

# **UNIVERSITA' DEGLI STUDI MILANO-BICOCCA**

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie



**Dottorato di ricerca in Scienze della Terra XXII ciclo**

**RICOSTRUZIONE E VALORIZZAZIONE DEL PAESAGGIO  
ARCHEOLOGICO IN AMBIENTE COSTIERO MEDITERRANEO TRAMITE  
TECNOLOGIE INNOVATIVE NON INVASIVE**

Relatore: **Prof. Cesare Corselli**

Correlatore: **Prof. Giorgio Cassiani**

Tesi di dottorato:

dott. **Bruno Vittorio**

Matricola n. 047382

*Anno Accademico 2008-2009*

*Ricostruzione e valorizzazione del paesaggio archeologico in ambiente costiero mediterraneo tramite tecnologie innovative non invasive.*

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>METODI GEOFISICI APPLICABILI PER LA RICERCA ARCHEOLOGICA A TERRA</b>	<b>7</b>
2.1	PREMESSA	7
2.2	METODI GEOFISICI	9
2.3	METODI GEOFISICI ATTIVI	10
2.4	METODI GEOFISICI PASSIVI	11
2.5	DESCRIZIONE DEI METODI	11
2.5.1	Metodi elettrici	11
2.5.2	Geoelettrica	11
2.5.2.1.1	Strumentazione	13
2.5.2.1.2	Operazioni di campo:	15
2.5.2.1.3	Processing, inversione ed interpretazione	18
2.5.3	Polariizzazione indotta	19
2.5.4	Georadar	21
2.5.5	Metodo Elettromagnetico	24
<b>3</b>	<b>METODI GEOFISICI APPLICABILI PER LA RICERCA ARCHEOLOGICA IN MARE</b>	<b>25</b>
3.1	OCEANOGRAFIA ACUSTICA	26
3.1.1	Multi beam	29
3.1.2	SUB BOTTOM	33
3.1.3	Side scan sonar	36
3.2	OCEANOGRAFIA OTTICA	36
<b>4</b>	<b>METODI GEOFISICI APPLICATI IN ACQUE POCO PROFONDE</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>PROGETTO PROTOTIPO IMBARCAZIONE</b>	<b>38</b>
5.1	FASI DI MONTAGGIO	43
<b>6</b>	<b>METODI GEOFISICI UTILIZZATI</b>	<b>44</b>
6.1	MULTI BEAM	44
6.1.1	Strumentazione utilizzata e principi	44
6.1.2	Acquisizione dati	47
6.1.2.1.1	PDS2000	47
6.2	SUB-BOTTOM PROFILER	49
6.2.1	Strumentazione utilizzata e principi	49
6.2.2	Acquisizione dei dati	50
6.2.3	Il software e parametri di acquisizione	51
6.2.4	Trattamento dati sub bottom profiler	52

6.3	GEOELETRICA.....	53
6.3.1	Strumentazione utilizzata e principi.....	53
6.3.2	Acquisizione dei dati.....	56
6.3.3	Il software e parametri di acquisizione.....	56
6.3.4	Trattamento dati di resistività.....	58
<b>7</b>	<b>SITI STUDIATI.....</b>	<b>60</b>
7.1	SITO DI MOTHIA.....	60
7.1.1	Storia.....	60
7.1.2	Risultati.....	61
7.1.3	Dati multibeam.....	62
7.1.4	Dati sub bottom.....	63
7.2	SITO DI NORA.....	67
7.2.1	Storia.....	67
7.2.2	La laguna di Nora.....	68
7.2.3	Risultati.....	71
7.3	DATI SUB BOTTOM.....	72
7.3.1	Zona profonda.....	76
7.4	GEOELETRICA.....	89
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>97</b>

## **1 INTRODUZIONE**

La prospezione archeologica e lo scavo di un'antica città è un'operazione delicata, lenta e perciò costosa.

Spesso, e soprattutto nell'area mediterranea, le città venivano costruite nei pressi della costa per permettere lo svolgimento di attività commerciali lungo le vie di trasporto più comode per le epoche passate. Successivi movimenti relativi tra la terraferma e il mare, in scenario con una sedimentazione accentuata dall'azione dei venti e del mare stesso, hanno portato al ricoprimento di queste città e quasi regolarmente dei loro sistemi portuali. La prospezione archeologica in questi siti è spesso complicata dalla difficile "lettura" della parte a mare e perciò dei rapporti tra strutture su terraferma e strutture a mare.

Nasce quindi come importante necessità quella di una prospezione complessiva del sito, che è ovviamente molto costosa e lenta e perciò poco fruibile se non in tempi molto lunghi.

Questi siti sono difficilmente valorizzabili. Una prospezione preliminare attuata con metodologie innovative di tipo non distruttivo, può consentire in tempi brevi una visualizzazione complessiva del sito e ad ottimizzare i costi dell'intervento diretto, proponendolo solo su aree di interesse.

Quasi tutti i siti di interesse archeologico fino ad oggi sono stati poco studiati con metodi di tipo indiretto a causa dell'impossibilità di operare in acque basse, in quanto le aree di interesse sono quasi sempre all'interno di lagune chiuse con fondali che sono molto spesso al disotto di un metro di profondità.

Il presente lavoro di tesi è stato svolto in concomitanza ad un progetto firb che individuava al suo interno alcune aree di interesse archeologico con caratteristiche che rispecchiano quanto esposto poc'anzi.

Tale progetto aveva lo scopo di provare vari metodi geofisici per verificarne l'applicabilità in condizioni così estreme e di verificare sui siti indagati l'eventuale esistenza di reperti archeologici sepolti.

Per quanto riguarda le strumentazioni utilizzate si è testato l'utilizzo di un ecoscandaglio ad altissima risoluzione (multi beam Reason 8125), un profilatore sismico a riflessione o sub bottom profiler (Innomar Ses 2000 Compact) e di un georesistivimetro equipaggiato con elettrodi galleggianti per rilievi in acqua (Iris Syscal Pro), che verranno descritti nei capitoli successivi.

Analizzando in dettaglio la struttura del presente lavoro di tesi, i capitoli sono di seguito descritti.

Nel secondo capitolo sono stati trattati i metodi geofisici tradizionalmente utilizzati per la ricerca archeologica a terra, nel terzo capitolo sono stati descritti i metodi indiretti utilizzati in mare per la prospezione archeologica, mentre nel quarto capitolo si spiega come si è tentato di coniugare diversi metodi: di mare e di terra ed applicarli in zone di fondali bassi, difficilmente rilevabili con imbarcazioni convenzionali.

Nel quinto capitolo si affronta in particolare il progetto e la costruzione di un prototipo sperimentale di imbarcazione adatto ai rilievi in acque basse.

Nel capitolo sesto invece si entrerà in dettaglio dei vari metodi utilizzati nelle campagne di rilievo eseguite.

Infine nel settimo capitolo verranno presentati i risultati dei rilievi e nell'ottavo capitolo le conclusioni del presente lavoro di tesi.

## **2 METODI GEOFISICI APPLICABILI PER LA RICERCA ARCHEOLOGICA A TERRA**

### ***2.1 Premessa***

Scopo delle tecniche di indagine geofisiche è quello di ottenere informazioni sulla natura e sulla struttura del sottosuolo attraverso una serie di misure effettuate dalla superficie.

Tali misure riguardano alcuni parametri fisici caratteristici delle rocce e dei materiali presenti nel sottosuolo come la resistività elettrica, la densità, le costanti elastiche, la suscettività magnetica ecc.

La raccolta dei dati, le successive fasi di processing ed interpretazione, consentono di ricostruire la struttura e composizione del sottosuolo e di formulare ipotesi sulla natura e la geometria degli eventuali corpi sepolti.

Numerosi sono i vantaggi che si hanno con l'applicazione delle tecnologie di tipo geofisico alla prospezione di aree archeologiche: primo vantaggio è di poter investigare vaste aree in poco tempo, secondo vantaggio è il costo molto più contenuto rispetto all'esecuzione di scavi preliminari, terzo vantaggio è il fatto che questo tipo di indagini sono di tipo non distruttivo e quindi si preservano le aree che non verranno poi interessate dagli scavi veri e propri, infine i metodi geofisici consentono la ripetibilità delle misure ed inoltre l'utilizzo di vari tipi di tecniche permettono vari gradi di precisione e penetrazione nel sottosuolo.

I vantaggi discussi sopra risultano essere di fondamentale importanza, in quanto trattasi di un campo di studio molto delicato. Infatti, il cosiddetto "scavo" è operazione non ripetibile e distruttiva, che deve quasi sempre essere eseguito a mano, con costi elevatissimi, soprattutto se eseguiti in mare.

La conoscenza a priori della posizione esatta dei reperti archeologici è cosa fondamentale e può consentire una maggiore velocità di scavo ed un'attenta salvaguardia dei beni.

Come noto la prospezione geofisica costituisce l'unico mezzo veramente non distruttivo per perseguire gli scopi sopraccitati e quindi dovrebbe essere diffusamente applicata in campo archeologico.

In realtà fino ad oggi il campo di maggiore applicazione dei metodi geofisici è stato quello della ricerca petrolifera, mentre nella ricerca a più piccole profondità è stata applicata quasi esclusivamente a poche problematiche classiche, di tipo idrogeologico, ambientale e per la ricerca mineraria.

E' solo nell'ultimo decennio che una grande quantità di problemi nei campi del controllo e tutela dell'ambiente naturale, della gestione del territorio, e della salvaguardia dei beni culturali sono diventati pressanti e di grande rilevanza economica.

Essi richiedono una conoscenza sempre più dettagliata del sottosuolo nella parte più superficiale.

Queste nuove problematiche hanno spinto la geofisica a confrontarsi col problema di individuare e descrivere strutture sepolte non più solo profonde come richiesto alla geofisica classica, ma spesso situate a piccolissima profondità, e di studiare strutture di dimensioni limitate in ogni direzione e poste in mezzi e materiali molto eterogenei.

E' dunque sempre più necessario migliorare il potere risolutivo di ogni metodo di prospezione e sviluppare nuove tecniche di analisi dei dati.

I recenti progressi tecnologici nel campo dell'elettronica e dell'informatica, fortunatamente, fanno sì che oggi sia possibile acquisire ed elaborare, con costi estremamente contenuti rispetto al passato, le grandi quantità di informazioni necessarie per affrontare questi nuovi problemi.

## **2.2 Metodi geofisici**

I metodi geofisici più frequentemente utilizzati nella prospezione di aree di interesse archeologico sono il metodo geoelettrico, magnetico, elettromagnetico, che si basano rispettivamente sulla misura di anomalie di resistività, suscettività magnetica e conducibilità del sottosuolo.

Altri metodi meno utilizzati sono quello gravimetrico e sismico che si basano sulla misura delle anomalie di densità e delle caratteristiche elastiche.

La pianificazione di un'indagine geofisica va fatta, conseguentemente alle esigenze archeologiche dell'area da investigare, ipotizzando tipo, dimensioni e profondità dei reperti che si potrebbero riscontrare nel sottosuolo.

Tutto ciò, compatibilmente con la logistica dell'area di indagine, permetterà di programmare i metodi geofisici adeguati alla soluzione del problema, la distanza tra i profili da rilevare e la lunghezza degli stessi.

L'obiettivo della ricerca, di volta in volta può riguardare manufatti, strade sepolte, tombe, pozzi, ecc.. Questi sono i primi dati da cui dipende la scelta della metodologia più idonea per lo studio di una particolare area.

Infatti, non sempre in uno stesso sito è possibile applicare le stesse metodologie, basti pensare, a titolo di esempio, come la presenza di eventuali costruzioni con parti metalliche o sottoservizi costruiti a posteriori possano limitare l'applicazione del metodo magnetico.

L'indagine geologica preliminare ed un minimo di informazioni storiche servono per poter definire la campagna geofisica da eseguire e per definire la tipologia di terreno al disotto del quale si deve indagare.

La scelta del tipo di metodologia geofisica da adottare infine è fortemente condizionata dalla profondità alla quale ci si aspetta di trovare reperti; essi normalmente si trovano nei primi metri di profondità. Indagini a profondità più elevate richiedono la pianificazione della campagna geofisica con approcci metodologici adeguati.

In tutti i campi della prospezione geofisica, bisogna distinguere i problemi diretti da quelli inversi.

Per *problema diretto* si intende il processo che consente di prevedere il risultato di una misura sulla base di alcuni principi o modelli generali. Per ogni struttura è calcolabile un solo andamento dell'anomalia che la stessa produce.

Per *problema inverso* si intende la determinazione, attraverso lo studio e l'andamento delle anomalie misurate, della struttura che ha determinato tale anomalia. In questo caso particolare, l'andamento di tale anomalia, può essere associato a diverse tipologie di strutture.

A titolo esemplificativo basta considerare che vari modelli di sottosuolo possono produrre lo stesso tipo di anomalia. E' solo attraverso l'ausilio di altre informazioni di carattere geofisico, geologico e storico-geologico che si può giungere ad una ricostruzione univoca del sottosuolo investigato.

Nella ricerca geofisica è indispensabile eseguire più misure per ogni presunta zona dove è probabile l'esistenza dell'anomalia; meglio ancora se sono utilizzate diverse metodologie geofisiche. Il dato isolato, non è da considerare attendibili ma, scoprendo anomalie in punti imprevisi, è possibile pianificare il prosieguo della campagna, intensificando le misure nelle parti più interessanti.

### ***2.3 Metodi geofisici attivi***

Sono i metodi che per rilevare il dato in superficie necessitano che al terreno venga fornita energia.

Per esempio la geoelettrica, immettendo corrente nel terreno attraverso una coppia di elettrodi, permette di rilevare una differenza di potenziale, attraverso un'altra coppia di elettrodi, che dipende dalla resistività del mezzo interessato dal percorso della corrente.

## ***2.4 Metodi geofisici passivi***

Sono i metodi che rilevano anomalie grazie a risposte che il terreno fornisce naturalmente.

Prendendo sempre come esempio la geoelettrica, si nota come essa possa essere un metodo sia un attivo che passivo, infatti, con i metodi geoelettrici è possibile rilevare la corrente generata spontaneamente da sottosuolo (Potenziali Spontanei).

## ***2.5 Descrizione dei metodi***

Entrando in dettaglio ai metodi geofisici applicabili alla prospezione archeologica si possono individuare tre categorie maggiormente utilizzate in campo archeologico:

- Metodi elettrici
- Metodi elettromagnetici
- Metodi magnetometrici

### **2.5.1 METODI ELETTRICI**

#### **2.5.2 Geoelettrica**

Tra i metodi elettrici va citato uno dei più utilizzati che è quello che si basa sull'iniezione di corrente continua tramite due elettrodi.

Già all'inizio del 900 vennero utilizzati per la descrizione quantitativa di anomalie conduttive individuate nel sottosuolo (Pettersson, 1907).

La vera svolta avvenne nel 1912, quando Conrad Schlumberger in Francia e circa negli stessi anni Frank Wenner negli U.S.A. (Schlumberger, 1920; Kunetz, 1966) diedero inizio al loro pionieristico lavoro, che ha portato oggi tramite un lungo percorso allo sviluppo di sistemi multi elettrodo, multicanale, l'implementazione codici di elaborazione semi-automatici ed il passaggio da analisi di tipo monodimensionale ad interpretazioni nelle tre dimensioni dello spazio nonché in funzione del tempo, o "Time-lapse", consentendo applicazioni

in svariati settori disciplinari tra cui l'archeologia e che hanno reso oggi il metodo elettrico uno dei più utilizzati.

Il metodo geoelettrico si basa sul principio che la distribuzione di un campo di potenziale elettrico (U) sulla superficie del terreno dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche della sorgente, anche dalla distribuzione della resistività elettrica ( $\rho$ ) nel sottosuolo.

La resistività elettrica  $\rho$ , detta anche resistività specifica, è una proprietà intrinseca dei materiali ed indica l'attitudine di tali materiali a opporre resistenza al passaggio di una corrente elettrica.

I metodi geoelettrici misurano la resistività elettrica del terreno mediante due elettrodi di corrente e due di potenziale, infissi nel terreno secondo diverse configurazioni geometriche (stendimenti).

In particolare, detta I l'intensità di corrente elettrica (misurata in A) applicata al terreno per mezzo di due elettrodi collegati ad una batteria, e V (in V) la differenza di potenziale misurata tra due elettrodi di potenziale, la resistività del terreno (espressa in  $\Omega$  m) si ricava dalla seguente relazione:

$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (2.5)$$

dove K (in m) rappresenta un fattore geometrico dipendente dalla configurazione geometrica dei quattro elettrodi.

Aumentando la distanza tra gli elettrodi di corrente, il flusso di particelle cariche interessa profondità sempre maggiori e il fattore K assume, nel caso di un mezzo ideale (omogeneo ed isotropo), un valore tale per cui la resistività calcolata rimanga costante.

Tuttavia, date le caratteristiche di anisotropia ed eterogeneità del sottosuolo, il valore di resistività misurato è, in realtà, un valore *apparente*, dipendente dalla combinazione delle resistività elettriche dei singoli strati, oltre

che rappresentativo di un volume la cui estensione varia all'aumentare della distanza fra gli elettrodi di corrente.

La resistività elettrica dei suoli e degli ammassi rocciosi è legata a molteplici fattori, quali la temperatura, la porosità dei materiali, il contenuto d'acqua interstiziale, il contenuto di gas e di sali disciolti nell'acqua e la presenza di ioni liberi; sono molteplici, di conseguenza, gli ambiti in cui può trovare riscontro la prospezione geoelettrica.

### **2.5.2.1.1 strumentazione**

La strumentazione si basa su alcune semplici componenti, ovvero:

- una batteria o un generatore di corrente continua (per esplorazione profonda), per l'iniezione di corrente.
- un amperometro, che misura la corrente iniettata
- un voltmetro, che ha un'altissima impedenza interna – tipicamente almeno 1 MOhm.

Perché si usano quattro elettrodi invece di due? La legge di Ohm (2.5) si basa su un esperimento in cui si usano due elettrodi. Il motivo è legato alla natura del suolo che è un conduttore ionico (gli ioni che si muovono nell'acqua che occupa, anche parzialmente, i pori) mentre gli elettrodi sono in generale delle barre di metallo, quindi sono conduttori elettronici. Al contatto tra elettrodi e suolo si genera quindi una resistenza di contatto, spesso molto elevata (decine di kOhm, se si arriva a centinaia di kOhm è possibile che la corrente abbia difficoltà ad entrare nel suolo, e quindi la resistenza di contatto va abbassata per esempio piantando più a fondo l'elettrodo e/o bagnando il suolo circostante). Se si usassero due elettrodi, si avrebbero le due resistenze di contatto in serie con la resistenza del suolo (Fig.1), per cui si misurerebbe la somma delle tre e sarebbe impossibile ricavare quella del suolo, non conoscendo le altre due. Usando invece il sistema a quattro elettrodi si ha la seguente situazione: in A e B la resistenza di contatto esiste, ma si misura solo la I iniettata, non la  $\Delta V$  tra A e

B. In M ed N esiste pure una resistenza di contatto ma questa non conta, in quanto attraverso M ed N non passa alcuna corrente (il voltmetro ha resistenza molto alta proprio per evitare di distogliere corrente attraverso il circuito di MN e modificare con la misura ciò che si vuol misurare): pertanto non essendoci corrente, non esiste caduta di tensione attraverso la resistenza di contatto in M ed in N, e quindi queste resistenze di contatto sono inattive. Quindi con 4 elettrodi si va a misurare solo la resistenza del suolo.

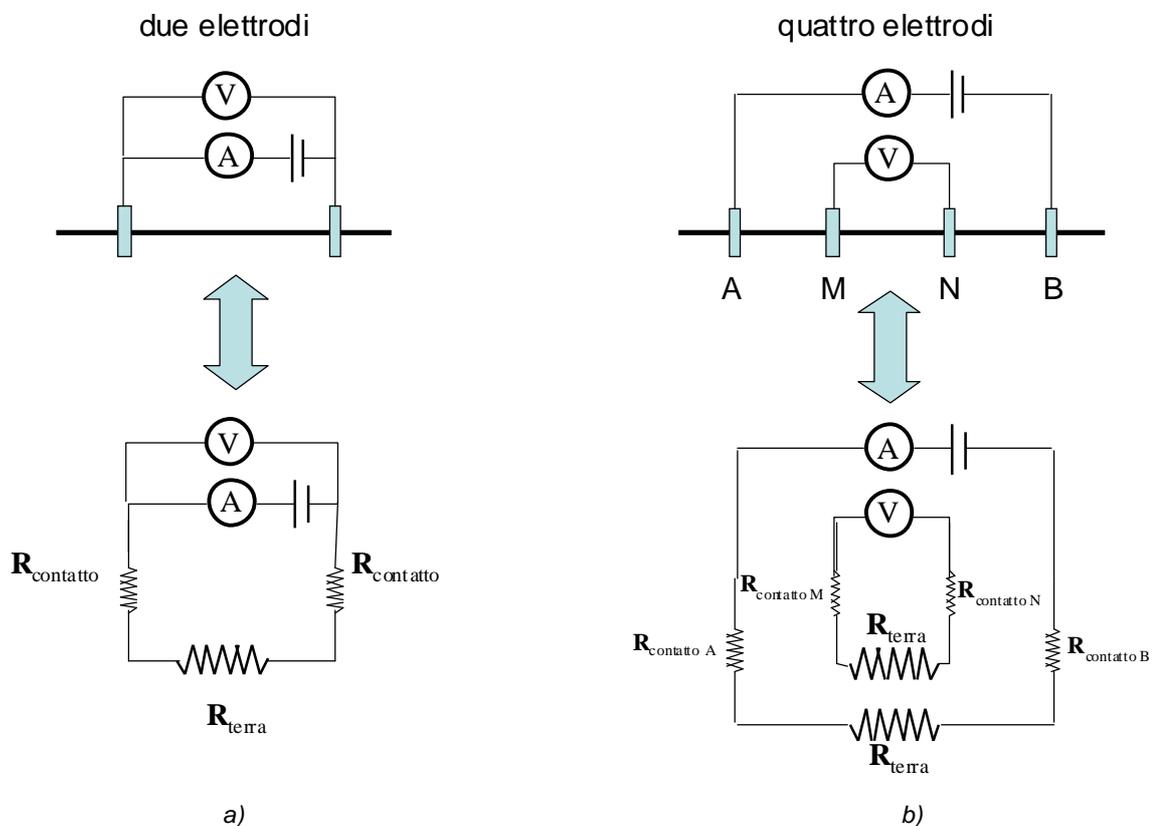


Fig. 1: a) schema rappresentativo delle resistenze di contatto che si generano tra elettrodi e terreno che, con due elettrodi, impediscono di misurare la resistenza propria del terreno attraversato dalla corrente iniettata; b) schema risolutivo al problema, utilizzando quattro elettrodi dove rispettivamente in due si inietta la corrente e negli altri due si misura la differenza di potenziale.

I resistivimetri odierni sono tutti tomografici ovvero hanno un multiplexer in grado di indirizzare volta per volta AB ed MN tra più elettrodi tutti collegati al stesso tramite cavi multiconduttore. Esistono anche sistemi con parecchi canali

fisici in parallelo, a loro volta multi-plexati, con grande aumento della velocità di acquisizione (importante per misure in time lapse).

I cavi oggi utilizzati per la tomografia elettrica sono multipolari. Gli elettrodi sono usualmente metallici, ma esistono anche elettrodi "non polarizzabili" (p.es. celle con rame-solfato di rame in soluzione satura, la quale è in contatto con il terreno attraverso i pori di una cella di ceramica porosa) che non danno luogo ad una polarizzazione tra elettrodo e suolo (di solito si usano per misure di polarizzazione indotta e potenziale spontaneo, non di solito per misure in corrente continua).

### ***2.5.2.1.2 Operazioni di campo:***

L'acquisizione dei dati di  $\Delta V$  e  $I$  su ogni singolo quadripolo sta alla base di tutte le misure geoelettriche. Dal momento che esistono altre sorgenti di differenza di potenziale oltre alla corrente  $I$  da noi iniettata, è indispensabile adottare una procedura di misura che elimini dalla misura di  $\Delta V$  le altre componenti non legate a  $I$ . Le altre cause di  $\Delta V$  nel suolo possono essere: potenziali spontanei (dovuti a sorgenti all'interno della terra, quali la presenza di corpi mineralizzati, o il flusso dell'acqua nel mezzo poroso – in quest'ultimo caso si parla di streaming potential), correnti telluriche (ovvero correnti nel suolo causate per induzione elettromagnetica dai flussi di ioni nella ionosfera) ed effetti di polarizzazione agli elettrodi stessi (se non usiamo elettrodi non polarizzabili, come di solito accade). Nelle misure in corrente continua non interessa distinguere la causa di queste altre differenze di potenziale al dipolo MN, ma solo rimuoverle. Pertanto la procedura di misura è quella di iniettare una corrente  $I$  cui viene commutato il verso con un certo periodo di commutazione, lasciando dei periodi in mezzo in cui non viene iniettata corrente (un'onda quadra – Fig.2): in questo modo lo "zero" ovvero il potenziale non dovuto all'iniezione di  $+I$ ,  $-I$  ad AB viene identificato facilmente e rimosso. Si osservi che utilizzando in questo

modo un'onda quadra non si lavora propriamente in corrente continua. Ma la procedura è adeguata perché i tempi durante i quali la corrente è tenuta costante sono lunghi (da centinaia di ms a qualche secondo) rispetto ai tempi di rilassamento del sistema, per cui le differenze di potenziale transitorie possono essere osservati se necessario ma non impattano la misura in corrente continua.

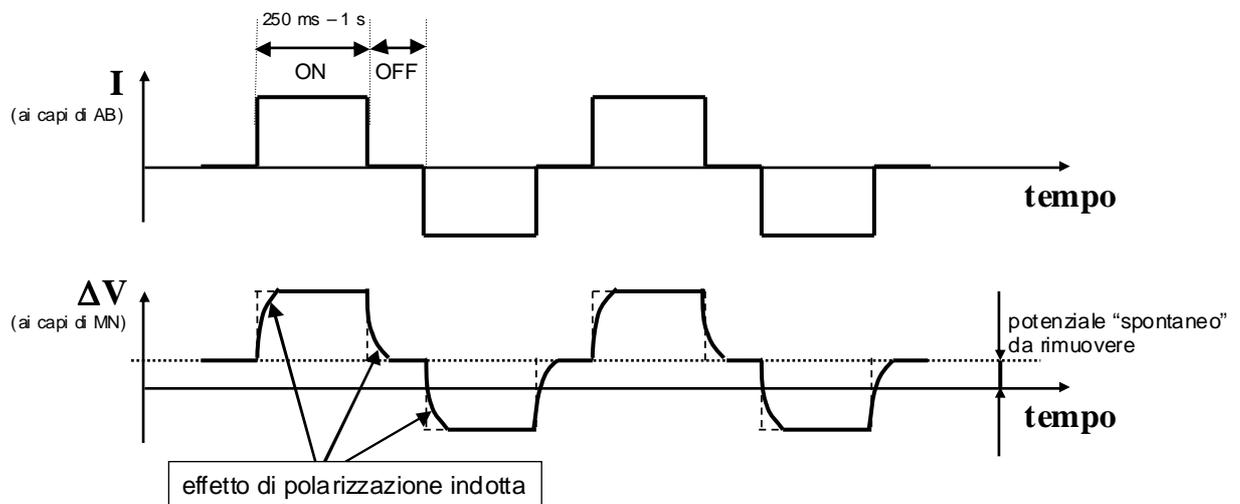


Fig. 2: schema rappresentativo dell'onda quadra e degli effetti di polarizzazione indotta.

Alternativamente, è possibile anche procedere alla misura iniettando una corrente alternata a frequenza relativamente bassa (da qualche decina di Hz a qualche kHz): in questo modo non si misura proprio la resistenza in DC, ma quella affetta dai fenomeni di polarizzazione indotta, di solito appena inferiore (di qualche punto %). Il vantaggio è che la maggiore rapidità di acquisizione.

Le modalità di conduzione di una prospezione geoelettrica sono essenzialmente tre:

- i sondaggi elettrici verticali (SEV), in cui AB sono progressivamente allontanati tra loro tenendo fisso il centro dell'array: al crescere di AB si interessano porzioni sempre più profonde del sottosuolo (in modo integrale, anche quelle superficiali sono sempre interessate): si pensi

al caso di un sottosuolo omogeneo ed a come è fatto un campo di dipolo elettrico. Si ottiene solo un profilo verticale di resistività.

- i profili di resistività: lo stesso array è shiftato in orizzontale e si ottiene un profilo che mostra solo variazioni orizzontali di resistenza ma niente in verticale (questo modo di procedere è desueto, sostituito dalle tomografie).
- tomografie elettriche di resistività (ERT= Electrical Resistivity Tomography): si usano un alto numero di elettrodi che sono di volta in volta utilizzati come AB ed MN, creando un vasto dataset di misure di quadripoli, in moltissime delle configurazioni possibili, senza muovere gli elettrodi ma solo indirizzandoli con il resistivometro secondo una configurazione progettata di volta in volta in base alle esigenze di lavoro. La ricostruzione di un'immagine del sottosuolo in termini di resistività elettrica si ottiene tramite inversione tomografica, di solito ai MMQQ (o robusta) regolarizzata, meglio se alla Occam. L'acquisizione e la conseguente inversione può essere 2D o anche 3D. Le tomografie possono essere condotte con tutti gli elettrodi in superficie, o anche da foro a foro (cross-well) con migliore risoluzione in profondità.

Qualunque sia la procedura di misura, è sempre molto importante avere una stima degli errori della misura stessa. Questa stima diventa essenziale quando si effettua in ERT un'inversione alla Occam, che richiede una stima quantitativa dell'errore nei dati perché da questo deriva la stima del più elevato  $\lambda$  che consente di ottenere una previsione del modello diretto che onora i dati solo ENTRO il loro livello di errore.

In elettrica una buona stima dell'errore di misura si ottiene tramite la misura del quadripolo in configurazione reciproca ovvero scambiando gli elettrodi AB con gli MN (e viceversa). La misura reciproca in teoria dovrebbe dare esattamente la stessa resistenza (lo stesso rapporto  $\Delta V/I$ ) della misura diretta

(principio di reciprocità). Se questo non accade, significa che in una (o entrambe) le misure è stato commesso un errore. Il più tipico errore presente in una misura elettrica a quattro elettrodi è dovuta allo scarso contatto tra un elettrodo ed il terreno, ovvero alla presenza di un'elevata resistenza di contatto: questa resistenza conta nulla quando quell'elettrodo è usato come elettrodo di potenziale, ma limita e altera la misura della corrente quando quell'elettrodo è usato come elettrodo di corrente.

Se vengono effettuate misure dirette e reciproche dell'intero dataset, è possibile calcolare la media e lo scarto fra misura diretta e reciproca, e scartare tutte le misure la cui deviazione standard eccede una certa soglia di errore imposta a priori.

### ***2.5.2.1.3 Processing, inversione ed interpretazione***

I dati grezzi di geoelettrica ( $\Delta V$  e  $I$ ) sono trasformati in resistività apparente tramite l'equazione (2.5) con  $K$  adeguato alla forma geometrica del particolare quadripolo usato. Quindi, la resistività apparente viene rappresentata in modo grafico, in modo da dare una valutazione rapida (anche in campagna) della natura e della qualità del dato.

Nell'inversione dei dati in DC; il modello diretto è basato su semplificazioni:

- per i SEV, il sistema viene idealizzato come stratificato, si usa l'integrale di Stefanescu, implementato tramite i cosiddetti "filtri lineari";
- per la tomografia, è necessario utilizzare un metodo numerico per risolvere il problema differenziale: tipicamente differenze finite ma più spesso elementi finiti che danno maggiore flessibilità di geometria. Specialmente nella rappresentazione (importante) della topografia.

L'inversione vera e propria, basandosi sul modello diretto, porta a produrre previsioni che matchano i dati misurati. Questo accade:

- per i SEV, vecchi metodi basati su abachi, o metodi ai MMQQ
- per l'ERT, metodi di inversione basati sui MMQQ regolarizzati, Tykhonov e Occam: per quest'ultimo specialmente è essenziale avere una stima dell'errore da cui la necessità dei reciproci in acquisizione.

### **2.5.3 Polarizzazione indotta**

La polarizzazione indotta (IP) è un metodo utilizzato con discreto successo in prospezioni archeologiche dal 1960 (Aspinall e Lynam, 1968, 1970).

Esperienza sul campo suggerisce che l'indagine IP può spesso rilevare oggetti metallici sepolti di dimensioni piuttosto piccole; oggetti difficili o impossibili da individuare con il metodo di resistività.

Aitken nel 1974 indicava la IP come metodo di maggiore chiarezza rispetto ai metodi di resistività, ma il requisito dell'utilizzo di elettrodi non polarizzabili rallentava notevolmente il lavoro sul campo. Quindi tale tecnologia era usata raramente a causa di questi vincoli di tempo e di costo delle necessarie sofisticate apparecchiature elettroniche.

Oggigiorno con lo sviluppo tecnologico si è arrivati a progettare apparecchiature più complete ed economicamente accessibili, come per esempio georesistivimetri che hanno la possibilità di acquisire anche dati IP con ottimizzazione dei tempi, superando di fatto le difficoltà che si riscontravano in passato.

Il metodo della *polarizzazione indotta I.P. (Induced Polarization)* è un fenomeno generato dalla stimolazione di una corrente elettrica che viene osservata dopo l'applicazione di una tensione al terreno.

Il metodo si basa sull'osservazione della curva di decadimento del potenziale, susseguente all'interruzione della corrente immessa, cioè sulla misura

della "caricabilità" residua trattenuta dal mezzo d'indagine sottoposto a corrente (Fig. 3, 4).

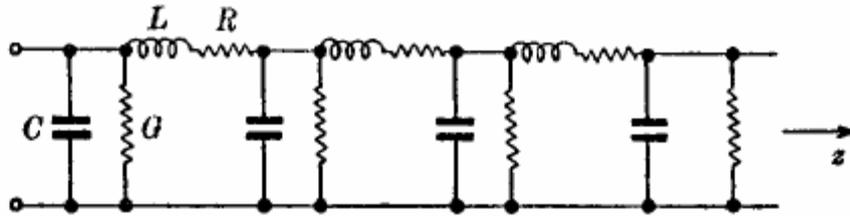


Fig. 3: Una porzione di terreno percorsa da corrente elettrica in frequenza può essere rappresentata schematicamente come una linea di trasmissione a parametri distribuiti. C = Capacità; L = Induttanza; R = Resistenza; G = Conduttanza; z = direzione dell'asse lungo il quale il mezzo risulta percorso da corrente. (disegno da Stratton, 1941)

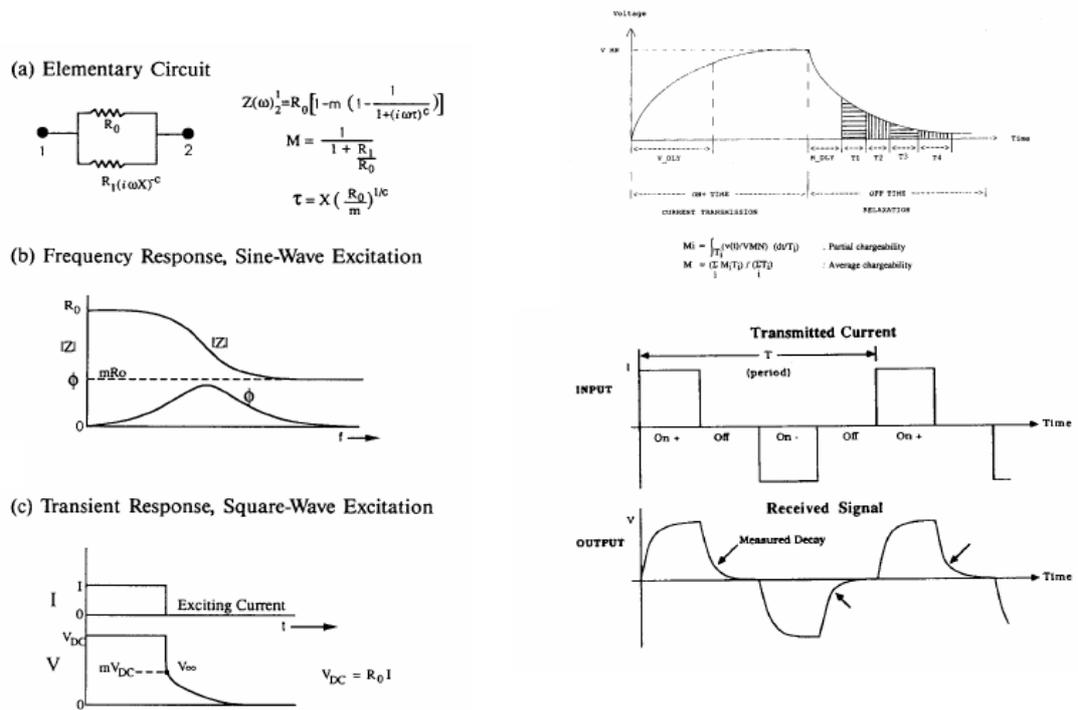


Fig.4: Modello di circuito semplificato di una porzione di terreno. (a) Circuito elementare; (b) applicazione di corrente sinusoidale: Z = ampiezza,  $\phi$  = fase; (c) applicazione di corrente quadra: V = tensione iniziale e residua di "caricabilità" (a sinistra). (da Pelton et al., 1978). Forma dell'onda trasmessa Tx ed in ricezione Rx (a destra). (da Ward, 1990)

Per un terreno omogeneo di dimensioni infinite, il tempo di decadimento è funzione della *resistività* del terreno e non cambia al variare della coppia dei punti tra i quali si misura la differenza del potenziale.

Se nel terreno è incluso un corpo metallico o con proprietà analoghe, si verificano anomalie nel decadimento elettrico, in funzione del tempo.

Lo stesso fenomeno si osserva anche per polarizzazione di contaminanti organici che possono eventualmente trovarsi nel terreno di un sito contaminato. La configurazione tipica per l'acquisizione dei dati di questo tipo varia in funzione di numerose variabili.

La profondità d'indagine è funzione della distanza tra i due poli ( $n \times a$ ). Sono generalmente utilizzati più valori di  $n$  consentendo di effettuare *pseudosezioni* di *polarizzabilità* del terreno.

#### **2.5.4 GEORADAR**

Il Ground Penetrating Radar (GPR) è uno dei più usati tra i metodi di esplorazione geofisica per applicazioni archeologiche. Questo metodo può definire, in maniera veloce ed accurata, i lineamenti di corpi sepolti di interesse archeologico.

La *permettività dielettrica relativa* (RDP) è la proprietà fisica che influenza le onde elettromagnetiche che attraversano un mezzo; essa è definita come la capacità del materiale di immagazzinare, ed in seguito restituire energia elettromagnetica quando è applicato ad esso un campo elettromagnetico.

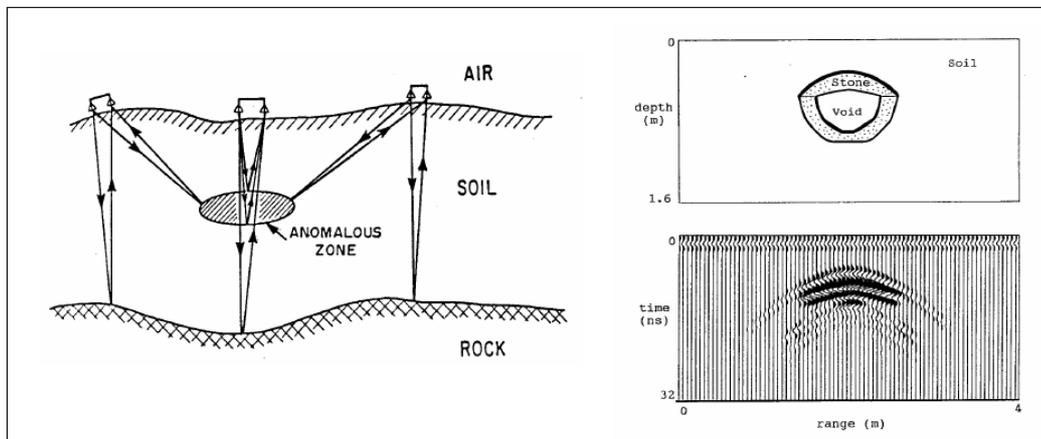


Fig. 4: schema del principio su cui si basano le misure gpr.

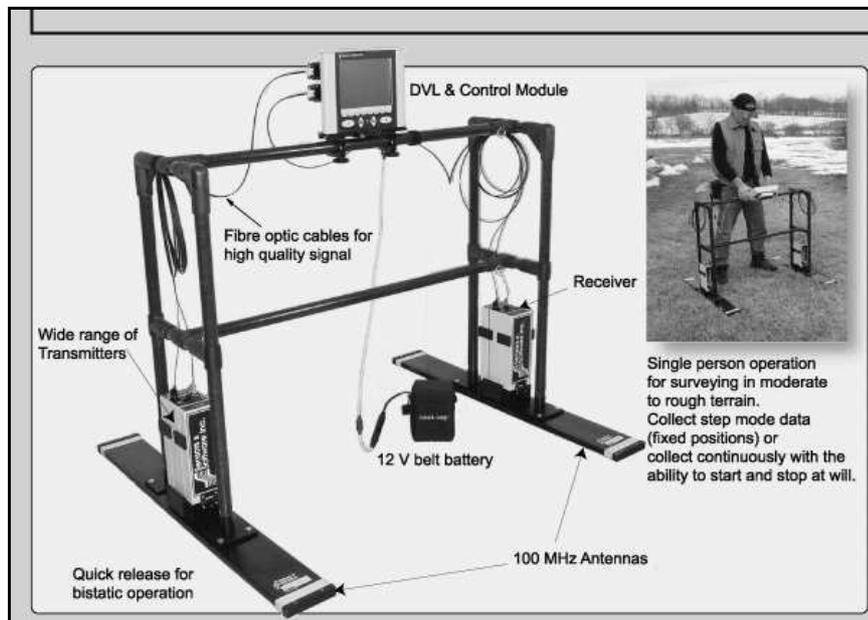
Le variazioni dielettriche dei mezzi attraversati dalle onde elettromagnetiche, permettono di discriminare le litologie attraversate in quanto è possibile misurare una differenza di velocità di propagazione tramite le differenze dei tempi di arrivo dell'impulso elettromagnetico inviato al terreno. L'impulso inviato viene riflesso dalle discontinuità presenti nel sottosuolo, per cui l'analisi dei tempi di arrivo consente di definire forma, dimensioni e profondità alla quale si trova la discontinuità (Fig.4).

Lo strumento può essere costituito da una o due antenne:

- *Antenna monostatica* che funge sia da trasmitter che da receiver dell'impulso elettromagnetico inviato nel terreno.
- *Antenna bistatica*, dove trasmitter e receiver sono fisicamente separati.



Esempio di antenna monostatica



Esempio di antenna bistatica

Il Georadar, è un metodo non distruttivo e non invasivo, molto veloce per l'acquisizione dei dati, inoltre in condizioni ottimali può avere un'elevata risoluzione.

Poiché mentre l'impulso attraversa il mezzo subisce una forte attenuazione dovuta all'assorbimento, risulta impossibile effettuare indagini che interessino profondità maggiori di alcune decine di metri. Inoltre l'assorbimento è funzione del mezzo attraversato, ne risulta che a parità di lunghezza d'onda emessa ed a

parità di antenna, si riusciranno ad effettuare rilievi più o meno profondi a seconda del substrato che si va ad indagare.

Ne risulta che la buona riuscita di rilievi GPR per scopi archeologici dipende dalla tipologia di terreno, dal contenuto in acqua, dal contenuto in argilla e dalla profondità a cui si trovano gli oggetti sepolti.

La scelta dell'antenna deve essere fatta in funzione della risoluzione e dell'approfondimento richiesto; maggiore è la frequenza dell'antenna, maggiore è la risoluzione, ma naturalmente minore sarà la profondità di investigazione.

Una delle tecniche più utilizzate è quella in modalità *continuo*, dove l'antenna monostatica viene trascinata lentamente a velocità possibilmente costante. In questo modo si possono ricoprire vaste aree in poco tempo.

### **2.5.5 METODO ELETTROMAGNETICO**

Il metodo elettromagnetico EM nel dominio della frequenza (FDEM) utilizza un campo elettromagnetico detto "primario" generato da parte di una bobina trasmittente, per indurre nel sottosuolo o nel corpo investigato una circolazione di corrente che a sua volta genera un campo elettromagnetico detto "secondario" la cui intensità è proporzionale alla conduttività elettrica del mezzo attraversato.

La conduttività elettrica (l'inverso della resistività) dei suoli e delle rocce dipende da vari fattori quali il grado di saturazione, la salinità dell'acqua dei pori, la composizione mineralogica.

Il metodo elettromagnetico consiste nel riconoscere, attraverso le modificazioni subite dal campo EM emesso, le zone anomale conduttive delle rocce.

Tale tecnica si contraddistingue per la rapidità di esecuzione delle misure, pressoché continue arealmente, evitando qualsiasi alterazione dei luoghi e mantenendone la fruibilità.

Si utilizza uno strumento detto elettromagnetometro con il quale è possibile eseguire un' esplorazione veloce e nello stesso tempo dettagliata di vaste aree di territorio (Fig. 5).



*Fig. 5: Esempio di magnetometro: la bobina trasmittente induce degli anelli circolari di corrente nel terreno. L'intensità di questi anelli di corrente è direttamente proporzionale alla conducibilità del terreno attraversato. Ciascuno di questi loops secondari di corrente genera a sua volta un campo magnetico secondario proporzionale al valore della corrente relativa a quell'anello. Una parte del campo magnetico generato da ciascun loop secondario è intercettata dalla bobina ricevente sotto forma di un segnale di uscita in tensione.*

### **3 METODI GEOFISICI APPLICABILI PER LA RICERCA ARCHEOLOGICA IN MARE**

Le tecniche d'indagine indirette sono largamente utilizzate in tutti gli studi di geologia marina, mirati alla ricostruzione della morfometria e della natura dei fondali, della geometria dei sedimenti e delle rocce sottostanti, nonché alle osservazioni dei processi in atto nel sistema marino (Corselli, 2000).

Inoltre i metodi indiretti possono dare indicazione su posizione forma e natura di eventuali oggetti sepolti.

In generale in ambiente marino gli strumenti impiegati per tali indagini sfruttano in particolare le leggi della fisica acustica, magnetica, gravimetrica e dell'oceanografia ottica.

La maggior parte di questi strumenti in genere lavora tramite osservazioni remote da piattaforme differenti che possono essere aeree (aerei o satelliti) o galleggianti (imbarcazioni di varia natura ed in particolare navi oceanografiche). Volendo suddividere i principali strumenti d'indagine indiretta a seconda delle proprietà fisiche su cui è basato il loro funzionamento e la loro progettazione, abbiamo:

### **3.1 OCEANOGRAFIA ACUSTICA**

I metodi geofisici che sfruttano le leggi dell'acustica in mare, sono individuati come una forma di *remote sensing* per lo studio della superficie dei fondali e degli strati sottostanti (Morang et al., 1997); in effetti mentre sulla terra le indagini "remote sensing" sono per lo più caratterizzate dalle diverse forme di telerilevamento satellitare ed aereo, in mare le onde elettromagnetiche (su cui è basato il principio d'applicazione del telerilevamento) vengono fortemente attenuate dall'acqua (Fig. 6). I segnali acustici sono invece attenuati in misura minore rispetto a quelli ottici ed elettromagnetici, soprattutto a basse frequenze (Jones, 1999). Quindi, i metodi geofisici acustici sono una forma di remote sensing nella quale un ricercatore usa uno strumento per ottenere un'immagine remota del fondale marino e degli strati sottostanti. Il risultato è una descrizione della geologia superficiale, un modello basato sulla variazione delle impedenze acustiche e dei differenti coefficienti di diffrazione dell'aria, dell'acqua, del sedimento e della roccia. Il modello che deve essere interpretato, è basato su numerosi presupposti, e ci si deve sempre ricordare che la situazione reale potrebbe essere molto diversa dal modello che viene stampato su carta o

visualizzato a monitor dagli strumenti impiegati. In ogni modo, i metodi acustici hanno dimostrato di essere degli strumenti di estrema utilità in numerose applicazioni come (Morang et al., 1997):

- la determinazione della profondità (rilevamenti idrografici);
- l'esplorazione del fondale marino per identificare i sedimenti superficiali e per la localizzazione di lineamenti geomorfologici e opere umane;
- la misura dello spessore degli strati che caratterizzano la copertura sedimentaria presente al fondo;
- la rilevazione di tasche di gas, affioramenti rocciosi e rischi geologici;
- l'identificazione di oggetti e strutture sepolte all'interno dei sedimenti.

Gli ecoscandagli (Echo-sounders), i sonar a scansione laterale (Side-Scan Sonar) ed i Sub-bottom Profilers sono le tre classi di equipaggiamento principali, utilizzate per raccogliere dati geofisici nei programmi di esplorazione marina.

Tutti e tre sono sistemi acustici che si basano sulla propagazione di impulsi sonori nell'acqua e misurano il tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso e l'arrivo del segnale riflesso e/o diffratto da sopra o sotto il fondale.

Gli Ecoscandagli a singolo fascio (Single-beam) sono usati per rilevamenti (surveys) batimetrici. Gli Ecoscandagli a fascio multiplo (Multi-beam) sono il perfezionamento dei tradizionali Single-beam e permettono la restituzione di un'immagine molto dettagliata delle strutture sottomarine e della topografia.

Il Side-Scan Sonar fornisce un'immagine (sonogramma) da cui si può ricavare la distribuzione superficiale dei sedimenti e le forme del fondo.

I Sub-bottom Profilers sono usati per esaminare la stratigrafia sotto al fondale.

Nei programmi d'esplorazione un singolo metodo raramente fornisce informazioni sufficienti senza l'impiego di campionamenti diretti di sedimento o di dati provenienti da altri metodi (Savini 2004).

Ciascuno risponde in modo diverso alle differenti caratteristiche fisiche dei materiali costituenti il fondale e gli strati sottostanti, e la correlazione dei dati ricavati da numerosi metodi fornisce i risultati più significativi (Morang et al., 1997).

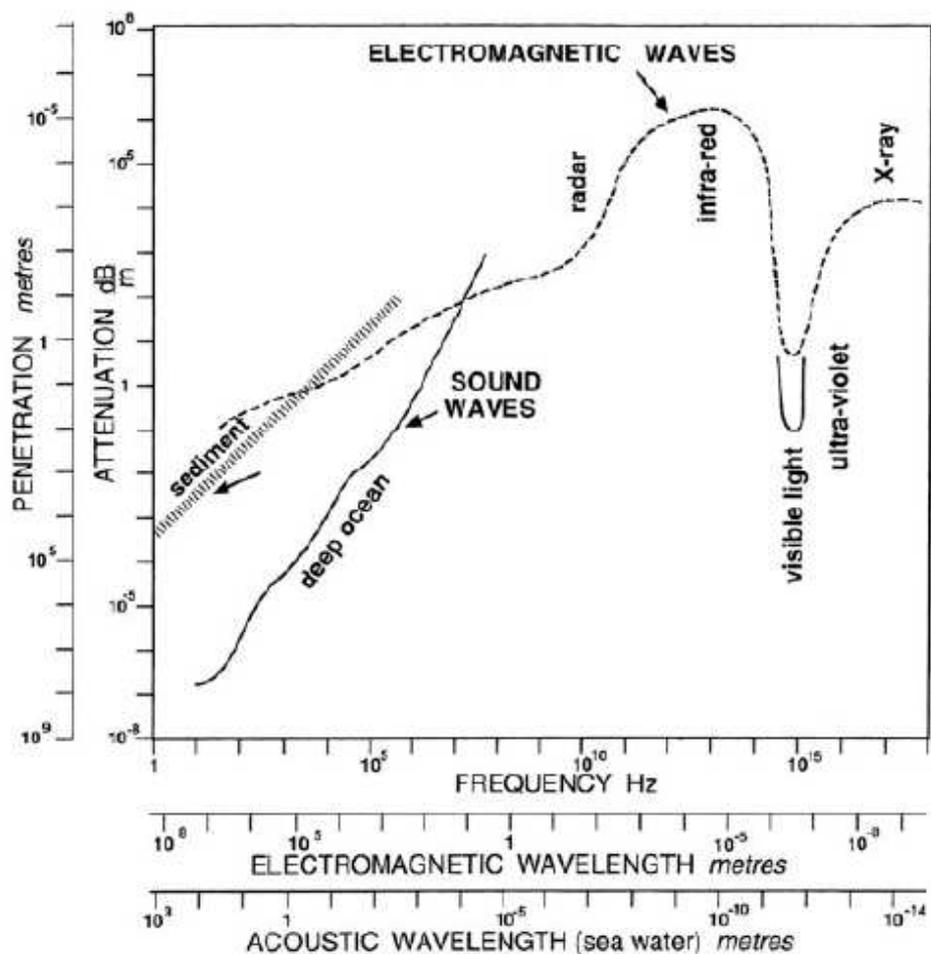


Fig. 6: Attenuazione delle onde acustiche ed elettromagnetiche in acqua (da Jones, 1999)

ACUSTIC SYSTEM	FREQUENCY (KHz)	PURPOSE
Sea floor		
Echo Sounder (single beam)	12-200	Measure water depth for bathymetric mapping
Echo sounder (multibeam)	75-455	Map sea floor topography and structure
Side Scan Sonar	30 - 500	Map sea floor topography, sediment type, texture, outcrops, man-made debris, structures.
Subbottom profiler		
Tuned trasducers	3.5 – 7.0	High – resolution subbottom penetration
Electromechanical		
Acustipulse	0.8 – 5.0	Bottom penetration to 30 m
Uniboom	0.4 – 14	15-30 cm resolution with 30-60 m penetration
Bubble pulser	0.4	Similar to Uniboom

*Elenco della principale strumentazione geofisica che sfrutta la trasmissione delle onde acustiche in acqua e relative frequenze operative e scopi d'utilizzo (modificato da Morang et al., 1997).*

### 3.1.1 MULTI BEAM

I dati batimetrici vengono acquisiti da ecoscandagli a singolo fascio lungo la perpendicolare alla rotta della nave o da ecoscandagli multi fascio perpendicolarmente e lateralmente alla rotta di navigazione e consistono in informazioni di tipo x, y, z.

Gli Ecoscandagli tradizionali (Single-Beam Echo-Sounders) misurano il tempo trascorso tra l'emissione dell'onda sonora dal trasduttore montato a chiglia, e l'arrivo dell'eco prodotto dalla riflessione di questa sul fondale. Se la velocità del suono nell'acqua è conosciuta, il tempo impiegato dall'onda riflessa può essere misurato e convertito in spazio:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} + k + d_r$$

dove:

$d$  = profondità ;

$v$  = velocità media del suono nella colonna d'acqua;

$t$  = tempo misurato trascorso dal trasduttore al fondo e di nuovo al trasduttore;

$k$  = costante dell'indice di sistema

$d_r$  = profondità del trasduttore.

I valori di  $v$ ,  $t$  e  $d_r$  non sempre possono essere determinati esattamente durante la fase del survey, e  $k$  deve derivare da calibrazioni periodiche della strumentazione. La forma o l'intensità dell'impulso di ritorno gioca il ruolo maggiore nella precisione di misura della profondità (per approfondimenti sulla teoria dello strumento si veda Morang et al. (1997), Jones (1999)).

Tradizionalmente gli echi ricevuti dai trasduttori venivano visualizzati e registrati in tempo reale su supporti analogici (carta elettrosensibile o termica) attraverso un registratore grafico. I sistemi moderni utilizzano registratori digitali in grado di memorizzare ciascun dato discreto acquisito e di poter effettuare elaborazioni successive mirate al miglioramento della qualità dei dati acquisiti (essenzialmente filtri che riescano a pulire il segnale da eventuali forme di rumore o da interferenze prodotte da altre strumentazioni). L'estrapolazione su supporto digitale dei dati batimetrici acquisiti da sistemi analogici, viene in effetti effettuata per mezzo del sistema di navigazione, in modo da poterne permettere l'elaborazione con sistemi programmati per la costruzione di carte batimetriche.

In particolare dal file di navigazione verranno successivamente estrapolati file della stessa natura (ASCII) con le tre informazioni  $x_e$ ,  $y_e$ ,  $z$ , dove:

$x_e$  = coordinata X o longitudine del trasduttore dell'ecoscandaglio

$y_e$  = coordinata Y o latitudine del trasduttore dell'ecoscandaglio

$z$  = misura di profondità

E' chiaro che in tal caso la frequenza di registrazione dei *fix* sarà funzione del dettaglio richiesto.

Per quanto riguarda invece i registratori digitali, si avranno formati di file idonei ad essere elaborati da software specifici per le dovute operazioni di filtraggio, da cui potranno poi essere estrapolate le informazioni utili al

trattamento con i tradizionali software in uso per la costruzione delle carte batimetriche. In questo caso la registrazione è praticamente continua per ogni impulso dello strumento, di conseguenza l'ammontare dei dati (che conterranno informazioni anche in merito alla funzione del segnale di ritorno) sarà notevolmente maggiore.

Il maggior contributo del progresso tecnologico nei confronti dell'acquisizione di rilievi batimetrici, è però da riconoscere nell'avvento dei sistemi *multi-beam echosounder*.

I sistemi Multi-beam producono fasci multipli da un singolo trasduttore. Sono il risultato di sviluppo di tecnologie avanzate che combinano risposte rapide dei sensori di compensazione rollio beccheggio (pitch e roll), posizionamento preciso (DGPS), integrazioni computerizzate alla navigazione con sensori e gestione computerizzata di dati (Morang et al., 1997).

Il principio di funzionamento del Multi-beam Echo-Sounder può essere illustrato con il sistema Seabeam illustrato in figura 7, riportando per approfondimenti sulla teoria dello strumento a Jones (1999).

Il riscontro principale in termine di innovazione del sistema risiede nel fatto che il singolo dato di profondità è rilevato in corrispondenza di fasci multipli emessi dal trasduttore anche lateralmente alla rotta e non più solo lungo la verticale. Questo garantisce la possibilità di effettuare una mappatura batimetrica al 100% rispetto all'area selezionata per l'indagine (Hughes Clarke, 1996).

La registrazione, su supporto digitale, consiste quindi in un enorme ammontare di dati relativi alla funzione d'onda di ciascun *beam* emesso dal trasduttore. Occorrono quindi software altamente specializzati sia per le fasi d'acquisizione che per quelle relative al trattamento di tali dati (Fig. 8).

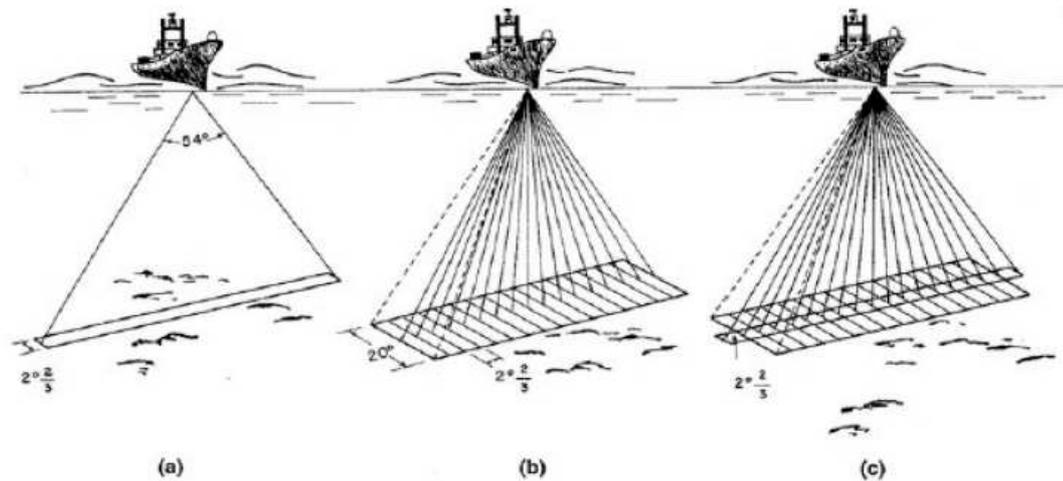


Fig. 7: Schematizzazione del principio di funzionamento del multibeam (a) area di fondale interessata dall'impulso di trasmissione, l'angolo di apertura interessato dai fasci è tecnicamente nominato swath. (b) Area del fondale coperta dai ricevitori del segnale. (c) Combinazione di (a) e (b) tecnicamente denominata footprint mostrante l'energia acustica ricevuta dal trasduttore per celle (da Morang et al., 1997).

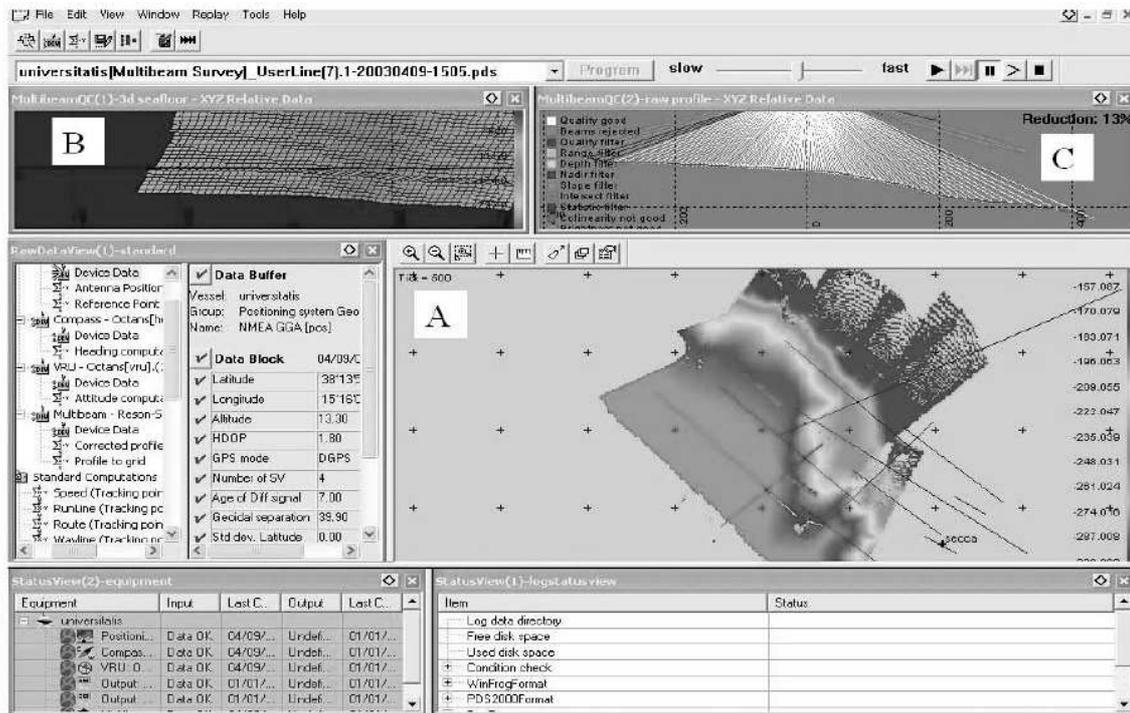


Fig.8: Rappresentazione del software PDS2000 impiegato per le operazioni di acquisizione di dati multibeam. A: vista in pianta con copertura su griglia batimetria in tempo reale. B: copertura 3D del fondale. C: visione bidimensionale di ciascun fascio (i beam colorati sono filtrati).

### **3.1.2 SUB BOTTOM**

Il sub bottom profiler o profilatore sismico dei sedimenti è un tipo di ecosuoner che permette, utilizzando basse frequenze, di identificare la sequenza litostratigrafica presente sotto il fondale marino.

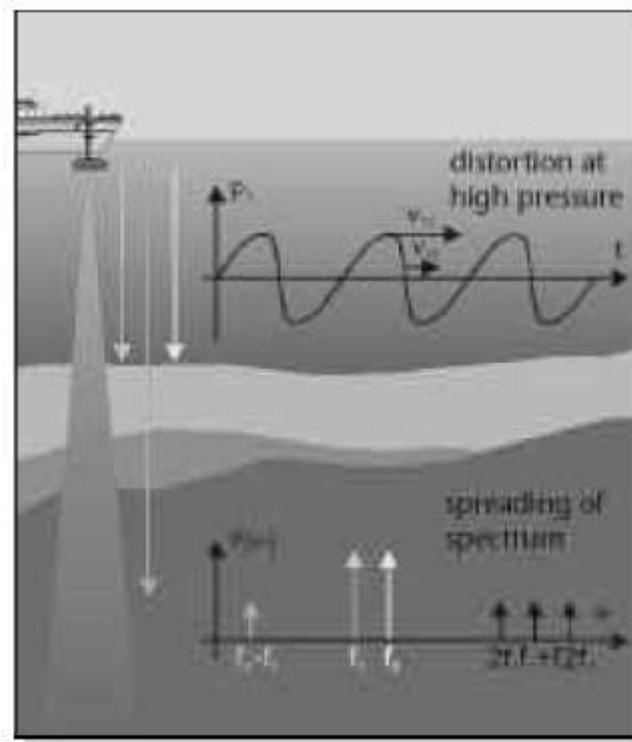
Il principio è basato sulla diversa velocità di propagazione del suono all'interno dei sedimenti, maggiore è la velocità e più marcata risulterà la risposta acustica.

La penetrazione e la riflessione dipendono sia dalle proprietà fisiche del materiale attraversato, che dalla potenza e dalla frequenza portante del segnale.

Viene trasmesso un impulso acustico che, in corrispondenza di una discontinuità nelle proprietà elastiche del materiale, che corrisponde a differenze di impedenza acustica, viene riflesso e ricevuto dal trasduttore che lo invia a sua volta tramite l'unità hardware al programma di visualizzazione nel laptop collegato.

L'impedenza acustica è correlata alla densità del materiale e la velocità con cui il suono viaggia attraverso il materiale.

Quando c'è un cambiamento di impedenza acustica, come tra acqua/sedimento, parte del suono trasmesso si riflette. Tuttavia, parte dell'energia sonora penetra attraverso il confine e nei sedimenti. Questa energia viene riflessa quando incontra i confini tra gli strati più profondi dei sedimenti aventi differenti impedenza acustica. Il sistema utilizza l'energia riflessa da questi livelli per creare un profilo del sub-sedimenti del fondo.



Schema rappresentativo dell'acquisizione Sub Bottom Profiler

La penetrazione e la riflessione dipendono dalla frequenza del segnale, dalle proprietà fisiche del materiale attraversato e dalla potenza trasmessa.

La tecnologia Sub bottom profiler si basa sull'utilizzo di due diverse frequenze del segnale, chiamate rispettivamente *Frequenza Primaria o Alta frequenza* (solitamente nell'ordine di 100 KHz) e *frequenza secondaria o bassa frequenza* (variabile da 5 a 15 KHz) (Fig. 9).

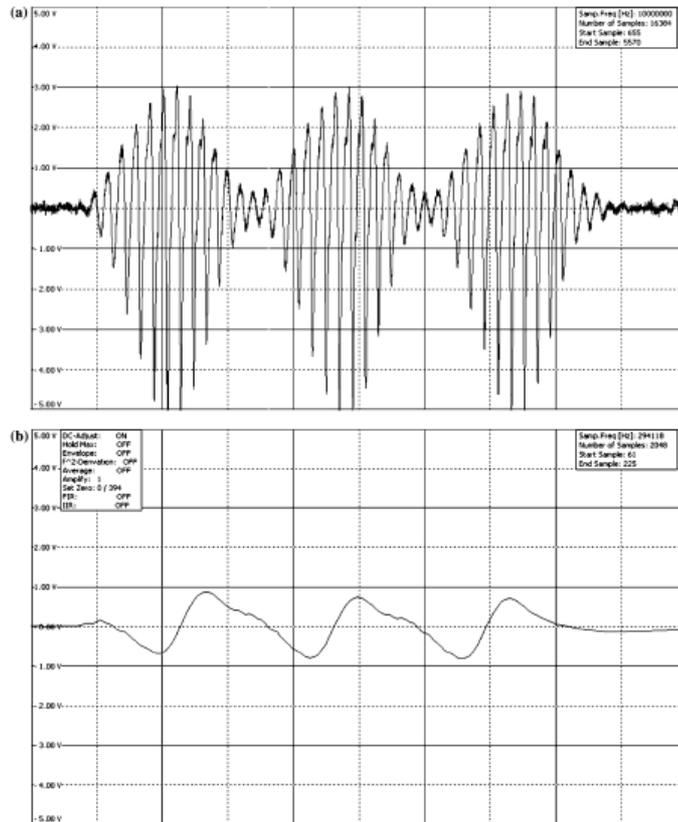


Fig 9: Esempio di segnale acustico emesso: a) alta frequenza, b) bassa frequenza

Con queste frequenze caratteristiche questo metodo permette di ricostruire la batimetria con buon dettaglio sfruttando le alte frequenze, mentre con le basse frequenze si ha la possibilità di penetrare in profondità andando a definire le sequenze litostratigrafiche presenti in profondità.

La profondità d'investigazione dipende dalla frequenza secondaria utilizzata, dalla presenza o meno di vegetazione sul fondo e dalla natura e granulometria dei sedimenti, infatti la presenza di sedimenti grossolani induce il fenomeno di scattering dell'onda acustica con relativa attenuazione del segnale.

### **3.1.3 SIDE SCAN SONAR**

L'immagine registrata dai sistemi Side Scan Sonar viene definita sonogramma.

Il principio acustico su cui si basa l'acquisizione dei sonogrammi è la diffrazione (scattering) delle onde acustiche emesse dal trasduttore, che opera, per i sistemi impiegati sulla piattaforma, con frequenza a 100-500 kHz.

I due trasduttori collocati nel tow-fish, trasformano i segnali elettrici, provenienti dal pannello di controllo, in onde di pressione (acustiche) che vengono emesse ad intervalli precisi e regolari. Il fondale genera onde diffratte in ogni direzione, e parte di tale energia torna verso il *sonar* che la amplifica e la invia al registratore a bordo, che quindi riporta per linee successive (una per ciascun impulso o *ping*) la risposta acustica del fondo.

Per approfondimenti sulla teoria dello strumento si veda Fish & Carr (1990), Jones (1999).

## **3.2 OCEANOGRAFIA OTTICA**

L'ottica marina interessa in particolare lo studio della fisica della luce nei fenomeni di interazione della luce stessa con la superficie degli oceani ed il loro interno; quindi i principali campi di interesse riguardano come l'energia luminosa interagisce con i differenti processi chimici, fisici e biologici degli oceani, e come avviene la trasmissione dell'informazione attraverso i segnali ottici sopra e all'interno della massa d'acqua (Apel, 1987). Sebbene le radiazioni ottiche siano di natura elettromagnetica e quindi governate dalle principali equazioni elettromagnetiche, nella pratica è più utile trattare questo tipo di radiazioni separatamente, come un aspetto particolare dell'elettromagnetismo.

A tale proposito, prendendo in considerazione l'intero spettro elettromagnetico, le lunghezze d'onda di maggior interesse in oceanografia ottica, sono essenzialmente confinate tra il vicino ultravioletto e il vicino infrarosso. Le principali applicazioni dell'oceanografia ottica riguardano

soprattutto il campo del telerilevamento. In particolare per quel che riguarda gli studi del sistema marino costiero, la rilevazione di fotogrammetrie aeree o recentemente di rilievi multi- o iper-spettrali (Dale, Hulsman & Chandica, 1986; Donoghue & Shennan, 1987; Zaccharias et Al., 1992; Jaubert et Al., 1999) è praticamente un metodo di routine impiegato per studi relativi alla mappatura e classificazione degli ambienti e delle biocenosi e/o di morfologie sommerse presenti sul fondo nei primi 20 metri d'acqua e per il monitoraggio dei cambiamenti della linea di costa.

I dati ottenuti tramite rilevamenti da satellite vengono utilizzati invece per studiare fenomeni a grande scala indicatori di condizioni geologiche e processi dinamici (es. la distribuzione dei sedimenti in sospensione in aree di delta) mentre in aree di mare aperto con acque profonde, questi ultimi sono utilizzati per studiare la circolazione e le correnti oceaniche o i processi legati alla produttività primaria superficiale (in merito alle misure della concentrazione di alcuni costituenti della massa d'acqua, in particolare il fitoplancton) (Savini 2004).

Per misure più puntuali e specifiche, da poter accorpate durante i survey oceanografici per lo studio della massa d'acqua, le applicazioni dell'oceanografia ottica hanno inoltre prodotto strumenti ideati per la misura del livello di torbidità della massa d'acqua come nefelometri e scatterometri (Corselli, 2000).

## **4 METODI GEOFISICI APPLICATI IN ACQUE POCO PROFONDE**

Come accennato in precedenza lo scopo del presente lavoro di tesi era quello di verificare l'applicabilità di metodi geofisici, tradizionalmente utilizzati a terra ed in mare per scopi archeologici, in zone con fondale basso, intorno al metro di profondità, verificandone l'applicabilità.

L'applicazione di tali metodi, come vedremo in seguito, è stata utile per verificare i limiti strumentali e per fare un tentativo di utilizzo congiunto di diverse tecniche da poter sviluppare in futuro, vista l'assenza in letteratura di lavori simili.

I metodi geofisici utilizzati sono stati:

- Multi beam
- Sub bottom profiler
- Geoelettrica con configurazione tomografica in continuo

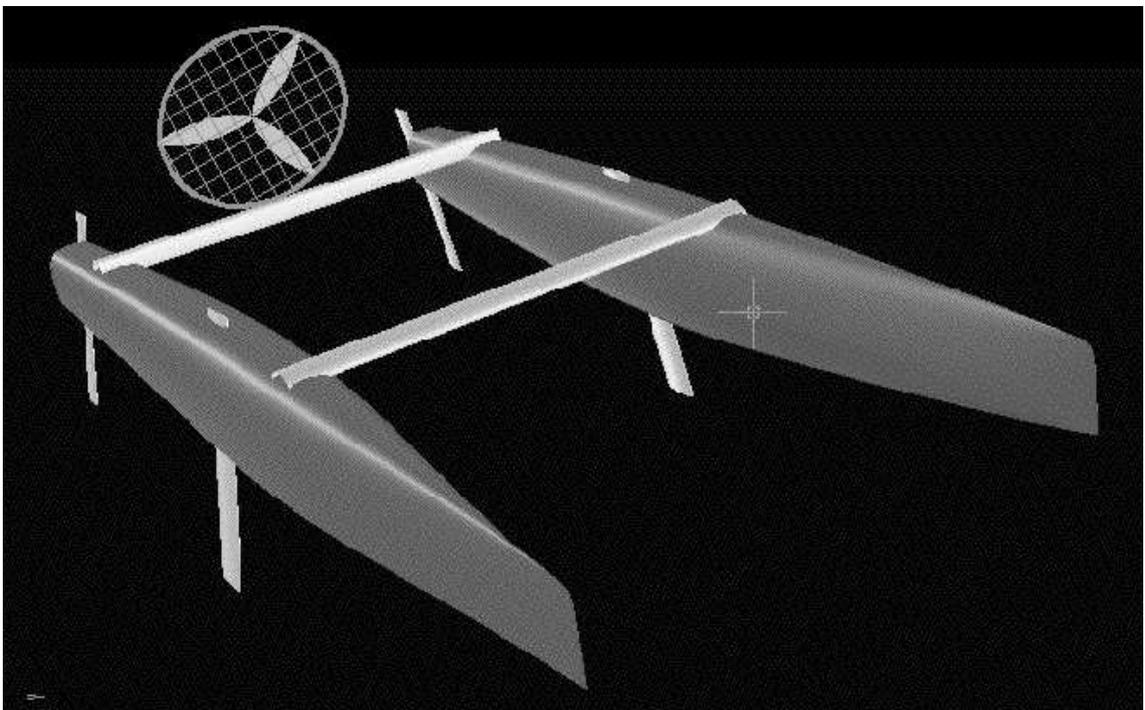
A tal proposito primo importante passo per eseguire questo studio sperimentale è stato quello di progettare e costruire un prototipo d'imbarcazione con caratteristiche idonee alla navigazione in acque poco profonde, con propulsione alternativa ed idoneo all'installazione delle strumentazioni utilizzate.

## **5 PROGETTO PROTOTIPO IMBARCAZIONE**

Per la realizzazione del prototipo d'imbarcazione adatto a rilievi geofisici in condizioni di fondale basso si è tenuto conto delle principali esigenze dettate da tale scopo:

- Lo scafo deve pescare il meno possibile in modo tale da lavorare in pochi cm d'acqua, compatibilmente alle condizioni di minimo lavoro degli strumenti.

- Possibilità di posizionare lungo l'asse della barca i trasduttori degli strumenti utilizzati per garantire sempre la massima stabilità in fase di navigazione.
- Propulsione alternativa per ridurre al minimo la perturbazione al di sotto della superficie dell'acqua, evitare i disturbi dovuti alle correnti galvaniche formate dalla presenza di una vicina elica in acqua ed il possibile incaglio.

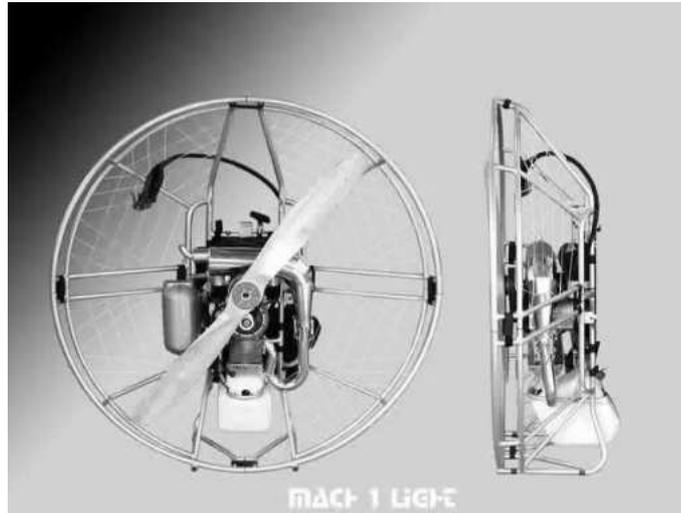


*Risultato delle esigenze di lavoro*

Il risultato delle esigenze sopraccitate è quello di un catamarano adattato con particolari accorgimenti, con propulsione garantita da un motore ad elica esterno, i particolari progettuali sono riportati qui di seguito.

La progettazione del prototipo è partita dallo sviluppo di due pattini catamarano modello Dynacat (cantieri nautici Mattia Dervio).

Per la propulsione alternativa a quella in acqua si è scelto di utilizzare un Paramotore modello Mach1 dell'azienda Fly Castelluccio.



*Paramotore utilizzato per la propulsione, mod. Mach 1: spinta statica 57 Kg*

La costruzione del prototipo è iniziata con l'adattamento dei due pattini di catamarano, che sono stati uniti da tre traverse in alluminio, in quanto dopo lo studio della distribuzione dei pesi (peso/spinta del paramotore posizionato a poppa e peso equipaggiamenti/equipaggio), sull'imbarcazione si era reso necessario portare la postazione di comando il più possibile verso prua in modo tale da bilanciare la barca rendendola in assetto il più possibile orizzontale, inoltre l'introduzione della terza traversa ha aumentato lo spazio disponibile a bordo rendendo le manovre più agevoli.

Al di sopra dei pattini è stata alloggiata una piattaforma, con dimensioni di circa 4,5m x 2,5m, costituita da due fogli di vetroresina con riempimento di poliuretano espanso, ricoperta poi con materiale morbido in gomma, il tutto diviso in due pezzi accoppiabili che consentono una maggior facilità nel montaggio/smontaggio.

Si è proceduto ad un primo collaudo in acqua del prototipo presso i cantieri nautici a Dervio; in particolare sono stati posizionati sullo stesso dei cilindri di cemento del peso di 50 Kg/cad dislocati secondo l'assetto di navigazione in fase di lavoro per un totale di circa 400 Kg, in modo tale da verificare la risposta iniziale del prototipo alla sollecitazione del carico verticale potendo avere una prima idea del pescaggio in fase di lavoro.

Il risultato ottenuto è stato soddisfacente in quanto l'abbassamento degli scafi è risultato modesto, nell'ordine di 10/15 cm e pressoché uniforme (Fig. 10).



*Fig. 10: Risultato primo collaudo di verifica del pescaggio: come si nota la barca mantiene un buon assetto ed inoltre il pescaggio è minimo.*

Dopo la prima fase di collaudo si è proceduto alla fase di modifica della timoneria che è stata prolungata verso prua collegandola con cavi rigidi speciali ad una postazione di comando costruita su misura.

E' stato fissato poi il paramotore a poppa ed è stato realizzato il prolungamento dei comandi di accelerazione e di avvio alla postazione di comando a prua.

Si è poi proceduto alla costruzione di un box in compensato marino verniciato con vernice nautica, a tenuta stagna per l'alloggiamento hardware

delle varie strumentazioni utilizzate, al disopra di esso è stata costruita una copertura plexiglass per la protezione dei montors.

Infine sono stati costruiti gli ancoraggi per i trasduttori degli strumenti di misura, in particolare al disotto del baricentro dell'imbarcazione è stato alloggiato il trasduttore multi beam, sorretto da un tubo collegato ad una piastra con una cerniera in modo tale da poterlo alzare ed abbassare durante le fasi di lavoro.

E' stata costruita poi una struttura in acciaio inox per prolungare verso prua l'ancoraggio del trasduttore sub bottom, distanziandolo così da quello del multi beam, per evitare interferenze durante l'eventuale utilizzo congiunto.

La barca durante le fasi di lavoro è dotata di un sensore di moto, posizionato sul baricentro della stessa e di un GPS allocato sul box in legno ad offset noto.

Il prototipo è interamente smontabile e trasportabile su un carrello sopra il quale si trova un gavone per il ricovero di tutti i componenti della barca e di alcuni strumenti. I particolari di montaggio sono riportati nel paragrafo successivo (Fig. 11)



*Fig. 11: particolare prototipo smontato e trasportato con carrello appositamente modificato.*

## 5.1 Fasi di montaggio



1)



2)



3)



4)



5)



6)

Nelle immagini sopra si possono notare le varie fasi di montaggio del prototipo: 1) si accoppiano gli scafi 2) si inseriscono le traverse in alluminio 3) si posiziona la piattaforma in vetroresina 4) si posiziona il paramotore 5) si installa la parte relativa alla timoneria e gli ancoraggi per i trasduttori degli strumenti 6) si posiziona il box per l'alloggiamento degli hardware e dei monitors e si completano i collegamenti necessari alla navigazione.

## **6 METODI GEOFISICI UTILIZZATI**

Per raggiungere lo scopo sopracitato è stata utilizzata la strumentazione messa a disposizione dal CONISMA e dall'unità locale dell'Università di Cagliari Dipartimento di Ingegneria del Territorio.

In particolare le metodologie utilizzate vengono di seguito illustrate.

### ***6.1 Multi Beam***

Primo scopo del presente lavoro era quello di restituire la batimetria di dettaglio ad alta risoluzione tramite l'utilizzo di un ecoscandaglio multifascio di altissima precisione.

Questo tipo di ecoscandaglio, a differenza del single-beam, irradia una superficie molto ampia di fondale. Con un singolo impulso è possibile campionare il fondale, perpendicolarmente alla direzione di avanzamento dell'imbarcazione, in 240 punti (240 beams) su di un corridoio ampio circa 3,5 volte la profondità dell'acqua.

#### **6.1.1 Strumentazione utilizzata e principi**

Il sistema utilizzato per l'esecuzione dei rilievi è il Multibeam Reson SeaBat 8125, strumento in grado di operare con ricezione simultanea di 240 *beams* separati ognuno di 0.5° per una apertura totale (*swath coverage*) di 120°, così

da rilevare una fascia di fondale pari a circa 3.5 volte la profondità. La frequenza utilizzata dal sistema è di 455 KHz.

In tal modo, questa strumentazione permette di ottenere la copertura totale dell'area da investigare con un elevato numero di punti campionati per unità di superficie.

Tutto il rilievo è pianificato e gestito dal sistema di navigazione ed acquisizione equipaggiato con il software THALES PDS2000. Questo sistema, oltre a gestire ed a controllare la geodesia, la navigazione sulle linee teoriche ed i dati provenienti da tutti i sensori connessi al sistema provvede anche a registrarli nel formato opportuno. Tutto ciò è facilitato dai numerosi display disponibili, tra cui quelli per il controllo di qualità dei dati, di supporto alla navigazione con background di carte elettroniche, la finestra dello stato degli strumenti, ecc.

Nella finestra della copertura multi beam è visibile in tempo reale sia la posizione dell'imbarcazione che un modello del fondo indagato e creato man mano che procede l'esecuzione del rilievo. In ogni singola cella possono essere memorizzati i dati di profondità min, max e di media. Tale visualizzazione, oltre a fornire subito l'andamento batimetrico del fondale, permette la corretta prosecuzione del rilievo evidenziando la eventuale presenza di zone non indagate.

Come accennato il software di navigazione PDS 2000 ha bisogno di dati che permettano di stabilire l'esatto punto di campionamento e che permettano di correggere gli errori indotti da rollio, beccheggio ed imbardata dell'imbarcazione. Per ottenere i dati sopraccitati sono stati utilizzati gli strumenti di seguito riportati:

- GPS rtk Trimble 5700
- OCTANS-GYROCOMPASS WITH MOTION SENSING, è uno strumento di compensazione integrato di rollio, beccheggio, girobussola. Lo strumento è costituito da un modulo integrato che comprende sia il sensore di

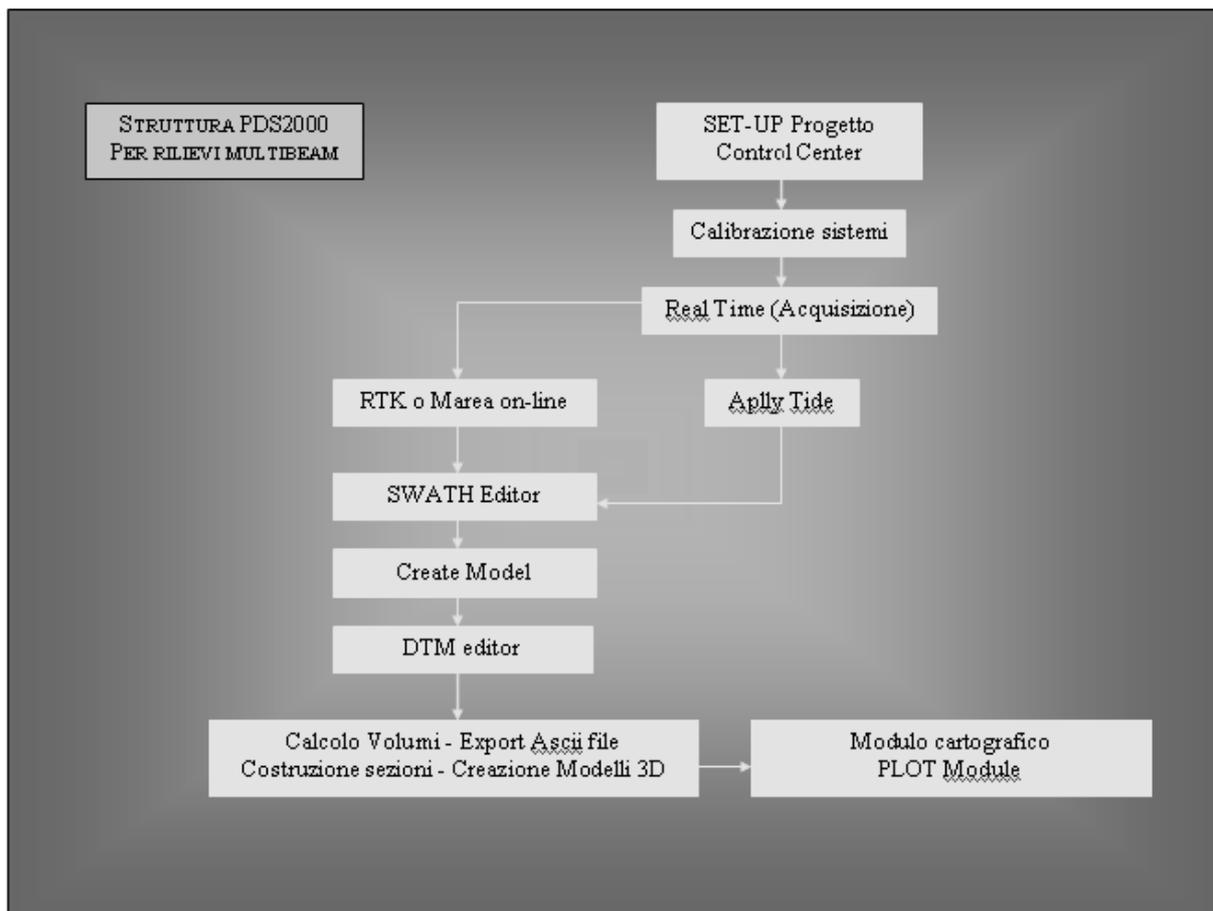
girobussola al fine di una corretta misurazione dell'orientamento del mezzo navale, sia il sensore per la correzione degli effetti del moto ondoso, necessari per le fasi d'acquisizione ed elaborazione e restituzione dati.

- SVP15 o SONDA PER LA DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEL SUONO IN MARE, serve per la calibrazione del multibeam, relativamente alla determinazione della velocità di propagazione acustica nella colonna d'acqua sottostante l'imbarcazione.

## 6.1.2 Acquisizione dati

Come accennato in precedenza il software Thales PDS 2000 è indispensabile per l'acquisizione ed elaborazione dei dati multi beam, di seguito sono illustrate in dettaglio le procedure d'acquisizione

### 6.1.2.1.1 PDS 2000



Il primo step è la CREAZIONE DEL PROGETTO con tutte le impostazioni relative a: dati del progetto, unità di misura e loro formato, elissoide di lavoro trasformazioni ellissoidiche, proiezioni topografiche, directory di registrazione.

Dopodiché bisogna passare alla scelta della tipologia del lavoro impostando:

- offsets degli strumenti, pescaggio e raggio di curvatura dell'imbarcazione
- impostazione dei contorni della barca
- Scelta, configurazione e test degli strumenti da utilizzare per il lavoro e impostazione delle porte di comunicazione.
- fonte dei dati da utilizzare
- calcoli standard o personalizzati che il software deve eseguire
- impostazione di runlines e waypoints

Secondo step da eseguire è la CALIBRAZIONE: all'interno del programma PDS2000 è presente una procedura semiautomatica di calibrazione dell'intero sistema di acquisizione dati multibeam (Time delay, Roll, Pitch, heading e sound velocity).

Per eseguire l'operazione di calibrazione è necessario acquisire delle linee in un'area caratterizzata da un fondale pianeggiante su cui è riconoscibile un target sul fondo, la routine di calibrazione permette di determinare i parametri di installazione del trasduttore, la latenza temporale del sistema di acquisizione dati e di effettuare un controllo sulla qualità del profilo di velocità del suono.

La procedura di calibrazione si basa sul cosiddetto patch test, ovvero la corrispondenza del profilo del fondo acquisito eseguendo delle linee di navigazione con differenti orientamenti e diverse velocità di rilievo.

#### Vantaggi multibeam

- maggiore precisione dei singoli valori di profondità rilevati
- copertura totale dell'area da investigare con un elevato numero di punti del fondale campionati per unità di superficie. Ad esempio in fondali con circa 10 metri di profondità si può arrivare a più di 55 punti campionati per m<sup>2</sup>.

- identificazione di oggetti presenti sul fondo, quali ad esempio condotte sottomarine, relitti, ecc. ecc.
- nel caso di profondità maggiori di circa 4,5 metri, l'ampiezza del corridoio indagato è tale da permettere l'esecuzione di un numero minore di transetti rispetto ad un rilievo eseguito con un ecoscandaglio single beam. Tutto ciò porta ad un numero minore dei giorni di lavoro ed ad un migliore rapporto qualità/prezzo del servizio fornito.

## **6.2 Sub-bottom profiler**

Il passo successivo per gli scopi prefissati era quello di utilizzare una tecnologia che permettesse di penetrare all'interno dei sedimenti in modo tale da poter ricostruire le sequenze litostratigrafiche ed eventualmente identificare delle anomalie che potessero ricondurre alla presenza di oggetti sepolti.

### **6.2.1 Strumentazione utilizzata e principi**

La strumentazione utilizzata è il sistema SBP SES 2000 Compact della Innomar (Fig.12). Le caratteristiche principali della strumentazione sono:

- FREQUENZA PRIMARIA: 100 KHz
- FREQUENZA SECONDARIA: 5,6,8,10,12,15 KHz
- POTENZA: >12 Kw



*Fig. 12: INNOMAR SES 2000 COMPACT*

Il principio è basato sulla diversa velocità di propagazione delle onde acustiche all'interno dei sedimenti, maggiore è la velocità e più marcata risulterà la risposta acustica.

Viene trasmesso un impulso acustico che, in corrispondenza di una discontinuità nelle proprietà elastiche del materiale, viene riflesso e ricevuto dal trasduttore che lo invia a sua volta tramite l'unità hardware al programma di visualizzazione nel laptop collegato. La sorgente Sub-bottom profiler fornisce dati di sismica di riflessione ad altissima risoluzione.

La penetrazione e la riflessione dipendono sia dalle proprietà fisiche del materiale attraversato, che dalla potenza e dalla frequenza portante del segnale.

Le onde emesse dalla sorgente piezoelettrica hanno una energia di 5 joule, la frequenza primaria (100 KHz) ha la funzione di restituire la batimetria in dettaglio, mentre quella secondaria (variabile da 5 a 15 KHz) ha la funzione di penetrare nei sedimenti e restituire la stratigrafia con buona precisione che dipende dal tipo di strumentazione utilizzata.

La penetrazione nel fondale può arrivare fino a 20-30 m in sedimenti limoso argillosi e di raggiungere una risoluzione centimetrica, mentre è limitata in sedimenti grossolani o in presenza di fitta vegetazione.

Per avere l'esatta posizione dei dati tutto il sistema è stato collegato ad un sistema ad un GPS RTK Trimble 5700, interfacciato con il software di gestione dello strumento.

### **6.2.2 Acquisizione dei dati**

Per l'acquisizione dei dati è stato installato il trasduttore SBP, che funge contemporaneamente da trasmitter e reciver, sulla prolunga in acciaio a prua del prototipo, ancorato per mezzo di un palo telescopico che permetteva di regolare la profondità dello stesso in funzione del fondale da investigare (Fig.13).



*Fig. 13: particolare dell'ancoraggio per il trasduttore SBP*

Il sistema hardware è stato posizionato all'interno del box di protezione in compensato marino ed il laptop di gestione dati è stato allocato sotto la copertura in plexiglass.

### **6.2.3 Il software e parametri di acquisizione**

Per l'acquisizione dei dati Sub Bottom è stato utilizzato il software SES for WIN che permette di visualizzare in tempo reale la sezione acustica che si sta acquisendo. Inoltre lo stesso permette di scegliere tutti i parametri di acquisizione come:

- frequenze secondarie, permettendo di verificare la profondità di penetrazione nei sedimenti e precisione di rilievo. Le frequenze possono essere variate in tempo reale rendendo il sistema estremamente elastico.
- Offset del trasduttore, profondità dello stesso, per avere il dato già corretto.

- Valore della velocità di propagazione delle onde acustiche in acqua, lo strumento permette anche l'autocalibrazione se non si dispone di una sonda SVP.
- Output dei dati relativi alle coordinate per la restituzione delle linee acquisite in carta.
- Range di profondità minima e massima sul quale si vuole lavorare e regolare il rumore.
- Numero di stack, lo smoothing, applicazione di filtri ed aggiustare il guadagno alle varie frequenze.

Il programma produce un file \*.SES in cui è visualizzata l'ampiezza del segnale acustico riflesso a diverse profondità. Inoltre in esso sono contenuti tutti i dati relativi a longitudine, latitudine, profondità del fondale e parametri d'acquisizione.

#### **6.2.4 Trattamento dati sub bottom profiler**

Per effettuare il confronto con le sezioni di resistività i dati ottenuti con le indagini di tipo SBP sono stati elaborati con il software ISE 2.8 della Innomar Technologie GmbH. Il sub bottom profiler genera delle sezioni in cui è visualizzata l'ampiezza del segnale acustico riflesso a diverse profondità. Il trattamento del segnale è del tutto analogo a tecniche quali georadar e sismica.

E' possibile generare la batimetria dell'area acquisita, individuare la stratificazione, le singole iperboli di riflessione, calcolare la velocità di propagazione del segnale di uno strato o di un oggetto e quindi la sua profondità.

Per ciascun file registrato sono state esportate le coordinate UTM, che sono poi state trattate con il software ultraedit, che prepara il formato giusto per l'importazione dei dati come waypoint in oziexplorer. Quest'ultimo poi converte i waypoint in profili in formato Kml.

Sono stati quindi applicati filtri di tipo stacking, background removal e di amplificazione del segnale.

Il dato ottenuto in acquisizione non viene ulteriormente elaborato, poiché il segnale acustico registrato è preventivamente filtrato per la frequenza di Nyquist e costituisce l'involuppo della trasformata di Hilbert del segnale, rendendo tutti i campioni di segno positivo. L'unico procedimento che può essere applicato è la migrazione, utilizzando un campo di velocità pari a quella dell'onda acustica nell'acqua, per collassare le diffrazioni legate alla morfologia del fondale marino e ottenere quindi un'immagine acustica più precisa dello stesso.

### **6.3 Geoelettrica**

Come accennato in precedenza in questo lavoro si sono voluti testare più metodi di tipo indiretto per la prospezione di fondali poco profondi, in modo anche congiunto. A tal proposito in collaborazione con l'Unità locale del CONISMA dell'università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, si è testata la metodologia elettrica in continuo con elettrodi galleggianti.

Questo ha permesso di effettuare il confronto con le sezioni sub bottom acquisite e verificare la corrispondenza di eventuali anomalie riscontrate.

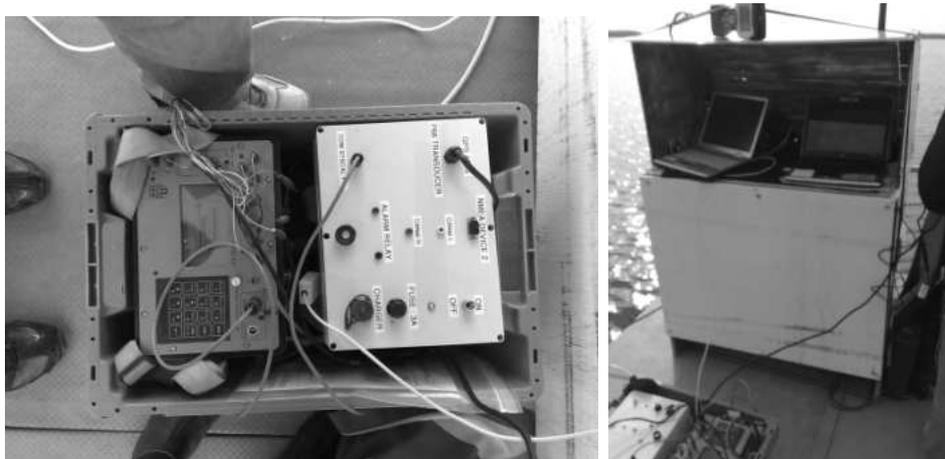
#### **6.3.1 Strumentazione utilizzata e principi**

Per quanto riguarda la strumentazione e la configurazione il sistema era così composto:

- Georesistivimetro Syscal Switch Pro della Iris Instruments a 48 uscite e 10 canali;
- Cavo multipolare a 13 uscite in grafite con spaziatura 2 m;
- Unità di controllo della strumentazione prodotta dalla Iris Instruments (componente indispensabile per la raccolta dei dati a mare)

- Set di galleggianti per mantenere il cavo sulla superficie dell'acqua;
- Cavi di raccordo e batterie;
- Sonda multi - parametrica per il campionamento dello strato d'acqua;
- Computer Laptop, per la gestione del georesistivimetro e la memorizzazione dei dati;
- GPS di navigazione Garmin 420S;
- GPS differenziale RTK Trimble 5700;
- Echo Sounder;

(Fig.14)



*Fig. 14: particolare dell'alloggiamento del sistema geoelettrico e suoi componenti*

Alla configurazione sopracitata si è arrivati dopo anni di studi dove l'acquisizione dei dati di resistività, della posizione e della batimetria avvenivano separatamente e integrate tra loro in fase di post processing (Snyder, 1997). Oggi tutto quanto è stato automatizzato dall'unità di controllo che gestisce contemporaneamente le informazioni provenienti da GPS, sounder e georesistivimetro.

L'unità di controllo riceve dal Syscal 10 misure simultanee di resistività apparente, dal GPS e dal sounder 2 blocchi di dati costituiti rispettivamente: dalle stringhe NMEA (National Marine Electronics Association) contenenti latitudine, longitudine, altitudine, velocità media e dai dati di batimetria.

Viene quindi calcolata la posizione di ciascun elettrodo sull'ipotesi di uno stendimento rettilineo a partire da offset noti, tra la posizione dell'antenna del GPS, del sounder, dalla prima uscita del cavo marino e dalla spaziatura degli elettrodi.

La precisione di questi dati viene a mancare durante le fasi di virata, generando così inevitabili errori nel posizionamento delle misure.

Snyder nel 1997 ha calcolato che curvature inferiori a 5° generano un errore di pochi metri sull'ultimo takeout di un cavo con 9 uscite spaziate 10 m (Fig.15).

L'output registrato dal computer è un file \*.bin generato dallo strumento Syscal Pro contenente tutte le informazioni acquisite dai vari componenti.



*Fig. 15: particolare della fase di virata*

### **6.3.2 Acquisizione dei dati**

Per l'esecuzione delle indagini è stato installato il cavo munito di galleggianti ancorato in prossimità di una delle traverse che costituiscono parte portante della barca (Fig 15).

In fase di navigazione poi i singoli galleggianti sono stati lasciati in acqua progressivamente in modo tale da evitare ingarbugliamenti nel cavo, infine sulla parte terminale del cavo è stata posizionata una zavorra in modo tale da tenere il cavo sempre teso. La zavorra terminale deve essere disposta in modo tale da non toccare sul fondo evitando così possibili incagli del cavo.

La strumentazione di misura (Syscal, e unità di controllo) sono stati posizionati in un contenitore stagno di materiale plastico, il laptop collegato è stato posizionato sul box in legno nella zona coperta destinata all'alloggiamento dei monitor (Fig. 14).

Come già accennato il gps ed il sounder sono stati installati ancorandoli al box principale ad offset noti, anche il trasduttore del sounder è stato posizionato lateralmente ad uno degli scafi del catamarano in posizione e profondità note.

### **6.3.3 Il software e parametri di acquisizione**

È stato utilizzato il software Sysmar, prodotto dalla Iris Instruments, per l'acquisizione dei dati.

Esso consente la gestione dei parametri di acquisizione quali intervallo di campionamento, numero di canali attivi, voltaggio agli elettrodi di corrente, distanza e offset di GPS e sounder, ecc.

In tempo reale vengono visualizzati sullo schermo del computer la velocità media dell'imbarcazione, i valori numerici registrati su ciascun canale e la pseudo sezione di resistività apparente o di polarizzazione indotta nel caso in cui questa modalità sia stata attivata.

La posizione degli elettrodi di corrente e la misura della differenza di potenziale rimane fissa rispetto al cavo e quindi rispetto all'acquisizione statica, non si ha la preparazione di una vera e propria sequenza di misura.

In questo sistema viene quindi bypassato lo switch del georesistivimetro collegando il cavo marino al box esterno tramite connettori tipo banana plug.

Il software consente quindi di stabilire le coordinate degli elettrodi di corrente e di potenziale, semplicemente assegnando una distanza relativa tra le uscite.

Una volta stabilita la geometria di acquisizione, il programma indica automaticamente su quali canali effettuare il collegamento dei connettori del cavo.

La densità spaziale di punti misurati è una funzione della frequenza di campionamento e della velocità con cui gli elettrodi vengono trascinati dall'imbarcazione sulla superficie dell'acqua.

L'acquisizione in continuo non consente l'inversione di polarità di quadripoli, né lo stacking delle misure e quindi il calcolo della deviazione standard durante le misure.

Per contro però, l'utilizzo di strumentazioni congiunte che permettono alte frequenze di campionamento, anche minori a 0,01 s (Panissod et al., 1998), consentono di sovra campionare i dati e perciò eliminare senza troppe conseguenze valori anomali di resistività.

Nel sistema utilizzato è quindi necessaria la sincronizzazione tra i tempi di campionamento dei vari componenti (gps, sonuder, syscal ecc.).

La frequenza di campionamento risultante deve essere quella del componente "più lento a campionare", ossia il GPS che acquisisce ogni secondo.

Mantenendo una velocità di circa 2 nodi sono stati acquisiti dati di resistività circa ogni metro.

Il quadripolo utilizzato è stato un reciprocal wenner (Fig.16) con tensione applicata agli elettrodi di corrente di 25 V.

### ARRAY RECIPROCAL WENNER

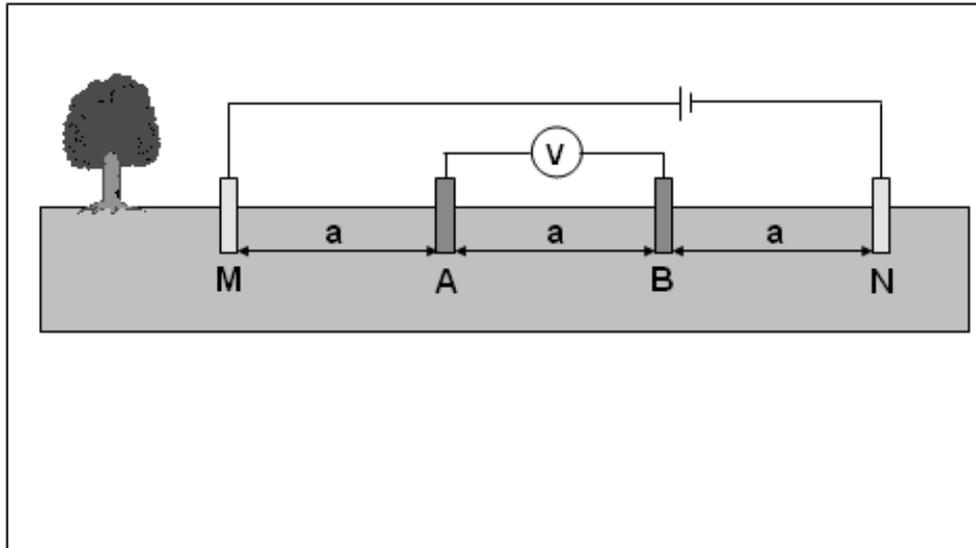


Fig. 16: Array "RECIPROCAL WENNER". Rispetto all'Array Wenner classico gli elettrodi di corrente sono all'interno (A-B), mentre quelli dove si misura la differenza di potenziale sono esterni (M-N), viene comunque mantenuta costante la mutua distanza tra gli elettrodi .

#### 6.3.4 Trattamento dati di resistività

I dati di resistività ottenuti con sistemi mobili presentano importanti differenze rispetto a quelli ottenuti con metodi standard. In primo luogo vengono generati profili molto lunghi in cui la dimensione orizzontale supera di gran lunga la massima profondità di penetrazione raggiunta. Nelle indagini in continuo viene inoltre acquisito un numero molto elevato di differenti posizioni degli elettrodi e di dati di resistività. Nel processo di inversione tutto ciò si traduce nell'utilizzo di una maglia costituita da molte celle in cui il numero di nodi nella direzione orizzontale è nettamente superiore a quella verticale (Loke e Lane, 2004). La griglia agli elementi finiti viene quindi modificata tramite una serie di sub -

griglie sovrapposte in direzione orizzontale simile al metodo descritto da Christiansen e Auken, 2004.

Questa soluzione riduce lo sforzo computazionale nel calcolo del modello diretto.

Un secondo vantaggio è ottenuto risolvendo l'algoritmo di calcolo del software Res d2inv, proposto da Loke, ai minimi quadrati con il metodo iterativo del gradiente coniugato che riduce la memoria necessaria per salvare lo Jacobiano (Li e Oldenburg, 2000).

Il calcolo delle coordinate degli elettrodi ed il processo di inversione si basano sull'ipotesi di stendimenti rettilinei.

Per ciascun file generato durante l'acquisizione, analogamente a quanto eseguito per i dati sub bottom, sono state esportate le coordinate GPS con il software di calcolo UltraEdit e di plottaggio OziExplorer, per essere poi convertite in formato kml importabile in google earth.

Questa fase del processing dei dati è fondamentale e notevolmente dispendiosa in termini di tempo poiché ad oggi non esiste un algoritmo che consenta di automatizzarne tutte le operazioni.

Le due prospezioni hanno consentito di elaborare in tutto 49 tomografie elettriche di resistività apparente.

I dati sono quindi stati esportati con formato idoneo per il software di inversione inserendo gli offset tra il sounder ed il primo elettrodo ed il valore di resistività campionato dello strato d'acqua.

I dati sono stati invertiti con il programma ResD2Inv della Geotomo Software.

I principali parametri di inversione utilizzati sono stati la soluzione con elementi finiti a maglia fine con dimensione delle celle pari alla metà della spaziatura degli elettrodi. È stata adottata la norma  $L_1$  che limita la propagazione degli errori e risolve meglio le anomalie regolari.

## 7 SITI STUDIATI

### 7.1 Sito di Mothia



#### 7.1.1 STORIA

Davanti la costa marsalese, nella zona delle saline, alcune piccole isole si stringono a formare una laguna: è la *Riserva Naturale Orientata Isole dello Stagnone*. Tra queste, la più importante è sicuramente **Mothia**. Il suo ruolo nella storia non è indifferente. Per la sua posizione strategica nel Mediterraneo, i Cartaginesi ne vollero fare un proprio scalo commerciale. Purtroppo però Mothia subì le conseguenze della lotta tra Greci e Cartaginesi per il dominio sulla Sicilia. Quando fu attaccata e distrutta da Dionisio di Siracusa, i suoi abitanti si trasferirono sul promontorio antistante, dove sorse l'odierna Marsala.

I resti della sua civiltà e della sua florida attività economica sono stati riportati alla luce da una lunga serie di scavi archeologici, soprattutto grazie all'opera di Giuseppe Whitaker che aveva precedentemente acquistato l'isola. Gli scavi hanno portato alla luce numerosi reperti fenici e la statua del "Giovinetto con Tunica" rinvenuta nel 1979, tutti conservati nella villa Whitaker divenuta museo.

I luoghi degni di nota sono la necropoli, il "*Tophet*", area sacra, dove si effettuavano sacrifici umani in onore di Baal e di Astarte, ed il "**Choton**". Quest'ultimo costruito intorno alla seconda metà del VI secolo a.C. dai fenici, si pensa che sia un piccolo porto di forma rettangolare (51x35,50 metri) con una profondità massima di circa 2,5 metri. Il suo fondo è lastricato ed è collegato al mare da un breve canale; al suo interno si dice che potevano entrare imbarcazioni lunghe fino a 19 metri e non più larghe di 4,5 metri.

La parte più studiata dell'isola è la strada lastricata, che è stata costruita intorno alla seconda metà del VI sec. a.C., pavimentata con un basolato di lastre calcaree è lunga 1770 metri; attraverso il mare collegava l'isola di Mozia alla costa siciliana. Oggi, con la bassa marea, la strada è visibile dall'alto.

### **7.1.2 RISULTATI**

Il sito di Mothia è stato il primo dove sono state testate le tecniche precedentemente descritte, in particolare nello stagnone ci si è concentrati sulle tecniche acustiche, non avendo ancora a disposizione la strumentazione per i rilievi geoelettrici, con elettrodi galleggianti.

Scopo delle indagini era quello di testare gli strumenti a disposizione a di verificare il possibile collegamento verso mare del Choton, che come precedentemente descritto poteva essere un piccolo porto (Fig. 18).

Se l'ipotesi fosse vera per il ricovero di imbarcazioni seppur di modeste dimensioni lo stesso necessitava verso mare della presenza di una sorta di canale d'accesso, considerando che il fondale nella zona è profondo meno di un metro, mentre il choton al suo interno presenta un fondale di 2,5 metri.

### **7.1.3 Dati multibeam**

I rilievi multibeam sono stati eseguiti nel mese di giugno 2007, congiuntamente a quelli sub bottom.

Prima fase dei rilievi è stata quella relativa al montaggio della strumentazione, dopodiché si è passati alla calibrazione della strumentazione come descritto nel paragrafo 6.1.2

Durante la fase di acquisizione nella zona oggetto di studio, purtroppo si è constatata l'impossibilità di acquisizione dei dati multibeam a causa delle caratteristiche dei fondali del sito.

La presenza di posidonia molto fitta sulla gran parte dell'area investigata e la profondità media al disotto del metro hanno dato problemi di scattering, inoltre i beams emessi non riuscivano ad allinearsi ridondando tra fondo e superficie.

Per quanto riguarda i dati in oggetto si è tentato per la prima volta di operare in condizioni così estreme e mai verificate precedentemente, mancando in commercio imbarcazioni con le caratteristiche del prototipo di proprietà CONISMA.

Inoltre è stato possibile verificare i limiti strumentali del sistema multibeam, che si è visto funzionare con fondali superiori a due metri (Fig. 17).



*FIG. 17: Fasi di lavoro nello stagnone di Mothia: si può notare la presenza di praterie di Posidonia, talvolta affioranti che rendevano molto difficile l'esecuzione di rotte rettilinee ed inoltre rappresentavano un fonte d'attenuazione delle onde acustiche.*

#### **7.1.4 Dati sub bottom**

Per quanto riguarda i dati sub bottom problemi legati alla profondità non si sono riscontrati, anche per questa tecnologia l'unica limitazione era quella dovuta alla presenza della vegetazione.

Le linee acquisite sono state in totale 28 di cui alcune acquisite in prossimità del Choton e nella zona di stagno antistante per verificare lo scopo sopraccitato.

La presenza della vegetazione così fitta ha limitato notevolmente la penetrazione del segnale acustico, si sono riportate quindi solo le linee con maggior risoluzione, evidenziandone alcuni tratti più significativi.

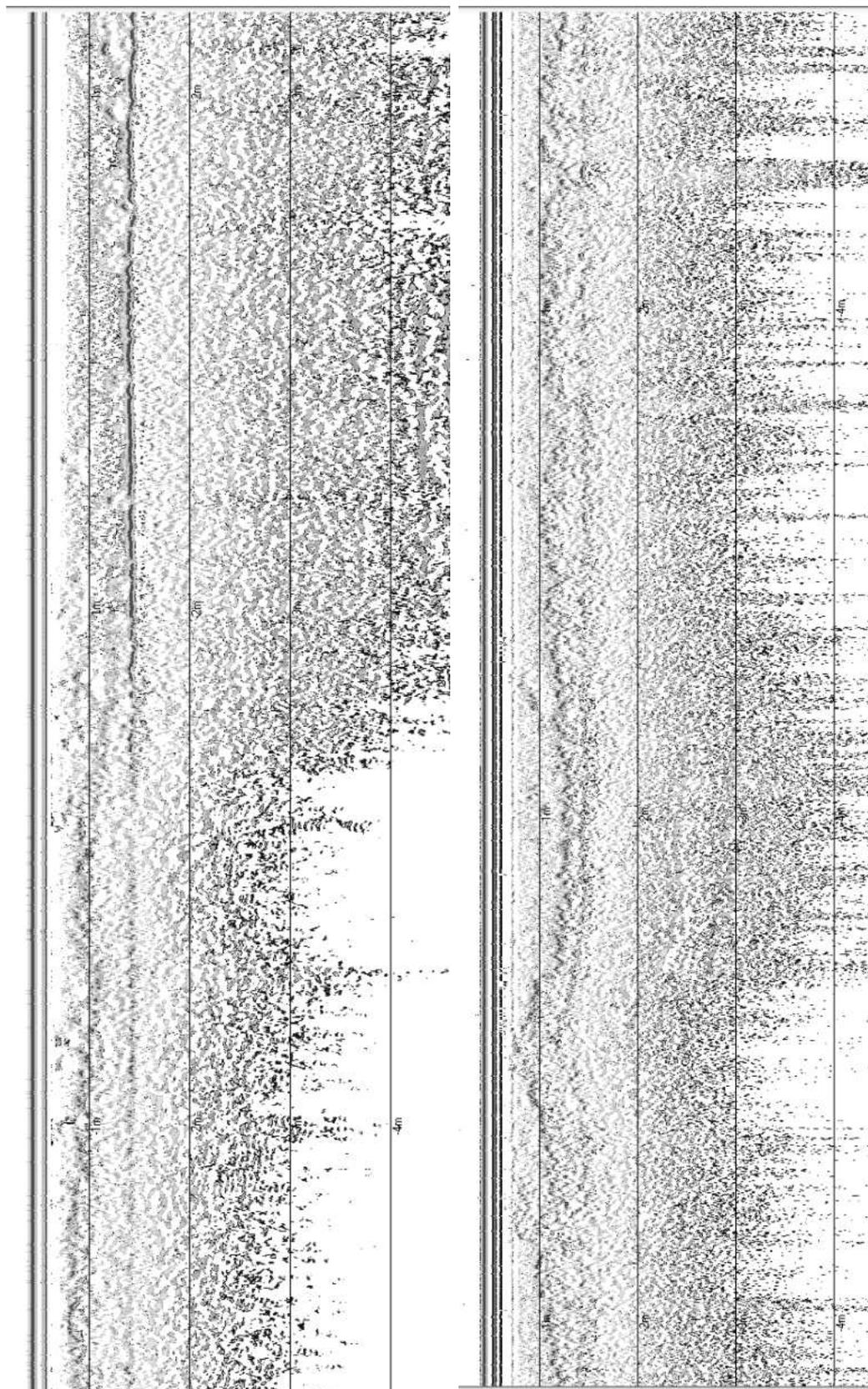
Osservando la linea\_C e la linea\_D l'unica considerazione possibile riguarda l'interfaccia posidonia/fondale mentre per considerazioni più profonde sono limitate dalla vegetazione che attenua il segnale, inoltre durante i rilievi si è visto che la vegetazione costituiva delle vere e proprie praterie, affioranti in alcune zone rendendo le manovre in acqua molto difficili e delicate (Fig. 17).

Nelle zone dove la vegetazione si dirada si nota come il segnale riesca a penetrare all'interno dei sedimenti, dove è possibile osservare che manca una vera e propria stratificazione almeno nella parte indagata.

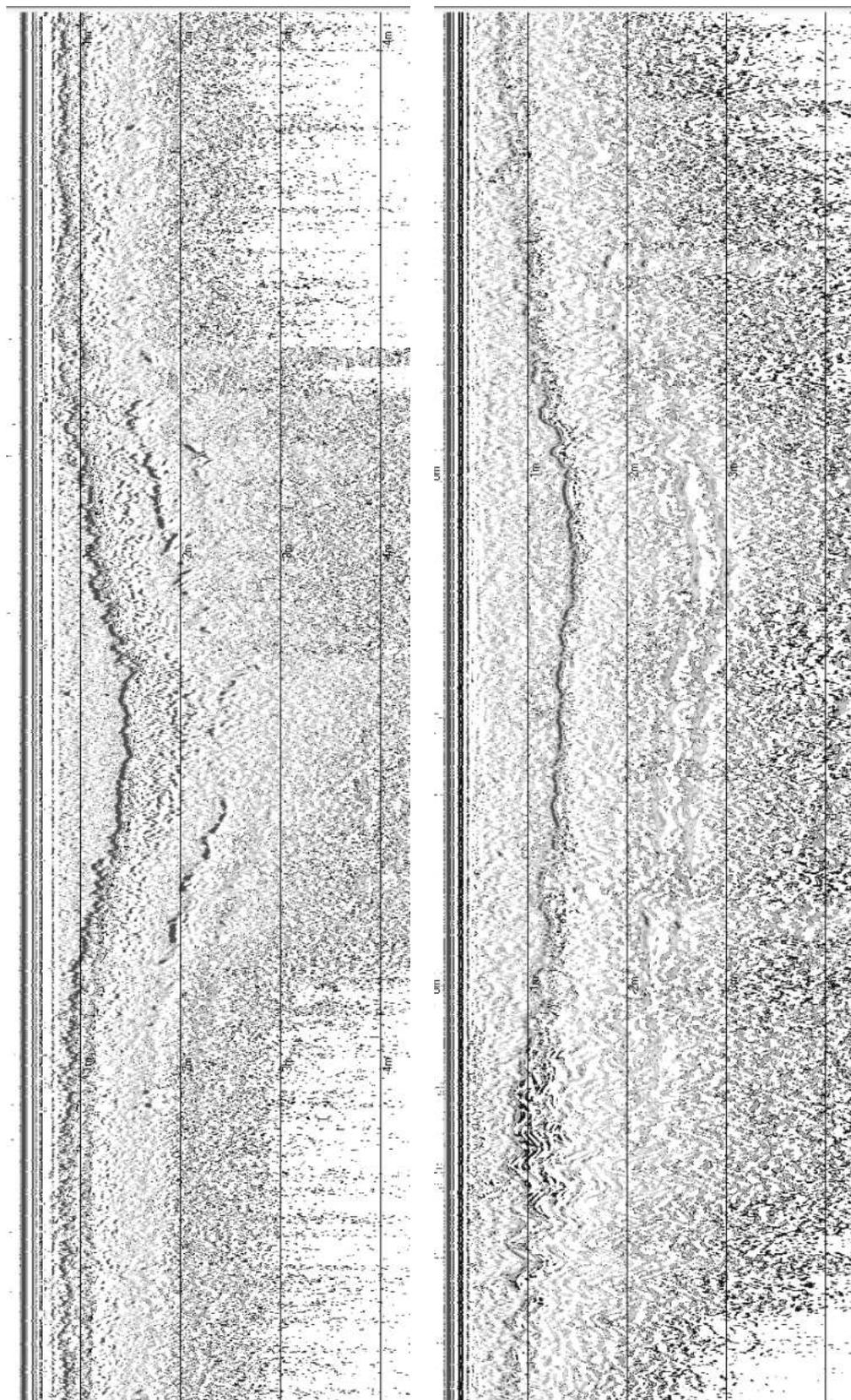
Analizzando invece la Linea\_A e la Linea\_B si osserva un'inflexione nella linea di fondo dove, seguendo l'allineamento delle due sezioni, viene evidenziato un tratto di canale, che potrebbe essere l'eventuale accesso all'area del Choton (Fig. 18).



*Fig. 18: schema rappresentativo delle principali linee analizzate.*



Linea\_C e linea\_D si noti come la vegetazione (posidonia oceanica) limiti la penetrazione delle onde acustiche, mentre dove la vegetazione si dirada il segnale riesce a penetrare mostrando un substrato pressoché omogeneo nei primi metri



Linea\_A e Linea\_B: evidenza della presenza di uno pseudo canale che poteva essere utilizzato come accesso all'area del Chyton.

## 7.2 Sito di Nora



### 7.2.1 STORIA

La città di Nora si trova collocata su di un promontorio (Capo di Pula), sito a 38° 59' 13" di latitudine Nord e 30° 26' di longitudine Ovest (riferita al meridiano di Monte Mario). Questa lingua è separata dall'entroterra mediante uno stretto istmo che, nel punto di massima strozzatura, non supera gli ottanta metri di larghezza. Dopo questo stretto il promontorio si allarga sensibilmente, estendendosi in due punte, l'una a Sud: Punta 'e su Coloru (punta dei serpenti), l'altra ad Est: Punta di Coltellazzo, di fronte all'isoletta omonima. Si forma così un approssimativo triangolo, la cui base, rivolta verso il mare, misura all'incirca m 650 e la cui altezza, sino alla strozzatura dell'istmo, è di m 500. Il promontorio inizia ad elevarsi all'altezza della cosiddetta "Casa della Guardiania", in linea con il tombolo che costituisce il limite a mare della Peschiera di Nora, portandosi a quota 3, e si estende a livello pressoché costante, tranne che in tre leggeri rialzi: il cosiddetto "luogo alto" o "tempio di

Tanit" a quota 5; Punta 'e su coloru a quota 6 e soprattutto la Punta di Coltellazzo a quota 32.

La situazione attuale del promontorio non rispecchia fedelmente quella antica. Il luogo comune della "Nora sommersa" si basa, infatti, sul reale arretramento della linea costiera, in talune parti abbastanza sensibile, anche se non in modo tale da giustificare le fantasie locali sulla città giacente sul fondo marino. L'esame delle fotografie aeree, condotta dal Prof. Schmiedt, ha permesso di ricostruire, nella cala di libeccio, un arretramento della costa di meno di m 90, e di identificare una serie di strutture portuali (moli) che si protendono nel mare. Di poco modificato, invece, appare l'istmo, la cui massima larghezza non deve avere mai superato i m 100. L'esplorazione subacquea non ha recato importanti contributi a questa indagine, se si eccettua l'identificazione di resti di una cinta muraria di epoca punica all'altezza della "Casa della Guardiania", in quanto, nella cala di libeccio, il Rio Arrieras-Tintioni ha provocato, con i suoi sedimenti, il rialzo del fondale marino.

### **7.2.2 la laguna di Nora**

La laguna di Nora non è sempre stata così com'è oggi. L'argine che la separa dal mare, e che collega la terraferma con la penisola di Fradis Minoris è stato infatti costruito nel 1957. Prima di questa data l'area lagunare era molto più piccola. Lo spazio occupato oggi dalla laguna era invaso dal mare e formava un ampio golfo naturale riparato dai venti settentrionali e occidentali. Un luogo ideale per attraccare anche in condizioni difficili, e infatti tra queste acque sono state ritrovate tracce di strutture dell'antico porto di Nora, la prima città della Sardegna.

Intorno al 1300-1150 a.C. la costa di Nora era abitata da popolazioni nuragiche, come dimostra il ritrovamento di un pozzo, di resti di ceramica e di un nuraghe oggi scomparso. Lo stesso nome di Nora è collegato alla radice mediterranea nor-nur, molto diffusa in tutta la Sardegna.

I Fenici fondano il primo nucleo della città di Nora. Arrivano intorno all'800 a.C., probabilmente attratti dalla conformazione di questo tratto di costa che consente un approdo sicuro. In questa fase Nora è soprattutto uno scalo mercantile che presto diventa vitale per le rotte commerciali del Mediterraneo. La città fenicia possiede ben tre porti, oggi in gran parte sommersi.

Con i Punici, tra il V e il IV secolo a.C., Nora è un ricco centro mercantile, in cui fervono attività e scambi commerciali. È la città più importante della costa meridionale, probabilmente anche più di Cagliari. Per assicurare la difesa di Nora e garantire l'approvvigionamento delle risorse agricole e minerarie, i Fenicio-Punici creano un sistema di fortificazioni e una rete di insediamenti abitativi in tutto il territorio circostante.

A partire dal 238 a.C., con la dominazione romana, Nora conosce il suo periodo di massimo sviluppo e ricchezza. Fra il II e il III secolo d.C. la città si è notevolmente ingrandita, con un'ampia piazza pubblica, abitazioni comuni e palazzi riccamente decorati da mosaici. È dotata di un sistema fognario e di un acquedotto, un teatro, le terme, vari luoghi di culto. Ha un sistema viario che la collega ai centri di produzione agricola e mineraria dell'entroterra e che le consente il controllo capillare del territorio. Nel porto di Nora arrivano navi cariche di merci dalla Spagna, dalla Grecia, dalla penisola italiana, dalla Gallia meridionale e dall'Africa.

Con la fine dell'impero romano inizia il lento decadimento di Nora. Le scorrerie dei Vandali, che fra il 456 e il 466 d.C. occupano la Sardegna, costringono gli abitanti a ritirarsi verso l'interno e ad abbandonare per sempre la città. Anche le strutture dell'antico porto scompaiono sommerse dal mare, ma la cala continua a essere usata come porticciolo per la pesca locale fin quasi ai giorni nostri. I pescatori più anziani ricordano ancora le piccole imbarcazioni che attraccavano in queste acque.

La costruzione dell'argine nel 1957, che trasforma l'area della laguna in peschiera, modifica profondamente il paesaggio. Col passare del tempo, l'incuria

e l'abbandono favoriscono il degrado dell'ambiente e delle strutture: soltanto col passaggio della concessione al Centro Laguna di Nora, dal 1985, la laguna è tornata a vivere.

### 7.2.3 RISULTATI

Più soddisfacenti sono i risultati ottenuti nelle due campagne di rilievo nella laguna di Nora, grazie anche all'uso congiunto della geoelettrica.

Le campagne si sono svolte rispettivamente nel mese di maggio 2008 e febbraio 2009, dove sono stati raccolti una buona quantità di dati sia SBP che geoelettrici.

Sono state rilevate 65 linee sub bottom e più di 30000 dati geoelettrici che hanno permesso di ricostruire 49 tomografie elettriche, tra prima e seconda campagna, cercando di ricoprire il più possibile tutta l'area lagunare, anche se la presenza di alcune peschiere hanno limitato l'indagine della parte centrale della laguna, inoltre alcune zone con profondità al limite delle condizioni minime di lavoro del prototipo (sotto i 30 cm) hanno inoltre impedito i rilievi. (Fig.19)

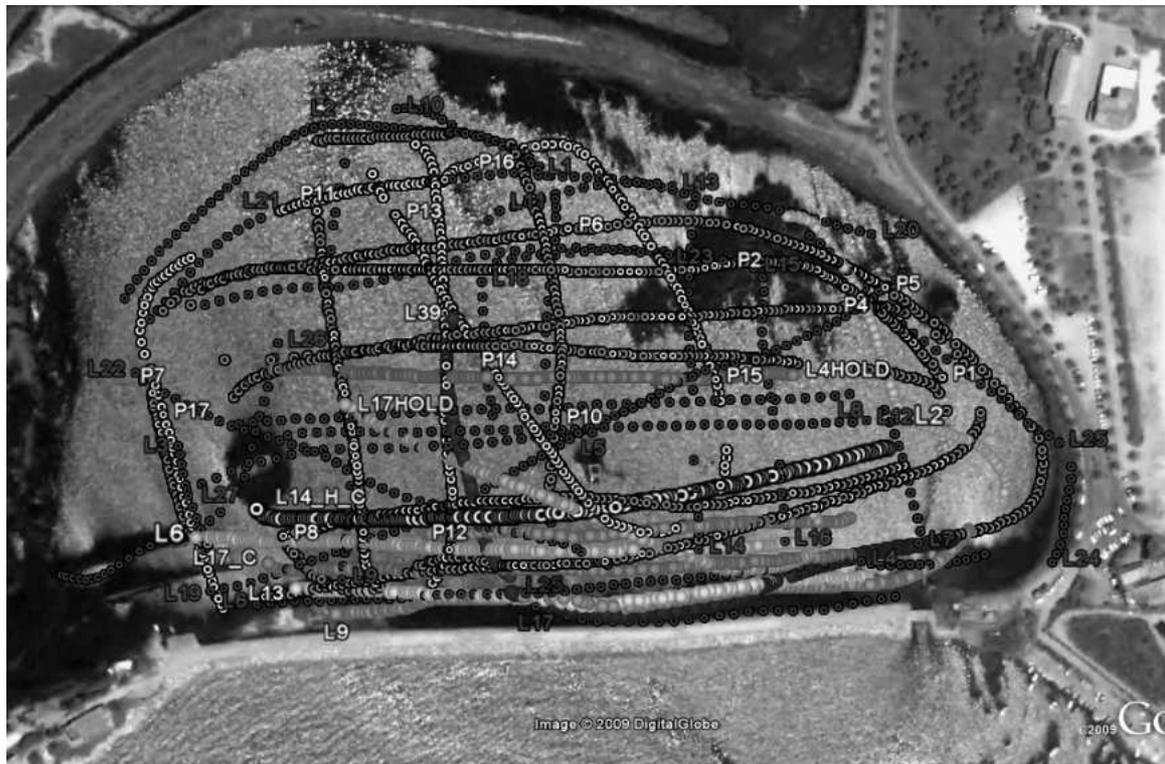


Fig. 19: schema rappresentativo di tutte le linee elettriche e sub bottom acquisite durante le due campagne di rilievi, si noti il buon ricoprimto di tutta l'area della laguna. Le zone dove manca la copertura al centro sono sedi di attività ittica (reti e pali di delimitazione), mentre le zone ai margini erano inaccessibili a causa del fondale con profondità intorno a 30 cm

### **7.3 Dati Sub Bottom**

I dati rilevati con il Sub Bottom Profiler hanno mostrato una buona risoluzione del metodo, inoltre hanno permesso di mappare la batimetria di dettaglio di tutta la laguna di Nora.

Di seguito sono state riportate solo alcune delle linee acquisite ed in particolare quelle che mostrano strutture degne di nota e quelle che come vedremo indicano una zona più profonda che descrive una sorta di pseudo-canale (Fig.20).



*Fig. 20.: schema rappresentativo delle linee di maggior interesse discusse in seguito.*

Analizzando le sezioni sub bottom di seguito riportate si nota come il segnale acustico ha permesso di investigare uno spessore di sedimenti mediamente nell'ordine di dieci metri.

In effetti in alcune aree della laguna la presenza di formazioni vegetali di forma sferica della famiglia della posidonia hanno limitato la penetrazione delle

onde acustiche rendendo meno possibile l'investigazione in profondità in quelle zone.

In particolare analizzando le linee acquisite nella parte settentrionale della laguna, si nota che esse non mostrano dati di particolare rilievo in quanto questa è la zona maggiormente vegetata e quindi i dati non mostrano sufficiente penetrazione e risoluzione (Fig. 21 e Fig. 24)

Entrando nel dettaglio, dall'analisi della linea 2 (Fig. 21) si può notare come sia possibile ricostruire la linea di fondo, ma non si possono fare apprezzamenti in profondità a causa della presenza della vegetazione che attenua il segnale.

L'attenzione quindi si è focalizzata sulla zona centro meridionale dell'area indagata, dove si possono osservare dati degni di nota.

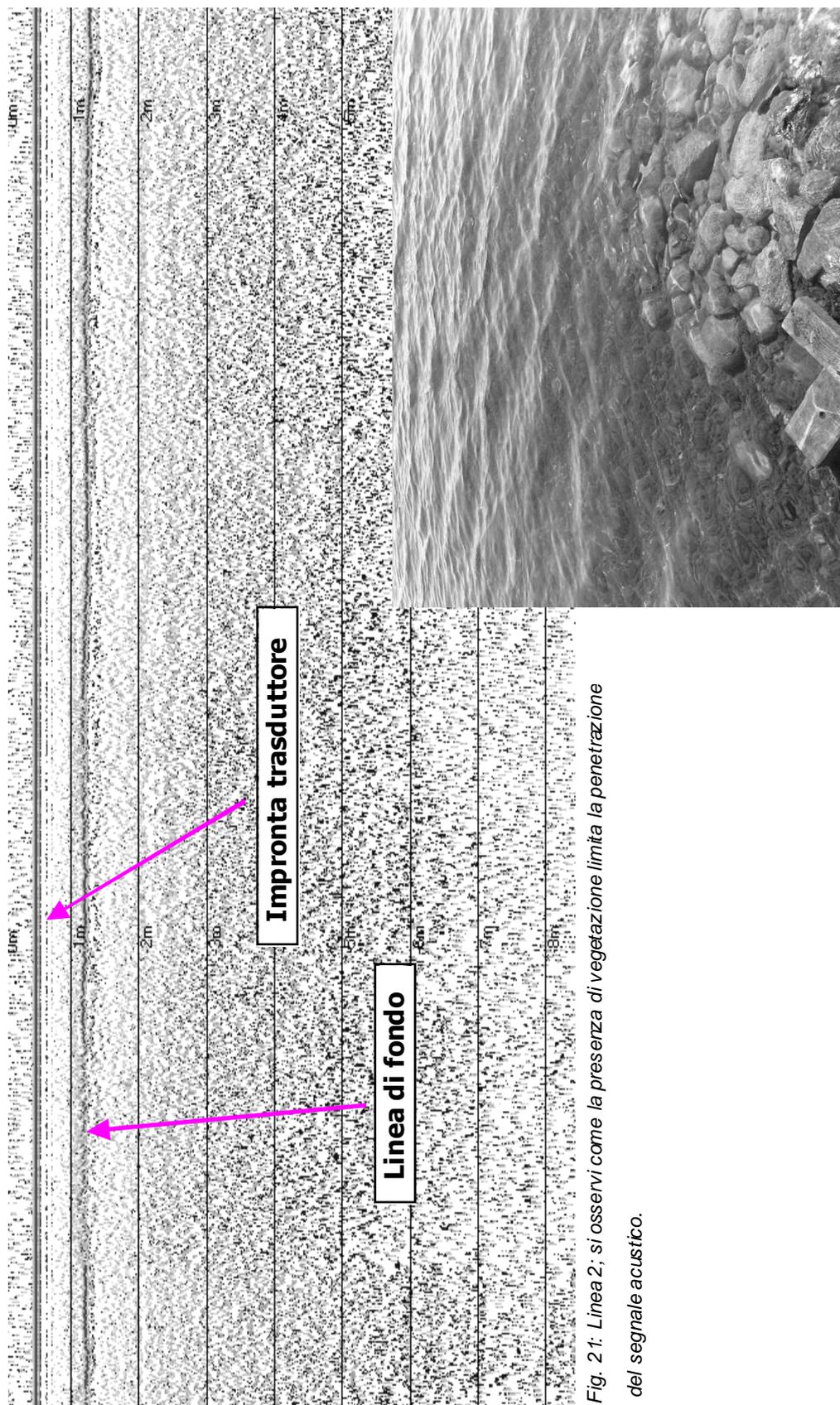


Fig. 21: Linea 2; si osservi come la presenza di vegetazione limita la penetrazione del segnale acustico.

Immagine che mostra la vegetazione di forma sferica derivante della famiglia della posidonia, che ricopre alcune zone della laguna

Analizzando la linea 4H (Fig. 23) si può vedere la differenza di penetrazione in presenza di vegetazione o meno. Inoltre si osservi come i dati sub bottom permettano di ricostruire bene la stratificazione in profondità mettendo in evidenza anche strati con potenza modesta. La risoluzione è in funzione della frequenza secondaria utilizzata, in questo caso 8 KHz; scegliendo frequenze più alte si risolvono meglio i particolari di piccole dimensioni, viceversa si perde penetrazione del segnale che è inversamente proporzionale alla frequenza utilizzata.

Gli stessi particolari si possono osservare anche nelle linee 2 e 25 dove il segnale penetra più o meno a seconda della presenza di vegetazione (Fig. 21 e Fig. 25).

Inoltre bisogna porre attenzione alle "riflessioni multiple" ovvero di riflessioni generate dalle onde acustiche che rimbalzano più volte tra due superfici riflettenti presenti nel sottosuolo. Tale fenomeno si verifica quando le onde acustiche attraversano corpi geologici caratterizzati da una grande variazione dell'impedenza acustica, quindi limitati da interfacce ad un alto coefficiente di riflessione.

Il fondo del mare è il più importante generatore di riflessioni multiple poiché le onde acustiche, attraversando una colonna d'acqua caratterizzata da una velocità di propagazione di 1500 m/s circa, impatteranno sul primo orizzonte caratterizzato da una velocità sicuramente superiore (prossima a 2000 m/s se non maggiore, nel caso di materiale altamente compattato). Il contrasto di impedenza acustica tra i due mezzi (acqua e sedimento) è pertanto importante e la riflessione multipla risulta particolarmente evidente.

Fortunatamente il riconoscimento di una riflessione multipla è piuttosto semplice, poiché mostra costantemente i caratteri distintivi di seguito elencati:

- La riflessione è regolarmente localizzata ad un tempo di riflessione a due vie doppio rispetto al primo riflettore, solitamente il fondo del mare;

- Il falso riflettore ricalca la morfologia del fondo,
- L'orizzonte "si sovrappone" ai segnali reali sottostanti;
- Se il contrasto di impedenza acustica è molto elevato (es. fondo mare), la riflessione multipla può ripetersi più volte sempre ad intervalli regolari.

I dati sub bottom permettono inoltre la ricostruzione dei rapporti di sedimentazione e di eventuali geometrie sepolte che non sono evidenziate dalla morfologia del fondale, quali per esempio paleo alvei (Fig. 26)

### **7.3.1 ZONA PROFONDA**

La zona meridionale della laguna è quella che merita maggior attenzione, come precedentemente accennato, in quanto come vedremo in seguito durante la prima campagna si è riscontrata nella parte centrale delle linee acquisite una zona profonda dove il fondale arriva a circa 3.5 metri di profondità, mentre il resto della laguna ha una profondità media dell'ordine di 1/1.5 metri. Tale zona è delimitata da pareti sempre più verticali man mano che ci si sposta verso Nord.

Durante la seconda campagna quindi ci si è concentrati sul maggior ricoprimento in termini di rotte di questa zona di laguna.

Passando all'analisi delle linee che interessano questo pseudo canale la figura 22 mostra una serie di linee affiancate che permettono la ricostruzione geometrica della zona profonda.

Inoltre osservando le linee riportate in sequenza si può ricostruire in modo dettagliato la zona profonda osservandone la forma che non è perfettamente regolare, ma che assume un profilo che da come risultato il poligono evidenziato in Fig. 28.

Si noti inoltre all'interno della zona profonda, in prossimità dell'argine della laguna, osservando la linea 25, la linea 9 e la linea 13, la presenza di una cresta definita nella morfologia del fondale (evidenziata dalle frecce in figura 22) al disotto della quale il segnale viene attenuato. In questa zona si è notato durante

una prospezione subacquea della laguna la presenza di un accumulo di legname e di cime aggrovigliate su di esso che di fatto hanno limitato la penetrazione del segnale acustico.

Come esposto poc'anzi la zona profonda non è ben delimitata con pareti che, dalla zona dell'argine salendo verso Nord, diventano sempre più pendenti quasi a descrivere un canale.

Questa zona si interrompe in corrispondenza di una peschiera ubicata circa a 80 metri dall'argine che chiude la laguna.

Le ipotesi formulate relative alla formazione della zona profonda sono due:

1. ORIGINE ANTROPICA; come eventuale accesso da mare aperto in una zona più calma per ricovero imbarcazioni; in effetti la zona esterna della laguna è tutt'oggi sede di ancoraggio delle imbarcazioni da pesca e di altre piccole barche. Inoltre si trovano delle evidenze sommerse verso mare di barriere frangiflutti di epoca romana come testimoniato dalle prospezioni subacquee per scopi archeologici eseguite all'esterno della laguna.
2. ORIGINE NATURALE; messa in posto dai corsi d'acqua che solcavano la parte emersa della laguna. Osservando le zone circostanti alla laguna si possono riscontrare numerosi corsi d'acqua dolce che in parte sfociano nella laguna.

Queste ipotesi sono complicate dalla costruzione negli anni cinquanta dello sbarramento verso mare della stessa che ne ha profondamente cambiato le dinamiche di sedimentazione.

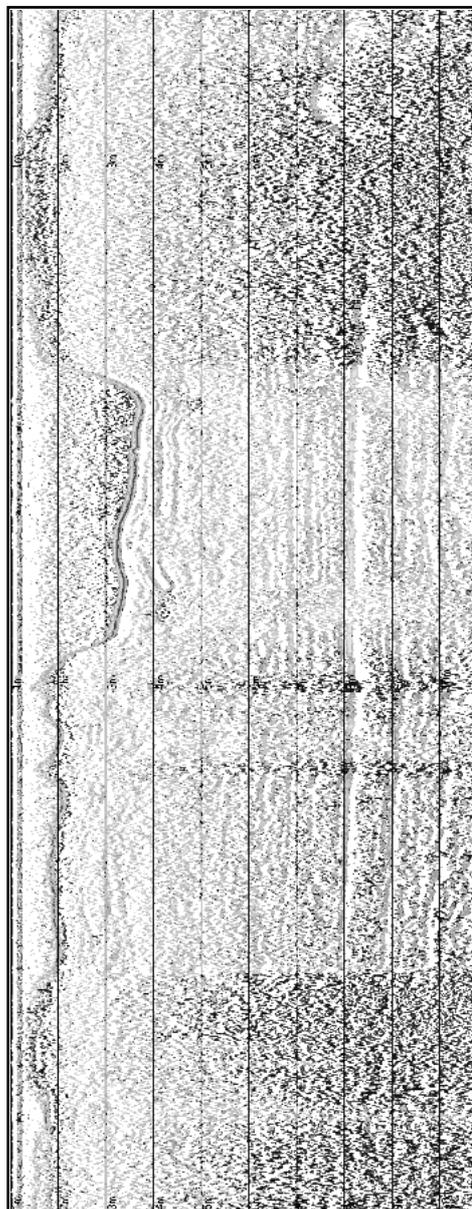
Per verificare l'attendibilità delle due ipotesi un metodo possibile sarebbe quello di eseguire dei carotaggi all'interno ed all'esterno della zona profonda e tramite la datazione dei sedimenti verificare la corrispondenza o meno in termini temporali dei sedimenti presenti dentro e fuori dal canale. In questo modo si potrebbe verificare l'assenza di sedimenti coevi e quindi per esempio confermare l'ipotesi antropica.

La zona profonda è stata evidenziata con un poligono di colore rosso e riportata in figura 28.

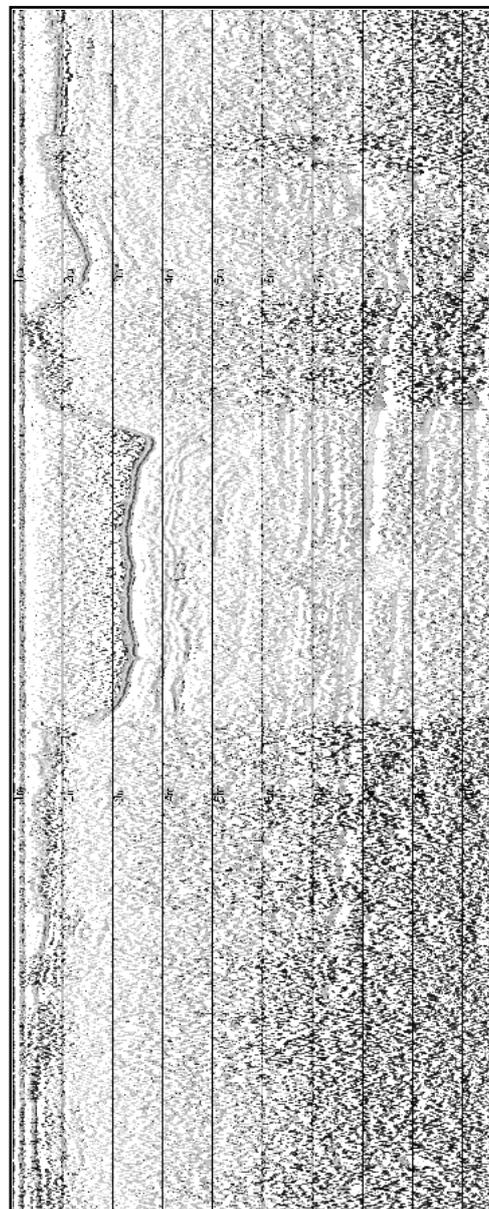
Con un'analisi di dettaglio delle singole sezioni all'interno dei sedimenti si possono notare alcune anomalie sia all'interno che all'esterno della zona profonda.

La linea 9 (Fig. 27) mostra un'anomalia all'interno dei sedimenti a circa un metro dal fondo con forma trapezoidale, che potrebbe essere l'evidenza di un oggetto sepolto.

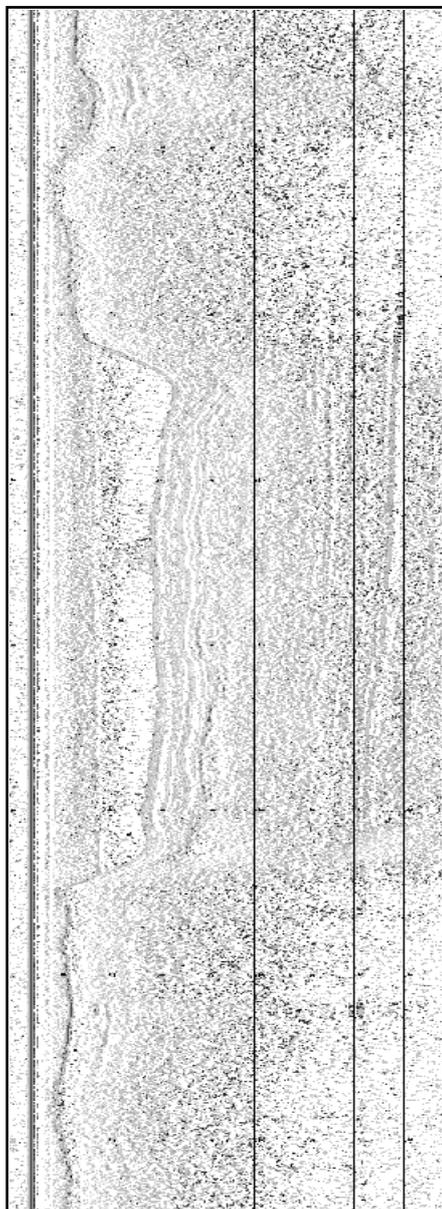
Altre anomalie sono riscontrabili all'esterno della zona profonda e come vedremo in seguito tali anomalie sono state riscontrate anche dai rilievi geoelettrici.



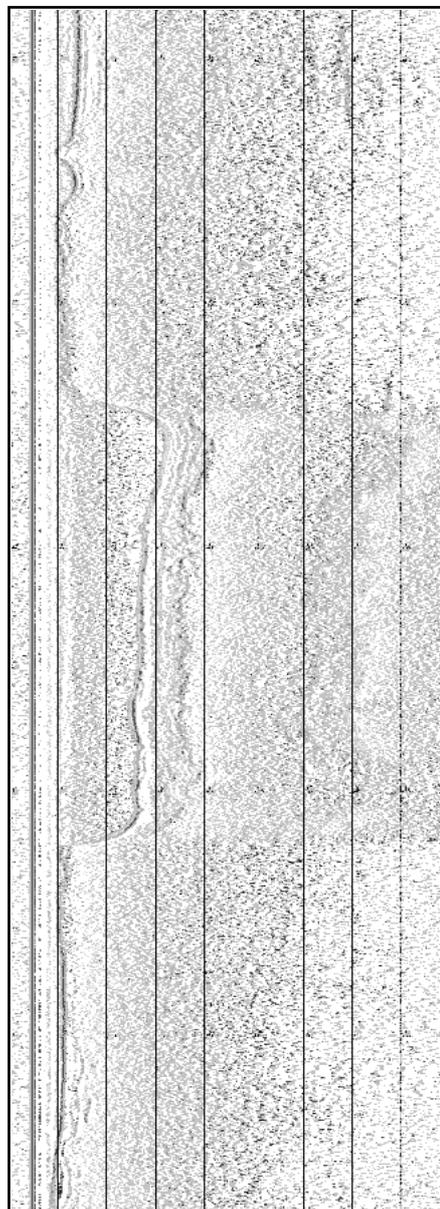
Linea 17H



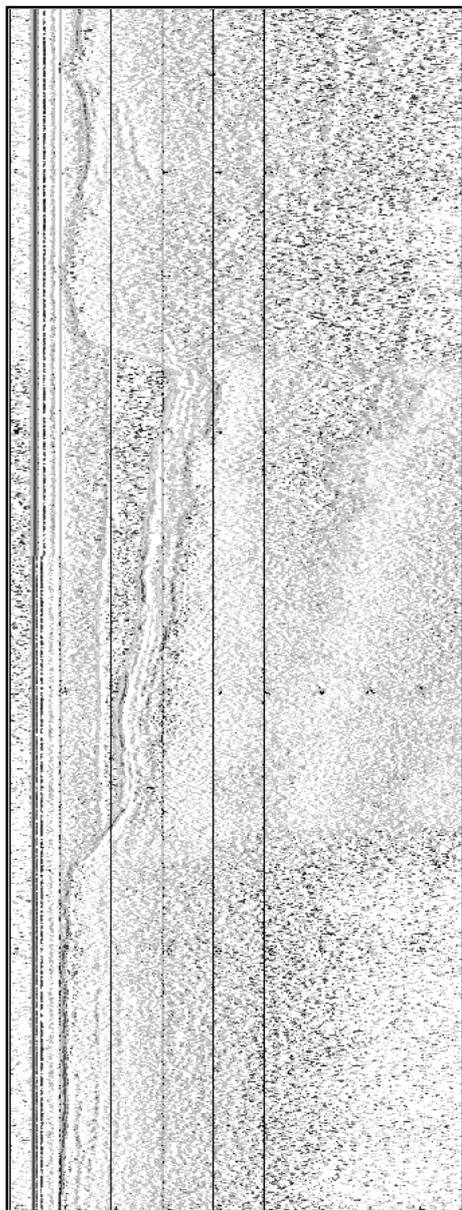
Linea 14C



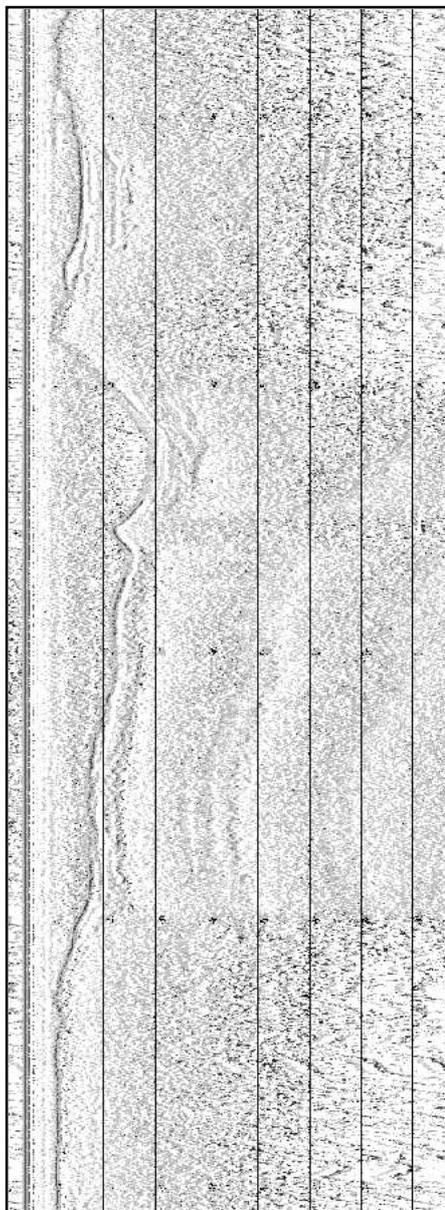
*Linea 6*



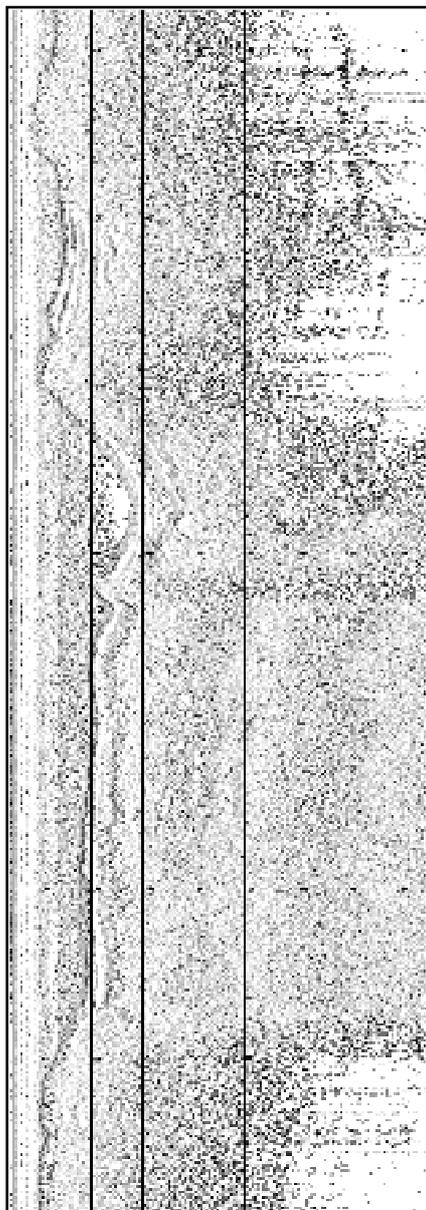
*Linea 17C*



*Linea 4C*



*Linea 13*



*Linea 9*



*Linea 25*

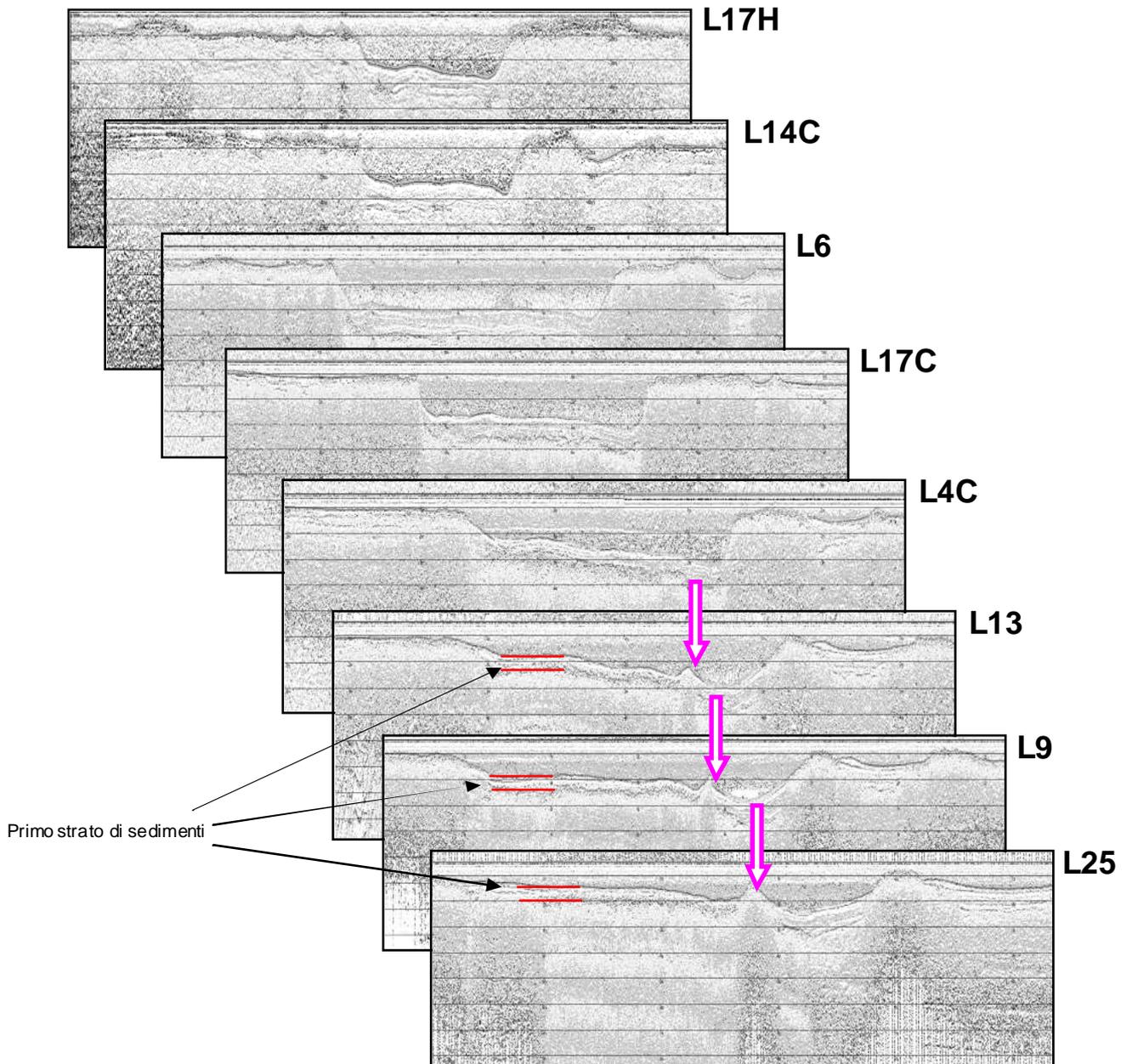


Fig. 22.: schema rappresentativo della zona profonda: dalle immagini è possibile ricostruirne i limiti, caratterizzati da pareti che diventano sempre più verticali spostandosi dal limite della laguna (L25) verso il centro della stessa (L17H); inoltre si può osservare una cresta evidenziata dalle frecce, al di sotto della quale il segnale viene attenuato.

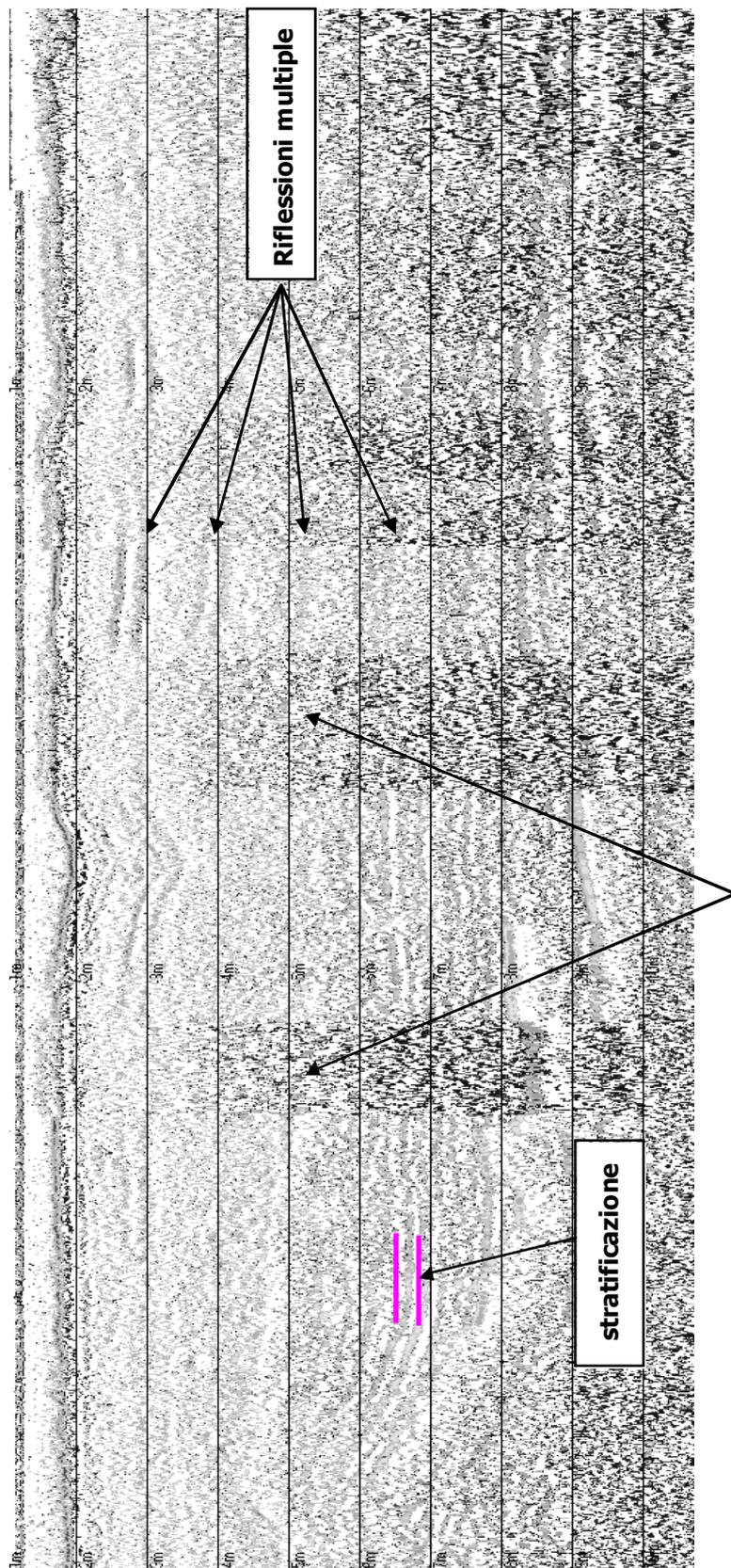


Fig.23: Linea 4H

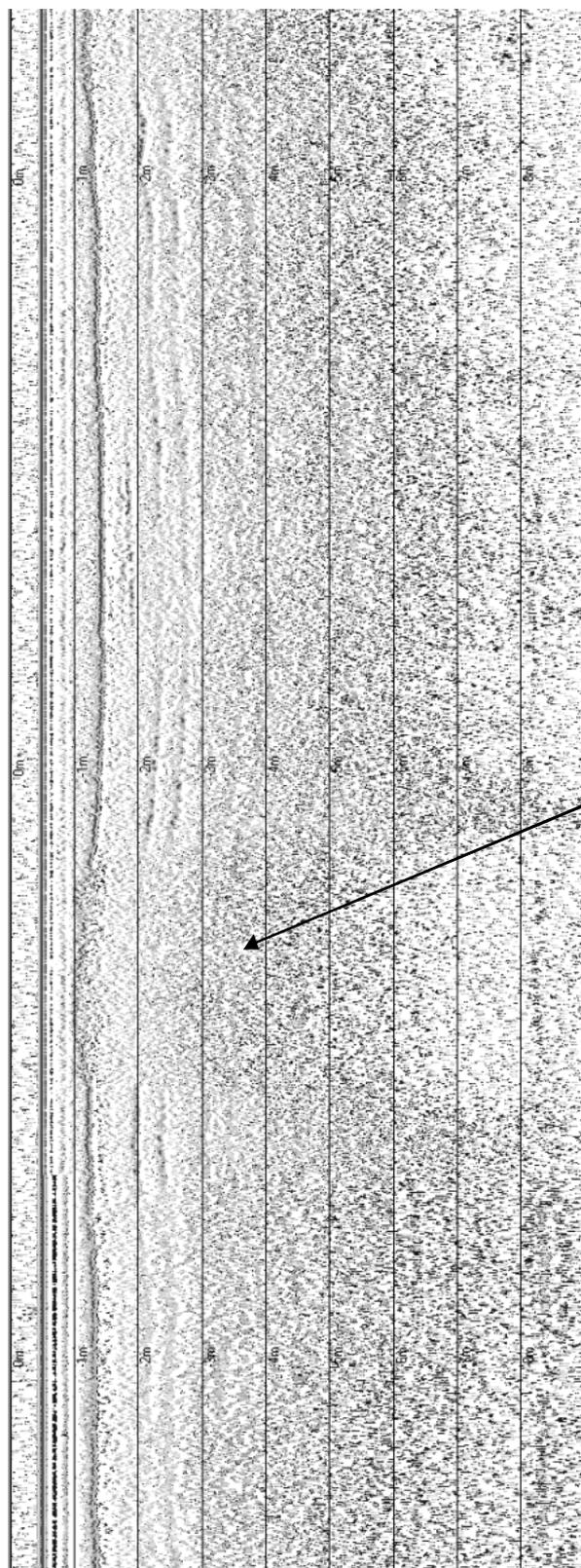


Fig. 24: Linea 5\_C



Fig. 25. Linea 25

Zone dove il segnale viene attenuato  
dalla presenza della vegetazione

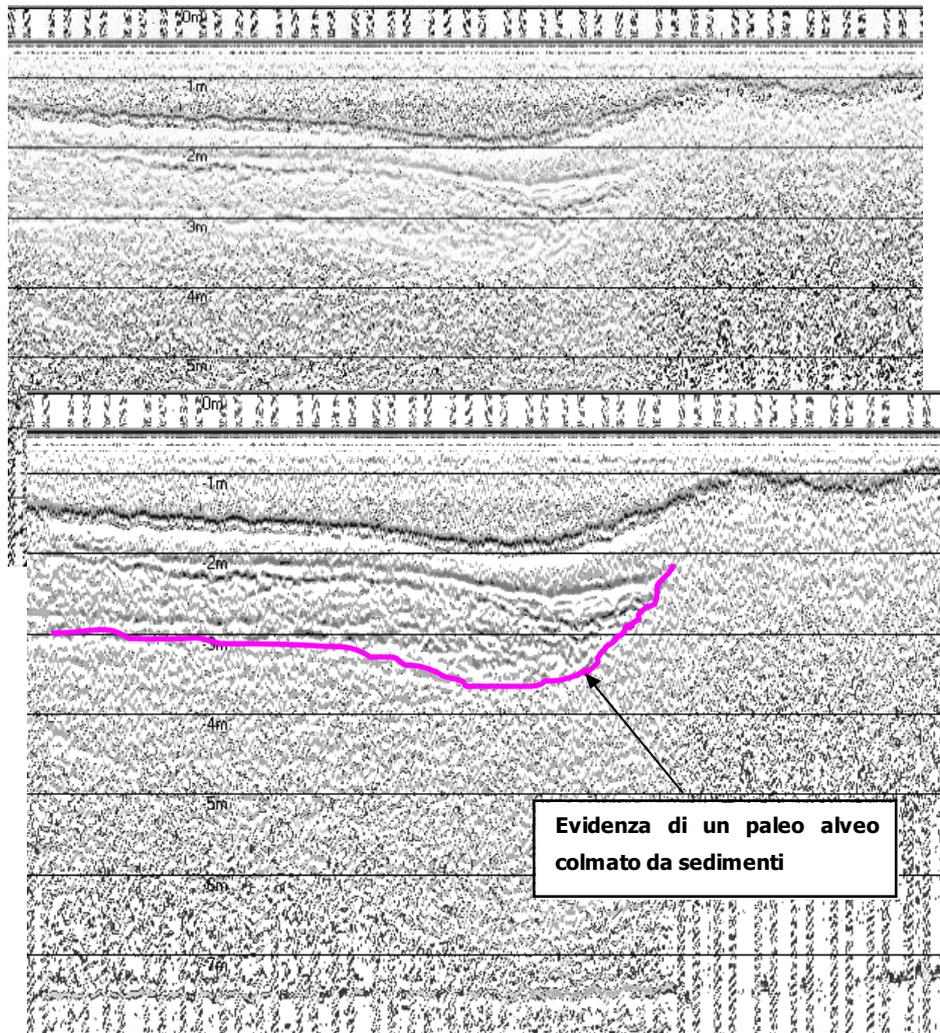


Fig. 26: particolare della linea 39, si nota la presenza come i dati sub bottom possono essere utili per la ricostruzione delle paleo geometrie.

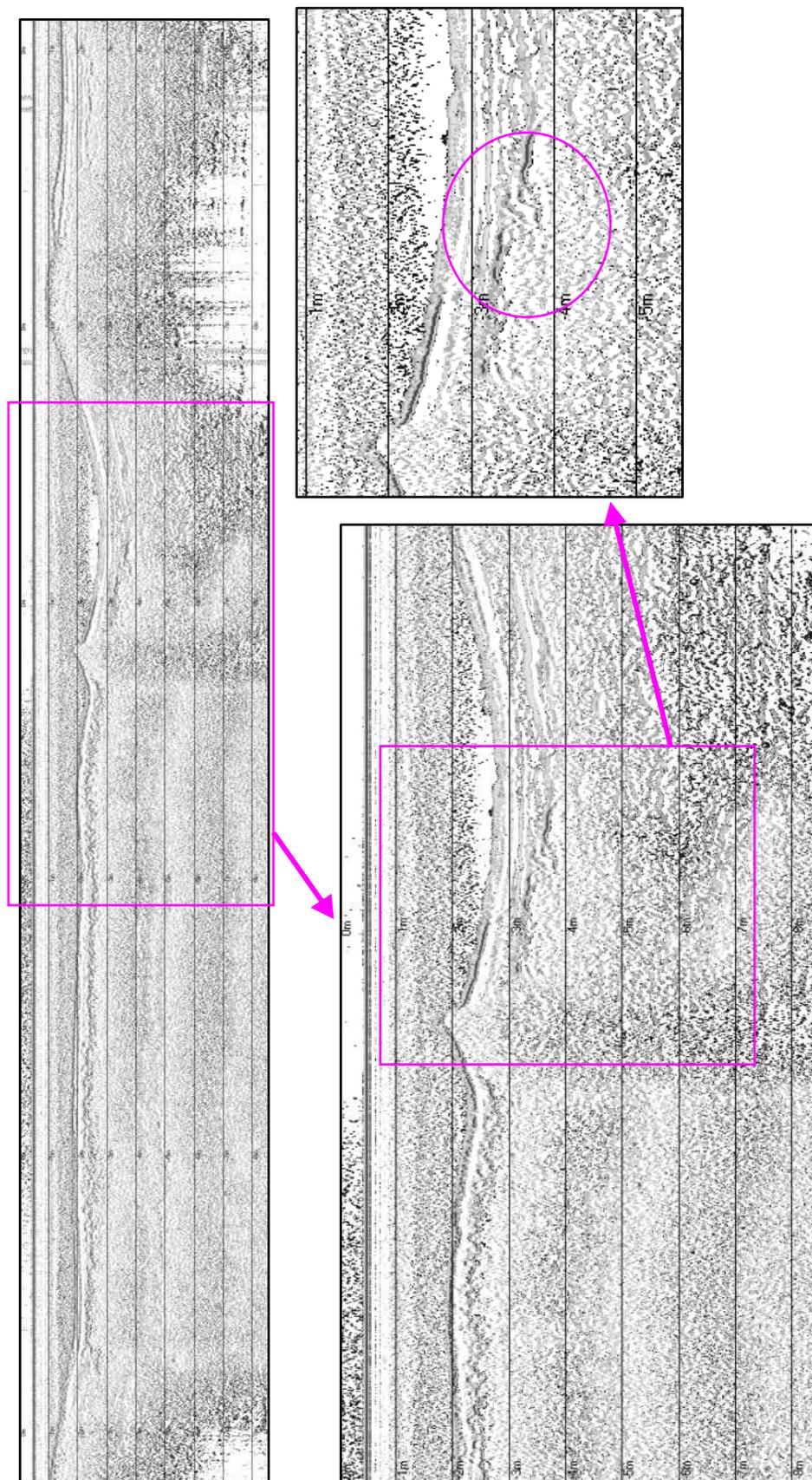


Fig. 27: Linea 9: evidenza di anomalia rilevata con le indagini sub battm, possibile evidenza di oggetto sepolto o di una struttura anomala

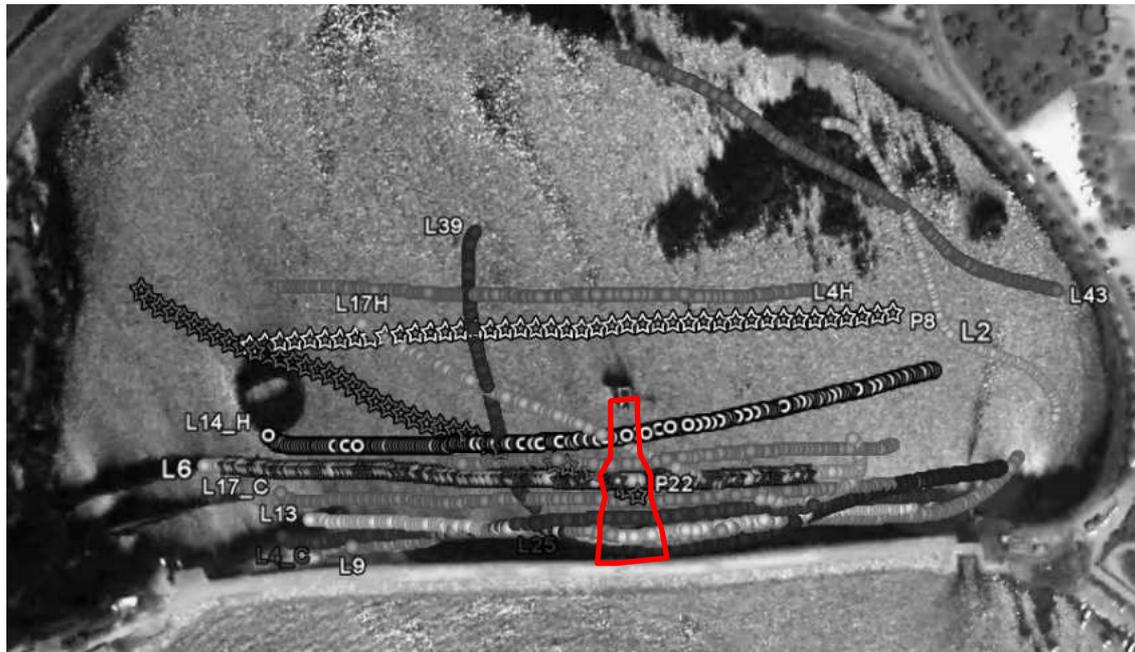


Fig. 28: delimitazione della zona profonda: il poligono di colore rosso è stato ricavato dall'analisi delle sezioni sub bottom e verificato con quelle elettriche.

## 7.4 Geoelettrica

La strumentazione è stata installata sull'imbarcazione ponendo GPS e sounder ad offset noti con distanza di 19 metri dal primo elettrodo di corrente posto in acqua. Il trasduttore del sounder inoltre è stato fissato ad una profondità rispetto alla superficie dell'acqua di circa 20 cm.

Il cavo, come già accennato, era tenuto in superficie da una serie di galleggianti ed è stato fissato in corrispondenza della traversa in alluminio di poppa, esso era tenuto teso tramite una zavorra agganciata sull'estremità del cavo.

Le indagini si sono svolte in due periodi differenti tra maggio 2008 e febbraio 2009.

La presenza di gabbie utilizzate per l'attività ittica della peschiera non ha consentito di eseguire una maglia ordinata, sono stati comunque realizzati profili

paralleli, perpendicolari e obliqui in modo da ottenere un'ampia densità spaziale di misure distribuite in modo omogeneo su tutta l'area.

Come anticipato nella Laguna di Nora è stata valutata l'efficienza della tomografia elettrica con acquisizione dei dati in continuo ed elettrodi posti sulla superficie dell'acqua, per applicazioni rivolte alla ricerca archeologica in ambiente marino di bassa profondità.

I test si sono svolti in due campagne di indagine differenti durante le quali sono stati acquisiti circa 30000 dati di resistività apparente interessando un'area di circa 160 ettari campionata in un tempo pari a solo 8 ore.

Come anticipato le indagini geoelettriche sono state eseguite in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell'Università di Cagliari, inoltre solo nella campagna di febbraio 2009 si sono potuti eseguire rilievi utilizzando contemporaneamente le due diverse tecnologie.

L'utilizzo congiunto di indagini sub bottom ed elettriche aveva il fine di ridurre l'ambiguità sull'interpretazione dei dati dovuta all'assenza di un riscontro certo e avere uno strumento di confronto sui risultati ottenuti.

L'acquisizione in continuo non consente lo stacking sulla misura e la valutazione dell'errore sul dato acquisito tramite misure reciproche.

L'analisi qualitativa condotta sulla distribuzione dei valori di resistività apparente al variare dei livelli di misura ha mostrato una buona qualità dei dati anche in virtù di valori di resistenza di contatto, ovviamente, prossimi allo zero.

Nelle zone meno profonde della laguna i dati sono affetti da errori sulla batimetria dovuti al non perfetto funzionamento dell'echo sounder a causa di effetti di scattering in battenti d'acqua così ridotti e dalla presenza della vegetazione sopradescritta. In questo caso l'utilizzo del sub bottom permette di apportare le correzioni di profondità in quanto la tecnologia SBP vanta una maggiore precisione rispetto ai sounder normalmente interfacciati alle apparecchiature per rilievi elettrici.

I risultati ottenuti mostrano una buona capacità risolutiva del metodo sia nella descrizione della stratigrafia dei sedimenti che nell'individuazione di anomalie dovute alla eventuale presenza di oggetti sepolti (è stato preso come esempio il profilo N. 3 eseguito durante la prima campagna di misure riportato in Fig. 30).

Sebbene sia stato eseguito il despiking della topografia, adottata la media sui valori batimetrici e fattori di damping elevati sul primo strato in fase di elaborazione, in alcune sezioni, l'effetto topografico si è propagato sui parametri del modello. Sono state ottenute profondità d'indagine oltre i cinque metri, ma, in alcuni casi, l'analisi di sensibilità ha ridotto tale valore di circa la metà e ha consentito di delimitare le soluzioni del modello "meno attendibili".

Il confronto però con i risultati ottenuti tramite il metodo del sub bottom profiler smentisce in parte l'analisi di sensibilità a favore delle prestazioni della tomografia elettrica (Fig. 31).

E' possibile infatti apprezzare l'ottima corrispondenza nella risoluzione della stratigrafia sia in termini di potenza degli strati che di profondità anche in corrispondenza di valori di sensibilità molto bassi. E' da sottolineare inoltre l'ottima corrispondenza tra le anomalie resistive presenti nel modello inverso e i riflettori del segnale acustico nelle sezioni del sub bottom profiler.

I risultati mostrano, come per i dati sub bottom la presenza della zona più profonda e ne descrivono la geometria e la stratificazione al suo interno.

I risultati forniscono un contributo importante e sembrano dare ulteriore peso all'ipotesi del collocamento delle strutture portuali dell'antica città di Nora nella laguna oggetto dello studio.

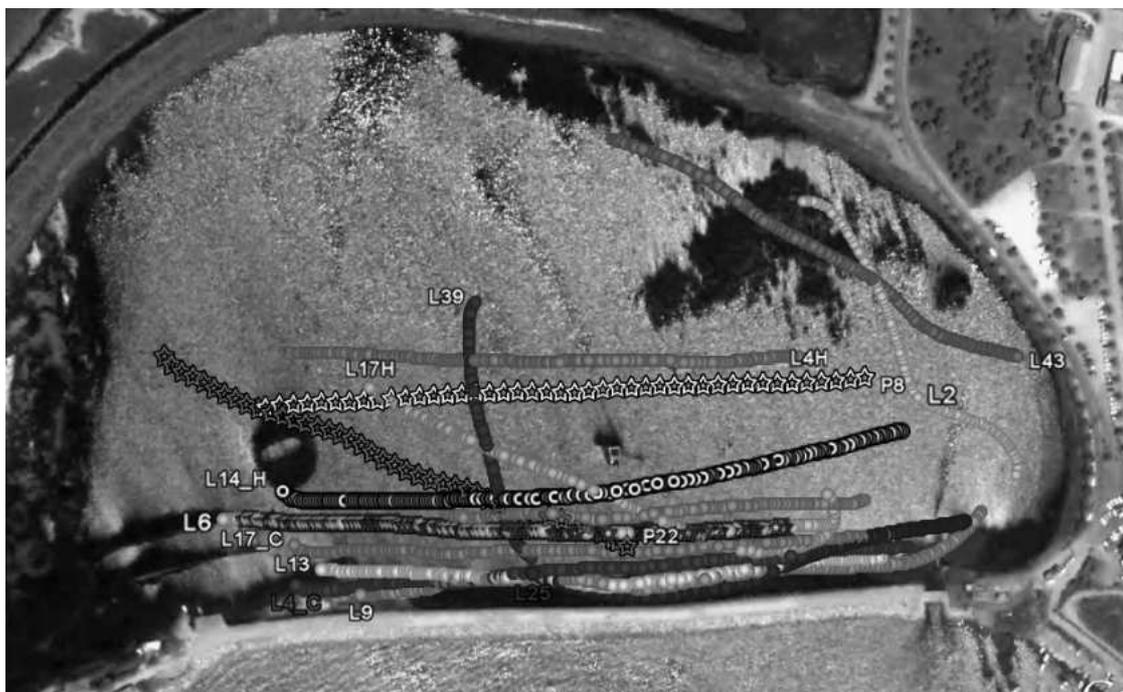


Fig 29: Schema rappresentativo delle principali linee di elettrica riportate

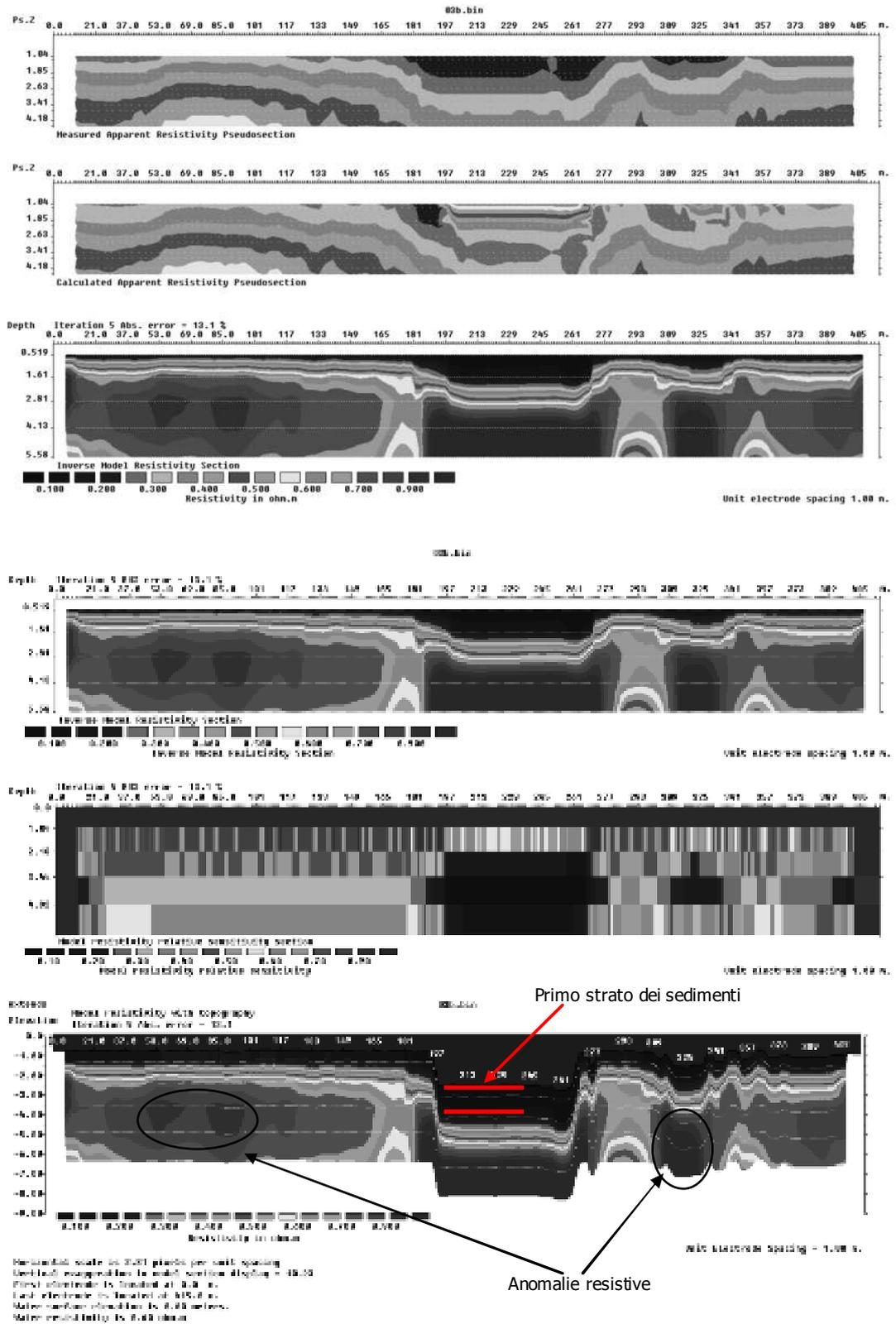


Fig. 30: Profilo n°3 eseguito durante la seconda campagna di indagini

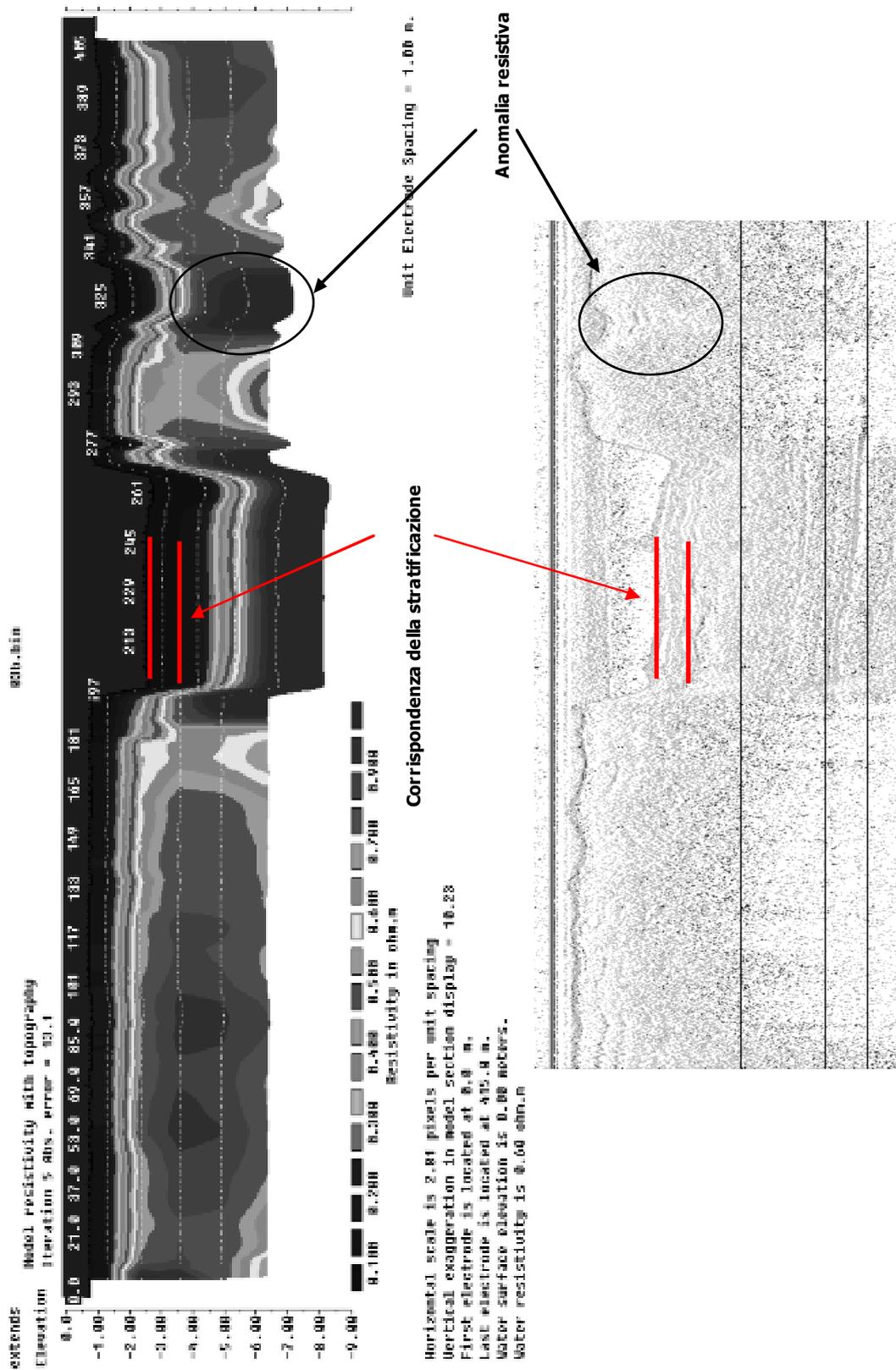


Fig. 31: confronto linee SBp ed elettriche: si noti la buona corrispondenza nella risoluzione della stratigrafia sia in termini di potenza degli strati che di profondità, inoltre si nota la corrispondenza delle riflessioni acustiche e le anomalie resistive.

Ricostruzione e valorizzazione del paesaggio archeologico in ambiente costiero mediterraneo tramite tecnologie innovative non invasive.

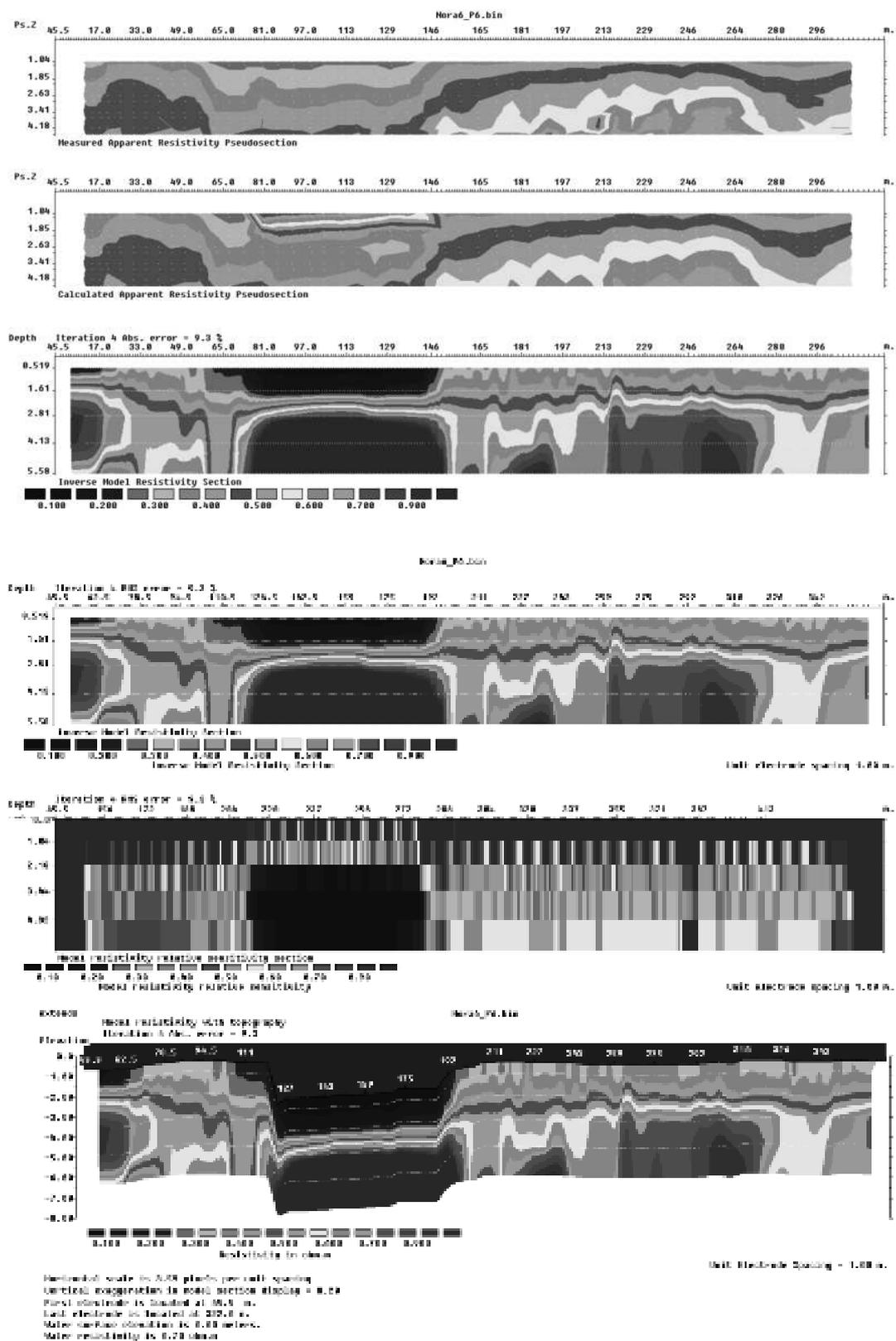


Fig. 32: Profilo n°6 eseguito durante la prima campagna di indagini

## **8 CONCLUSIONI**

Concludendo il presente lavoro di tesi si può affermare che:

- Per la prima volta si sono testati vari metodi di tipo indiretto tradizionalmente utilizzati per la prospezione archeologica a terra ed in mare in modo congiunto.
- Si sono verificati i limiti degli strumenti, in particolare del multi beam, grazie all'utilizzo di un prototipo di imbarcazione sperimentale che non esiste in commercio.
- La tecnologia sub bottom e geoelettrica possono essere utilizzate contemporaneamente riducendo tempi e costi di acquisizione; inoltre permettono l'identificazione di potenziali oggetti sepolti legati alle anomalie riscontrate indicando così le eventuali zone dove concentrare rilievi di dettaglio o prospezioni di tipo invasivo.

## 9 BIBLIOGRAFIA

Aitken, M.J. (1974). *Fisica e archeologia*, 2nd edition. Oxford: Clarendon Press, 286 pp.

Apel, J.R., 1987, *Principles of Ocean Physics*. In *International Geophysics Series*, ISSN 0074-6142, vol.38. p.511. Academic Press.

Aspinall, A., and Lynam, J.T. (1968). Induced polarization asa technique for archaeological surveying. *Prospezioni Archeologiche* 3, 91-93.

Aspinall, A., and Lynam, J.T. (1970). An induced polarization instrument for detection of near surface features. *Prospezioni Archeologiche* 5, 67-76.

Christiansen A.V. e Auken E., 2004. Optimizing a layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data using Broyden's update and 1D derivatives. *Journal of Applied Geophysics*, 56, 247 – 262.

Corselli C., 2000. *Appunti dal corso di geologia marina*. Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie dell'Università degli Studi di Milano Bicocca.

Hughes Clarke, J.E., Mayer, L.A. and Wells, D.E., 1996, *Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf*: MGR , v.18, p.607-629.

Morang, A., Larson, R., Gorman, L., 1997. Monitoring the coastal environment; Part III; Geophysical and research methods. *Journal of Coastal Research*, 13(4), 1064-1085.

Kunetz G., 1966. Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 103.

Jaubert J.M., Chisholm J.R.M., Ducrot D., Ripley H.T., Roy L., Passeron-Seitre G., 1999. No deleterious alterations in Posidonia Beds in the bay of Menton (France) eight years after Caulerpa taxifolia colonization. J. Phycology 35, 1113-1119.

Jones, E. J. W., 1999. Marine Geophysics. Ed. Wiley, ISBN: 0-471-98694-1

Li Y., Oldenburg D.W., 2000. 3D inversion of induced polarization data. Geophysics, 65, 1931-1945.

Loke M. H., Lane J.W., 2004. Inversione of data from electrical resistivity imaging surveys in water covered areas. Exploration Geophysics, 35, 266-271

Passaro S., Budillon F., Ruggeri S., Soldovieri M.G., Di Maio R., D'Isanto C., Giordano F., Marsella E., 2007. Recognition of archaeological targets by means of marine geophysical prospections. Proceedings of 26th GNGTS, Rome, November, 13 - 15.

Petersson W., 1907. Om malmsoö kande medelst elektricitet. Jern-Kontorets Annaler 2-3, 153-171.

Savini a., 2004. Tesi di dottorato "Metodologie di analisi di prospezioni geofisiche in ambiente marino e loro implementazione in applicazioni S.I.T."

Schlumberger C., 1920. *Étude sur la Prospection Électrique du Sous-sol*, Gaultier-Villars et Cie., Paris, 94.

Zaccharias M., Niemann, O., Borstad G., 1992. An assesment and classification of multispectral bandset for the remote sensing of intertidal seaweeds. *Can J. Remote Sens.* 18:263-274.

## **10 RINGRAZIAMENTI**

Prima di tutto ringrazio la Fondazione Fratelli Confalonieri, per avermi sostenuto con la borsa di studio.

Ringrazio il prof. Corselli per avermi seguito in questi anni di lavoro.

Un ringraziamento particolare al prof. Cassiani che oltre ad avermi seguito come correlatore mi ha sostenuto moralmente in questo cammino.

Ringrazio Francesco Loddo, Rita Deiana, Alberto Villa, Maria Teresa Perri ed Alessandra Savini per il prezioso aiuto.

Ringrazio il Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell'Università Di Cagliari per la collaborazione.

Ringrazio mia moglie Lara e la mia piccola Margherita per avermi sostenuto in questo cammino non sempre facile, mio Padre che con il suo prezioso aiuto ha reso possibile la costruzione del prototipo di imbarcazione.

Ringrazio il CONISMA per aver messo a disposizione i fondi per costruire il prototipo e per gli strumenti utilizzati.

Infine, ma non ultimi, ringrazio tutti i colleghi con cui ho condiviso le campagne di rilievo con il bello e cattivo tempo.