



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: Fabrizio Nestola

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**ELECTROMAGNETIC METHODS FOR
NEAR-SURFACE APPLICATIONS: A CRITICAL
ANALYSIS OF DIFFERENT INVESTIGATION
APPROACHES**

Relatore: Prof. Giorgio Cassiani

Correlatori: Prof. Massimiliano Ghinassi, Dott. Jacopo Boaga

Laureando: Matteo Censini

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

*I have not failed.
I've just found 10,000 ways that won't work.*

Thomas Alva Edison

Abstract

Collecting the information regarding the sedimentary patterns of ancient tidal channels and providing a better understanding of their influence on the morphodynamic evolution of the lagoon environment, requires an expensive process that involves high resolution sediment coding. In this work we discuss the methods and results obtained from the electromagnetic survey carried out in the northern Venice Lagoon. We investigated meander deposit using two different conductivity meters: a multi-coil sensor and a multifrequency one.

The aim of this study was to reveal the lateral and vertical structure of the meander body. The interpretation of the geophysical data has been correlated with borehole analysis, carried out from five sediment cores collected on the site area. In addition, the information regarding the architectural structure of the point bar deposit observed in the channel, from two seismic profile shown in the literature, has been considered.

The results show that this method allows us to identify a sand deposit buried in a mud-silty context, that is not related with the point bar deposit identified with the tidal meander. Moreover, we demonstrated that the proposed geophysical technique, is not only rapid and non-invasive, but is also a successful tool in detecting strata architecture and the definition of its spatial distribution.

Indice

1. Introduzione	1
2. Metodologie e Strumentazioni utilizzate.....	3
2.1 Induzione Elettromagnetica	3
2.2 Metodologia di funzionamento	9
2.3 Configurazione Slingram.....	12
2.4 CMD-Explorer.....	16
2.5 GEM-2	19
3. Caso studio	23
3.1 Inquadramento Geografico	23
3.2 Inquadramento Geologico	24
4 L'area di studio.....	28
5. Acquisizione ed Elaborazione dati.....	31
5.1 Acquisizione dei dati elettromagnetici	31
5.2 Inversione ed elaborazione dei dati.....	33
5.2.1 Inversione dei dati.....	33
5.2.2 SURFER	38
5.2.3 VOXLER	41
6. Carotaggi e loro interpretazione	44
7. Interpretazione dei dati e considerazioni sui risultati	49
7.1 Modelli interpretativi	54
8. Conclusioni	61
Bibliografia	63
Appendice	65

Indice delle figure

Figura 1: Relazioni di ampiezza e fase tra il campo primario P, il campo secondario S e il campo risultante R. Il vettore ϵS rappresenta la f.e.m. indotta nel conduttore dal campo primario P	11
Figura 2: Principio di funzionamento delle tecniche FDEM near field.....	11
Figura 3: Schema configurazione tipo Slingram, con bobina trasmittente e ricevente poste a distanza fissa su di uno chassis in materiale non conduttore, su cui è indicata l'orientazione per misure con dipolo orizzontale e verticale. Inoltre, è riportato un grafico relativo alla sensibilità delle due configurazioni	13
Figura 4: Sensitivity function normalizzata relativa al CMD-Explorer	17
Figura 5: Componenti principali del CMD-Explorer della GF Instruments	18
Figura 6: Nomogramma per la determinazione del valore di skin-depth in funzione della frequenza del segnale © Geophex Ltd. 2015	21
Figura 7: Componenti principali del GEM-2 della ©Geophex	22
Figura 8: : Inquadramento geografico dell'area di studio	24
Figura 9: Inquadramento geologico della pianura veneto-friulana	25
Figura 10: Inquadramento dell'area di indagine contenuta all'interno del meandro del canale Gaggian.....	26
Figura 11: Sezione esempio che esprime l'architettura dei depositi presenti nell'ambiente lagunare	27
Figura 12: Immagine satellitare del canale Gaggian, le aree identificate sono relative al lavoro di (Ghinassi et al., 2018).....	28
Figura 13: Sezioni sismiche acquisite all'interno del canale Gaggian (Ghinassi et al., 2018)	29
Figura 14:Sezioni sismiche GT6 e GT9 collezionate all'interno del canale Gaggian (Ghinassi et al., 2018)	30
Figura 15: a sinistra) Area studiata durante la campagna d'acquisizione dati e profilo AB effettuato con il CMD-Explorer; a destra) Area analizzata tramite l'utilizzo del GEM-2.....	31

Figura 16: a sinistra) Acquisizione dei dati tramite sensore elettromagnetico GEM-2; a destra) Acquisizione dei dati tramite sensore elettromagnetico CMD-Explorer	32
Figura 17: Modello utilizzato nell’algoritmo di inversione presentato da (Deidda et al., 2014)	34
Figura 18: Inversione alla Occam delle componenti di Quadratura e In-Fase registrate dal segnale multifrequenza utilizzato dal GEM-2 durante l’acquisizione dei dati, definendo un valore di partenza di 2 Ohm*m	37
Figura 19: Modello diretto ricavato dal fitting manuale dei dati tramite il software IX1D v3	37
Figura 20: Modelli equivalenti al modello diretto ricavato dal fitting manuale dei dati	37
Figura 21: Mappe dei valori ppm relative alle frequenze di 450 - 1950 - 5970 Hz	38
Figura 22: Sezione di conducibilità del profilo AB ottenuta con CDM-Explorer.....	39
Figura 23: Sezione di conducibilità del profilo AB ottenuta con il GEM-2.....	40
Figura 24: a sinistra) Sezioni sismiche (Ghinassi et al., 2018) di cui si è prodotto il corrispettivo elettromagnetico su Voxler. Nell’immagine a destra) vista panoramica delle sezioni elettromagnetiche orientate congruamente alle sezioni sismiche	41
Figura 25: Sintesi di visualizzazione della superficie isovalore corrispondente a 400 mS/m. a) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Est. b) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Est – Profondità. c) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Profondità	42
Figura 26: Sintesi di visualizzazione della superficie isovalore corrispondente a 750 mS/m. a) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Est. b) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Profondità. c) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Est – Profondità	43
Figura 27: Esempio di come si presenta il carotaggio nella fase finale di preparazione per la fase di riconoscimento dei depositi, in foto il sondaggio "1"	44
Figura 28: Posizione dei carotaggi effettuati nell'are di studio	45

Figura 29: Log stratigrafici ottenuti dall'analisi delle carote prese nell'area di studio ...	48
Figura 30: Sezione di conducibilità elettrica orientata secondo il profilo che congiunge i punti dei sondaggi	49
<i>Figura 31: Corpi sedimentari riconosciuti nella sezione di conducibilità elettrica</i>	<i>51</i>
Figura 32: Sezione interpretativa ottenuta dalle informazioni geofisiche e stratigrafiche	52
Figura 33: Schematizzazione dell'area di studio con indicati i profili relativi alle sezioni sismiche ed elettromagnetiche utilizzate per l'interpretazione dei risultati ..	54
Figura 34: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT6 e quello interpretato dal dato elettromagnetico, relativamente alla prima ipotesi presentata.	55
Figura 35: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT9 e quello elettromagnetico relativamente alla prima ipotesi presentata. La sezione elettromagnetica è stata specchiata per essere correttamente orientata.	56
Figura 36: Modello ideale di formazione di una point bar che mostra le geometrie delle strutture nel caso in cui il ciglio della barra e il talweg migrano in maniera sincrona seguendo traiettorie parallele ed orizzontali	56
Figura 37: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT6 e quello elettromagnetico relativamente alla seconda ipotesi presentata.	58
Figura 38: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT9 e quello elettromagnetico relativamente alla seconda ipotesi presentata.	59
Figura 39: Sezione elettromagnetica orientata lungo l'asse del meandro e sua interpretazione in funzione delle informazioni ricavate dalle altre due sezioni.	60

1. Introduzione

Il lavoro di questa tesi nasce con lo scopo di testare la tecnica di investigazione geofisica ad induzione elettromagnetica nel dominio della frequenza, per l'indagine di elevato dettaglio dei primi 10-20 metri di sottosuolo, cercando di comprenderne le potenzialità e i limiti di applicabilità. Lo sfruttamento dei fenomeni di induzione elettromagnetica per l'esplorazione del sottosuolo risale alla prima metà del 1900, tuttavia è a partire dagli anni '60 che sono state sviluppate varie tecniche di indagine che, sfruttando sistemi basati sul principio fisico dell'induzione elettromagnetica, hanno permesso di indagare differenti profondità con dispositivi di dimensioni variabili. I progressi della tecnologia elettronica hanno permesso la realizzazione di dispositivi sempre più compatti, che hanno portato alla possibilità di indagine speditiva tramite sistemi capaci di condurre rapide mappature del contesto near surface, con elevato dettaglio e velocità di acquisizione.

Ad oggi le moderne strumentazioni permettono di acquisire in maniera speditiva un'importante mole di dati, circa 50'000 punti di misura per ettaro all'ora, da cui è possibile ottenere sezioni, mappe e modelli 3D del sottosuolo.

Questa tecnica di prospezione trova molti campi d'applicazione, comunemente:

- Indagini Idrogeologiche
- Esplorazione Mineraria
- Mappatura di aree contaminate
- Ricerca di corpi sepolti di natura metallica (ordigni bellici inesplosi)
- Mappatura delle variazioni laterali delle caratteristiche geologiche
- Ricerche archeologiche

Nello studio presentato in questa tesi, il metodo ad induzione elettromagnetica FDEM è stato impiegato con l'obiettivo di valutare le potenzialità dei sensori elettromagnetici multifrequenza, rispetto ai più comuni elettromagnetometri multi-coil di cui è presentato un confronto. Si è cercato inoltre, di valutare l'affidabilità e la capacità di dettaglio di

questo metodo d'indagine in un contesto complesso, sia dal punto di vista delle dinamiche deposizionali, sia in funzione delle caratteristiche elettriche dell'acqua salmastra, quale l'ambiente lagunare.

Lo studio è stato svolto nell'area di San Felice nella Laguna di Venezia, dove si è indagato un deposito di meandro associato ad un canale tidale (canale Gaggian), le cui geometrie deposizionali osservabili all'interno del corso d'acqua sono state indagate e descritte in lavori precedenti. (Ghinassi et al., 2018)

L'interpretazione dei risultati ottenuti dall'indagine elettromagnetica è stata integrata con informazioni sedimentologiche ottenute dai carotaggi effettuati nell'area di indagine, e confrontata con le informazioni inerenti le strutture dei depositi di canale descritte in letteratura, ricavate da sezioni sismiche collezionate nel canale (Ghinassi et al., 2018).

I risultati e le interpretazioni dei dati elettromagnetici presentati in questo studio, associate alle analisi dei campioni di sito, dimostrano la potenzialità di questa metodologia e la sua applicabilità nel riconoscimento delle architetture deposizionali di depositi antichi e loro estensione spaziale.

2. Metodologie e Strumentazioni utilizzate

In questo capitolo si provvederà a descrivere i principi teorici alla base della tecnica di prospezione geofisica basata sull'induzione elettromagnetica e le metodologie utilizzate in fase di acquisizione. Successivamente verranno descritte le strumentazioni utilizzate durante la campagna di acquisizione dati.

2.1 Induzione Elettromagnetica

La tecnica di prospezione elettromagnetica utilizzata permette la misurazione delle proprietà elettriche del terreno attraverso l'analisi del segnale elettromagnetico generato dai corpi conduttori presenti nel sottosuolo, tale risposta è indotta da un segnale primario inviato tramite un'antenna sorgente. Questa risposta elettromagnetica, registrata da un'antenna ricevente, sarà condizionata dalle proprietà elettriche del mezzo investigato, l'analisi delle componenti vettoriali del segnale registrato, permette di ricavare informazioni relative alla variazione di conducibilità elettrica nel sottosuolo.

Questa tecnica, rispetto alla più comune tomografia elettrica (ERT) presenta alcuni vantaggi e svantaggi: in particolare il vantaggio più ovvio è l'assenza di un contatto diretto tra suolo e strumentazione, in quanto non sono necessari elettrodi per l'immissione del segnale né per la misura della quantità fisica d'interesse. Inoltre, la risoluzione spaziale che è possibile ottenere tramite la tecnica ad induzione elettromagnetica aumenta, permettendo di processare vaste aree in poco tempo, di conseguenza il rapporto costi/benefici si riduce andando a fornire una migliore soluzione logistica in determinati contesti.

È tuttavia necessario ricordare che, per quanto riguarda il tipo di prospezione elettromagnetica trattato, la risoluzione verticale è compromessa rispetto alle profondità che generalmente possono essere raggiunte tramite la tomografia elettrica.

Il principio teorico alla base del funzionamento dell'induzione elettromagnetica risiede nelle seguenti relazioni, meglio note come le *Equazioni di Maxwell*:

1	Legge di Faraday	$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Un campo magnetico variabile nel tempo genera un campo elettrico.
2	Legge di Ampère	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	Una corrente di conduzione o di spostamento genera un campo magnetico.
3	Legge di Gauss per il campo elettrico	$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$	In assenza di cariche libere.
4	Legge di Gauss per il campo magnetico	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	Non esistono poli magnetici liberi.

Tabella 1: Equazioni di Maxwell

Dove:

- \mathbf{E} : rappresenta il vettore intensità di campo elettrico [V/m]
- \mathbf{H} : rappresenta il vettore intensità di campo magnetico [A/m]
- \mathbf{B} : rappresenta il vettore induzione magnetica [Weber/m²]
- \mathbf{D} : rappresenta il vettore spostamento elettrico [Q/m²]
- t : rappresenta il tempo [s]
- \mathbf{J} : rappresenta il vettore densità di corrente di spostamento [A/m²]

La legge di Faraday (1) afferma che un campo magnetico \mathbf{B} variabile nel tempo produce un campo elettrico \mathbf{E} , mentre la legge di Ampère sostiene che una corrente di conduzione o di spostamento, generi un campo magnetico. Oltre a queste leggi introduciamo inoltre anche le relazioni costitutive che legano tra loro i vari campi vettoriali:

5	$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} = \mu_r\mu_0\mathbf{H} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + k)\mathbf{H}$
6	$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} = \varepsilon_r\varepsilon_0\mathbf{E}$
7	$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$

Tabella 2: Relazioni costitutive tra i vari campi vettoriali

Dove:

- \mathbf{E} : rappresenta il vettore intensità di campo elettrico [V/m]
- \mathbf{H} : rappresenta il vettore intensità di campo magnetico [A/m]
- \mathbf{B} : vettore induzione magnetica [Weber/m²]
- \mathbf{D} : vettore spostamento elettrico [Q/m²]
- μ_0 : permeabilità magnetica del vuoto (costante $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)
- μ_r : permeabilità magnetica relativa = μ/μ_0
- k : suscettività magnetica = μ_r^{-1}
- \mathbf{M} : vettore magnetizzazione
- ε_0 : permittività elettrica del vuoto (costante $8.85418781862 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)
- ε_r : permittività elettrica relativa $\varepsilon/\varepsilon_0$
- σ : conduttività elettrica [S/m]

Attraverso la combinazione delle leggi di Maxwell riportate in tab. 1 e le relazioni costitutive di tab. 2 è possibile riscrivere le equazioni del campo elettromagnetico nella forma di equazioni d'onda dissipative per un mezzo omogeneo:

8	Equazione d'onda per il campo elettrico	$\nabla^2\mathbf{E} - \sigma\mu\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} = \varepsilon\mu\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2}$
9	Equazione d'onda per il campo magnetico	$\nabla^2\mathbf{H} - \sigma\mu\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} = \varepsilon\mu\frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2}$

Tabella 3: Equazioni d'onda dissipative nel caso di un mezzo omogeneo

Nelle due equazioni presentate in tab. 3 i termini in **rosso** rappresentano la componente di dissipazione dell'onda, mentre i termini in **blu** la propagazione d'onda.

Le onde che si propagano secondo queste equazioni sono definite *ellettromagnetiche*, e viaggiano con velocità pari a quella della luce.

10	Velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche	$c = v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$
----	---	--

Tabella 4: Velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche:

Trasformando l'equazione d'onda dissipativa nel dominio della frequenza tramite Fourier, si ottiene:

11	Equazione d'onda per il campo elettrico nel dominio della frequenza	$\nabla^2 \mathbf{E} - j\mu\omega\sigma\mathbf{E} = \mu\epsilon\omega^2\mathbf{E}$
12	Equazione d'onda per il campo magnetico nel dominio della frequenza	$\nabla^2 \mathbf{H} - j\mu\omega\sigma\mathbf{H} = \mu\epsilon\omega^2\mathbf{H}$

Tabella 5: Equazioni d'onda nel dominio della frequenza

Le equazioni in tab. 5 possono essere anche riscritte introducendo il numero d'onda k :

13	Equazione d'onda per il campo elettrico nel dominio della frequenza	$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0$
14	Equazione d'onda per il campo magnetico nel dominio della frequenza	$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0$
15	Numero d'onda k	$k = \sqrt{\mu\epsilon\omega^2 - j\mu\omega\sigma}$

Tabella 6: Equazioni d'onda nel dominio della frequenza espresse tramite il numero d'onda

Il numero d'onda, anche definito parametro di propagazione, è importante nella comprensione della propagazione delle onde elettromagnetiche, il cui comportamento varia in funzione della frequenza del segnale.

Generalmente si possono identificare due casi:

1) Se la frequenza del segnale è inferiore ai 10^5 Hz, le correnti di spostamento sono inferiori rispetto alle correnti di conduzione ($\mu\epsilon\omega^2 \ll j\mu\omega\sigma$) e si definisce quindi il regime induttivo. In queste condizioni il numero d'onda è approssimabile a: $k^2 = -j\mu\omega\sigma$

2) Se la frequenza del segnale è superiore a 10 MHz, le correnti di spostamento sono dominanti rispetto alle correnti di conduzione ($\mu\epsilon\omega^2 \gg j\mu\omega\sigma$).

In queste condizioni il numero d'onda è approssimabile a: $k^2 = \mu\epsilon\omega^2$

Inoltre, effettuando il rapporto tra il termine dissipativo e quello di propagazione si ottiene il *loss factor* o *fattore di perdita* P , che riassume l'importanza del comportamento del numero d'onda in funzione della frequenza:

16	FATTORE DI PERDITA	$P = \frac{\mu\omega\sigma}{\mu\epsilon\omega^2} = \frac{\sigma}{\epsilon\omega} = \frac{1}{\rho\epsilon\omega}$
----	--------------------	--

Tabella 7: Fattore di perdita

Dove:

- ρ : resistività elettrica [Ohm*m]
- ω : frequenza [Hz]

Se il fattore di perdita $\mathbf{P} \gg 1$ siamo in condizioni *diffusive*, caratteristiche di alta conduttività e bassa frequenza, in queste condizioni lavorano i metodi elettromagnetici ad induzione. Nel gruppo dei metodi ad induzione individuato nelle condizioni diffusive si trovano le tecniche FDEM, che lavorano nel dominio della frequenza, e le TDEM, che lavorano nel dominio del tempo.

Tra le tecniche FDEM è possibile fare un'ulteriore suddivisione basata sul numero di induzione:

- Tecniche *near field*: metodologie a basso numero di induzione in cui non c'è sfasamento rispetto al campo primario, tutto accade molto vicino alla sorgente. (tecniche *slingram*)
- Metodologie *far field*: metodi ad onda piana, dove la sorgente del campo primario è così lontana che il campo prodotto è uniforme nella zona di esplorazione.

Nel caso studio presentato in questo lavoro di tesi, la metodologia ad induzione elettromagnetica utilizzata rientra nel campo delle tecniche FDEM *near field*.

2.2 Metodologia di funzionamento

Il principio di funzionamento di questa tecnica consiste nel far circolare una corrente alternata a frequenza $\omega/2\pi$ e di intensità I_P in una bobina sorgente posta in superficie, che costituisce l'antenna trasmittente (Tx). Tale corrente alternata produrrà un campo primario P che si propagherà nella regione circostante. Un'antenna ricevente (Rx), posta anch'essa in superficie, riceverà direttamente il segnale primario senza venire modificato se non per una leggera attenuazione dovuta alla distanza.

Allo stesso tempo il campo primario P penetra all'interno del suolo, che per le sue proprietà elettriche si comporta come un conduttore.

Per quanto espresso da Faraday e Ampère (in eq. 1 e 2) la variazione nel tempo del campo magnetico generato dall'antenna trasmittente, genera un campo elettrico variabile nel tempo all'interno dei corpi conduttori presenti nel sottosuolo.

Il campo elettrico produrrà quindi una f.e.m. indotta \mathcal{E}_S all'interno dei corpi conduttori che a sua volta produrrà una corrente indotta, caratterizzata dalla stessa frequenza $\omega/2\pi$ della corrente che circola nel Tx, ma sfasata di $\pi/2$. L'intensità di corrente generata dalla f.e.m. è funzione dell'impedenza effettiva dei corpi conduttori ed è definita come riportato in eq.18 in tab. 8:

17	IMPEDENZA	$Z = R + i\omega L$
18	CORRENTE INDOTTA o EDDY CURRENT	$I_S = \frac{\mathcal{E}_S}{Z}$

Tabella 8: Impedenza e corrente secondaria dei corpi conduttori presenti nel suolo

Dove:

- R: rappresenta la resistenza elettrica [Ohm*m]
- L: rappresenta l'induttanza [H]

A sua volta, la corrente alternata prodotta nei corpi conduttori genererà un campo magnetico secondario \mathcal{S} , e sia I_S che \mathcal{S} saranno sfasati rispetto ϵ_S di un angolo φ , il quale è funzione delle proprietà elettriche del materiale e la cui espressione matematica è riportata in eq. 19 in tab. 9.

Infine, lo sfasamento totale tra \mathbf{P} e \mathcal{S} sarà dato dalla somma dei due sfasamenti.

19	DIFFERENZA DI FASE TRA ϵ_S e I_S, \mathcal{S}	$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$
20	SFASAMENTO TOTALE	$\Delta_{\varphi_{sp}} = \frac{\pi}{2} + \varphi$
21	SFASAMENTO TOTALE IN FUNZIONE DELLE PROPRIETÀ ELETTRICHE	$\Delta_{\varphi_{sp}} = \frac{\pi}{2} + \frac{\omega L}{R}$

Tabella 9: Angolo di sfasamento tra S e ϵ_S e sfasamento totale tra P e S

Per quanto espresso dalla eq. 21 si possono identificare due situazioni estreme:

1) Caso di un *buon conduttore*: Consideriamo $R \rightarrow 0$, di conseguenza $\left(\frac{\omega L}{R} \right) \rightarrow \infty$,

allora $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) = \frac{\pi}{2}$. Perciò lo sfasamento totale di \mathcal{S} rispetto a \mathbf{P}

sarà $\Delta_{\varphi_{sp}} = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} = \pi$.

2) Caso di un *cattivo conduttore*: Consideriamo $R \rightarrow \infty$, di conseguenza $\left(\frac{\omega L}{R} \right) \rightarrow 0$,

allora $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) = 0$. Perciò lo sfasamento totale di \mathcal{S} rispetto a \mathbf{P}

sarà $\Delta_{\varphi_{sp}} = \frac{\pi}{2} + 0 = \frac{\pi}{2}$.

Quello che emerge da queste considerazioni è che lo sfasamento di S è funzione della conducibilità elettrica del materiale σ . Quello che però viene misurato in superficie dall'antenna ricevente (Rx) è la risultante vettoriale R che si ottiene dalla combinazione di P e S .

La componente in fase con P di R è definita *componente reale* o *in-phase*, mentre la componente fuori fase è definita *componente immaginaria* o di *quadratura*. Queste componenti sono rappresentate in fig. 1.

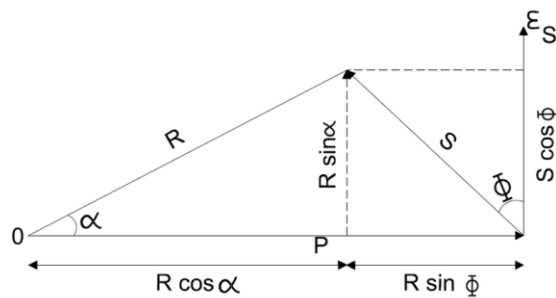


Figura 1: Relazioni di ampiezza e fase tra il campo primario P , il campo secondario S e il campo risultante R . Il vettore ϵ_S rappresenta la f.e.m. indotta nel conduttore dal campo primario P

Analizzando il rapporto tra il campo primario prodotto dalla sorgente e il campo secondario, è possibile ottenere informazioni relative alla conducibilità elettrica.

In fig. 2 è riportata una schematizzazione di ciò che è appena stato descritto.

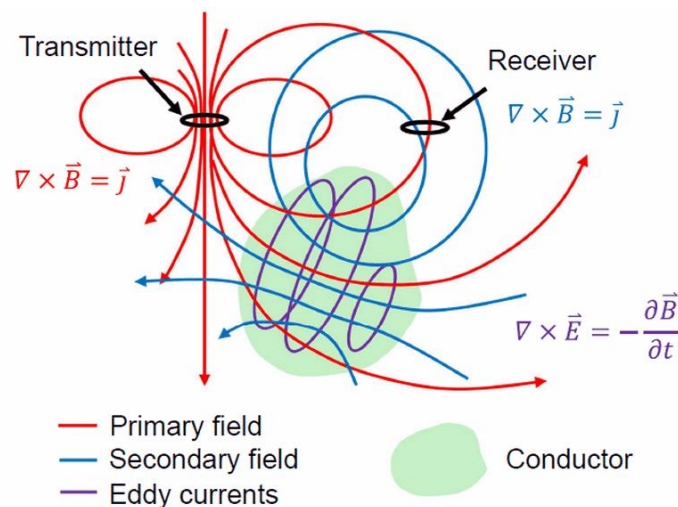


Figura 2: Principio di funzionamento delle tecniche FDEM near field

2.3 Configurazione Slingram

Tra le varie combinazioni *sorgente - ricevitore* che possono essere impiegate in fase di acquisizione, per quanto concerne i metodi ad induzione elettromagnetica a bassa frequenza, sono di particolare interesse le strumentazioni *bobina-bobina complanare* detti anche *SLINGRAM*. Questa tipologia di configurazioni è la più popolare tra le strumentazioni operanti nel dominio della frequenza, ed è caratterizzata da una traslazione simultanea dell'antenna trasmittente e di quella ricevente, poste ad una distanza fissa tra di loro.

Come rappresentato in fig. 3 queste configurazioni possono essere realizzate con le bobine solidali ad uno chassis, che ne permette il trasporto mantenendo fissa l'interdistanza tra Tx e Rx, in altri assetti le due antenne possono essere connesse tramite un cavo, generalmente lungo qualche decina di metri, e vengono trasportate da due operatori i quali mantengono una distanza definita e un orientamento delle due antenne stabilito.

È evidente che nel secondo caso sarà più complicato mantenere costante l'orientazione e l'interdistanza tra le due antenne.

Sempre in fig. 3 sono rappresentate le due modalità di funzionamento che possono essere realizzate con questo tipo di configurazione:

- 1) Modalità *VDM: Vertical Dipole Mode*, in cui l'asse delle spire è normale al terreno, e quindi il dipolo magnetico equivalente alla bobina trasmittente è verticale. In questa configurazione la profondità di indagine è maggiore ed è circa il doppio della configurazione HDM
- 2) Modalità *HDM: Horizontal Dipole Mode*, in cui l'asse delle spire è parallelo al terreno, e quindi il dipolo magnetico equivalente alla bobina trasmittente è orizzontale. In questa configurazione la profondità di indagine è minore.

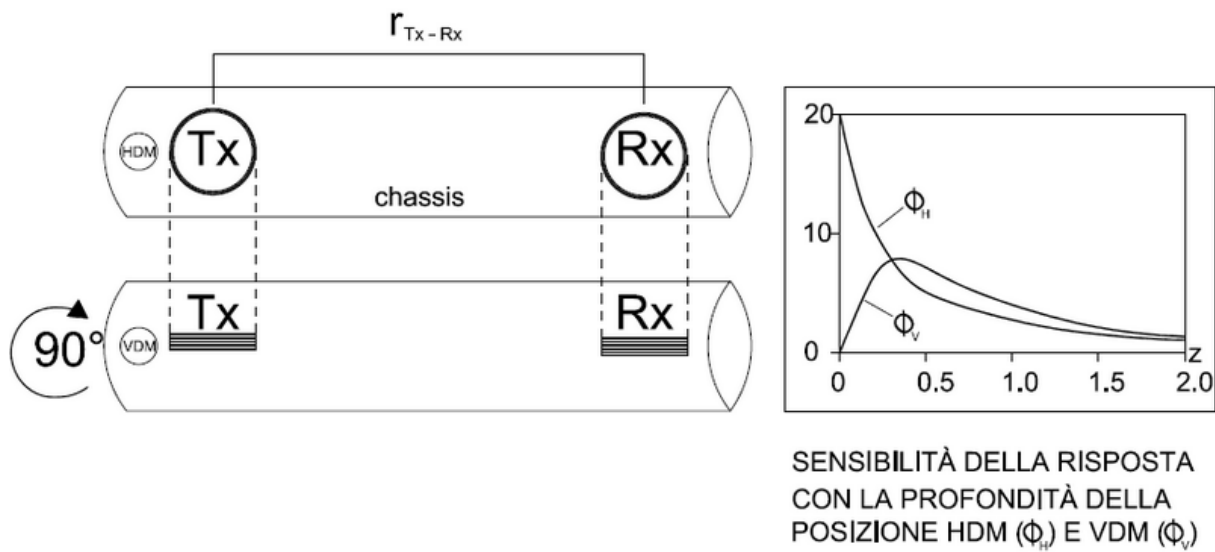


Figura 3: Schema configurazione tipo Slingram, con bobina trasmittente e ricevente poste a distanza fissa su di uno chassis in materiale non conduttore, su cui è indicata l'orientazione per misure con dipolo orizzontale e verticale. Inoltre, è riportato un grafico relativo alla sensibilità delle due configurazioni

L'interdistanza e la frequenza che è preferibile utilizzare dipende dal numero di induzione. Questa tipologia di investigazione elettromagnetica prende infatti anche il nome di *LIN*, il quale acronimo sta per *low induction number*.

Il numero d'induzione è un parametro adimensionale e definito in tab. 10:

22	SKIN-DEPTH EFFECT	$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$
23	INDUCTION NUMBER	$N_B = \frac{r_{Tx-Rx}}{\delta} = r \times \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}$

Tabella 10: rappresentazione matematica dello skin-depth effect e del numero d'induzione

Come si osserva il numero d'induzione dipende dallo *skin-depth effect*, ovvero la profondità alla quale il segnale si attenua fino al valore e^{-1} del suo valore iniziale.

Questa riduzione di intensità è dovuta al fatto che in un mezzo conduttore, il campo elettromagnetico si attenua per effetto Joule in proporzione alla frequenza e alla conducibilità elettrica.

Il numero di induzione è piuttosto importante poiché è funzione delle caratteristiche geometriche dello strumento e delle proprietà elettriche del materiale. Inoltre, nell'eq. 24 riportata tab. 11 valida per $N_B \ll 1$, è presentato il rapporto tra le componenti in fase e di quadratura del campo magnetico secondario H_S rispetto al campo magnetico primario H_P .

24	Rapporto tra le componenti H_P e H_S	$\frac{H_S}{H_P} = \frac{i\mu_0\omega\sigma r^2}{4} = \frac{iN_B^2}{2}$
----	--	---

Tabella 11: rapporto tra la componente di quadratura del campo magnetico secondario H_S e il campo magnetico primario H_P

Questo rapporto, come si osserva, è proporzionale alla conducibilità elettrica del materiale ma dipende anche dal numero di induzione, quindi in funzione di una stima della massima conducibilità aspettata durante l'indagine, è possibile selezionare frequenza e interdistanza tra Tx e Rx necessarie, per far sì che venga rispettata la condizione $N_B \ll 1$.

Gli elettromagnetometri tipo slingram sono i più diffusi tra i gli strumenti ad induzione elettromagnetica, ed il loro utilizzo è principalmente svolto ad indagare le variazioni delle caratteristiche elettriche del sottosuolo per profondità relativamente piccole (nell'ordine di metri - decine di metri).

In particolare, si trovano due diverse tipologie di elettromagnetometri in configurazione slingram:

1) Elettromagnetometri *multi-coil*: sono caratterizzati da più coppie trasmettitore-ricevitore, poste ad un'interdistanza fissa e differente per ciascuna coppia. Tramite questo tipo di configurazione è possibile effettuare misure simultaneamente a differente profondità su ciascun punto di misura.

Ottenendo così informazioni diffuse all'interno di un volume, questo tipo di indagine prende il nome di *geometrical sounding*.

2) Elettromagnetometri *multifrequenza*: al contrario dei multi-coil, questi sono caratterizzati da una singola coppia trasmettente-ricevente posta in configurazione slingram. Il *sounding* elettromagnetico viene effettuato utilizzando un segnale costituito da più frequenze, riuscendo così ad investigare il mezzo geologico a differenti profondità. Questa tipologia di indagine prende in nome di *frequency sounding*.

Durante la campagna dati sono stati utilizzati due strumenti, uno appartenente alla famiglia dei multi-coil, l'altro appartenente a quella dei multifrequenza.

2.4 CMD-Explorer

Per l'acquisizione dei dati in campagna sono stati utilizzati due differenti elettromagnetometri. Il GEM-2 "ski" della Geophex, sensore elettromagnetico multifrequenza, e il CMD-Explorer della GF Instruments, sensore tipo multi-coil.

Il CMD-Explorer, al contrario del GEM-2, sfrutta una configurazione di acquisizione tipo *geometrical sounding*, sistemi dove varia l'interdistanza tra antenna trasmittente (Tx) e ricevente (Rx) per ottenere informazioni a differente profondità.

Nel caso specifico il CMD-Explorer sfrutta una combinazione definita da 3 coppie sorgente - ricevitore poste a diversa distanza come riportato in tab. 12.

<i>Probe</i>	<i>Effective High/Low Depth Range (m)</i>	<i>Dipole Center distance (m)</i>	<i>Working Weight (kg)</i>
<i>CMD-Explorer</i>	2.2 / 1.1	1.48	8.0
	4.2 / 2.1	2.82	
	6.7 / 3.3	4.49	

Tabella 12: Proprietà tecniche CMD-Explorer della GF Instruments

I grafici riportati in fig. 4 sono complementari a quanto riportato in tab. 12, risulta evidente considerando l'elevata sensibilità del segnale alle basse profondità, come questo tipo di strumentazioni sia ideale per lo studio di variazioni di conducibilità per condizioni *near surface*.

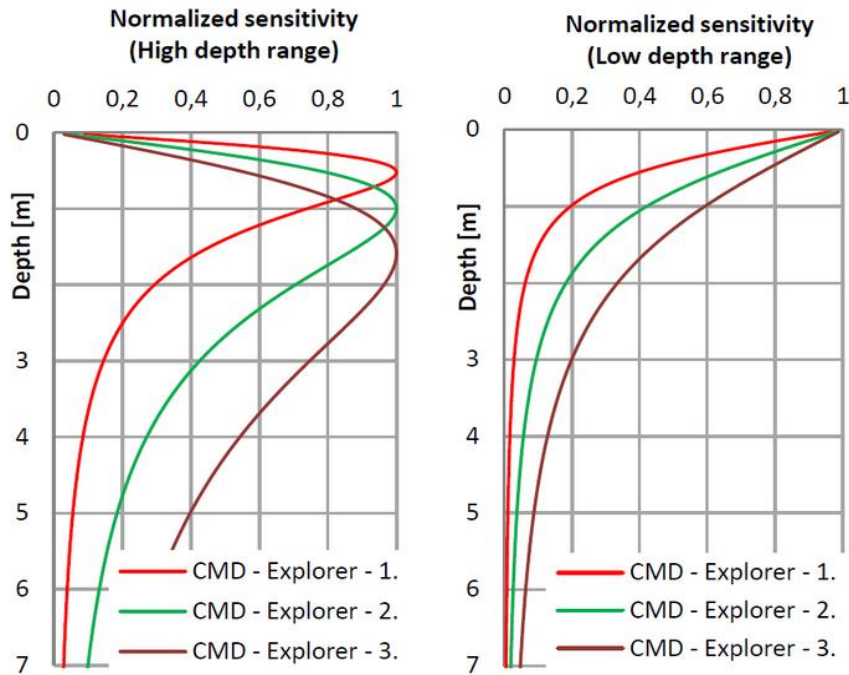


Figura 4: Sensitivity function normalizzata relativa al CMD-Explorer

In generale, se si intende indagare profondità piccole, le tecniche elettromagnetiche offrono velocità di acquisizione elevate, alta risoluzione spaziale, elevata precisione del dato e migliori soluzioni logistiche.

Come accennato nell'introduzione teorica, a seconda del tipo di configurazione slingram che utilizziamo possiamo indagare il substrato a diversa profondità, variando la frequenza del segnale o l'interdistanza delle antenne riceventi e trasmettenti.

Il caso del CMD-Explorer rientra nel gruppo di strumenti che sfruttano questa proprietà geometrica, inoltre, come già discusso nei capitoli precedenti, è possibile ottenere informazioni a differente profondità variando l'orientamento delle bobine trasmettenti e riceventi, nelle configurazioni *HDM* e *VDM*.

L'acquisizione di misure lungo un profilo eseguita tramite l'utilizzo del CMD-Explorer permette all'operatore di collezionare in ogni singola posizione di misura, *sei* valori di *conducibilità apparente* σ_a correlati a *sei* differenti profondità sulla verticale.

La conducibilità elettrica di un semispazio conduttore omogeneo e isotropo è ricavabile come in eq. 25 in tab. 13.

25	CONDUCIBILITÀ APPARENTE	$\sigma_a = \frac{4}{\mu_0 \omega r^2} \operatorname{Im} \left[\frac{(H_S)_d}{(H_P)_d} \right]$
----	-------------------------	--

Tabella 13: Conducibilità elettrica di un semispazio conduttore omogeneo e isotropo

La fase di acquisizione è automatica, una volta scelta la direzione da seguire si percorre 2 volte il tragitto, prima con le bobine in configurazione HDM o VDM, e la successiva con le bobine ruotate di 90° rispetto alla configurazione precedente, ottenendo così una distribuzione bidimensionale della conducibilità apparente, qualora si acquisisca lungo un profilo, o un volume se l'acquisizione avviene su un'area.

Questi dati saranno successivamente elaborati attraverso un processo di inversione, e successivamente tramite l'utilizzo di software dedicati verranno realizzate delle tomografie di conducibilità elettrica.

In fig. 5 è riportata una schematica presentazione dei componenti principali del CMD-Explorer.



Figura 5: Componenti principali del CMD-Explorer della GF Instruments

2.5 GEM-2

Il secondo strumento utilizzato per l'acquisizione dei dati è il GEM-2 della Geophex. Questo strumento, al contrario del prodotto di casa GF Instruments, è un sensore elettromagnetico multifrequenza che sfrutta un segnale variabile da 30 Hz fino a 96 kHz.

Il funzionamento di questo tipo di sensori è basato sul principio secondo il quale, la profondità di esplorazione è funzione della frequenza del segnale utilizzato. Questo principio è valido anche per il CMD-Explorer, solamente che in tal caso la frequenza del segnale utilizzata dallo strumento è fissa, ed è funzione del tipo di antenna scelta per la trasmissione del segnale.

L'analisi di un segnale costituito da frequenze multiple equivale a misurare la risposta di un segnale a differenti profondità. È quindi possibile usare questo tipo di strumentazione per ottenere una distribuzione 3D della conducibilità elettrica del sottosuolo nell'area investigata.

In realtà quello che il GEM-2 fornisce come dato grezzo è il valore in *ppm* del rapporto tra H_S e H_P . Questo rapporto, come visto precedentemente riguardo alle tecniche di tipo LIN, è comunque un'espressione della variabilità della conducibilità elettrica nel sottosuolo. Per ottenere una distribuzione della conducibilità elettrica è necessario effettuare un'inversione del dato *raw* attraverso software dedicati o codici di inversione. Tuttavia, il GEM-2 permette di acquisire una mole di dati davvero abbondante, tanto che per la semplice localizzazione di corpi metallici sepolti, è spesso sufficiente realizzare delle mappe con i dati espressi in *ppm*, per avere un'informazione qualitativa di dove possano localizzarsi.

In particolare, risultati ottenuti su molti siti ambientali, indicano che i dati ottenuti dal GEM-2 sono di gran lunga superiori rispetto ai dati acquisiti con sistemi a frequenza singola, per quanto riguarda la caratterizzazione di anomalie prodotte da corpi sepolti, sia nel caso che la natura del target sia metallica oppure no.

In tab. 14 sono riportate le caratteristiche tecniche del GEM-2.

<i>Probe</i>	<i>Effective High/Low Depth Range (m)</i>	<i>Dipole Center distance (m)</i>	<i>Working Weight (kg)</i>	<i>Sounding Frequency</i>
<i>GEM-2</i>	~ 10	1.6	4.0	30 Hz-96kHz

Tabella 14: Caratteristiche tecniche del GEM-2

Il vantaggio di utilizzare un sensore EM multifrequenza si basa sul concetto dello *skin-depth effect* (introdotto precedentemente in eq. 22 Cap. 2.3 pag. 13), il quale è inversamente proporzionale alla frequenza del segnale.

Concettualmente un segnale a bassa frequenza viaggia lontano in un mezzo conduttivo, riuscendo quindi ad illuminare strutture profonde, mentre al contrario, un segnale ad alta frequenza, riuscirà a spingersi solo per breve distanza all'interno di un mezzo conduttivo, e di conseguenza sarà capace di vedere bene solamente strutture più superficiali.

In fig. 6 è presentato un nomogramma fornito dalla Geophex, attraverso il quale è possibile determinare il valore dello *skin-depth* associato ad un segnale elettromagnetico di cui è nota la frequenza, ed in funzione della conoscenza del tipo di suolo/roccia attraversato dal segnale. (Won, 1980)

Per determinare tale valore è sufficiente unire con un segmento il tipo di materiale attraversato, con il corrispettivo valore di frequenza del segnale, e l'intersezione di tale segmento con l'asse relativo allo *skin-depth* fornisce tale valore.

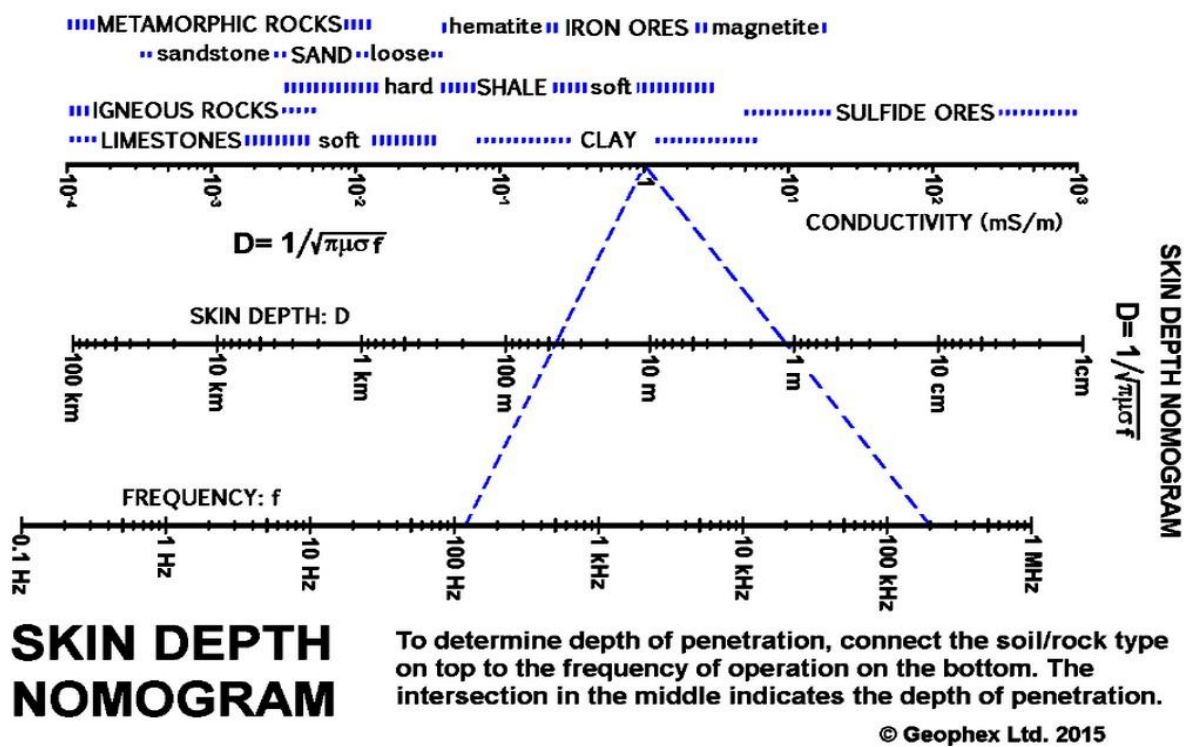


Figura 6: Nomogramma per la determinazione del valore di skin-depth in funzione della frequenza del segnale © Geophex Ltd. 2015

L'indagine in profondità effettuata variando la frequenza del segnale, è un'operazione che prende il nome di *frequency soundign*. L'analisi consiste nell'acquisizione del segnale elettromagnetico generato dal target in risposta alle differenti frequenze utilizzate, ottenendo in questo modo un'immagine delle strutture sepolte.

Questa metodologia necessita di un sistema costituito essenzialmente da un trasmettitore (Tx) e un ricevitore (Rx), configurazione slingram definita *bistatica*, perciò il sensore può essere realizzato su un unico sistema hardware. Questa configurazione produce di conseguenza misure estremamente sensibili e precise, tale vantaggio è ben definito rispetto ai metodi *geometrical sounding*, dove per indagare profondità maggiori è necessario variare la distanza di separazione tra Tx e Rx, richiedendo generalmente strumentazioni molto più ampie o più di un operatore per l'acquisizione, nonché un

ingombro maggiore della componentistica hardware, dovendo gestire più bobine connesse alla console.

In fig. 7 è riportata una schematica presentazione dei componenti principali del GEM-2.

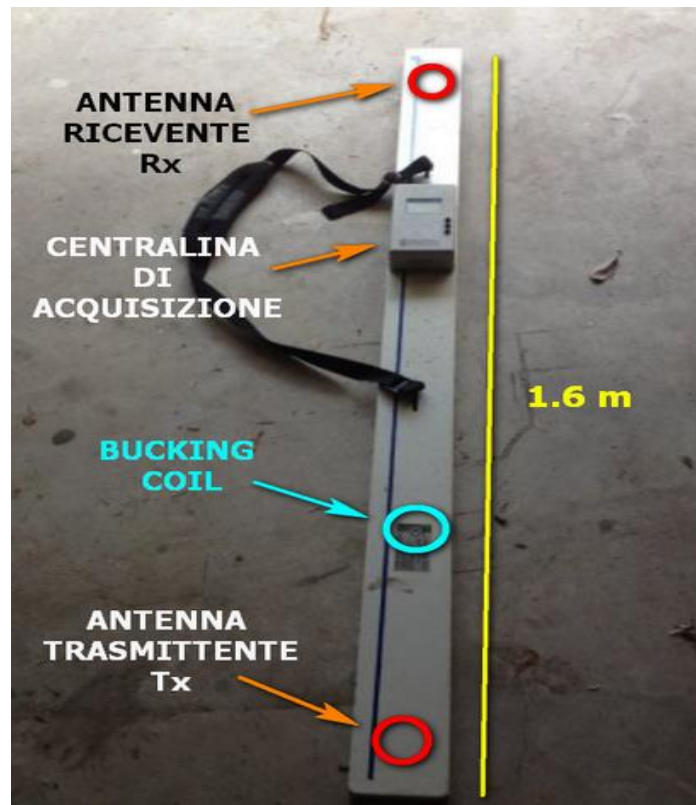


Figura 7: Componenti principali del GEM-2 della ©Geophex

Come si osserva dalla rappresentazione schematica riportata in fig. 7 nel GEM-2 è presente anche un 3 bobina definita *bucking coil* che ha il compito di sottrarre il campo primario registrato della bobina ricevente dal segnale complessivo.

3. Caso studio

Lo studio che viene presentato è stato condotto con lo scopo di testare la metodologia introdotta, verificandone le potenzialità risolutive in un ambiente complesso quale è l'ambiente lagunare.

Il presente capitolo fornirà le principali informazioni geografiche e geologiche riguardanti l'area di studio.

3.1 Inquadramento Geografico

Lo studio è stato condotto nella zona di S. Felice, ubicata nella porzione settentrionale della Laguna di Venezia, ed ha preso in considerazione l'area di barena sviluppatasi sopra il deposito di meandro associato al canale Gaggian, riportato in fig. 8. Il Gaggian è un canale tidale largo circa 100 metri e con una profondità massima di circa 7.5-8.0 m.

La Laguna di Venezia è un ambiente costiero con una lunghezza di circa 50 km e una larghezza variabile tra 8 e 14 km, occupando perciò un'area di circa 550 km², e rappresenta il corpo d'acqua salmastra più grande del bacino Mediterraneo.

É caratterizzata da un complesso sistema di barene intertidali naturali e non, e tidal flats, talvolta sommersi, drenati da una fitta rete di canali tidali sinuosi, anch'essi in certi casi artificiali. La laguna è situata nel settore settentrionale del Mar Adriatico al quale è connessa tramite 3 bocche: Lido, Malamocco e Chioggia, ed è caratterizzata da una forma allungata in direzione NE-SW con una profondità media di circa 1.5 m.

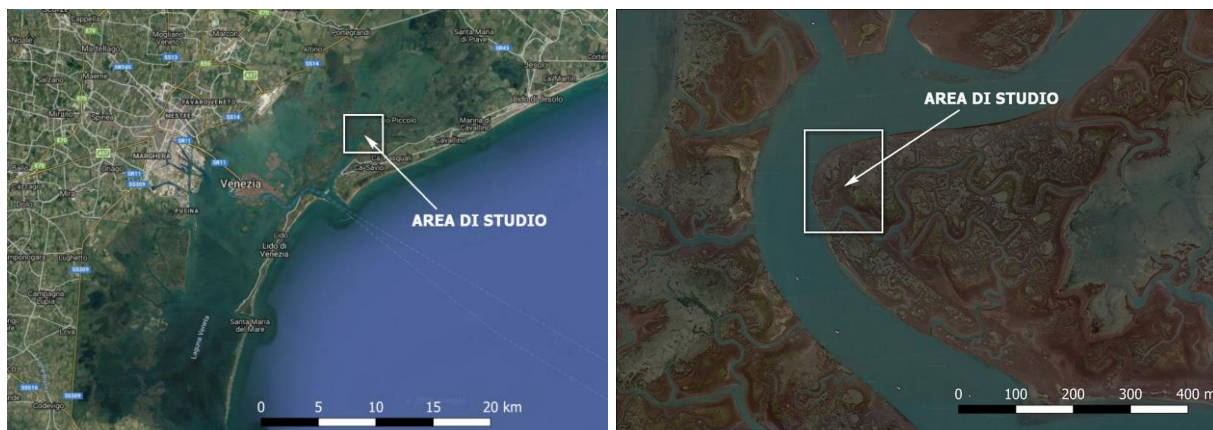


Figura 8: : Inquadramento geografico dell'area di studio

L'escursione di marea che si registra in quest'area è di circa 1.0 m, con picco massimo di escursione in prossimità delle insenature di circa ± 0.75 m rispetto al M.S.L. che può essere ulteriormente aumentato dalle forzanti meteorologiche (D'Alpaos et al., 2013).

La Laguna è delimitata a Nord-Est dal sistema deltizio associato al Piave, mentre a Sud-Ovest è delimitata dei tre fiumi Brenta, Adige e Po (Brivio et al., 2016).

3.2 Inquadramento Geologico

La Laguna di Venezia occupa il settore di foreland della pianura veneta, localizzata tra la porzione NE-vergente della catena Appenninica e la porzione SSE-vergente del Sud-Alpino (Zecchin et al., 2008) L'erosione delle catene montuose ha generato la messa in posto di una successione sedimentaria Pliocenica-Quaternaria nel settore di avanfossa, costituita da alternanze di sabbia, silt e argilla con spessore superiore ai 2 km (Zecchin et al., 2014). Questi corpi sedimentari presentano forma lenticolare con terminazioni verso i fronti Appenninici e Alpini dovute al contesto nel quale si sono depositati. (Zecchin et al., 2008)

Lo sviluppo del sistema lagunare è avvenuto in conseguenza all'innalzamento del livello del mare durante la trasgressione marina Olocenica, successiva alla fase dell'ultimo

massimo glaciale (LGM). La fase trasgressiva portò alla deposizione dei sedimenti alluvionali associati al Megafan del Brenta, accumulatisi durante LGM nella porzione settentrionale dell'Adriatico.

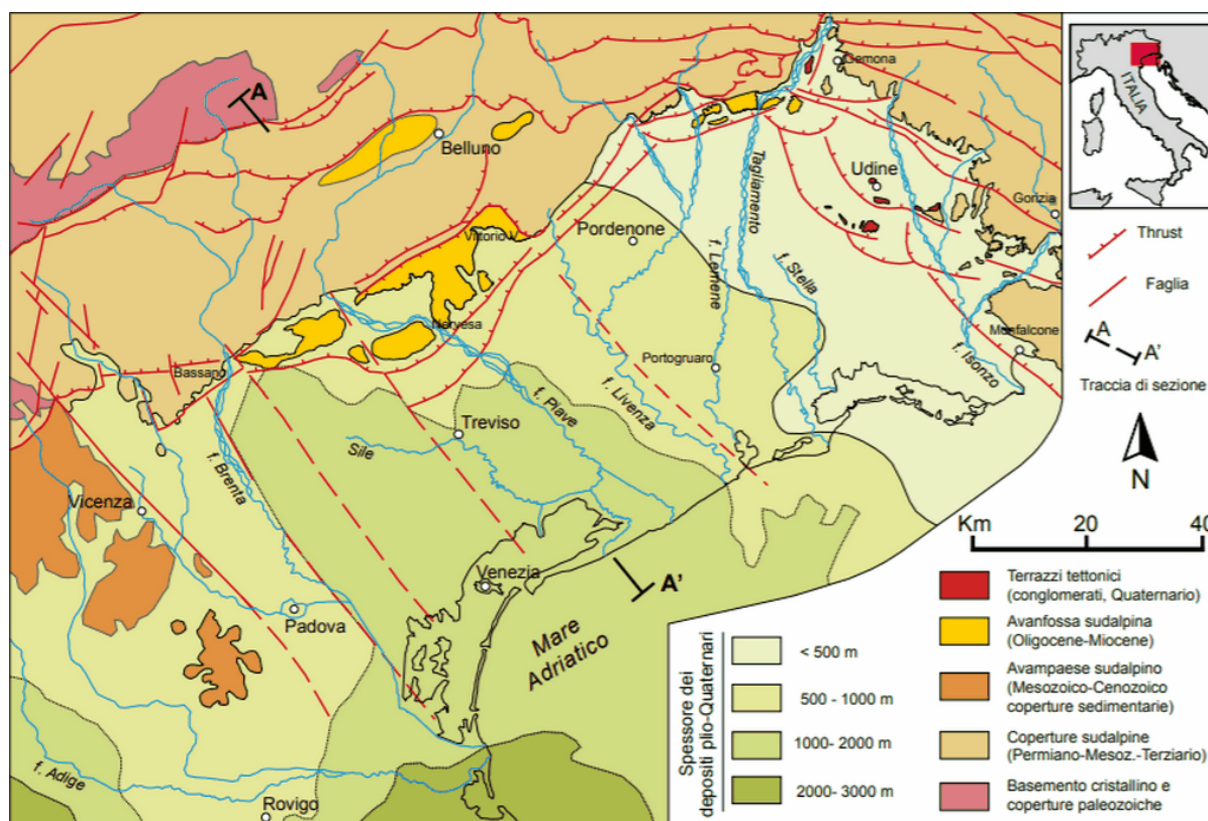


Figura 9: Inquadramento geologico della pianura veneto-friulana

I depositi Quaternari all'interno del bacino consistono di sequenze deposizionali con tendenza *shallowing upward*, passando da depositi marini fangosi emipelagici e successioni turbiditiche, fino ad arrivare a sequenze deposizionali di ambiente deltizio e costiero (Massari et al. 2009), che sono seguite da un'alternanza ciclica di facies continentali e di mare poco profondo, depositatesi durante una fase dominata da controllo glacio-eustatico. L'ultimo ciclo registrato consiste nei depositi alluvionali del Megafan del Brenta, sviluppatasi durante il periodo LGM (Fontana et al. 2014), e i depositi lagunari associati alla trasgressione Olocenica. (Zecchin et al., 2014, 2009, 2008)

Nel corso degli ultimi cinque secoli, l'intervento umano sull'ambiente lagunare ne ha fortemente alterato la sua naturale evoluzione causando una fase trasgressiva indotta dall'attività antropica che ha portato alla riduzione delle aree di saltmarsh. (Zecchin et al., 2014, 2009, 2008),

L'indagine elettromagnetica è stata condotta in una porzione di barena associata al deposito di meandro del Gaggian, tale area è contenuta nella porzione intertidale della laguna, quindi in condizione emersa, durante la bassa marea, e sommersa durante l'alta marea. In questa area le correnti tidali scorrono all'interno di canali associati a depositi di pointbars, ed il trasporto dei sedimenti avviene sotto condizioni trattive.



Figura 10: Inquadramento dell'area di indagine contenuta all'interno del meandro del canale Gaggian

La sequenza stratigrafica che si riscontra comunemente nei depositi lagunari consiste generalmente di alternanze di livelli di fango, ricco in materia organica, e corpi di sabbia

isolati, la cui origine è prevalentemente associata ai processi tidali o fluvio-tidali. Un esempio dei depositi associati in ambiente lagunare è riportato in fig. 11.

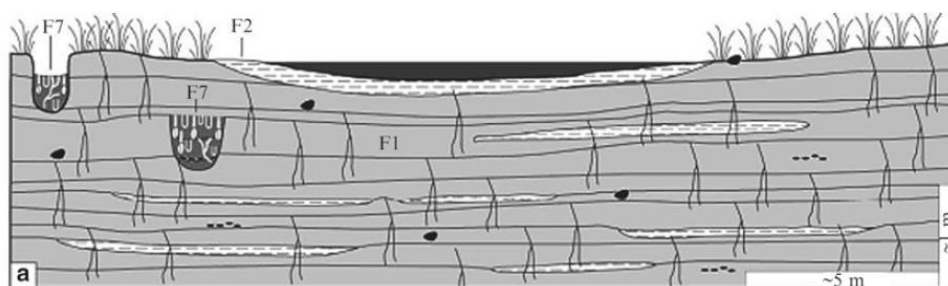


Figura 11: Sezione esempio che esprime l'architettura dei depositi presenti nell'ambiente lagunare

4 L'area di studio

In questo capitolo verrà descritta più nel dettaglio l'area di studio, presentata in fig. 12, relativamente a quanto osservato da Ghinassi et al., 2018 in merito all'evoluzione del canale Gaggian. In particolare, l'attenzione verrà concentrata su alcune delle sezioni sismiche ricavate all'interno del canale in prossimità del meandro BEND1.

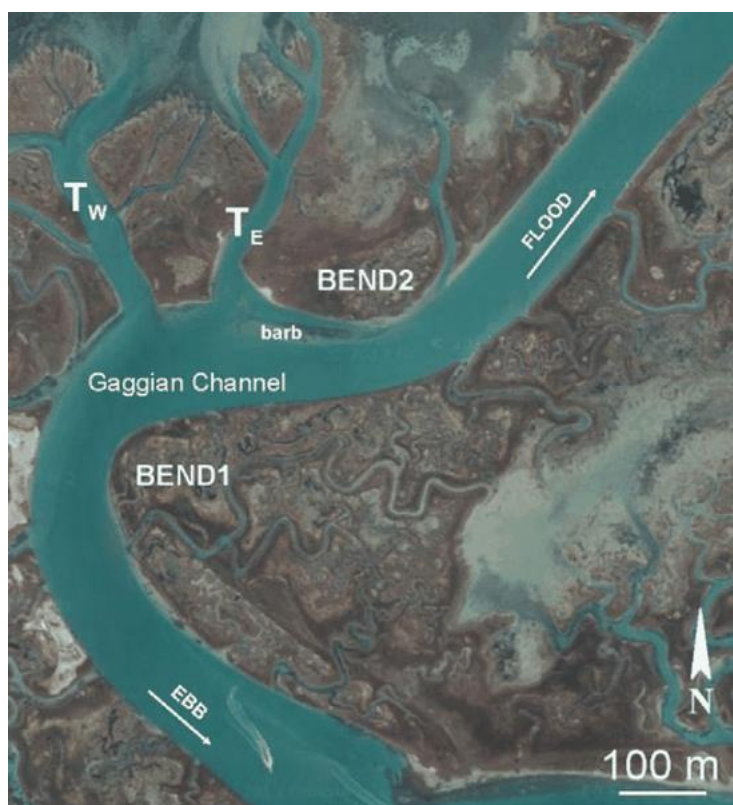


Figura 12: Immagine satellitare del canale Gaggian, le aree identificate sono relative al lavoro di (Ghinassi et al., 2018)

Il meandro BEND1 è lungo circa 800 m e si sviluppa attorno ad una point bar con un raggio di curvatura medio di circa 250m. Il meandro, che caratterizza principalmente l'area di studio, riceve due tributari principali identificati in fig. 12 come T_W (tributario occidentale) e T_E (tributario orientale), questi s'immettono nel Gaggian in prossimità della zona apicale del meandro, e connettono il canale con la Palude della Centrega.

Rispetto alle dimensioni precedentemente citate del Gaggian (100 m di larghezza, ~ 8 metri di profondità) i due tributari sono larghi rispettivamente T_W 40m, mentre T_E 30m, e profondi 4 m e 3 m.

Il BEND2, riportato in fig. 12, rappresenta il secondo meandro presente nell'area, ma non è stato interesse di indagini in questa tesi.

Nel corso dell'Aprile 2011 sono stati acquisiti 2 profili sismici longitudinali (GL1-2) e 22 profili sismici trasversali (GT1-22), più 3 profili sismici nei canali tributari (GTW1, GTE1-2) il cui quadro di unione è presentato in fig.13. L'acquisizione è stata effettuata attraverso l'utilizzo di un Innomar SES-2000 compact, un sub-bottom profiler equipaggiato con un trasduttore SES 2000. Questa tipologia di strumenti viene generalmente impiegata per le indagini sismo-stratigrafiche ad alta risoluzione. (Ghinassi et al., 2018).

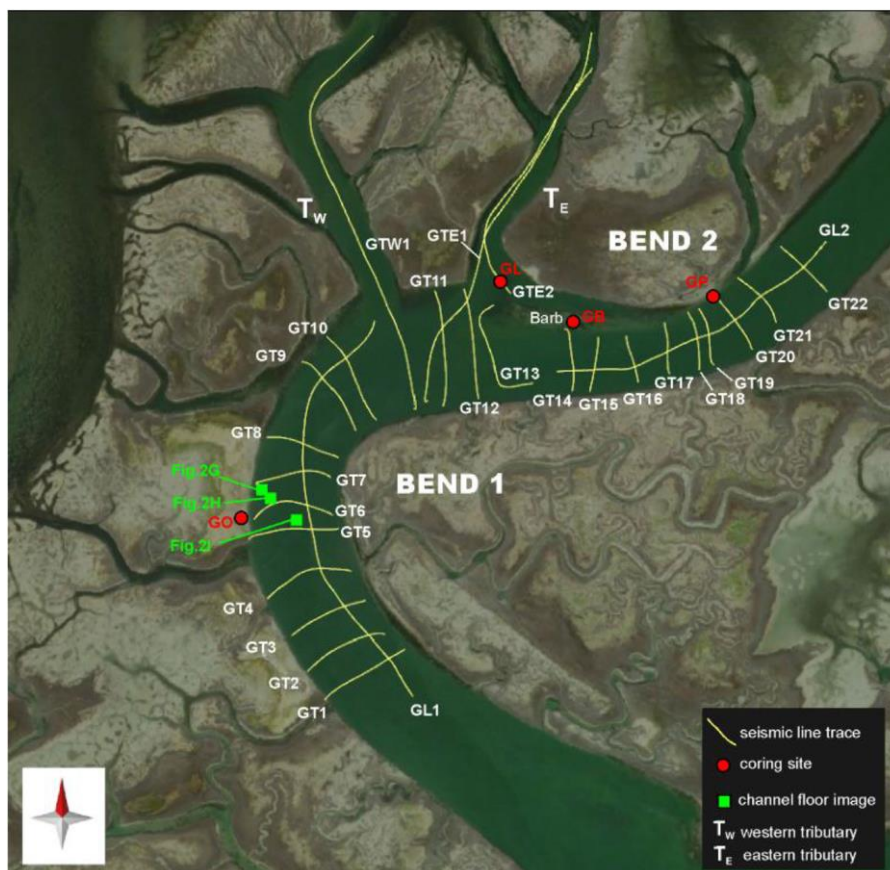


Figura 13: Sezioni sismiche acquisite all'interno del canale Gaggian (Ghinassi et al., 2018)

Tra queste sezioni sono state prese in considerazione per il lavoro di tesi la **GT6** e la **GT9** riportate in fig. 14. Queste sono le uniche riportate nell'articolo che presentano informazioni relative ad una sezione limitrofa all'area indagata nel lavoro di tesi.

Nella fase di interpretazione dei dati raccolti si è cercato di valutarne la correlazione con il dato elettromagnetico.

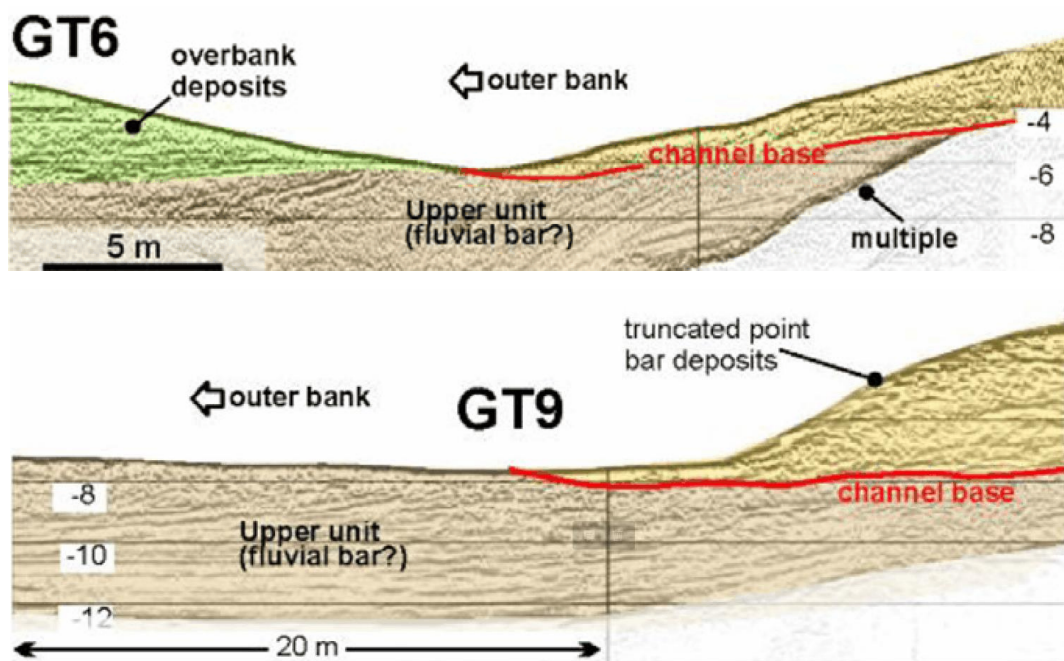


Figura 14: Sezioni sismiche GT6 e GT9 collezionate all'interno del canale Gaggian (Ghinassi et al., 2018)

Come si osserva dalle due sezioni sismiche, è identificabile un deposito di pointbar che si sviluppa a ridosso del meandro. Per quanto riguarda l'utilizzo di questa informazione in fase di interpretazione dei dati elettromagnetici, si deve considerare che le due sezioni sono distanti entrambe circa 20 m dal limite del meandro.

Inoltre, è stata presa in considerazione l'analisi storica dell'evoluzione del canale dal 1938 al 2016 effettuata tramite l'analisi di foto aeree e satellitari, da cui si evince che il canale tidale nel corso dei 78 anni di informazioni relativamente all'evoluzione morfologica dell'area ha subito un incremento della sua larghezza, associata anche ad un incremento della sua profondità. (Ghinassi et al., 2018)

5. Acquisizione ed Elaborazione dati

5.1 Acquisizione dei dati elettromagnetici

L'acquisizione dei dati è stata condotta in data 11/07/2018, ed è stata effettuata tramite l'utilizzo del GEM-2, impostato per acquisire dati a 6 differenti frequenze di campionamento (450Hz, 1950Hz, 5970Hz, 9930Hz, 16890Hz, 25050Hz), tramite il quale è stata analizzata un'area di circa 140 m x 80 m. fig. 15a-b.

Tramite il CMD-Explorer sono state acquisite misure lungo il profilo AB orientato all'incirca N-S, trasversalmente alla direzione di accrescimento del deposito di meandro in prossimità della zona apicale prossima al canale. Il profilo AB è contenuto all'interno dell'area precedentemente investigata con il GEM-2, allo scopo di poter confrontare i risultati ottenuti dai differenti strumenti. Le informazioni relative alla posizione e alla quota sono state acquisite tramite un GPS collegato alla strumentazione.

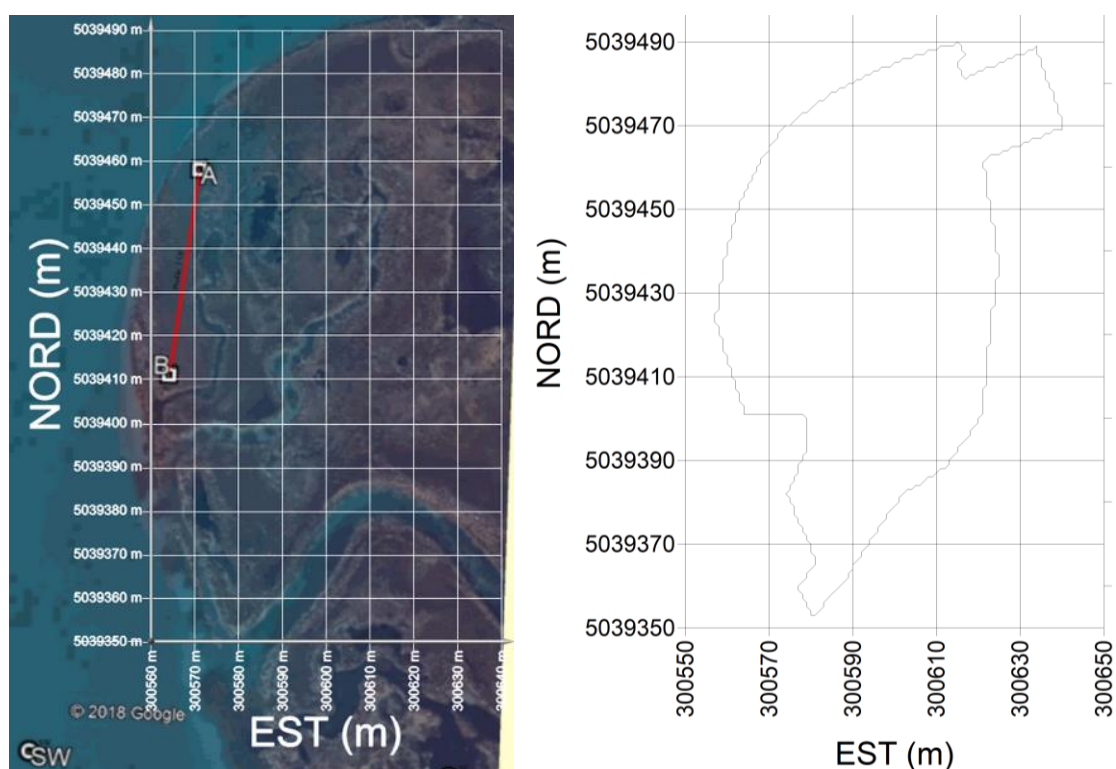


Figura 15: a sinistra) Area studiata durante la campagna d'acquisizione dati e profilo AB effettuato con il CMD-Explorer; a destra) Area analizzata tramite l'utilizzo del GEM-2

Idealmente la strumentazione dovrebbe essere mantenuta ad un'altezza costante rispetto al piano campagna, in modo da evitare sensibili variazioni del dato misurato. Questo criterio è stato rispettato il più possibile durante la fase di acquisizione con entrambe le strumentazioni, tuttavia, la presenza di zone lacustri all'interno dell'area di indagine, ha comportato il locale sprofondamento dell'operatore costituendo sensibili variazioni locali del parametro inerente alla quota, come intuibile in fig. 16a raffigurante la fase di acquisizione con il GEM-2, mentre in fig. 16b è presentata la fase di acquisizione dati effettuata con il CMD-Explorer.



Figura 16: a sinistra) Acquisizione dei dati tramite sensore elettromagnetico GEM-2; a destra) Acquisizione dei dati tramite sensore elettromagnetico CMD-Explorer

5.2 Inversione ed elaborazione dei dati

L'elaborazione dei dati elettromagnetici collezionati durante la campagna di acquisizione dati, è stata effettuata attraverso l'utilizzo di vari software.

In questo capitolo verrà discussa la procedura utilizzata per l'inversione dei dati e successivamente saranno presentati alcuni risultati ottenuti tramite i software dedicati alla realizzazione di mappe bidimensionali e modelli 3D, generalmente utilizzati per l'analisi di dati scientifici. La discussione dei risultati verrà affrontata nei capitoli successivi.

5.2.1 Inversione dei dati

I fenomeni che caratterizzano l'induzione elettromagnetica sono fortemente non lineari, ed i metodi per risolvere questi problemi sono iterativi, ed ogni step si richiede generalmente la soluzione di un problema lineare. La definizione di un modello rappresentativo del sottosuolo partendo dai dati osservati costituisce il processo di inversione, che è stato effettuato con due diversi approcci.

Il primo metodo di inversione utilizzato è quello proposto da (Deidda et al., 2014) un procedimento di inversione che permette di gestire dati relativi alla risposta del segnale elettromagnetico a più profondità. Il processo di inversione è strutturato su un approccio tipo Gauss-Newton smorzato, basato sull'approssimazione di basso rango dello Jacobiano della funzione da invertire. L'algoritmo che ne risulta, utilizza un parametro di rilassamento che garantisce la positività della soluzione ed implementa vari metodi per la stima automatica del parametro di regolarizzazione. Questo fa sì che l'algoritmo sia veloce ed affidabile, ed i risultati presentati da Deidda et al., 2014 mostrano che l'algoritmo produce soluzioni ragionevoli anche in presenza di dati rumorosi, inoltre, produce risultati compatibili con quelli ottenuti da tomografia di resistività elettrica.

Il modello alla base dell'algorithmo riportato in fig. 17, assume che il suolo sia costituito da n strati, definiti da uno spessore d_k con $k = 1, \dots, n$, e con le proprietà elettromagnetiche costanti in ogni strato. Lo spessore dello strato d_n è assunto infinito.

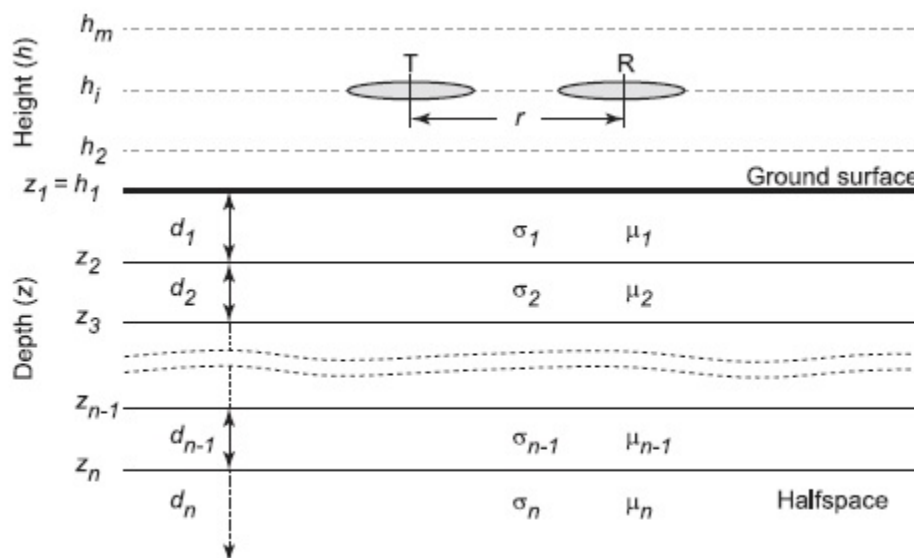


Figura 17: Modello utilizzato nell'algorithmo di inversione presentato da (Deidda et al., 2014)

Nel modello si considera σ_k e μ_k rispettivamente come conducibilità elettrica e la permeabilità magnetica del k -esimo layer.

La conducibilità elettrica apparente può essere espressa come in eq. 25 precedentemente introdotta nel **cap. 2.5** in *tab. 13* e qua riportata per comodità:

25	CONDUCIBILITÀ APPARENTE	$\sigma_a = \frac{4}{\mu_0 \omega r^2} \operatorname{Im} \left[\frac{(H_S)_d}{(H_P)_d} \right]$
----	-------------------------	--

Dove H_P e H_S sono le componenti del campo primario e secondario lungo l'asse del dipolo del campo magnetico. Dall'eq. 25 è possibile ottenere l'espressione della conducibilità elettrica apparente in funzione che il dipolo magnetico associato alla bobina, sia orientato orizzontalmente o verticalmente, come riportato in eq. 26.

In eq. 27 è riportata la formulazione matematica nella sua espressione semplificata:

26	CONDUCIBILITÀ APPARENTE PER <i>VDM</i>	$\sigma_a^V(h) = \frac{4}{\mu_0 \omega r^2} \text{Im}[N_B^3 T_0(h)]$
	CONDUCIBILITÀ APPARENTE PER <i>HDM</i>	$\sigma_a^H(h) = \frac{4}{\mu_0 \omega r^2} \text{Im}[N_B^2 T_2(h)]$
27	CONDUCIBILITÀ APPARENTE PER <i>VDM</i> SEMPLIFICATA	$\sigma_a^V(h) = \frac{4r}{\mu_0 \omega} H_0[-\lambda \exp^{-2h\lambda} \text{Im}(R_0(\lambda))](r)$
	CONDUCIBILITÀ APPARENTE PER <i>HDM</i> SEMPLIFICATA	$\sigma_a^H(h) = \frac{4}{\mu_0 \omega} H_1[-\exp^{-2h\lambda} \text{Im}(R_0(\lambda))](r)$

Tabella 15: Espressione della conducibilità elettrica apparente nelle configurazioni *VDM* e *HDM*

Dove:

- N_B rappresenta il numero di induzione precedentemente introdotto in eq. 23;
- T_0 e T_2 sono relative al sistema di sounding utilizzato;
- $R_0(\lambda)$ rappresenta il coefficiente di riflessione;
- h è l'altezza dal suolo dello strumento ed assume un valore costante;
- r è la distanza tra Tx e Rx;
- H_0 e H_1 sono le trasformate di Hankel di ordine zero e di ordine 1;

In generale il modello utilizzato dipende da un certo numero di parametri che influenzano il valore della conducibilità apparente, in particolare l'orientazione dello strumento, la sua altezza dal suolo, dalla distanza tra le bobine e la frequenza del segnale.

Il secondo approccio utilizzato per l'inversione dei dati è stato effettuato con il software IX1D v3 fornito dalla Interpex, che al contrario del metodo precedente, basa il processo di inversione su una regolarizzazione alla *Tikhonov*, anche nota come *Ridge Regression*, dove si procede minimizzando la variazione del modello, inoltre è possibile procedere con un'inversione di tipo "smooth" alla *Occam* attraverso la quale il best fit dei dati avverrà andando a minimizzare la rugosità del modello.

La regolarizzazione di *Tikhonov*, che comprende come caso particolare *l'inversione di Occam*, è un algoritmo estremamente robusto, la cui efficienza si materializza in particolare nell'inversione di dati tomografici. In questi casi infatti, si ottiene una ragionevole stima della distribuzione della proprietà fisica cercata, o del parametro "smooth" nella versione Occam, anche partendo da un modello iniziale ad informazione minima, quale un semispazio omogeneo e isotropo a cui si deve attribuire solo un ragionevole valore di partenza della proprietà di interesse. Questo algoritmo a differenza del metodo della regressione non lineare di Gauss-Newton non necessita di un modello iniziale, quindi la soluzione finale dipende unicamente dalla struttura dei dati sperimentali. Questa proprietà va a rispondere all'obiezione principale che può essere fatta al metodo di Gauss-Newton.

Inoltre, in fase di elaborazione dei dati tramite il software della Interpex è possibile visualizzare i possibili *modelli equivalenti*, cioè coerenti con il dato sperimentale, come si può vedere da fig. 20, sono molto diversi tra loro, proprio perché il processo di inversione dei dati per quanto riguarda le tecniche elettromagnetiche è più complesso rispetto ad altri utilizzati nelle altre tecniche geofisiche, ad esempio in tomografia elettrica o in sismica, principalmente perché la matematica e la fisica alla base del funzionamento sono più complesse. In fig. 18 è riportata l'inversione dei dati di soundign del GEM-2, effettuata tramite l'inversione alla Occam definendo un modello omogeneo isotropo di partenza con resistività di 2 Ohm*m, il sounding è relativo alla posizione di uno dei carotaggi collezionati nell'area di studio, descritti nei capitoli successivi. Mentre in fig.19 è presentato il modello diretto.

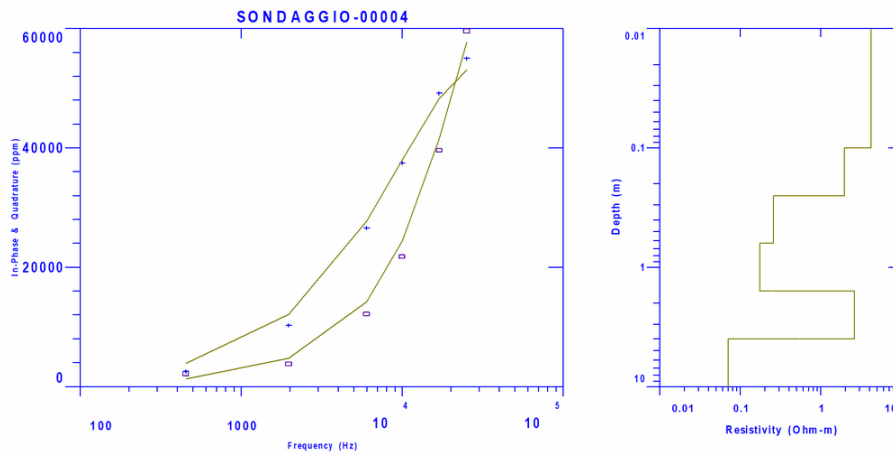


Figura 18: Inversione alla Occam delle componenti di Quadratura e In-Fase registrate dal segnale multifrequenza utilizzato dal GEM-2 durante l'acquisizione dei dati, definendo un valore di partenza di 2 Ohm*m

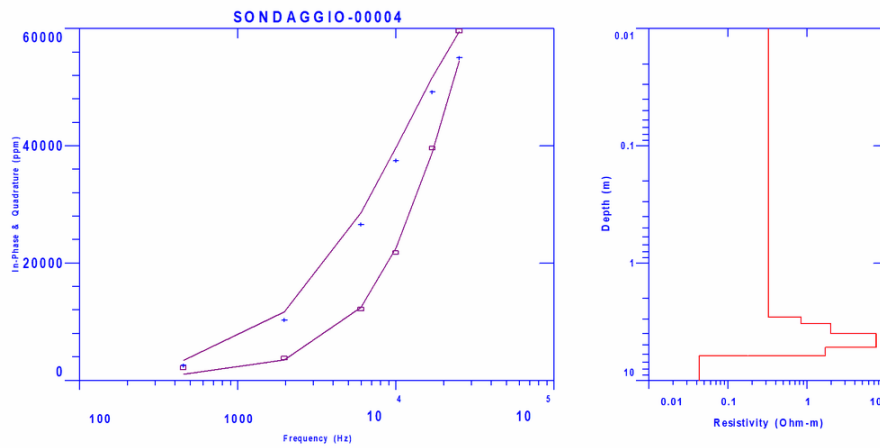


Figura 19: Modello diretto ricavato dal fitting manuale dei dati tramite il software IX1D v3

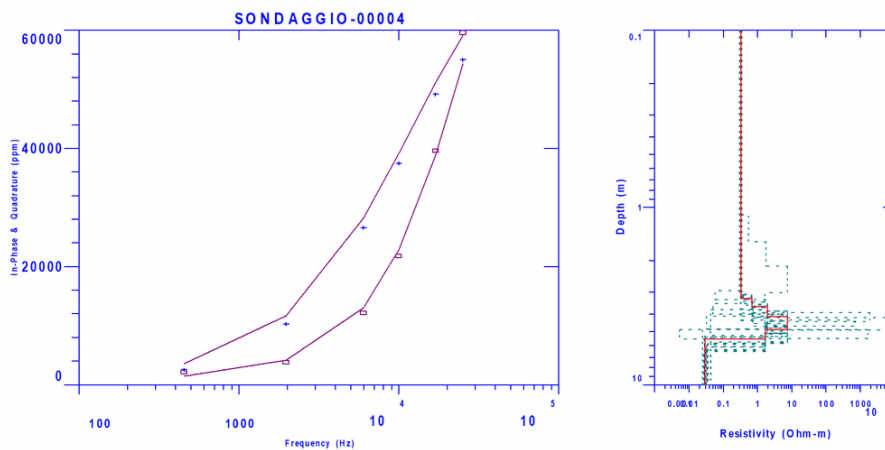


Figura 20: Modelli equivalenti al modello diretto ricavato dal fitting manuale dei dati

5.2.2 SURFER

Surfer è un programma distribuito dalla Golden Software, ed è stato utilizzato principalmente per la realizzazione di mappe di anomalia di conducibilità elettrica, relative ai dati collezionati con il GEM-2 su tutta l'area in esame. È stata inoltre realizzata una mappa di anomalia riportata in fig. 21 per 3 delle frequenze associate al segnale elettromagnetico utilizzato in fase di acquisizione. I dati nelle mappe sono espressi in $ppm = 10^6 \times \frac{\text{secondary magnetic field at receiver coil}}{\text{primary magnetic field at receiver coil}}$ e ciascuna mappa rappresenta un'immagine della variabilità delle proprietà elettriche ad una differente profondità.

Questa visualizzazione è stata presentata per far vedere come anche il dato grezzo ottenuto dallo strumento, possa fornire un'informazione qualitativa delle caratteristiche del sottosuolo, in maniera particolarmente evidente qualora i corpi sepolti siano di natura metallica. Tuttavia, ai fini di un'analisi più dettagliata e quantitativa il procedimento di inversione, per quanto discusso, risulta fondamentale.

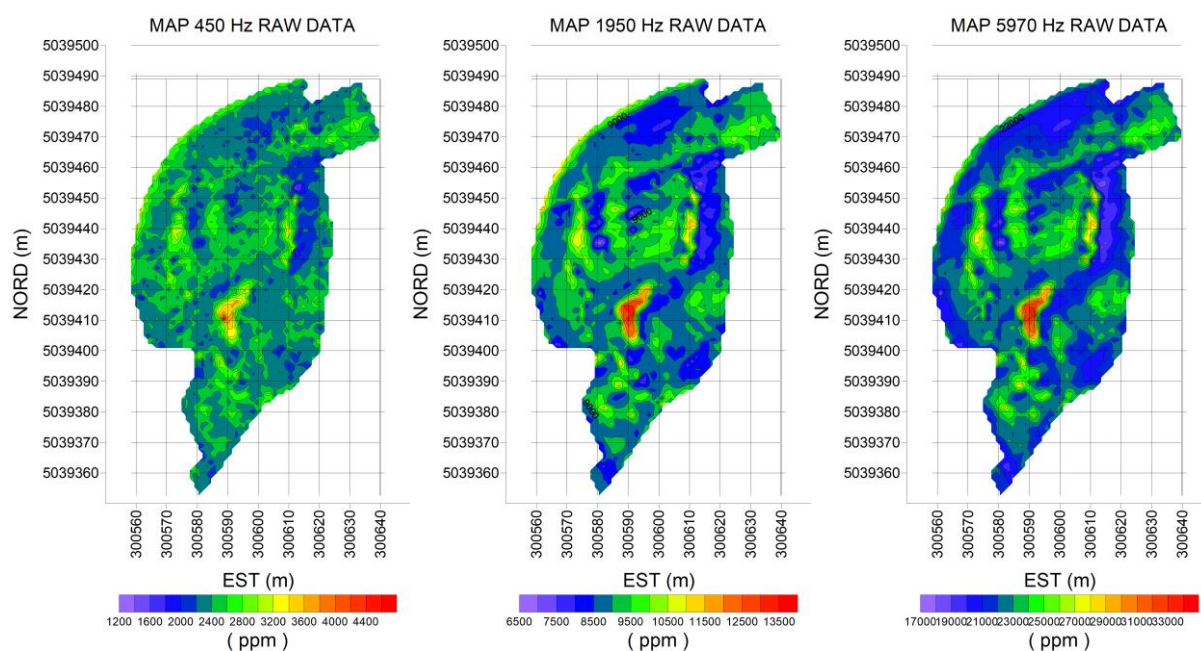
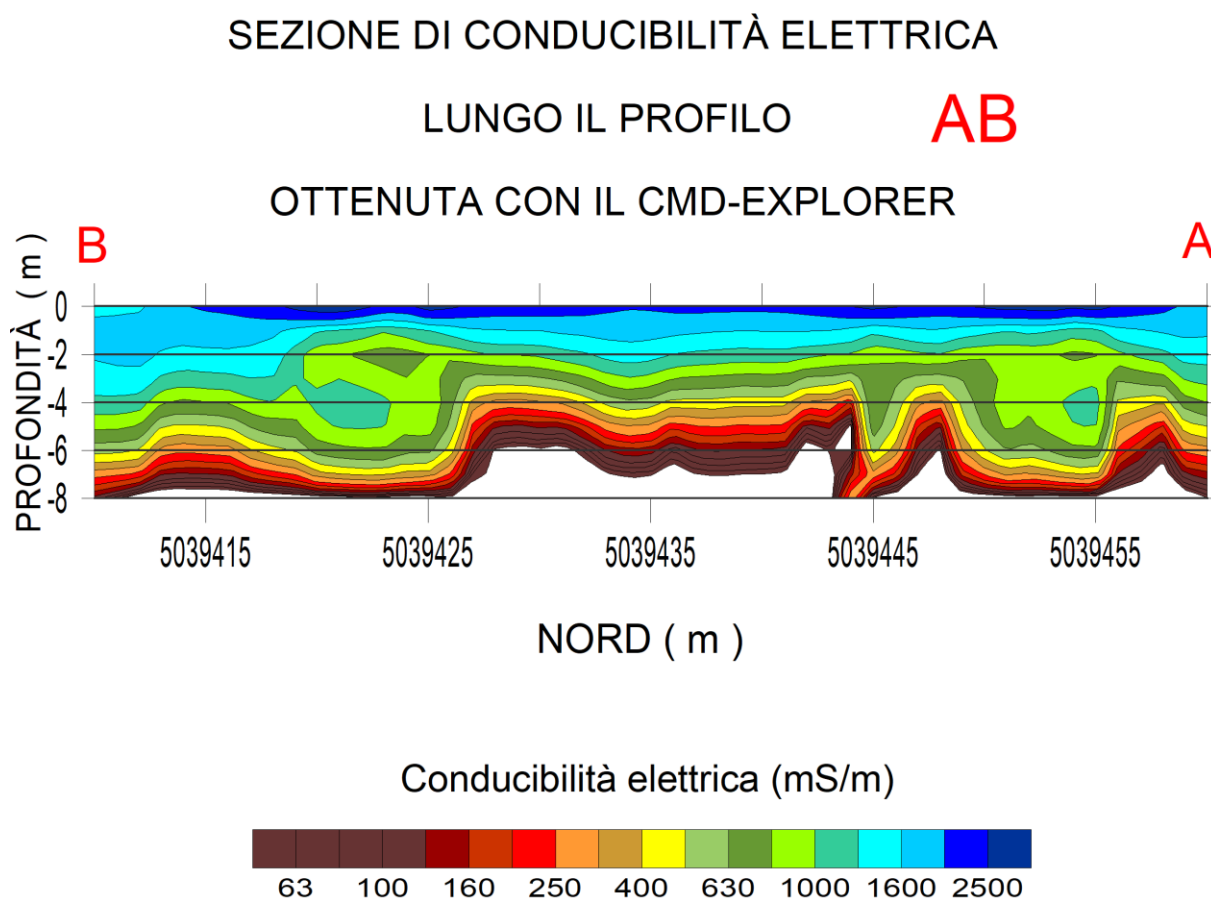


Figura 21: Mappe dei valori ppm relative alle frequenze di 450 - 1950 - 5970 Hz

Sempre con *Surfer* è stata effettuata l'elaborazione della sezione del profilo *AB* (fig. 14) acquisito con il CMD-Explorer e riportata in fig.22. I valori rappresentati attraverso una scala cromatica sono valori di conducibilità elettrica espressi in mS/m. Inoltre, sempre in fig.23 è riportata la sezione orientata congruamente al profilo *AB* ricavata dai dati acquisiti con il GEM-2 per effettuare il confronto.

Come si osserva dalle due sezioni la risoluzione del dato è differente, in particolare il GEM-2 sembra essere molto sensibile alla forte presenza di acqua salmastra nel sistema, identificando una variazione di conducibilità solamente oltre la profondità di 3.5-4.0 m. Al contrario il CMD-Explorer sembra subire meno l'effetto del sistema e identifica bene una regione a maggiore resistività che si sviluppa fino alla base della sezione.



*Figura 22: Sezione di conducibilità del profilo *AB* ottenuta con CDM-Explorer*

SEZIONE DI CONDUCIBILITÀ ELETTRICA

COINCIDENTE CON IL PROFILO **AB**

RICAVATA DAI DATI DEL GEM-2

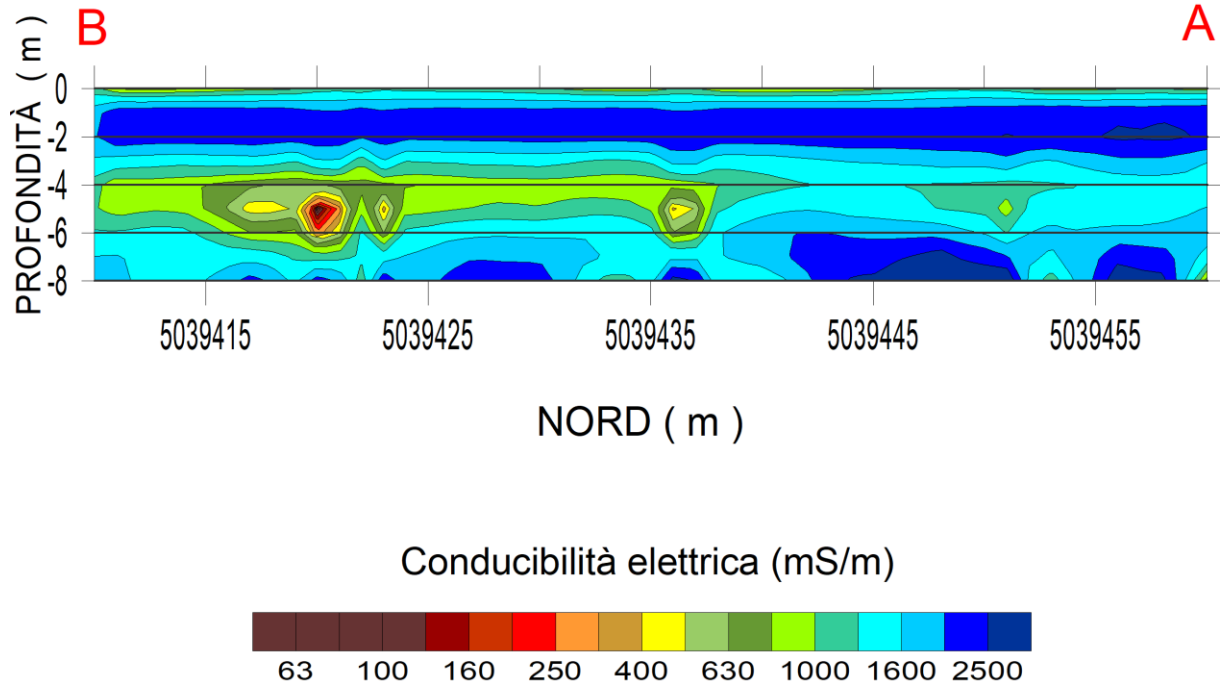


Figura 23: Sezione di conducibilità del profilo AB ottenuta con il GEM-2

Le elaborazioni dei dati effettuate con Surfer, in forma di Mappe di conducibilità elettrica a differenti profondità, e di sezioni orientate lungo le principali progressive geografiche dell'area di studio, sono riportate nelle tavole presenti in appendice come indicato nella seguente tab. 16.

APPENDICE	TAVOLA 1	<i>Ubicazione dell'area</i>
	TAVOLA 2	<i>Visione prospettica delle mappe di conducibilità a differente profondità</i>
	TAVOLA 3	<i>Sezioni di conducibilità N-S allineate da Ovest a Est</i>
	TAVOLA 4	<i>Sezioni di conducibilità E-W allineate da Sud a Nord</i>

Tabella 16: Tabella riassuntiva delle tavole inerenti alle elaborazioni dei dati elettromagnetici effettuate con Surfer

5.2.3 VOXLER

Voxler è un altro programma distribuito dalla Golden Software, è stato utilizzato per l'analisi dei dati in ambiente 3D. Il programma fornisce una discreta libertà di elaborazione del dato, è infatti possibile interagire con il volume ottenuto dall'interpolazione dei dati, in modo da ricavare sezioni orientate a piacimento nello spazio 3D.

In funzione di tale possibilità, si è provveduto ad individuare le sezioni orientate congruamente a quelle presentate nel lavoro di (Ghinassi et al., 2018) limitrofe al meandro in esame, riportate in fig. 24 a sinistra. Come accennato nel **cap. 4** solo la GT6 e la GT9 sono presentate nel lavoro in relazione ai dati elettromagnetici.

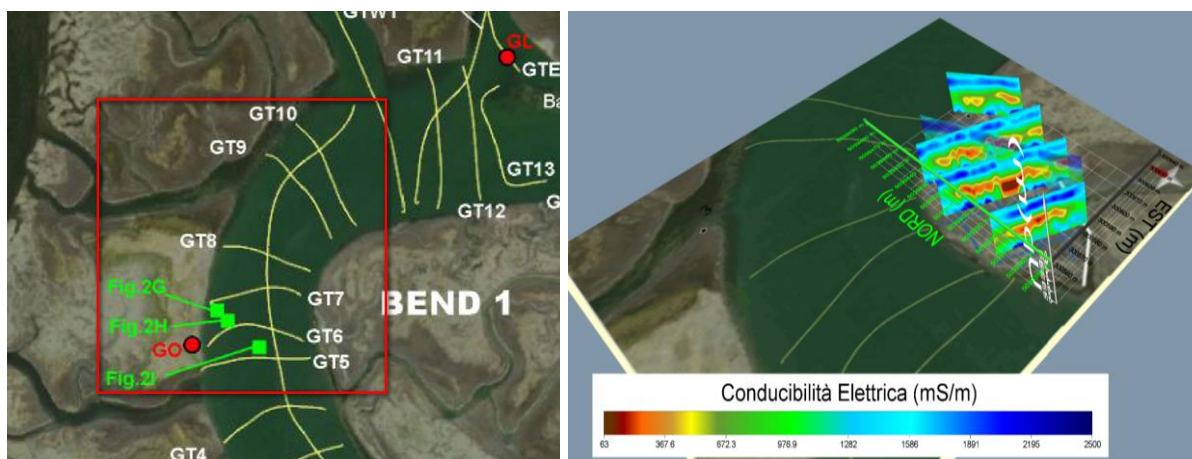


Figura 24: a sinistra) Sezioni sismiche (Ghinassi et al., 2018) di cui si è prodotto il corrispettivo elettromagnetico su Voxler. Nell'immagine a destra) vista panoramica delle sezioni elettromagnetiche orientate congruamente alle sezioni sismiche

L'elaborazione dei dati eseguita con Voxler si è concentrata principalmente sull'analisi della struttura geometrica del deposito di meandro, individuabile attraverso il dato elettromagnetico. In particolare, si è cercato di identificare variazioni in spessore della porzione di materiale più resistivo corrispondente alla porzione di deposito caratterizzato

da una maggiore granulometria, in associazione all'evoluzione temporale del corso d'acqua.

In fig. 24 (a destra) è riportata la visualizzazione delle sezioni di volume coerenti alle sezioni sismiche esplorate all'interno del canale ed introdotte nel **cap. 4**.

Con Voxler è inoltre possibile effettuare una visualizzazione del dato tramite superfici iso-valore. Questa visualizzazione è interessante poiché permette di avere un'idea geometrica della distribuzione areale di una porzione di interesse del dato, ad esempio nelle fig. 25-26 sono riportate le distribuzioni del valore corrispondete alla porzione più resistiva evidente dalle precedenti sezioni mostrate nel **cap. 5.2.2** in fig. 22-23, consentendone la visualizzazione dello sviluppo su tutta l'area di studio.

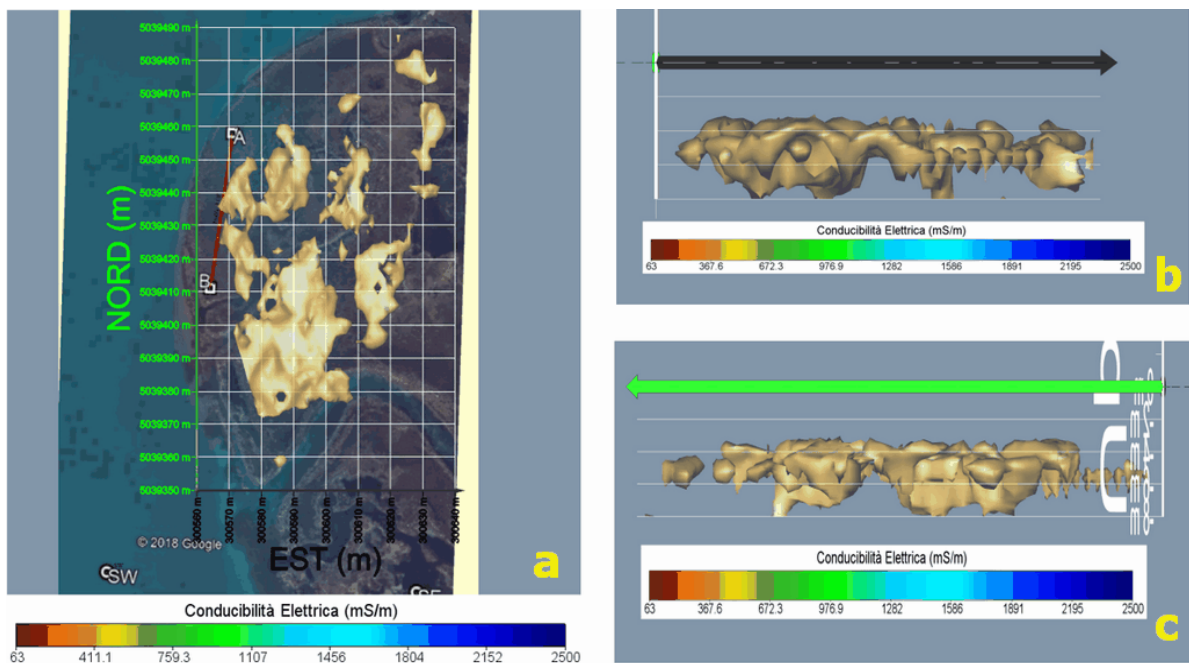


Figura 25: Sintesi di visualizzazione della superficie isovalore corrispondente a 400 mS/m. a) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Est. b) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Est – Profondità. c) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Profondità

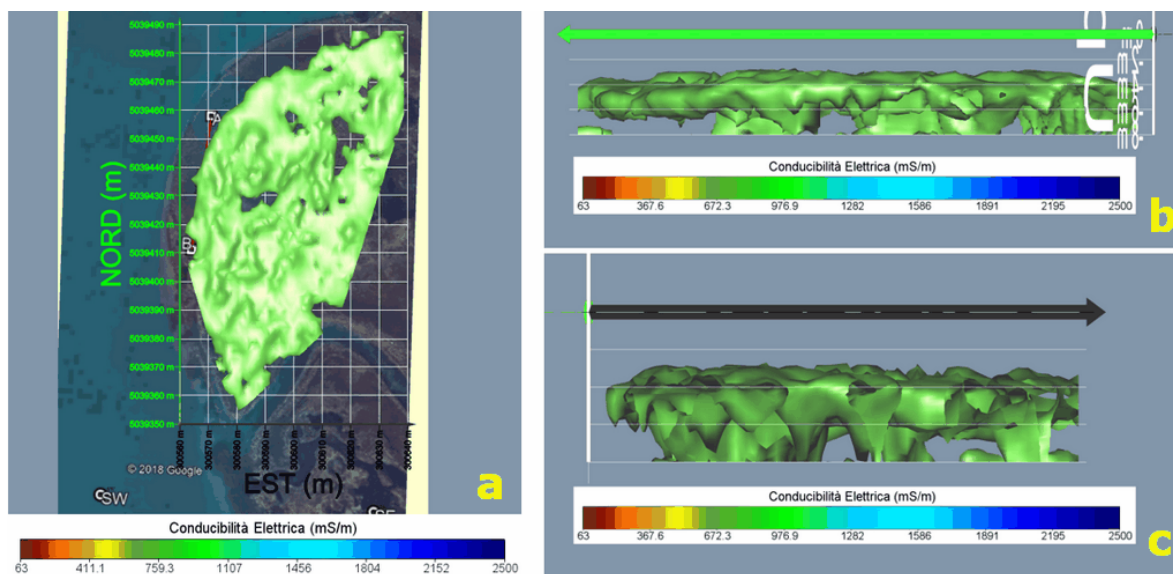


Figura 26: Sintesi di visualizzazione della superficie isovalore corrispondente a 750 mS/m. a) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Est. b) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Nord – Profondità. c) Visualizzazione dello sviluppo della superficie sul piano Est – Profondità

Tuttavia, per l'interpretazione di dettaglio delle sezioni di interesse, si è preferito utilizzare surfer, poiché restituisce immagini delle elaborazioni, più dettagliate e gestibili per tale obiettivo.

6. Carotaggi e loro interpretazione

Successivamente alla fase di acquisizione dei dati, sono stati realizzati cinque carotaggi orientati in direzione WSW – ENE la cui posizione è riportata in fig. 28, mentre le profondità di ciascun sondaggio sono riportate in tab. 17.

I carotaggi sono stati effettuati usando una sonda Eijkelkamp, costituita da campionatore da 30 mm di diametro ed aste da 1.0 m. I campioni prelevati sono stati posizionati in fase di campionamento, all'interno di canalette in PVC di 1 m di lunghezza e successivamente rivestite con cellophan per mantenerne le condizioni di umidità. Questo procedimento è stato effettuato principalmente per evitare l'essiccamento delle carote prima di poterle analizzare.

Successivamente, le carote sedimentarie sono state tagliate longitudinalmente e fotografate (fig. 27), è stata poi effettuata la loro caratterizzazione sedimentologica e loro interpretazione presentata in fig. 29.



Figura 27: Esempio di come si presenta il carotaggio nella fase finale di preparazione per la fase di riconoscimento dei depositi, in foto il sondaggio "1"

SONDAGGIO	PROFONDITÀ
1	4.63 m
B1	3.50 m
B2	3.75 m
B3	3.00 m
B4	3.00 m

Tabella 17: Profondità di campionamento dei carotaggi eseguiti nell'area di studio



Figura 28: Posizione dei carotaggi effettuati nell'area di studio

Come si osserva dalla tab. 17 ad eccezione del sondaggio n° 1 in cui siamo riusciti a ricavare una carota di 4.63 metri, la profondità di campionamento è all'incirca sui 3.50 metri.

Dalle analisi effettuate sulle sezioni ricavate dalle carote sedimentarie, risulta una tendenza generale di tipo *fining upwards* della granulometria osservata, riscontrabile in tutti e 5 i campioni, di cui brevemente verranno descritte le caratteristiche principali osservate nei singoli campioni:

- a) Il *primo campione* è indicato con il numero **I**. Questo campione è localizzato a pochi metri di distanza dal **B1** e presenta l'informazione diretta più profonda raggiunta dai sondaggi. Quello che si osserva nei primi 0.90 m di campione è costituito da sedimenti fini prevalentemente siltosi-fangosi i quali risultano ossidati e ricchi in materiale vegetale, sono stati associati a depositi di ambiente intertidale del contesto lagunare. La permanenza per lunghi periodi in condizioni subaeree di questo tipo di sedimenti ne spiega l'ossidazione che si osserva. Tra 0.90 m e 2.70 m si osserva una maggiore prevalenza di sedimento siltoso intercalato a livelli millimetrici di materiale sabbioso presumibilmente associabile ad eventi di tempesta, durante i quali le barene sono sommerse e le onde sono in grado di interagire con il sistema. Nella porzione di campione compresa tra 2.70 m e 4.63 m si osserva una prevalenza di sedimento a granulometria maggiore rispetto alla colonna sovrastante, con intercalazioni di fango. Questo sedimento è stato identificato come sabbia con granulometria variabile da fine a media, associato ad un deposito sabbioso.

- b) Il *secondo campione* è indicato con la sigla **B1**. Questo campione è localizzato a pochi metri di distanza da **I**. Quello che si osserva nei primi 0.28 m di campione è un deposito fangoso ossidato associato a depositi di ambiente intertidale del contesto lagunare. Successivamente nella porzione tra 0.28 m e 1.28 m si osserva una deposizione importante di sedimenti sabbiosi con granulometria prevalentemente fine, questo sedimento stona un po' con quanto si osserva dal campionamento effettuato in **I**, probabilmente in questa zona è osservabile una

porzione dei depositi associati al corpo di barra presente nel canale. Tra 1.28 m e 3.0 m si osserva nuovamente un'alternanza di livelli siltoso-fangosi e livelli di silt con intercalazioni di livelli millimetrici sabbiosi presumibilmente associabili ad eventi di tempesta. Infine, nella porzione finale tra 3.0 m e 3.50 m si osservano nuovamente depositi sabbiosi con granulometria da fine a media associabili al deposito sabbioso identificato nel campione **I**.

- c) Il *terzo campione* è indicato con la sigla **B2**, ed è localizzato a circa 18 metri da **B1** e **I**. Quello che si osserva nei primi 1.12 m di campione sono i sedimenti associati a depositi di ambiente intertidale del contesto lagunare, quindi sedimenti fini siltosi-fangosi. Tra 1.12 m e 2.38 m si osservano intercalazioni di livelli siltosi e livelli centimetrici di sabbia, sempre associabili ad eventi di tempesta. Infine, tra 2.38 m e 3.75 m si osserva un progressivo incremento della granulometria che risulta dominata dai sedimenti di sabbia fine, con il raggiungimento nella porzione finale di una sabbia fine/media.
- d) Il *quarto campione* è indicato con la sigla **B3**, ed è localizzato a circa 25 metri dal **B2**. Quello che si osserva nei primi 1.0 m di campione sono depositi fini siltoso-fangosi ossidati associati a depositi di ambiente intertidale del contesto lagunare, tra 1.0 m e 1.57 m si osserva l'apparizione di un contesto sabbioso con intercalazioni siltose, sempre associabili ad eventi di tempesta. Tra 1.57 m e 3.0 m si va a caratterizzare la porzione finale del campione, con depositi di sabbia da fine a media che segnano l'entrata nel dominio sabbioso.
- e) Il *quinto campione* è indicato con la sigla **B4**, ed è localizzato a circa 14 metri dal **B3**. Quello che si osserva nei primi 0.65 m di campione sono sedimenti fini associati a depositi di ambiente intertidale del contesto lagunare, quindi mud e silt, mentre tra 0.65 m e 1.0 m si osserva un deposito caratterizzato da prevalenza sabbiosa con presenza di silt nel sistema. Nella porzione restante, tra 1.0 m e 3.0 m, si osserva una dominanza di sedimenti sabbiosi che vanno a concludere il campione con una sabbia media.

Quanto descritto è riportato in fig. 29 dove sono identificate le superfici che vanno a distinguere i vari domini sedimentologici identificati tramite l'analisi delle carote.

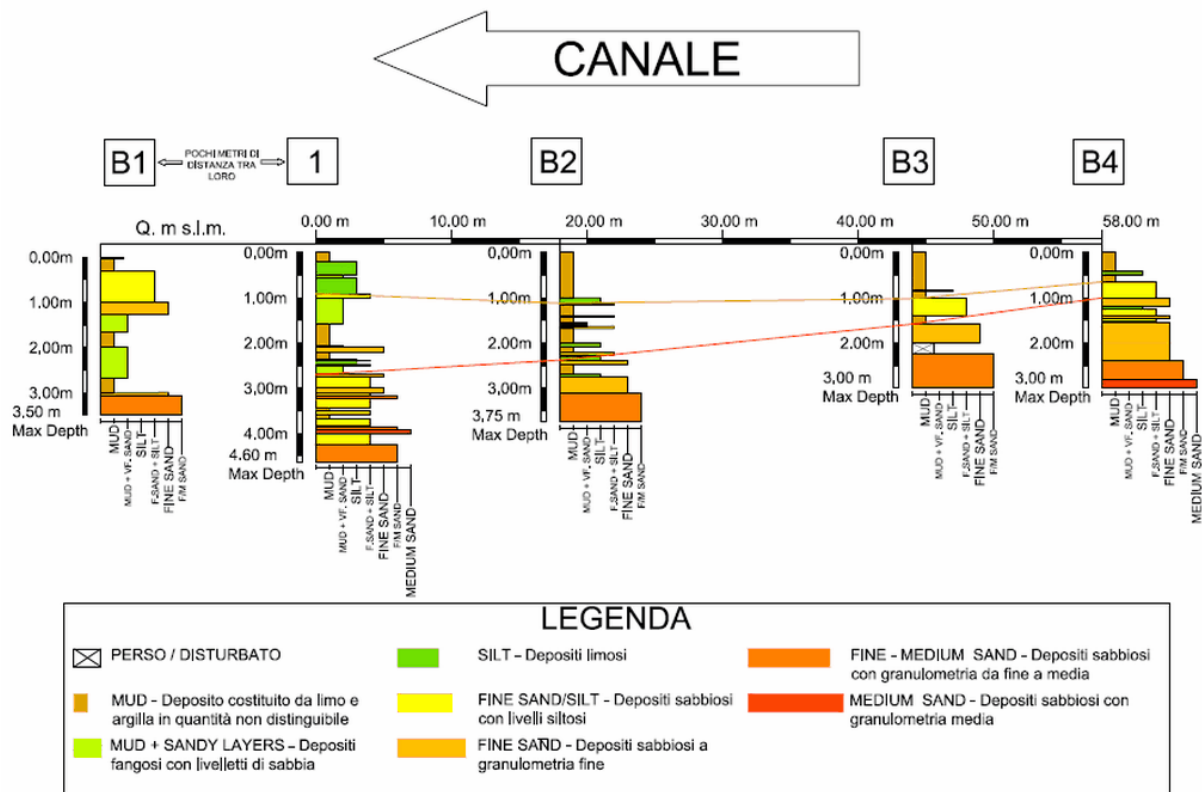


Figura 29: Log stratigrafici ottenuti dall'analisi delle carote prese nell'area di studio

7. Interpretazione dei dati e considerazioni sui risultati

Dalle indagini elettromagnetiche svolte e le informazioni sedimentologiche ottenute dalle carote, è stato possibile trarre alcune considerazioni.

Le due superfici granulometriche, identificate tramite l'analisi delle carote sedimentarie ed i rispettivi log stratigrafici, sono state riportate sopra la sezione di conducibilità elettrica orientata lungo il profilo che unisce i sondaggi presentata in fig. 30.

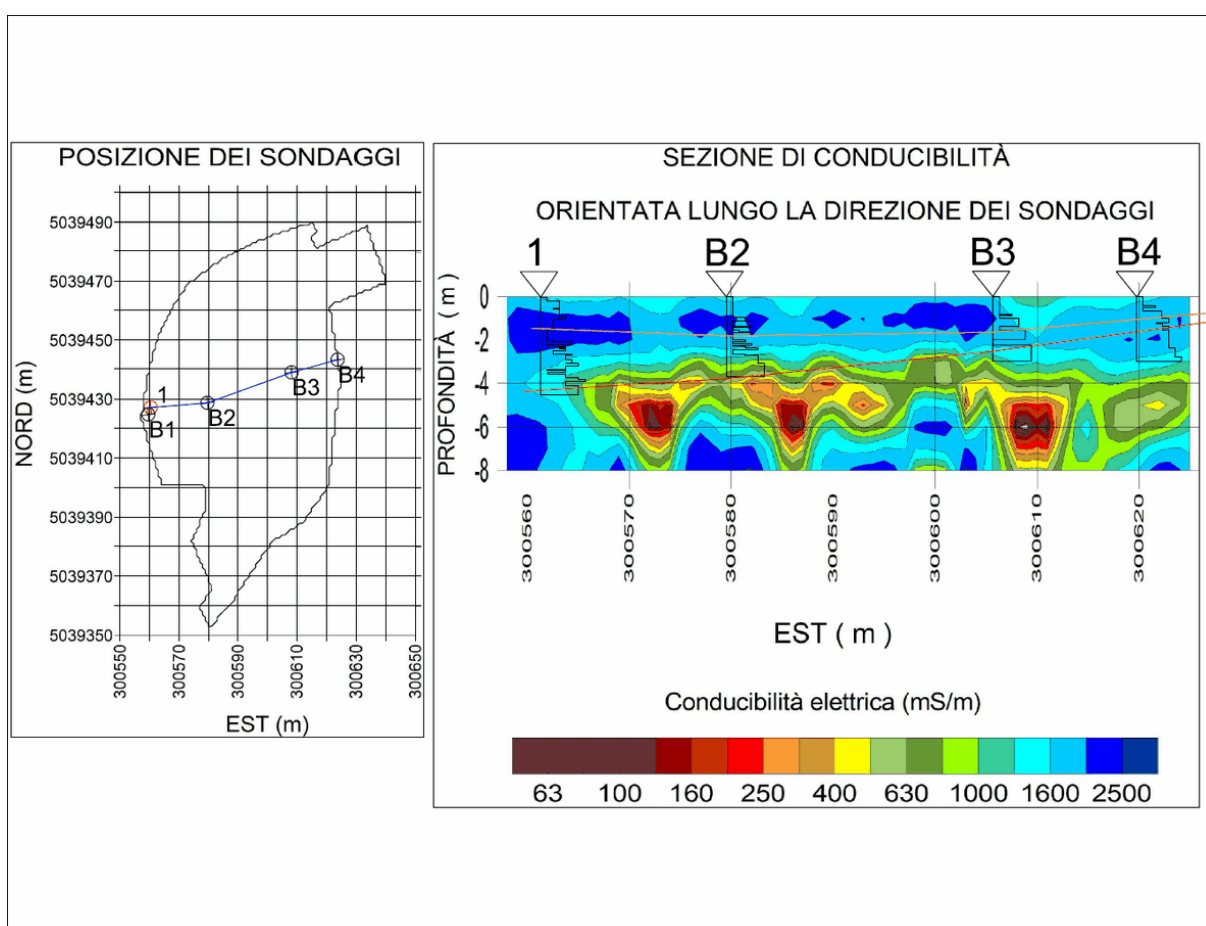


Figura 30: Sezione di conducibilità elettrica orientata secondo il profilo che congiunge i punti dei sondaggi

Integrando le informazioni ricavate dall'interpretazione dei carotaggi sono state distinti i settori sedimentari principali, caratterizzati da valori differenti conducibilità elettrica, tale differenza è stata associata alla variazione di sedimento che caratterizza il deposito.

Come si osserva i valori di conducibilità ricavati dall'inversione sono particolarmente elevati, e idealmente non coerenti con valori di conducibilità elettrica standard di un determinato materiale, ad esempio quello che può essere attribuito ad una sabbia asciutta, si deve tener conto dell'ambiente nel quale ci troviamo.

L'ambiente lagunare che caratterizza l'area di studio è saturo di acqua salmastra, la cui conducibilità elettrica è generalmente elevata, rendendo questo tipo di indagine abbastanza complessa nel sito in esame, tuttavia essendo una costante nel sistema, è ragionevole ritenere che le variazioni di conducibilità elettrica osservate nei modelli ottenuti dall'inversione siano funzione della variazione litologica. (Boaga et al., 2018)

In funzione di tale precisazione, l'attenzione è stata focalizzata principalmente sul contrasto di conducibilità elettrica osservabile nella sezione, il deposito è stato suddiviso in 3 layers principali che identificano i principali domini di conducibilità elettrica del sistema:

- 1) Il 1° layer è stato associato ad una zona superficiale ad elevata conduttiva, che interessa i primi 2.0-2.5 m di deposito. Questa porzione è stata identificata come l'unione di un primo metro di deposito di salt marsh e la porzione restante come materiale limoso con intercalazioni di livelli centimetrici di sabbia, riscontrati dalle carote sedimentologiche.
- 2) Il 2° layer è localizzato tra le due porzioni di materiale conduttivo, dove si riconoscono valori a minore conducibilità elettrica, dove quindi si identifica un blocco di materiale più resistivo dallo spessore compreso tra i 3.50-4.50 m. Dal punto di vista stratigrafico questa porzione resistiva, è stata associata alla presenza di materiale a granulometria maggiore, identificabile tramite i sondaggi come un deposito sabbioso. È ragionevole ritenere che questa porzione più resistiva rispetto al materiale fine al contorno, possa rappresentare il deposito di pointbar associata

al meandro oppure un deposito sabbioso dovuto a processi precedenti quelli che caratterizzano attualmente l'area. Informazioni dirette di questo corpo non sono state rinvenute dai sondaggi a causa della eccessiva resistenza del materiale alla penetrazione tramite sonda manuale. Tuttavia, i dati stratigrafici presentano tutti sabbia con granulometria da fine a media alla loro base, identificando il tetto del corpo resistivo delle sezioni di conducibilità, quindi del deposito sabbioso.

- 3) Il 3° layer è stato associato ad un'ulteriore zona conduttiva, riconoscibile alla base della sezione, che si sviluppa mediamente tra i 5.5-6.0 e gli 8.0 metri di profondità. Tale porzione è associabile nuovamente ad un dominio ad elevata conduttività associabile ad un deposito fine di origine lagunare, rappresenta la base su cui si è depositato il corpo di sabbia identificato nel secondo layer.

Nelle fig. 31-32 sono riportati i layers descritti e le superfici che li delimitano.

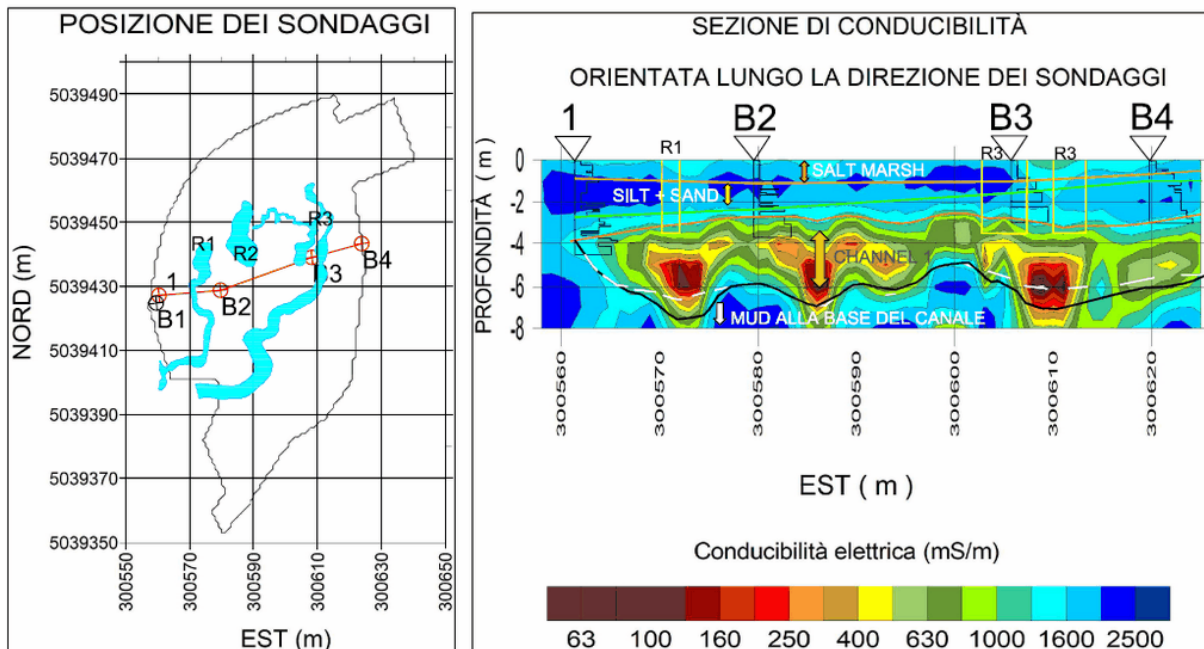


Figura 31: Corpi sedimentari riconosciuti nella sezione di conducibilità elettrica

Le superfici riportate in fig. 31 sono descritte nella legenda di fig. 32.

La differenza nei colori utilizzati per la rappresentazione delle medesime superfici nelle due immagini, è dovuta alla differente capacità di visualizzazione nella sezione elettromagnetica, con relativa scala di colori, rispetto al foglio bianco di disegno.

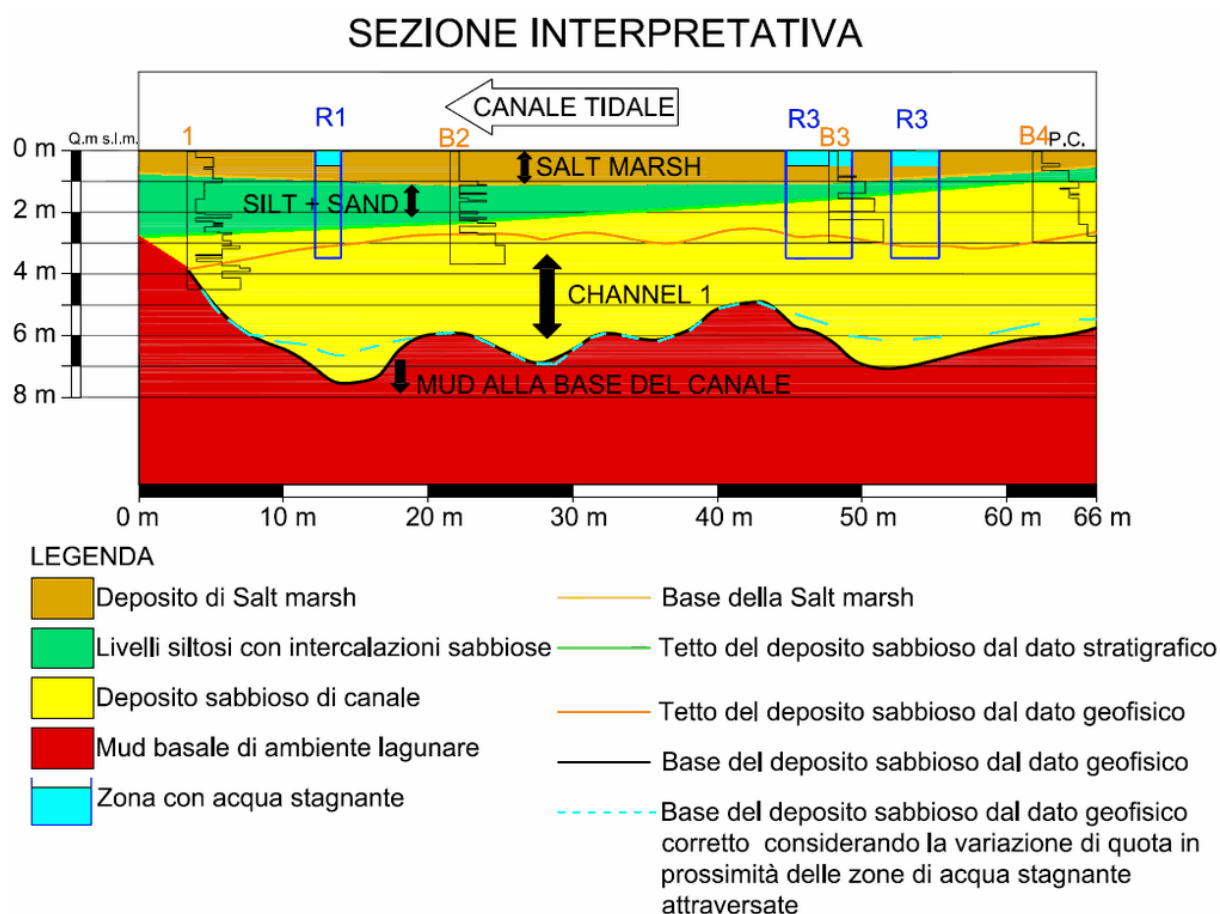


Figura 32: Sezione interpretativa ottenuta dalle informazioni geofisiche e stratigrafiche

Come accennato nel **cap. 5** relativo all'acquisizione dei dati, durante la fase di campionamento è stato necessario attraversare le aree con acqua stagnante presenti nell'area della barena. L'attraversamento di queste zone ha determinato lo sprofondamento dell'operatore e della strumentazione all'interno dei depositi poco compatti della salt marsh per circa 1.0 m.

In funzione di ciò, il livello di acquisizione dello strumento, generalmente mantenuto all'altezza del fianco ~ 120 cm variava la posizione di acquisizione rispetto al piano campagna.

In fase di inversione del dato viene fornita una altezza costante d'acquisizione, quindi per cercare di controllare questa variazione locale del parametro h , in fase di interpretazione è stata riportata la posizione delle aree con acqua stagnante attraversate **R1** e **R3** incrociate dal profilo, si è quindi corretta la quota della base della superficie in prossimità dello specchio d'acqua. Nel complesso questa mancanza non sembra influenzare particolarmente il dato, in quanto l'obbiettivo principale con il quale la tecnica è stata applicata è quello di riconoscere una macro-geometria del presunto deposito sabbioso e distinguerlo dai differenti depositi lagunari.

Considerando quanto descritto da (Ghinassi et al., 2018) riguardo le geometrie deposizionali dei corpi sedimentari riconosciuti tramite le sezioni sismiche all'interno del canale, e di quanto precedentemente descritto nel **cap. 4** inerente l'area di studio, è possibile fare alcune considerazioni sulle sezioni di fig. 31-32, in particolare sono state avanzate due ipotesi:

- 1) La prima ipotesi prende in considerazione il dominio resistivo osservabile dalla sezione orientata lungo i sondaggi in fig. 31, associando tale deposito ad un corpo di point bar tidale associato al meandro, coerente con quanto si osserva dalla sismica.
- 2) La seconda ipotesi considera la non correlazione tra la regione resistiva osservata nel dato elettromagnetico e il deposito di point bar associato al meandro riconoscibile delle sezioni sismiche.

Entrambe le ipotesi sono ragionevoli e coerenti con quanto osservato dall'analisi delle carote sedimentarie.

7.1 Modelli interpretativi

Di seguito sono presentate le interpretazioni ottenute dalla correlazione del dato elettromagnetico e sismico, la porzione compresa tra i due dati è caratterizzata da assenza di informazione è stata perciò interpretata in funzione delle informazioni a disposizione e delle due ipotesi precedentemente introdotte.

In fig. 33 è presentata una schematizzazione dell'area di indagine, con riportati i profili sismici GT6 e GT9 relativi ai depositi in canale e le corrispondenti sezioni elettromagnetiche ricavate dal volume di interpolazione.

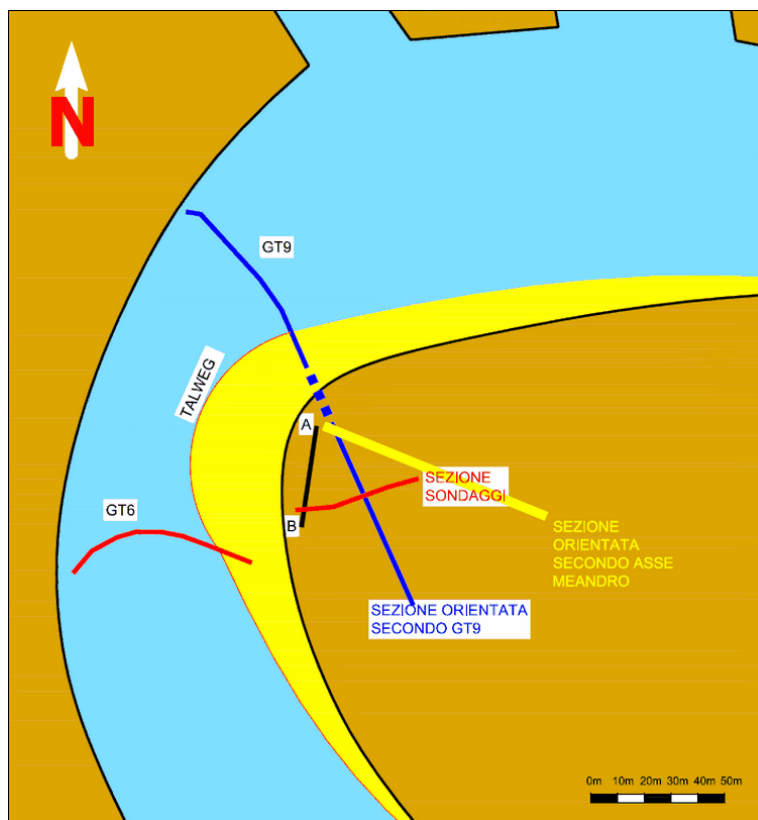


Figura 33: Schematizzazione dell'area di studio con indicati i profili relativi alle sezioni sismiche ed elettromagnetiche utilizzate per l'interpretazione dei risultati

La *prima ipotesi*, inerente al riconoscimento di un corpo di pointbar interamente generato dal meandro, relativamente al dominio a minore conducibilità, produce un'interpretazione del dato del tipo presentato in fig. 34 per quanto riguarda la sezione **rossa** e in fig. 35 per quanto riguarda la sezione **blu**.

Questa interpretazione rispecchia quanto ci aspettiamo dalla letteratura in merito ai depositi associati a meandri fluviali e tidali, ovvero un deposito tabulare di natura sabbiosa, che accresce dall'innerbank verso l'outerbank del canale man mano che il meandro si sviluppa, come rappresentato in fig. 36, durante la loro deposizione le architetture dei depositi seguono l'evoluzione del canale andando a definire delle geometrie genericamente tabulari ben sviluppate.

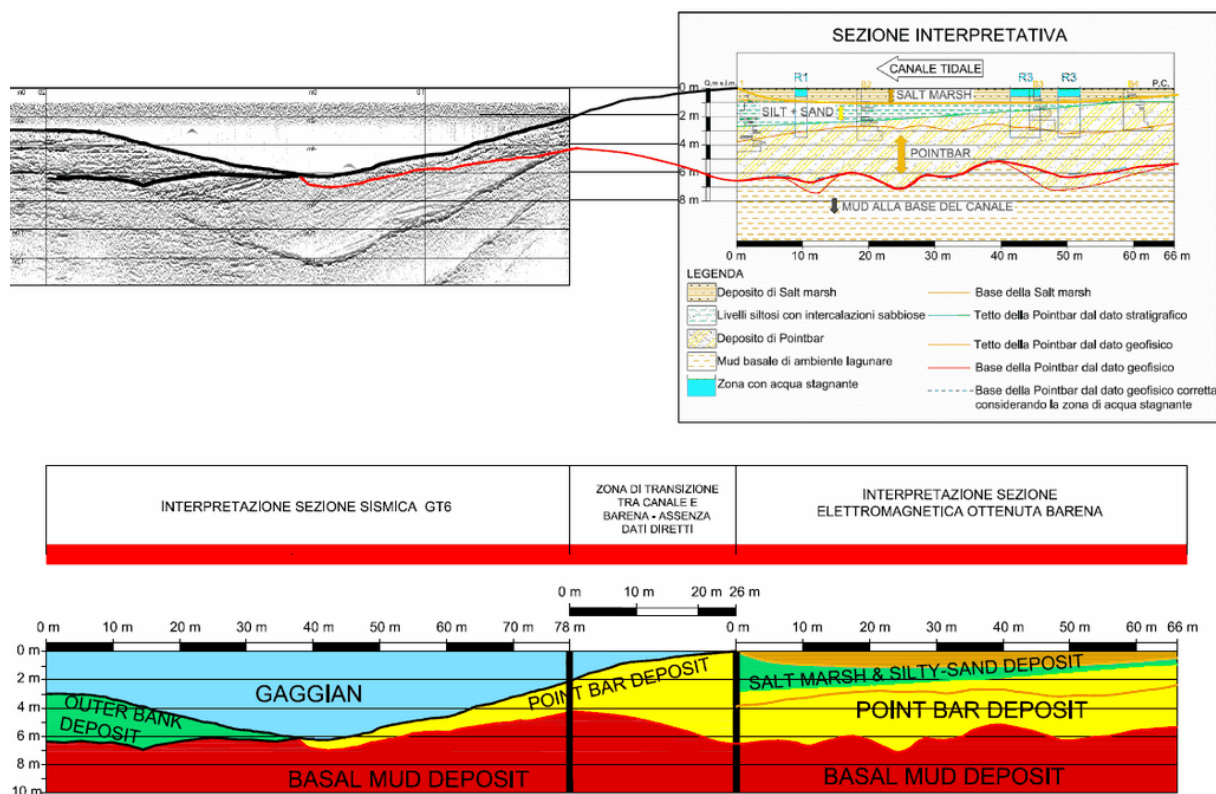


Figura 34: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT6 e quello interpretato dal dato elettromagnetico, relativamente alla prima ipotesi presentata.

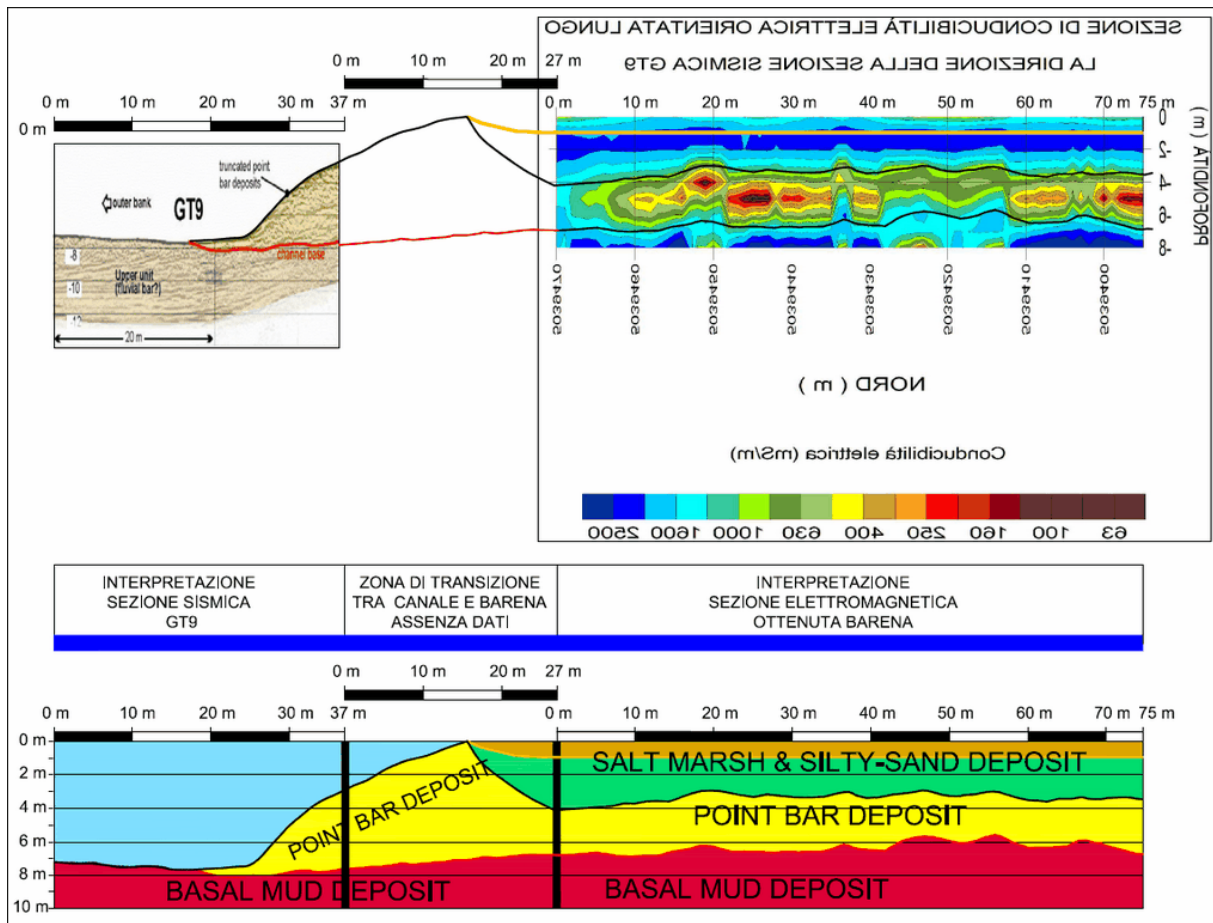


Figura 35: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT9 e quello elettromagnetico relativamente alla prima ipotesi presentata. La sezione elettromagnetica è stata specchiata per essere correttamente orientata.

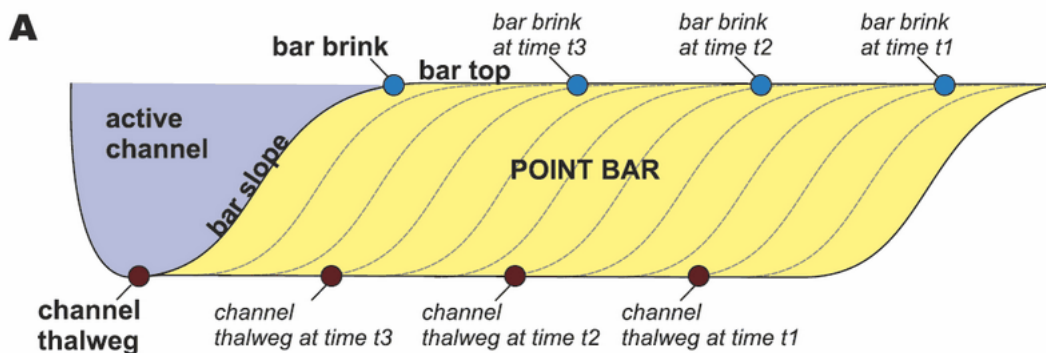


Figura 36: Modello ideale di formazione di una point bar che mostra le geometrie delle strutture nel caso in cui il ciglio della barra e il talweg migrano in maniera sincrona seguendo traiettorie parallele ed orizzontali

Tuttavia, il dato elettromagnetico relativo alla sezione **rossa**, orientata coerentemente con la direzione dei sondaggi, presenta una chiusura del dominio a minore conducibilità elettrica, all'incirca alla progressiva EST 300565 m come si osserva dalla fig. 30 descritta nel precedente capitolo.

Tale chiusura avviene circa 10 metri prima del bordo del meandro, questa informazione essendo relativa ad una porzione di dato non trascurabile, non è associabile ad un effetto di bordo dell'interpolazione dei dati. Perciò, questa ipotesi definirebbe un deposito di point bar che, per un qualche motivo, ad un certo punto della sua evoluzione ha interrotto la sua crescita durante la migrazione del canale, per poi riprendere a crescere ad una quota differente e separato da una porzione di diversi metri di materiale fine rispetto a prima.

Per quanto riguarda la *seconda ipotesi*, ovvero la non correlazione tra regione resistiva osservata nel dato elettromagnetico e il deposito di point bar associato al meandro, le interpretazioni sono riportate successivamente in fig. 37, per quanto riguarda la linea **rossa**, e fig. 38 per quanto riguarda la linea **blu**.

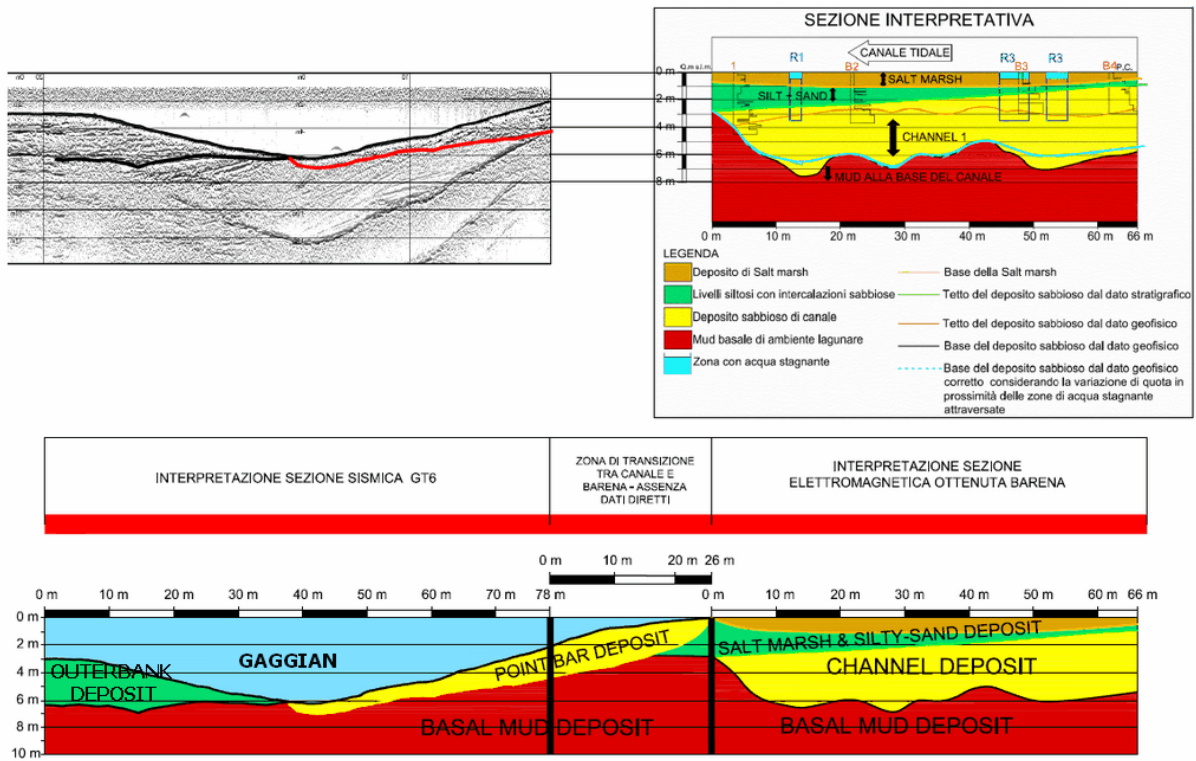


Figura 37: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT6 e quello elettromagnetico relativamente alla seconda ipotesi presentata.

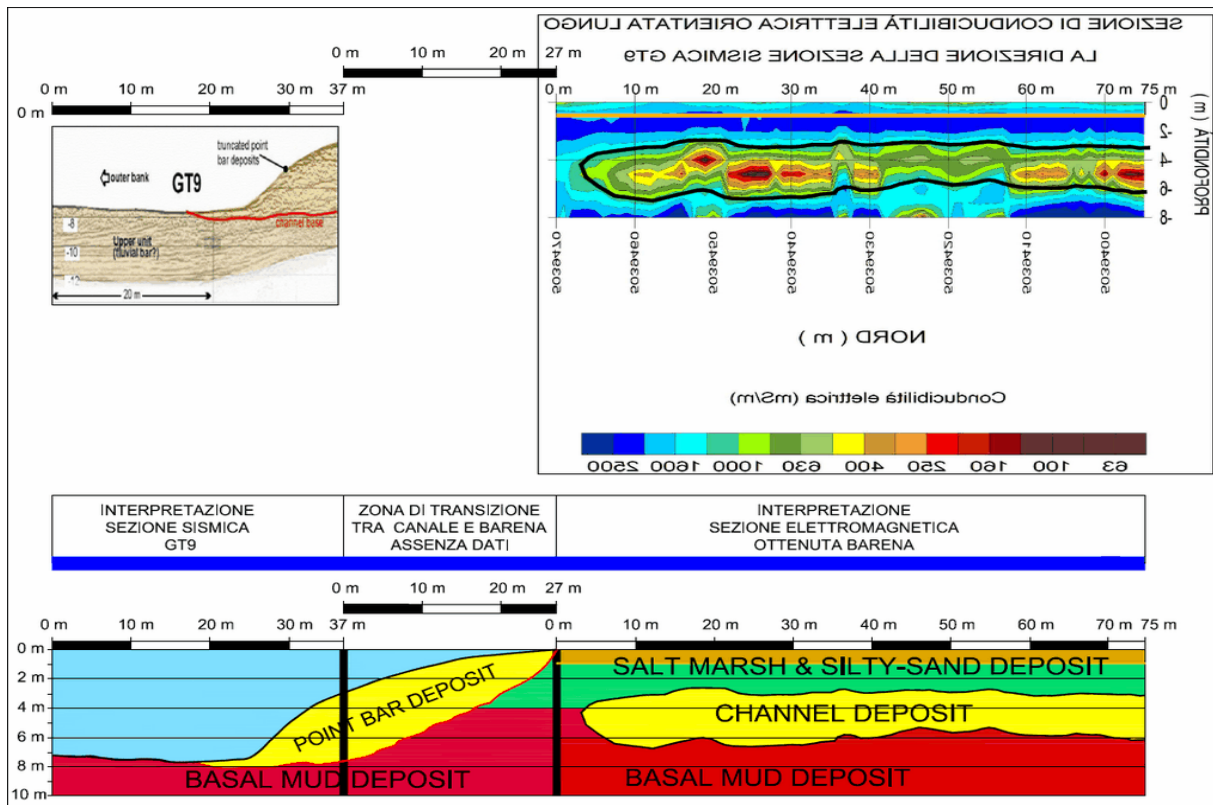


Figura 38: Interpretazione della sezione risultante dall'unione del dato sismico presente in GT9 e quello elettromagnetico relativamente alla seconda ipotesi presentata.

Questa interpretazione considera nel corpo resistivo identificato dall'indagine elettromagnetica un deposito più antico, associato a sistema di drenaggio tidale organizzato in maniera differente dalla situazione attuale. Il deposito è stato successivamente sepolto dai sedimenti fini che caratterizzano l'ambiente di laguna, definendo l'organizzazione attuale di ciò che vediamo nell'area di studio. In un momento successivo il canale tidale Gaggian si è instaurato ed ha subito un evento che ne ha caratterizzato l'evoluzione osservata e descritta nel lavoro di (Ghinassi et al., 2018) al quale è associato il deposito di point bar riconoscibile dalle indagini sismiche, coerentemente a quanto avvenuto in alveo senza però interessare la porzione più antica del meandro.

A favore di questa seconda ipotesi troviamo soprattutto il fatto che il deposito evidenziato dalle immagini geofisiche termini prima del bordo del canale, e sia fisicamente disconnesso dal deposito di barra associato al meandro.

È ragionevole in funzione delle informazioni presentate e le considerazioni raccolte ritenere che la seconda ipotesi sia la più solida. Tuttavia, l'ambiente lagunare è complesso e le geometrie che legano i depositi di canale e le tidal flats non sempre sono riassumibili in semplici schemi, come descritto nei lavori di Boaga et al., 2018; Cosma et al., 2019 comunque ai fini dell'indagine proposta è opportuno ritenere valido quanto dedotto.

Per completezza in fig. 39 è riportata la sezione elettromagnetica interpretata, orientata lungo l'asse del meandro (sezione gialla in fig. 33), dove si osserva lo sviluppo del corpo resistivo lungo la direzione assiale. Idealmente questa sezione dovrebbe fornire chiarezza tra la prima e la seconda ipotesi, ma il dominio in cui il dato elettromagnetico è stato registrato si interrompe prima del bordo del meandro, non è quindi possibile ottenere un'informazione aggiuntiva, se non la riconferma che il corpo resistivo si estende prevalentemente come un corpo tabulare localizzato ad una profondità mediamente costante all'incirca di 3.0 metri.

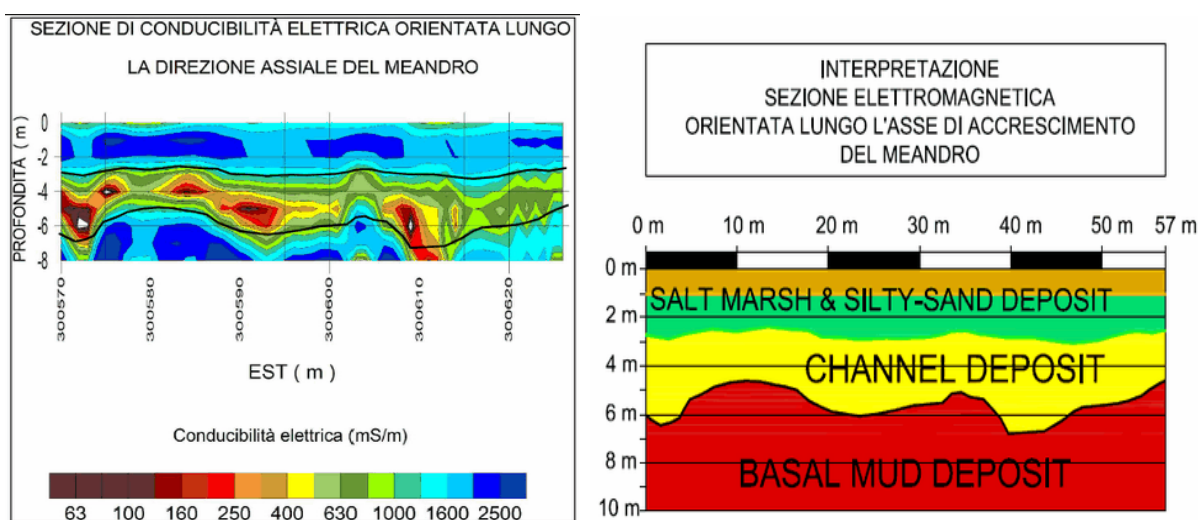


Figura 39: Sezione elettromagnetica orientata lungo l'asse del meandro e sua interpretazione in funzione delle informazioni ricavate dalle altre due sezioni.

8. Conclusioni

Dall'indagine condotta possiamo affermare che gli obiettivi preposti sono stati raggiunti, infatti, tramite la prospezione elettromagnetica è stato possibile identificare i principali domini di conducibilità elettrica che caratterizzano l'area, coerenti con ciò che si osserva dalle informazioni dirette ottenute dai dati sedimentologici. Inoltre, grazie alle elaborazioni svolte in Voxler e Surfer, è stato possibile valutarne la distribuzione spaziale nell'area in esame, e le geometrie che i depositi presentano.

Per concludere ritengo che la tecnica ad induzione elettromagnetica rappresenti una risorsa da non sottovalutare per quanto concerne gli studi di contesti near surface, in particolare le applicazioni in casistiche in cui le indagini FDEM possono fornire informazioni di dettaglio al pari, se non superiori, di quelle ricavabili tramite una prospezione di tomografia elettrica, ad esempio indagini in siti contaminati, discariche, contesti ambientali, archeologici e agronomici. Questo, nonostante le indagini ERT rappresentino un tipo di prospezione consolidato e diffuso, il vantaggio della prospezione elettromagnetica consisterebbe in una logistica di acquisizione dei dati molto più semplicemente.

Infine, ritengo che questa metodologia di investigazione del sottosuolo, vedrà un forte incremento di utilizzo specialmente per gli studi inerenti al permafrost, in conseguenza principalmente alle esigenze climatiche che si sono create negli ultimi anni ed al ruolo che questa entità geologica gioca a tal riguardo.

Ed è proprio in funzione della capacità di fornire informazioni di elevato dettaglio, associata alla capacità di coprire vaste aree in poco tempo, il motivo per cui ritengo che questa tecnica sia un'interessante risorsa sia in ambito della ricerca che in quello professionale.

Non ultimo il fatto che queste strumentazioni, diventando sempre più leggere potranno essere abbinate a sistemi di trasporto quali i droni che renderanno ancora più facile e veloce l'esplorazione di vaste aree. In pratica diverranno più abordabili indagini

elettromagnetiche aereo o eliportate che sono già da molti decenni ampiamente utilizzate per esplorazioni di grandi aree, ma con costi molto elevati.

Bibliografia

- Boaga, J., Ghinassi, M., D'Alpaos, A., Deidda, G.P., Rodriguez, G., Cassiani, G., 2018. Geophysical investigations unravel the vestiges of ancient meandering channels and their dynamics in tidal landscapes. *Sci. Rep.* 8, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20061-5>
- Brivio, L., Ghinassi, M., D'Alpaos, A., Finotello, A., Fontana, A., Roner, M. and Howes, N. (2016) Aggradation and lateral migration shaping geometry of a tidal point bar: An example from salt marshes of the Northern Venice Lagoon (Italy). *Sedimentary Geology*, 343, 141–155.
- Cosma, M., Ghinassi, M., D'Alpaos, A., Roner, M., Finotello, A., Tommasini, L., Gatto, R., 2019. Point-bar brink and channel thalweg trajectories depicting interaction between vertical and lateral shifts of microtidal channels in the Venice Lagoon (Italy). *Geomorphology* 342, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.009>
- D'Alpaos, A., Carniello, L., Rinaldo, A., 2013. Statistical mechanics of wind wave-induced erosion in shallow tidal basins: Inferences from the Venice Lagoon. *Geophys. Res. Lett.* 40, 3402–3407. <https://doi.org/10.1002/grl.50666>
- Deidda, G.P., Fenu, C., Rodriguez, G., 2014. Regularized solution of a nonlinear problem in electromagnetic sounding. *Inverse Probl.* 30. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/30/12/125014>
- Fontana, A., Mozzi, P. and Marchetti, M. (2014) Alluvial fans and megafans along the southern side of the Alps. *Sedimentary Geology*, 301, 150–171.
- Ghinassi, M., Brivio, L., D'Alpaos, A., Finotello, A., Carniello, L., Marani, M., Cantelli, A., 2018. Morphodynamic evolution and sedimentology of a microtidal meander

bend of the Venice Lagoon (Italy). *Mar. Pet. Geol.* 96, 391–404.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.06.011>

Giovanni Santarato, Nasser Abu Zeid, Samuel Bignardi, *Lezioni di geofisica applicata*
[Prima edizione 2015, libreria universitaria.it edizioni]

Massari, F., Grandesso, P., Stefani, C., Jobstraibizer, P., 2009. A small polyhistory foreland basin evolving in a context of oblique convergence: the Venetian basin (Chattian to Recent, Southern Alps, Italy). In: Allen, P.A., Homewood, P. (Eds.), *Foreland Basins*. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 141–168.

Prem V. Sharma, *Environmental and engineering geophysics 2002* [first published 1997, Cambridge University Press]

Won, I.J., 1980. A wide-bank electromagnetic exploration method - some theoretical and experimental results. *Geophysics* 45, 928–940. <https://doi.org/10.1190/1.1441097>

Zecchin, M., Baradello, L., Brancolini, G., Donda, F., Rizzetto, F., Tosi, L., 2008. Sequence stratigraphy based on high-resolution seismic profiles in the late Pleistocene and Holocene deposits of the Venice area. *Mar. Geol.* 253, 185–198.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.05.010>

Zecchin, M., Brancolini, G., Tosi, L., Rizzetto, F., Caffau, M., Baradello, L., 2009. Anatomy of the Holocene succession of the southern Venice lagoon revealed by very high-resolution seismic data. *Cont. Shelf Res.* 29, 1343–1359.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.03.006>

Zecchin, M., Tosi, L., Caffau, M., Baradello, L., Donnici, S., 2014. Sequence stratigraphic significance of tidal channel systems in a shallow lagoon (Venice, Italy). *Holocene* 24, 646–658. <https://doi.org/10.1177/0959683614526903>

Appendice

Nel file pdf allegato “*APPENDICE A - TAVOLE TESI.pdf*” è possibile trovare le tavole riportate in tabella.

APPENDICE	TAVOLA 1	<i>Ubicazione dell'area</i>
	TAVOLA 2	<i>Visione prospettica delle mappe di conducibilità a differente profondità</i>
	TAVOLA 3	<i>Sezioni di conducibilità N-S allineate da Ovest a Est</i>
	TAVOLA 4	<i>Sezioni di conducibilità E-W allineate da Sud a Nord</i>