ottiene ruotando i dati sino a portare in sovrapposizione il bersaglio.

Alla componente statica si somma una terna “dinamica” degli angoli di *roll*, *pitch* e *heading*, espressione delle continue variazioni di assetto della imbarcazione causate dal moto irregolare del natante (con accelerazioni e rallentamenti che ne determinano l’affondamento di poppa o di prua) e dal moto ondosso. La terna angolare dinamica viene acquisita in tempo reale dal *software* PDS2000, interfacciato con le bussole giroscopiche della IMU, che opera la correzione, parimenti in tempo reale, per ciascun fascio.

Un ultimo errore da compensare, detto di *time*, è dovuto al ritardo temporale, di natura elettronica, esistente tra la ricezione del segnale GPS e l’associazione tra posizione dell’imbarcazione (e quindi della “testa”) e dati acquisiti. Per stimare questo errore si acquisisce la stessa linea per due volte con velocità differenti. Un eventuale bersaglio (chiaramente identificabile nei due *swath*), risulterà più avanti o più indietro a seconda che vi sia un anticipo o un ritardo di sincronia.

In fase di acquisizione si procede anche alla misura del profilo verticale della velocità di propagazione del suono in acqua. La velocità, infatti, cambia in funzione della temperatura

dell'acqua stessa. La funzione profondità/velocità viene utilizzata per migliorare la trasposizione in distanza sorgente/bersaglio, dei tempi di arrivo rilevati.

Copertura

La copertura delle unità lacustri dei bacini di cava è stata ridondante, nel senso che gli *swath* ottenuti con le singole “spazzate” sono stati acquisiti in condizioni di parziale sovrapposizione tra loro. Questo tipo di acquisizione è stata possibile in virtù del controllo in tempo reale sia della navigazione che della mappatura morfobatimetrica del fondale.

La risoluzione orizzontale della griglia di acquisizione, dipendente anche dalla profondità investigata, è risultata in ogni caso di ordine pluricentimetrico, garantendo un estremo dettaglio nella lettura dei gradienti di quota presenti sul fondale.

Elaborazione dei dati

L'elaborazione del dato è stata effettuata inizialmente su piattaforma PDS2000 (lo stesso *software* impiegato per l'acquisizione), un programma utilizzato in campo scientifico e industriale per l'elaborazione di batimetrie marine e terrestri. Successivamente i dati sono stati elaborati mediante il software MATHWORKS Matlab e infine importati nel programma AUTODESK Autocad per la generazione delle mappe definitive. L'elaborazione è stata piuttosto articolata ed è risultata composta dalle seguenti fasi:

- stima e correzione “fine” degli errori di *roll/pitch/heading* e di *time* delle singole scansioni;
- rimozione con metodi di analisi visuale e/o statistici di eventuali valori dispersi e costruzione di un primo modello *grid* ad alta risoluzione con apertura di maglia variabile da 0.25 m a 0.50 m;
- analisi del modello *grid* e ulteriore rimozione di eventuali *spike* presenti nei dati;
- esportazione della mappa morfobatimetrica in formato ASCII XYZ;
- importazione dei dati in Matlab e inserimento nei dati di una fascia di vincolo composta dalla linea di riva (quota zero del rilievo) e da altri due anelli a quota superiore e inferiore alla linea di riva;
- costruzione di un nuovo modello *grid* a media risoluzione;
- traslazione verticale della mappa utilizzando la quota della linea di riva riferita ai capisaldi del bacino di cava e inserimento dei capisaldi di cava nel sistema di coordinate WGS84/UTM33;
- ri-proiezione dei dati, sulla base delle coordinate dei capisaldi, dal sistema WGS84/UTM33 al sistema di coordinate locali;
- importazione del *cluster* batimetrico, della linea di riva e dei capisaldi nel programma Autocad e generazione del *file* di uscita nel formato previsto.

Le correzioni angolari statiche dei valori di *roll*, *pitch* e *heading* vengono effettuate mediante un modulo specifico del software PDS2000. L'algoritmo di analisi stima, con un metodo di *trial and error best fitting* per diversi valori angolari di rotazione, la minima differenza esistente tra i due insiemi di dati, acquisiti secondo rotte “andata e ritorno” oppure lungo due linee parallele, come illustrato al paragrafo precedente.

La seconda fase di elaborazione consiste nell'individuazione e nella rimozione di eventuali valori dispersi all'interno della spazzata. Per questo tipo di analisi vengono comunemente impiegati dei filtri di tipo statistico (devianza, coerenza, etc.) e dei filtri di tipo spaziale (angoli di uscita, quota, etc.). Questa operazione, effettuata su ogni singola linea di acquisizione, è risultata essere la più onerosa in termini temporali.

L'aggregazione delle diverse linee e la costruzione del modello *grid* è stato, al contrario, un processo relativamente breve, pur risultando molto influenzato dalla capacità del processore, in particolare se il numero di punti-misura non è ingente.

L'elaborazione successiva è stata condotta in ambiente Matlab ed è stata particolarmente critica in quanto in questa fase il dato MBES è stato "chiuso", imponendo come condizione al contorno la linea di riva, e ri-strutturato su una nuova griglia. La linea di riva è stata associata ai dati con l'impiego di tre anelli: la riva alla quota 0.0, un anello inferiore alla quota di - 0.5 m e un anello superiore alla quota di +1.0 m. Dopo questa rielaborazione si è proceduto a un sottocampionamento della mappa morfobatimetrica su una griglia ad apertura da metrica a plurimetrica, per ridurre la dimensione del *dataset* e renderlo facilmente "leggibile" dai *software* comunemente in uso per il monitoraggio dei volumi di estrazione.

A questo punto la mappa, completa della linea di riva, è stata traslata verticalmente agganciando la coordinata Z della linea di riva, rilevata contestualmente all'acquisizione dei dati MBES in diversi punti del bacino, e alla Z della rete locale dei capisaldi di cava.

In virtù del fatto che la coordinata Z del fondale risultante dal rilievo ha anche implicazioni di tipo fiscale, si è proceduto a considerare l'intera catena di potenziali errori di misura (come, ad esempio, la rilevazione della quota con il sistema GPS) e tutte le tolleranze strumentali (velocità del suono in acqua, risoluzione verticale del MBES, etc.).

Gli errori sono stati cautelativamente sommati in modo costruttivo e sottratti dalla quota del fondale che è stato, conseguentemente, traslato verso l'alto di diversi centimetri in modo da prevenire eventuali contestazioni sulla propagazione dell'errore di misura indotto dalla catena strumentale.

Dopo la correzione della coordinata Z sono stati inseriti in mappa i capisaldi locali rilevati nativamente nel sistema di riferimento WGS84/UTM33. La mappa MBES, sulla base delle coordinate planimetriche dei capisaldi, è stata nuovamente proiettata dal sistema WGS88/UTM33 al sistema di riferimento locale.

Risultati

Le misure con sistema MBES hanno consentito di ottenere una mappa morfobatimetrica ad altissima risoluzione dei fondali delle 20 unità lacustri dei 13 bacini estrattivi rilevati nell'ambito di questo progetto.

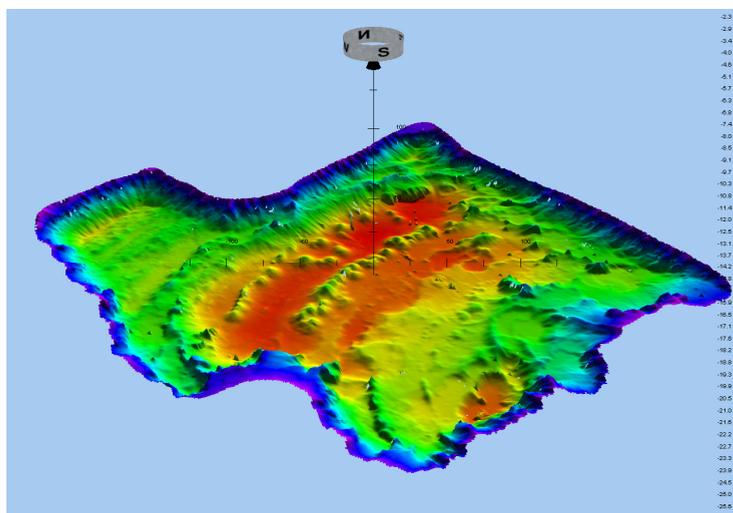


Figura 4. Esempio di batimetria di fondale di cava.

Il dettaglio morfologico del fondale, visibile nella mappa riportata a titolo esemplificativo in figura 4, consente di effettuare delle letture con una risoluzione che, alle basse e medie profondità, può

arrivare anche a 0.1 m. Nell'esempio di figura 4, tra i vari particolari presenti in mappa (scarpate, dossi, canyon, etc.) si possono osservare chiaramente anche i movimenti ad arco eseguiti dalla "cucchiaia" del *redinger* durante l'escavazione del fondale.

È significativo far notare come tutti i punti presenti nelle mappe finali rappresentano delle celle (la cui apertura è compresa tra 0.25 m e 0.50 m), coperte con un numero di echi variabile da uno a qualche decina. Non si tratta di un dato interpolato, bensì di un dato sottocampionato rispetto a quello acquisito durante il rilievo, esattamente l'opposto di quanto normalmente avviene affidandosi ai classici rilievi con ecoscandaglio monocanale.

La presenza in alcune mappe di qualche piccola zona priva di dati (*no-data zone*), la cui estensione non supera comunque qualche frazione di unità percentuale dell'intero bacino, dipende dalla non perfetta "saldatura" tra due *swath* oppure da "gradini" morfologici del fondale che hanno impedito la perfetta "illuminazione" di alcuni settori del fondale stesso. In qualche caso queste zone sono dovute alla presenza di diversi punti-misura dispersi la cui causa può essere attribuita alla forte torbidità dell'acqua in vicinanza della draga in fase di attività. Quest'ultimo problema è stato osservato in tutte le "spazzate" acquisite nelle zone di operazione della draga. In molti casi, proprio in vicinanza della draga, è stato necessario ripetere le scansioni per la presenza di riflettori fantasma causati dalla sospensione di materiale fine.

Dalle mappe morfobatimetriche è stato, inoltre, possibile rielaborare il dato in sezioni verticali del bacino di cava e operare il confronto tra lo stato di fatto rilevato e il progetto di coltivazione di ciascun sito estrattivo, al fine di accertare l'esistenza di escavazioni in difformità rispetto a quanto previsto dalle autorizzazioni rilasciate nonché di quantificare con precisione le volumetrie di scavo in eccesso, elemento, questo, essenziale per l'irrogazione delle sanzioni di legge.

Bibliografia

- Fontana A., Mozzi P. e Bondesan A. (2004) *L'evoluzione geomorfologica della pianura veneto-friulana* in *Geomorfologia della provincia di Venezia* a cura di Aldino Bondesan e Mirco Meneghel – Esedra Editrice, pp.113-138.
- Dal Prà A., Bellati R., Costacurta R. e Sbettega G. (1976) *Distribuzione delle ghiaie nel sottosuolo della pianura veneta* in "Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, 28(12)", C.N.R. Roma
- Dal Prà A., Bellati R., Antonelli R., Costacurta R. e Sbettega G. (1977) *Distribuzione dei materiali limoso-argillosi nel sottosuolo della pianura veneta* in "Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, 34(4)", C.N.R. Roma.