

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE  
Dipartimento di Geoscienze  
Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
IN  
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**VERIFICA DELLA QUALITÀ  
DEI DATI DI TOMOGRAFIA ELETTRICA E RELATIVE  
INFLUENZE SUI RISULTATI D'INVERSIONE**

*Relatore: Prof. Giorgio Cassiani  
Correlatore: Dott. Jacopo Boaga*

*Laureanda: Anna Borriello*

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

## **Abstract**

It is well established that applied geophysics provides effective support to more traditional direct investigation methods, which typically supply only punctual and often incomplete information. Among the many geophysical techniques available, electrical resistivity tomography (ERT) is one of the most used for both geological and hydrogeological characterization of the subsurface. Nevertheless, a careful data analysis and a correct interpretation of the ERT data are mandatory, in order to obtain reliable information regarding the investigated domain.

Traditionally, the ERT data are acquired by investigating each electrode quadrupole only one time (so-called “direct measurement”) and the data thus obtained are directly processed by means of geophysical inversion software. This procedure, however, may provide wrong inversion results, which in turn could lead to a misinterpretation of the actual resistivity distribution.

This is mainly due to the lack of a proper data error estimation. To overcome this issue, it is possible to add to the acquisition scheme the so-called “reciprocal measurements”, where the current electrodes and the potential electrodes of the same quadrupole are switched. As a consequence, for each quadrupole two transfer resistance values are available. Moreover, these values should be identical, according to reciprocity effect. Any inconsistency can be considered an estimation of the measurement error, therefore this acquisition type allows filtering the available data, rejecting those measurement couples with an error greater than a fixed threshold.

In this work, based on data analysis and inversion, we compare the results obtained with traditional ERT acquisitions, i.e. using only direct measurements, with the acquisition of both direct and reciprocal values.

The main aim is to check the quality of the ERT data acquired following the two approaches described above.

This is achieved by means of appropriate processing and data inversion software, in combination with graphical representation tools.

The analyzed data come from two different field sites: the construction site of the new high-speed trains. Railway station in Bologna and the reconstructed embankment of the Frassine river in Megliadino San Fidenzio (PD).

The main results show that acquiring both direct and reciprocal measurements gives more effective and reliable results with respect to the dataset made up of only direct measurements.

## Riassunto

È ormai assodato come i metodi geofisici forniscano un supporto efficace alle metodologie dirette più tradizionali per sopperire ad informazioni puntuali e spesso frammentarie. Tra le molteplici tecniche di indagine e monitoraggio geofisico, la tomografia di resistività elettrica (ERT) è una delle più usate per la caratterizzazione geologica e idrogeologica del sottosuolo. Sono però necessarie una corretta analisi ed una attenta interpretazione dei dati ERT a disposizione, per ottenere informazioni il più possibile attendibili e vicine alla realtà oggetto di studio.

Tradizionalmente i dati ERT vengono acquisiti indagando ciascun quadripolo dello stendimento una sola volta (i.e. “misura diretta”) e questi stessi dati vengono trattati direttamente con software geofisici di inversione. Seguendo questo modo di procedere non è raro sbagliare nell’interpretazione finale dei risultati, in quanto non è possibile quantificare l’errore delle misure effettuate, rischiando così di sovrastimare o sottostimare le effettive resistività. È possibile però procedere con un’acquisizione che tenga conto anche delle cosiddette “misure reciproche”, ottenute scambiando gli elettrodi di corrente con quelli di potenziale: in questo modo, per ogni quadripolo di indagine sono disponibili due valori di resistenza, teoricamente identici secondo il principio di reciprocità. Questo tipo di acquisizione permette di associare un certo errore a ciascuna coppia di misure e quindi di effettuare una selezione dei dati a disposizione scartando quelli con errore superiore ad una determinata soglia. In questo lavoro di tesi, basato sul processo di trattamento e inversione dei dati, si sono confrontati i risultati ottenuti con l’acquisizione ERT più tradizionale, costituita cioè dalle sole misure dirette, con l’acquisizione che tiene conto anche delle misure reciproche. L’obiettivo è di verificare la qualità dei dati ERT acquisiti con queste due diverse modalità, confrontando i diversi risultati ottenuti dalla successiva procedura di inversione.

Il tutto è stato eseguito con appositi software di elaborazione e inversione dei dati, oltre a software di rappresentazione grafica dei risultati ottenuti.

I dati utilizzati provengono da due casi di studio reali: il cantiere della nuova stazione ferroviaria per l'Alta Velocità di Bologna e l'argine ricostruito in seguito a rotta del fiume Frassine a Megliadino San Fidenzio (PD). Si vuole in questo modo evidenziare quanto sia più efficace e attendibile, nonché molto poco laboriosa, un'acquisizione di misure sia dirette che reciproche, poiché in grado di fornire risultati molto buoni a livello pratico.

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Riassunto</b>	<b>4</b>
<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>1 Tomografia elettrica di Resistività (ERT)</b>	<b>11</b>
1.1 Principi di base.....	11
1.1.1 Legge di Archie (legame con l'idrologia).....	15
1.1.2 Resistività apparente.....	16
1.1.3 Tipi di Array.....	18
1.2 Tomografia elettrica di Resistività.....	21
<b>2 Processing e inversione dei dati</b>	<b>25</b>
2.1 La stima dell'errore.....	25
2.2 Il processo di inversione.....	26
2.2.1 Modello diretto.....	27
2.2.2 Modello inverso.....	28
<b>3 Elaborazione dei dati</b>	<b>31</b>
3.1 Separazione delle misure dirette da quelle reciproche.....	31
3.2 L'inversione.....	36
3.3 Localizzazione dei punti di misura.....	37
3.4 Software utilizzati per elaborazione ed inversione dei dati.....	40
3.4.1 IRIS2Profiler.....	40
3.4.2 ProfileR (Binley 2016).....	40
3.4.3 Readprof.....	42

3.4.4 Surfer.....	42
<b>4 Risultati ottenuti e discussioni</b>	<b>44</b>
4.1 Stazione di Bologna.....	44
4.1.1 Linea d'acquisizione L1.....	45
4.1.2 Linea d'acquisizione L2.....	49
4.2 Argine del fiume Frassine (PD).....	52
4.2.1 Misurazioni di Ottobre.....	54
4.2.2 Misurazioni di Novembre.....	59
4.2.3 Misurazioni di Febbraio.....	65
4.3 Confronto tra pseudosezioni e profili di resistività invertiti.....	68
4.4 Discussione dei risultati.....	72
<b>Conclusioni</b>	<b>75</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>77</b>

## **Introduzione**

La caratterizzazione ed il monitoraggio delle strutture e dei processi presenti nelle prime decine di metri di sottosuolo sono obiettivi comuni a numerose discipline quali la geologia, l'idrogeologia, l'archeologia, l'ingegneria e la bonifica di siti contaminati [26]. Queste discipline basano le loro indagini principalmente su metodologie tradizionali come carotaggi, prove geotecniche e campionamento acque. Si tratta infatti, di tecniche molto diffuse, ampiamente utilizzate e spesso costose, che però forniscono informazioni di tipo puntuale e per questo frammentarie e insufficienti, talvolta non completamente descrittive del dominio investigato.

Per superare tali problemi già assodati, la geofisica applicata mette a disposizione diverse tecniche non invasive e relativamente poco costose, in grado di fornire un supporto efficace alle metodologie dirette, grazie alla possibilità di investigare domini bi- e tri-dimensionali unitamente a tempi di acquisizione ridotti [13, 3, 12]. Il vero vantaggio deriva tuttavia dalla combinazione e dal confronto di prove geofisiche da superficie ed in foro con prove dirette tradizionali, per ottenere una migliore caratterizzazione del dominio oggetto dello studio [16, 21, 10].

Ogni metodo geofisico possiede un campo di applicazione più adatto e la selezione deve quindi essere effettuata sulla base degli obiettivi dello studio e delle caratteristiche del sito in esame, tenendo conto inoltre delle problematiche di agibilità e logistica del sito. Tra le molteplici tecniche di indagine e monitoraggio geofisiche, la tomografia di resistività elettrica (ERT, e.g. Daily et al., 2004; Binley e Kemna, 2005) è una delle più usate per la caratterizzazione geologica e idrogeologica del sottosuolo, sia da superficie (e.g. Kemna et al., 2002; Cassiani et al., 2006; Robert et al., 2012) che in foro (e.g. Daily et al., 1992; Binley et al., 2002; Perri et al., 2012). L'ERT infatti, è in grado di garantire generalmente una buona

risoluzione ed una profondità di indagine sufficienti per affrontare diverse problematiche ambientali che si possono riscontrare [20, 3, 5]. Per sfruttare al meglio le potenzialità di questa tecnica, non è sufficiente solo una corretta pianificazione della campagna di misura, ma particolare attenzione deve essere riposta anche nelle successive fasi di analisi, di inversione e di interpretazione del dato. A tal proposito, il dato ERT può essere soggetto a diverse tipologie di errore in fase di acquisizione: (i) errori sistematici, legati a particolari elettrodi ed (ii) errori sporadici, dovuti ad effetti non deterministici (Binley et al., 1995; Oldenborger et al., 2005). Queste tipologie di errore possono inficiare il successivo processo di inversione, riducendo la qualità del dato e rendendo più difficile l'interpretazione finale. Per ovviare a questo problema, una soluzione è offerta dal *Principio di Reciprocità* (Binley et al., 1995).

Usualmente i dati ERT vengono acquisiti indagando ciascun quadripolo dello stendimento una sola volta, ottenendo così un solo valore di resistenza. Questi stessi dati vengono poi trattati direttamente con software geofisici di inversione quali *Res2dinv*, *EM4soil*, e *ERTlab*. Tuttavia, in qualsiasi acquisizione è possibile scambiare gli elettrodi di corrente con quelli di potenziale, ottenendo così due misure per ogni quadripolo di indagine: la misura di resistenza diretta e la misura di resistenza reciproca (Binley et al., 1995). Ogni quadripolo viene in questo modo investigato due volte dalla strumentazione [20]. I due valori di resistenza così misurati dovrebbero, da un punto di vista teorico, essere uguali (Binley et al., 1995). Nella realtà questo raramente accade, ma questa inconsistenza può essere sfruttata per determinare l'errore di ciascuna coppia di misure ottenuta in campo, per definirne una maggiore o minore attendibilità [12]. Più nel dettaglio, il dataset così acquisito può essere filtrato, eliminando tutte quelle coppie di misura con valori di errore superiori ad una certa soglia (Binley et al., 1995; Perri et al., 2012).

In questa tesi, l'attenzione è posta sul procedimento di trattamento e inversione del dato geofisico. Più nel dettaglio, il lavoro è basato su due dataset reali, acquisiti presso due siti differenti: il cantiere della nuova stazione ferroviaria dell'Alta Velocità di Bologna e l'argine ricostruito in seguito a rotta del fiume Frassine in località Megliadino San Fidenzio (PD). In entrambi i casi, per ciascuna acquisizione, i dati a disposizione sono stati elaborati seguendo tre passaggi: (i) separazione delle misure dirette dalle rispettive misure reciproche, (ii) inversione in senso stretto e (iii) localizzazione dei punti di misura e creazione di

pseudosezioni. I risultati così ottenuti sono quindi confrontati con l'inversione dei dataset completi di misure dirette e reciproche, opportunamente filtrati sulla base dell'errore determinabile secondo il principio di reciprocità. L'obiettivo è quello di verificare la qualità dei dati acquisiti mediante tomografia di resistività elettrica puntando l'attenzione su due diversi approcci nell'acquisizione e quindi sui diversi risultati ottenuti dalla successiva procedura di inversione. In particolare, si confrontano i risultati ottenuti con l'acquisizione ERT più tradizionale, indagando ciascun quadripolo dello stendimento con la sola misura diretta, con l'acquisizione che tiene conto anche delle misure reciproche. Con questo lavoro si vuole evidenziare quando sia più efficace e attendibile, nonché molto poco laboriosa, l'acquisizione di misure sia dirette che reciproche nella fase di interpretazione finale dei risultati.

# Capitolo 1

## Tomografia elettrica di Resistività (ERT)

La *tomografia elettrica di resistività*, che viene indicata con l'acronimo ERT (Electrical Resistivity Tomography) è una tecnica geofisica frequentemente utilizzata che si basa sull'utilizzo di corrente continua iniettata nel terreno, sfruttando appunto le caratteristiche elettriche dei materiali presenti.

Lo scopo dell'investigazione è di ottenere più informazioni possibili sulle strutture del terreno e una visione d'insieme della zona interessata tramite l'uso di metodi non invasivi e relativamente economici.

### 1.1 Principi di base

I metodi geofisici che usano la corrente elettrica come l'ERT, si basano su alcuni principi fisici fondamentali come la *legge di Ohm*:

$$\Delta V = I \cdot R \quad (1.1)$$

*In un conduttore, il rapporto tra la differenza di potenziale e l'intensità di corrente è costante al variare della differenza di potenziale.*

Dove  $\Delta V$  è la differenza di potenziale misurata in Volt [V],  $I$  è l'intensità di corrente misurata in Ampere [A] e  $R$  la resistenza del materiale che viene attraversato dalla corrente, espressa in Ohm [ $\Omega$ ] [31].

Un ulteriore sviluppo della legge di Ohm, applicata ad un conduttore, è data dalla seguente relazione:

$$R = \frac{\rho l}{s} \quad (1.2)$$

La resistenza è direttamente proporzionale alla lunghezza del conduttore e inversamente proporzionale alla sezione

Dove  $l$  è la lunghezza del conduttore espressa in metri [m],  $s$  è la sezione trasversale del conduttore cilindrico [m<sup>2</sup>] dotato di resistenza  $R$  al quale viene applicata ai capi una differenza di potenziale  $\Delta V$ .

La costante di proporzionalità  $\rho$  è definita *resistività*, espressa in [ $\Omega\text{m}$ ] ed è una caratteristica tipica del mezzo attraversato [32].

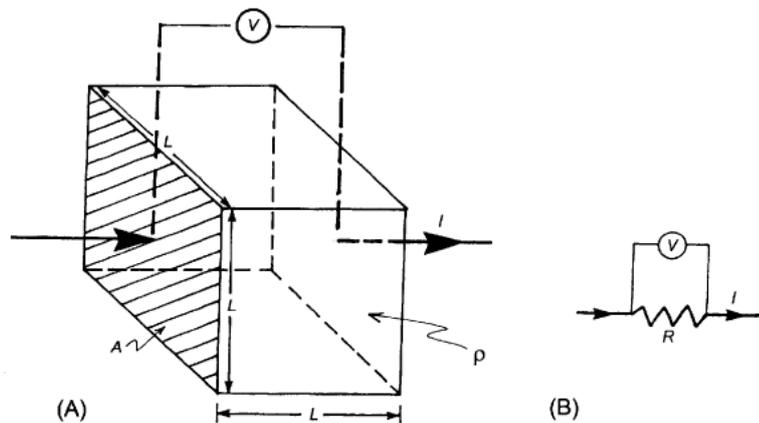


Fig. 1.1: Resistività di un blocco omogeneo di lunghezza  $L$ . Immagine tratta da [32].

Esiste un'altra forma della legge di Ohm in funzione del vettore intensità di campo elettrico  $\vec{E}$ , espresso in [V/m] e del vettore densità di corrente  $\vec{J}$ , misurato in [A/m<sup>2</sup>].

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.3)$$

$\sigma$  è la *conducibilità elettrica* espressa in Siemens su metri [S/m] ed è definita come l'inverso della resistività [12].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

Il flusso di corrente continua, in un mezzo conduttore, è descritto nella forma di un'equazione alle derivate parziali che coinvolge le variabili spaziali (x, y, z) e temporale (t). L'equazione soddisfa la *legge di Ohm* e la *legge di conservazione dell'energia*.

Considerando un volume infinitesimo REV (Representative elementary volume), il flusso di corrente elettrica in entrata deve essere pari al flusso di corrente elettrica uscente, non deve quindi esserci accumulo di cariche nel sistema trattandosi di corrente continua [12].

L'equazione che rappresenta la conservazione della carica elettrica attraverso il REV è:

$$\left( \frac{\delta}{\delta x} J_x + \frac{\delta}{\delta y} J_y + \frac{\delta}{\delta z} J_z \right) dx dy dz = 0 \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0$$

( $\nabla$ : Divergenza)

Sapendo che, per la legge di Ohm, il flusso di carica è generato da una variazione di potenziale.

$$J_x = -\sigma_x \frac{\delta V}{\delta x} \quad J_y = -\sigma_y \frac{\delta V}{\delta y} \quad J_z = -\sigma_z \frac{\delta V}{\delta z}$$

Si ricava l'equazione differenziale che descrive il flusso di corrente continua in un mezzo 3D non omogeneo e anisotropo:

$$\left( \frac{\delta}{\delta x} \left( \sigma_x \frac{\delta V}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( \sigma_y \frac{\delta V}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( \sigma_z \frac{\delta V}{\delta z} \right) \right) = 0 \quad (1.6)$$

Per un flusso stazionario in un mezzo isotropo ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ ) l'equazione differenziale viene semplificata:

$$\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} = 0 \quad (1.7)$$

$$\nabla^2 V = 0$$

(Laplaciano di V)

Si ottiene così l'equazione di Laplace che è la base per il calcolo delle soluzioni analitiche dell'equazioni di corrente continua [12].

Considerando un singolo punto di immissione di corrente in un mezzo omogeneo, isotropo infinitamente esteso.

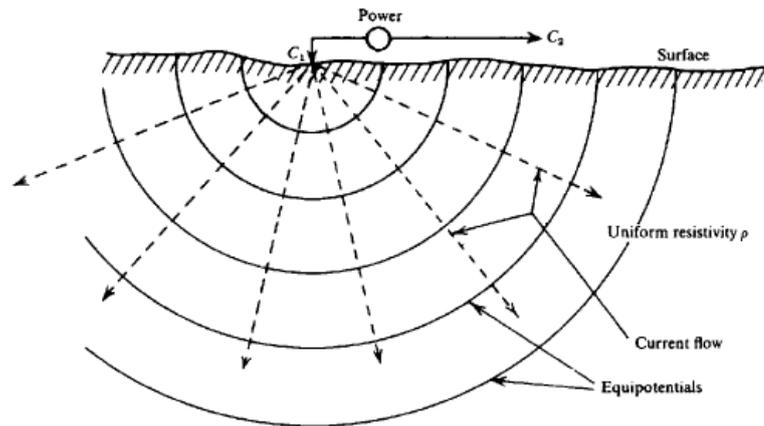


Fig. 1.2: Il flusso di corrente rappresentato dalle linee radiali perpendicolari alle superfici equipotenziali semisferiche. Immagine tratta da [38].

La soluzione all'equazione di Laplace (1.7) fornisce il valore del potenziale in ogni punto del dominio ad una distanza  $r$  dal punto di iniezione.

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1.8)$$

Si osserva come in flusso di corrente va in direzione opposta all'aumento di potenziale [12].

Essendo la legge di Laplace un'equazione lineare, è possibile sovrapporre l'effetto di più elettrodi di corrente per calcolare il potenziale complessivo [12].

Data una configurazione a quattro elettrodi, due di corrente A e B e due di potenziale M e N, usata comunemente in geoelettrica:

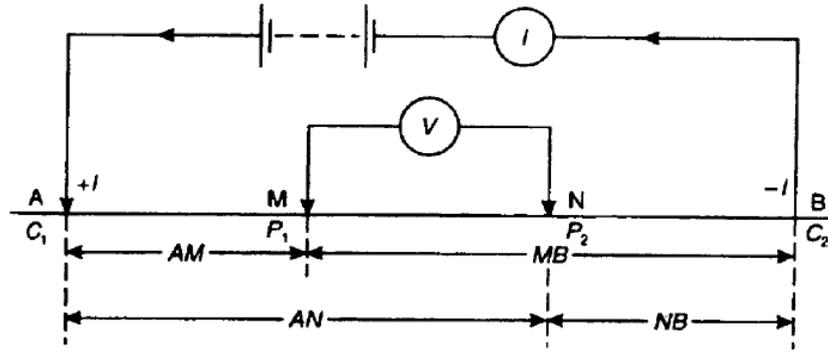


Fig. 1.3: Generica configurazione a quattro elettrodi. A e B sono gli elettrodi di corrente, M e N quelli di potenziale. Immagine tratta da [38].

Il valore del potenziale nel punto M e nel punto N sarà dato da:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_4} \right)$$

La differenza di potenziale tra i due punti è data quindi dalla seguente formula:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right) - \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (1.9)$$

### 1.1.1 La legge di Archie (legame con l'idrologia)

La *legge di Archie*, che prende il nome da *Gus Archie*, è una legge empirica nata nel 1942 in ambito petrolifero ma il suo utilizzo si allarga anche all'ambito geoelettrico su mezzi porosi.

Si tratta di una relazione che lega il valore di resistività di un terreno ad alcune caratteristiche del terreno stesso. Tiene conto del diverso grado di compattezza del materiale, della saturazione in acqua e della porosità [12].

In linea generale la legge di Archie è:

$$\rho = F \cdot \rho_w \quad (1.10)$$

Dove  $\rho$  è la resistività del terreno e  $\rho_w$  la resistività elettrica in acqua  
Il rapporto  $\rho/\rho_w$  è conosciuto come *fattore di formazione (F)*.

*Legge di Archie* in condizioni non sature:

$$\rho = a \cdot \phi^{-m} \cdot s^{-n} \cdot \rho_w \quad (1.11)$$

*La resistività elettrica è inversamente proporzionale alla porosità, inversamente proporzionale alla saturazione in acqua e direttamente proporzionale alla resistività elettrica in acqua [12].*

Dove  $\phi$  è la porosità del terreno,  $s$  la saturazione in acqua mentre  $a, m, n$  sono delle costanti determinate sperimentalmente in laboratorio.

$$0,5 \leq a \leq 2,5 \quad 1,3 \leq m \leq 2,5 \quad n \approx 2$$

*Legge di Archie* in condizioni sature:

$$\rho = a \cdot \phi^{-m} \cdot \rho_w \quad (1.12)$$

Dalla formula (1.11) si osserva che la resistività decresce con l'aumentare della porosità del terreno e più sono presenti sali disciolti più la conduttività cresce [12].

### **1.1.2 Resistività apparente**

Ci sono tre meccanismi di trasporto della corrente elettrica attraverso una roccia ospite [38]:

- Conduzione elettrolitica: avviene per movimento lento, relativo di ioni. Il passaggio della corrente dipende dal tipo di ioni e dalla concentrazione ionica.
- Conduzione elettronica: avviene in mezzi (frequentemente metallici) che consentono il passaggio rapido di corrente.
- Conduzione dielettrica: avviene in materiali debolmente conduttivi (isolanti). Se si applica una corrente alternata, si ha un leggero spostamento degli elettroni dal nucleo.

L'obiettivo dei sondaggi geoelettrici è di trovare la vera resistività del sottosuolo. Come si è visto dalla legge di Archie (1.10), la resistività dei materiali cambia notevolmente a seconda di molti parametri come ad esempio la struttura, ma anche l'anisotropia del materiale, la temperatura.

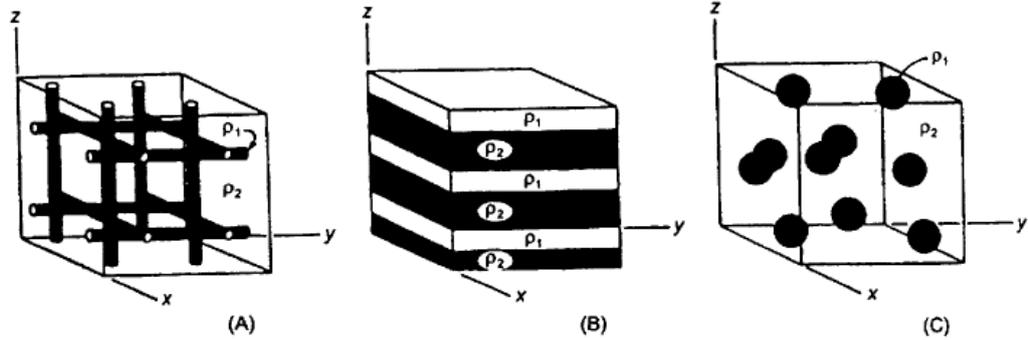


Fig. 1.4: Tre tipi di strutture che coinvolgono due materiali a resistività diversa ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ). È possibile il calcolo del *coefficiente di anisotropia* dato dal rapporto tra la resistività massima e quella minima e si osserva così che la struttura laminare (B) avrà un alto coefficiente di anisotropia. Immagine tratta da [32].

L'ideale sarebbe effettuare acquisizioni su materiali omogenei, cosa molto difficile in natura dove si ha a che fare generalmente con mezzi non omogenei [30].

Viene così introdotto il concetto di *resistività apparente* ( $\rho_a$ ):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} = K \cdot R \quad (1.13)$$

*La resistività apparente è data dal prodotto del fattore geometrico, che dipende dalla configurazione degli elettrodi usata, per la resistenza.*

Dove  $K$  è il fattore geometrico che descrive la geometria della configurazione degli elettrodi usata.

$$K = 2\pi \left[ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right) - \left( \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_4} \right) \right]^{-1} \quad (1.14)$$

Come la resistività, la resistività apparente è espressa in  $[\Omega m]$  ma a differenza della resistività, quella apparente non è una proprietà fisica del sottosuolo ma è soggetta al tipo di configurazione scelta [12].

Nel caso in cui il terreno indagato sia omogeneo, la resistività apparente coincide con quella reale, in caso contrario è necessario procedere con l'*inversione* dei dati per ottenere la distribuzione di resistività reale (si veda cap.2) [8].

### 1.1.3 Tipi di Array

Come si osserva dalla formula (1.13), il valore della resistività apparente è influenzato dal tipo di configurazione degli elettrodi usata.

Esistono vari tipi di *array* e vengono classificati in base a alcuni criteri come: profondità di penetrazione del suolo, copertura orizzontale e ampiezza del segnale, distribuzione della sensibilità ad anomalie verticali e orizzontali.

Questi fattori sono valutati tramite un'analisi di sensitività usando la *derivata di Frechet* [12].

Si tratta di un metodo empirico lineare che si basa sull'assunzione che il sistema in esame sia omogeneo, cosa che in realtà non è veritiera.

Viene calcolata la variazione di resistività del sottosuolo in base al tipo di array e vengono fornite quindi informazioni su quanto la variazione di resistività in un certo punto, influenzi la misura. Si ottengono così per i diversi tipi di array delle *mappe di sensitività*.

Per valori alti di sensitività di avranno valori di resistività più attendibili e viceversa. In linea generale la sensitività è alta nella zona vicino agli elettrodi per la maggiore densità di corrente e diminuisce con la profondità [20].

Le configurazioni più usate sono:

- Array Wenner: Migliore per l'intensità del segnale, ha una buona profondità di investigazione e una buona risoluzione verticale ma scarsa orizzontale. Configurazione molto affidabile ma non nei dettagli.

Wenner:

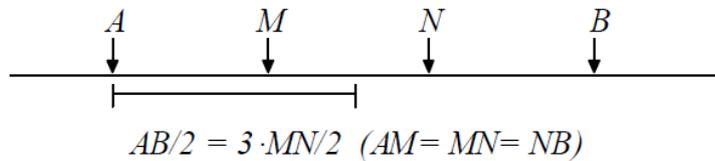


Fig. 1.5: Elettrodi di potenziale M e N sono interni a quelli di corrente A e B, tutti ad uguale distanza. Immagine tratta da [30].

- Array Dipolo-Dipolo: Peggior per l'intensità del segnale perché si misura la differenza di potenziale tra elettrodi vicini, ha una bassa profondità di investigazione e una scarsa risoluzione verticale ma ottima orizzontale. Si ottengono immagini molto nitide per la sua alta risoluzione ma ha un basso rapporto segnale/rumore e per questo si tratta di un array poco affidabile in presenza di un ambiente molto rumoroso.

Dipole-dipole

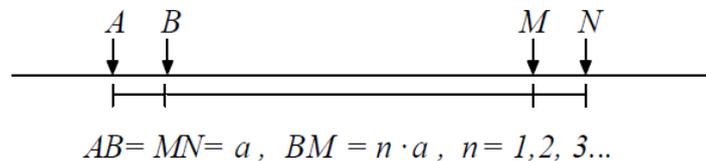


Fig. 1.6: Gli elettrodi di corrente A e B sono da una parte rispetto a quelli di potenziale M e N. Immagine tratta da [30].

- Array Schlumberger: Configurazione molto usata, ha caratteristiche intermedie ai precedenti array.

Schlumberger:

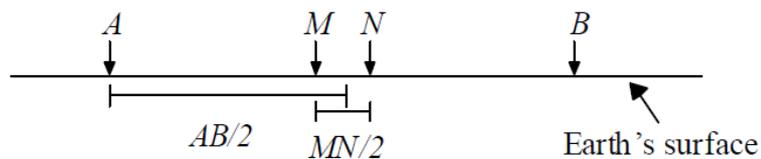


Fig. 1.7: Gli elettrodi i potenziale M e N sono posti a distanza ridotta all'interno degli elettrodi di corrente A e B. Immagine tratta da [30].

La scelta del tipo di array da usare va fatta in base al tipo di acquisizione, alle caratteristiche del sito in analisi valutando i pregi e i difetti di ciascuno.

Si possono effettuare misurazioni anche senza seguire una particolare configurazione ma si scelgono array conosciuti perché se ne conoscono i punti di forza e di debolezza [12].

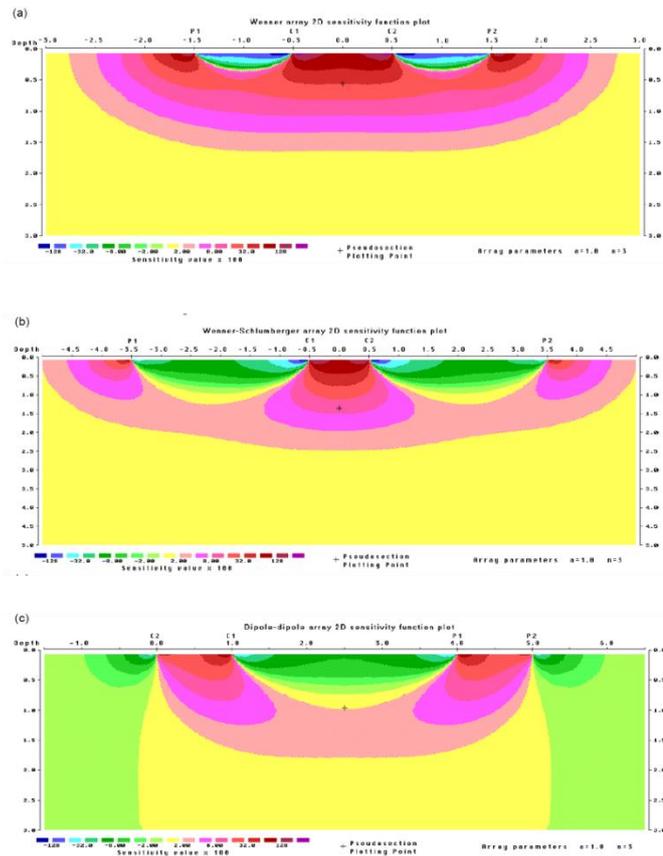


Fig. 1.8: Mappa di sensitività per l'array Wenner (a), Schlumberger (b) e Dipolo dipolo (c). Immagine tratta da [12].

Oltre alla corrente iniettata  $I$  durante l'acquisizione, esistono altre sorgenti di differenza di potenziale nel terreno ed è indispensabile eliminare il contributo di  $\Delta V$  non dovuto ad  $I$  [12].

Le sorgenti naturali di differenza di potenziale possono essere:

- Potenziali spontanei dovuti a sorgenti all'interno della terra (corpi mineralizzati o flusso di acqua in un mezzo molto permeabile)
- Correnti telluriche (causate per induzione elettromagnetica da flussi ionici nella ionosfera)
- Polarizzazione di elettrodi

Per eliminare queste differenze di potenziale viene iniettata una corrente  $I$  invertendo il verso dopo un certo periodo di commutazione e lasciando periodi intermedi in cui non viene iniettata alcuna corrente (periodi di *off*).

In questo modo si ottiene un onda quadra di corrente.

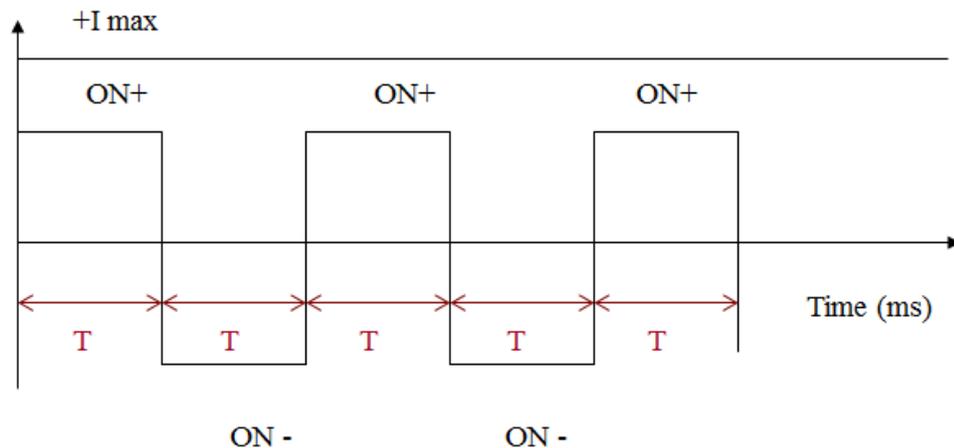


Fig.1.9: Andamento ad onda quadra della corrente  $I$ . Immagine tratta da [20].

Si può così individuare ed eliminare facilmente il potenziale generato nei periodi di *off*. Per far sì che la prova sia effettuata sempre in corrente continua i periodi di iniezione di corrente e quindi con corrente costante, sono più lunghi (di quelli rispetto ai tempi di *off* del sistema [20].

## 1.2 Tomografia elettrica di Resistività

La *tomografia elettrica di resistività* è un metodo elettrico che usa tanti elettrodi posti ad uguale distanza l'uno dall'altro.

Vengono eseguite misure multiple di resistenza elettrica tramite quadripoli. L'insieme delle misure così effettuate permettono di ricostruire la distribuzione 2D e 3D di resistività nel sottosuolo [20].

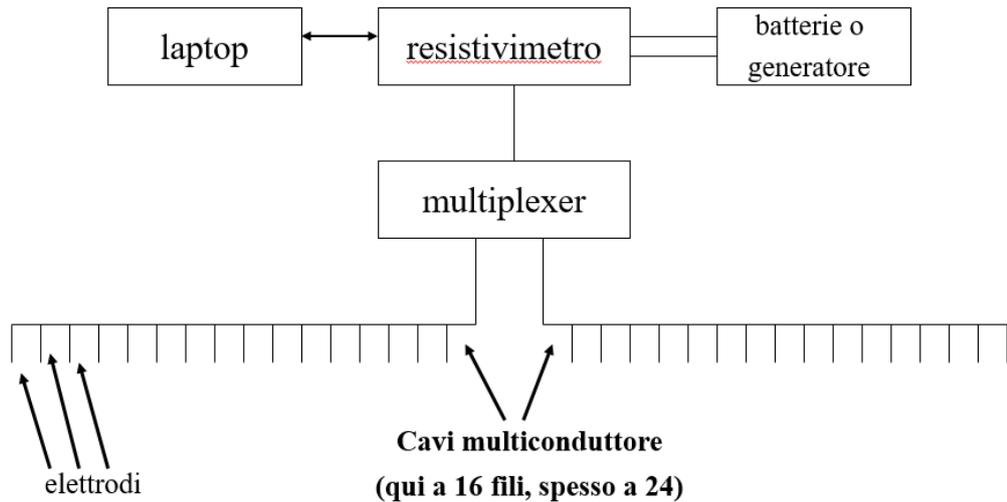


Fig. 1.10: Schematizzazione dell' acquisizione in tomografia elettrica. Immagine tratta da [12].



Fig. 1.11: Esempio di strumentazione che può essere usata per l'acquisizione. Immagine tratta da [12].

La strumentazione usata per l'acquisizione consiste in un georesistivimetro dotato di voltmetro e amperometro e una batteria o generatore di corrente continua, un numero appropriato di elettrodi con cavi multicolore e pinzette e un computer portatile per scaricare e visualizzare i dati.

Durante l'acquisizione in campagna viene iniettata la corrente  $I$  tramite un amperometro e si misura la differenza di potenziale tra la coppia di elettrodi di potenziale, tramite un voltmetro.

Lo strumento che effettua le misurazioni invia poi i dati acquisiti al computer a cui è collegato [38].

È possibile selezionare il tipo di array da usare nell'acquisizione ma, è anche possibile selezionare diverse configurazioni per uno stesso stendimento.

Viene poi calcolato il valore di resistività apparente  $\rho_a$  tramite la formula (1.13).

La strumentazione usata permette un controllo sugli elettrodi che misura la *resistenza di contatto*, si tratta della resistenza che oppongono gli elettrodi al passaggio della corrente e deve essere più bassa possibile ( $\sim 10 \Omega$ ) [12].

I valori di resistività apparente ottenuti da ogni misura sono plottati in una *pseudosezione*.

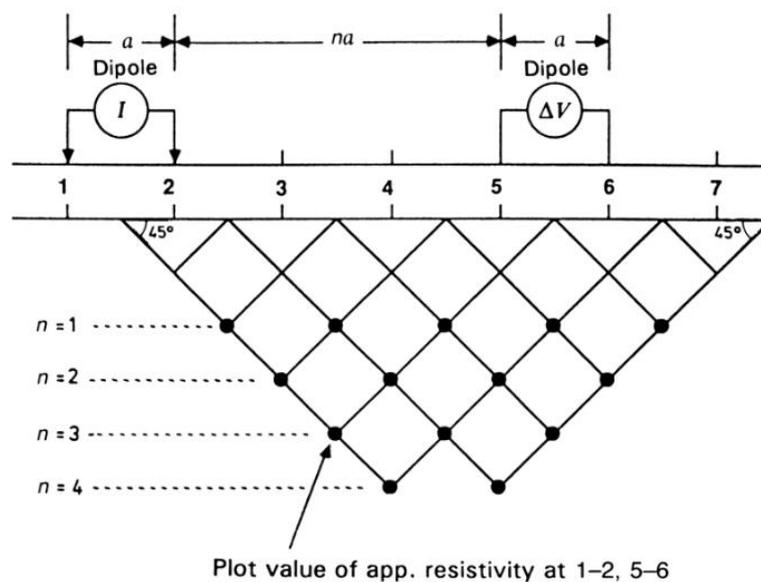


Fig. 1.12: Costruzione grafica di una pseudosezione. La costruzione di pseudosezioni è stata proposta per la prima volta da *Hallof* (1957), con l'utilizzo dell'array dipolo-dipolo. L'ordine dipolare  $n$  (assunto come multiplo intero della distanza dei dipoli) viene progressivamente incrementato, ottenendo valori di resistività relativi a volumi maggiori e sempre più estesi in profondità. Immagine tratta da [12].

Il valore relativo ad una misura si pone verticalmente al di sotto, nel punto medio dell'array usato, in corrispondenza della profondità di indagine media relativa alla configurazione degli elettrodi usata.

Dalla figura (1.12) si osserva che maggiore è la distanza tra gli elettrodi, maggiore sarà la profondità a cui viene plottato il punto misura della resistività apparente.

Si ottiene in questo modo la pseudosezione tramite il *contouring* dei valori di resistività apparente ed ha una forma tipicamente triangolare [12].

La pseudosezione è una rappresentazione grafica che fornisce una visualizzazione approssimativa della reale distribuzione di resistività perché è influenzata dal tipo di stendimento utilizzato [20].

È necessaria quindi un'opportuna inversione dei dati per trovare il valore di resistività reale. Può essere però uno strumento molto utile per individuare i valori poco attendibili e quindi eliminarli e avere così un'idea generale della distribuzione della resistività reale del dominio di indagine.

Un parametro fondamentale durante l'acquisizione è la profondità di investigazione che in linea generale è pari a circa  $1/4$  della lunghezza dello stendimento. La corrente iniettata si distribuirà ovunque nel terreno ma in questa porzione si avranno dati maggiormente attendibili.

Come si può dedurre facilmente, lo stendimento degli elettrodi dovrà essere molto lungo se paragonato alla profondità di indagine [12].

## Capitolo 2

### Processing e inversione dei dati

Una volta effettuate le misure in campagna si ottengono dei dati “grezzi” che necessitano di un’opportuna inversione per ottenere la reale distribuzione di resistività nel sottosuolo indagato.

Ovviamente la geoelettrica come tutti gli altri metodi geofisici e non, ha diverse potenzialità ma anche dei limiti che devono essere sempre tenuti in considerazione durante l’interpretazione dei risultati.

#### 2.1 La stima dell’errore

Quando si raccolgono i dati in campagna durante le acquisizioni, pur eseguite con le tecniche più accurate e gli accorgimenti più appropriati, questi non sono mai valori perfettamente definiti nel senso più rigoroso, ma sono sempre affetti da errore [12].

È necessario quindi fare una valutazione dell’errore prima dell’inversione per capire quali valori ottenuti sono attendibili e quali non lo sono.

Per stimare l’errore si sfrutta solitamente il *principio di reciprocità* [12].

In qualsiasi misura effettuata si scambiano gli elettrodi di potenziale con quelli di corrente ottenendo così le misure sia dirette che reciproche per ogni quadripolo.

Il valore di resistenza trovato dalle misure dirette deve essere uguale al valore trovato dalle misure inverse (stesso rapporto  $\Delta V/I$ ).

Se ciò non si verifica significa che la misura è affetta da errore.

L’errore più frequente è dato dalla resistenza di contatto elevata e quindi dal cattivo contatto che può esserci tra il terreno e l’elettrodo in esso inserito.

Il calcolo della differenza di potenziale non è disturbato da una resistenza di contatto elevata in un elettrodo ma diventa importante se l'elettrodo in questione è un elettrodo di corrente. Si ottengono in questo modo misure dirette molto diverse da quelle reciproche.

Un valore elevato di resistenza di contatto si potrà avere, ad esempio, nel caso in cui un elettrodo sia piantato male o in presenza di un terreno a grana grossolana.

Si osserverà il tipico valore di resistenza di 999 K $\Omega$  quando la pinza è staccata dall'elettrodo [12].

Una volta ottenute le misure sia dirette che reciproche per l'intero dataset si calcola il *fattore di qualità* (in percentuale) [12].

$$Q\% = \frac{|R_D - R_R| \times 100}{\frac{|R_D + R_R|}{2}} \quad (2.1)$$

Dove  $R_D$  è il valore della resistenza diretta e  $R_R$  è il valore della resistenza reciproca. Le misure che rientrano entro una certa percentuale di tolleranza (di solito del 5%) vengono tenute, mentre quelle che superano tale soglia, vengono scartate e quindi non considerate nell'inversione [12].

## 2.2 Il processo di inversione

Per ricostruire la reale distribuzione di resistività del sottosuolo investigato è necessario effettuare l'inversione dei dati ottenuti durante l'acquisizione in tomografia elettrica [12].

L'inversione è definita come l'insieme di metodi matematici (numerici generalmente) che permettono di estrarre informazioni su un sistema fisico a partire da un insieme di dati.

Gli elementi alla base della teoria sono i dati, misure delle proprietà di interesse e il modello, che rappresenta un legame tra i parametri che descrivono il problema fisico e i dati.

Il procedimento di inversione in geofisica è un processo matematicamente *mal posto* [8]. Un problema matematico è *ben posto* se per tutti i dati esiste ed è unica la soluzione e questa dipende in modo continuo dai dati stessi [8].

Nel caso dell'inversione geofisica, viene assicurata solo l'esistenza di una soluzione e l'inversione soffre maggiormente per il problema dell'univocità della soluzione e questo genera diversi gradi di incertezza.

Si rende necessario l'uso di tecniche di "regolarizzazione" che approssimano il problema *mal posto* in problemi *ben posti* dipendenti da alcuni parametri [8].

Le tecniche di regolarizzazione hanno lo scopo di minimizzare appropriate *funzioni obiettivo* (si veda formula 2.2) [8].

L'insieme delle misure effettuate costituisce un sistema di equazioni che coinvolgono la distribuzione della resistività nel sottosuolo. Il sistema deve quindi essere risolto con l'aiuto di informazioni a priori.

Nella costruzione del modello finale, effettivamente utilizzabile a livello pratico, si può procedere in due modi: secondo la *modellazione diretta* o secondo la *modellazione inversa* [12].

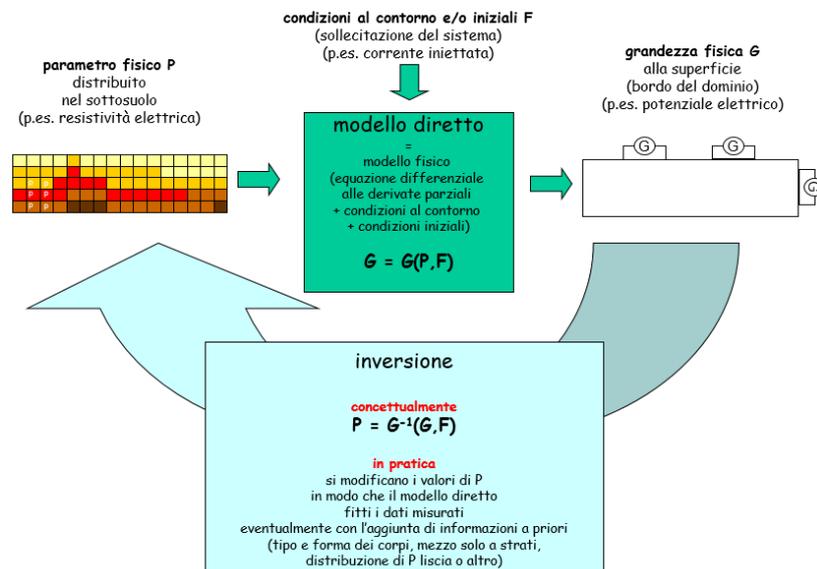


Fig. 2.1: Modello concettuale del problema diretto e inverso. Immagine tratta da [20].

### 2.2.1 Modello diretto



Il modello diretto calcola le resistenze che sarebbero misurate teoricamente per una certa distribuzione di resistività. È la risposta teorica del sistema data la sua costituzione. Si tratta quindi di un modello predittivo.

Il modello diretto prevede la discretizzazione del continuo. I metodi più usati per farlo sono il metodo alle *differenze finite* e al *elementi finiti* [12].

Il metodo alle *differenze finite* permette di risolvere numericamente equazioni differenziali sostituendo alle derivate i rapporti incrementali. La discretizzazione della regione di studio avviene attraverso la creazione di una griglia di nodi uniformemente distribuiti. In ciascun nodo viene determinato il valore della grandezza fisica che definisce la fenomenologia ( $\Delta V$  nel caso della geoelettrica), valore legato al valore nei nodi contigui [12].

Il metodo agli *elementi finiti* è una tecnica numerica più recente che trova soluzioni a problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali semplificandole in un sistema di equazioni algebriche di più facile risoluzione. La regione, oggetto di studio, viene discretizzata in un numero di elementi finiti non uniformemente distribuiti nello spazio. Per questo si tratta di una tecnica che si presta bene ad essere utilizzata quando non è richiesta una soluzione omogenea su tutto il dominio [12].

### 2.2.2 Modello inverso



Il modello inverso consiste nel calcolo della distribuzione della resistività coerente con le misure effettivamente acquisite [12].

Per risolvere il problema inverso, la regione in esame viene discretizzata in un certo numero di parametri  $m$  (solitamente corrispondono al logaritmo della resistività o conduttività) che possono corrispondere a singole celle o a gruppi di celle.

$m_1$				
		$m_2$		$m_3$
$m_4$	$m_5$			
$m_6$		$m_7$		

$$m_j = \ln \sigma_j \quad (j=1, 2, \dots, M)$$

$M$  è il numero celle e quindi il numero di incognite del sistema

La distribuzione di  $\rho$  sarà quindi rappresentata da un vettore di incognite  $m$ .

Si cerca di determinare il miglior dataset di parametri  $m$  che riproducano i dati sperimentali di resistenza tramite i calcoli effettuati nel modello diretto [12].

Per fare ciò è necessario individuare una funzione, chiamata *funzione obiettivo*, da minimizzare ( $\Psi_d$ ).

$$\Psi_d = \sum_{i=1}^N \left( \frac{F_i(\mathbf{m}) - d_i}{\varepsilon_i} \right)^2 = \|W_d(F(\mathbf{m}) - d_i)\|^2 \quad (2.2)$$

$F_i(m)$  è la  $i$ -esima resistenza calcolata

$d_i$  è la  $i$ -esima resistenza misurata

$W_d$  è la matrice degli errori  $\varepsilon$

$N$  è il numero di misure

Le interazioni per minimizzare la funzione  $\Psi_d$  si devono fermare quando il *misfit* dei dati è prossimo agli errori, i dati raccolti infatti sono sempre rumorosi.

Non basta però usare solo il *misfit* dei dati perché si può arrivare ad un sistema contemporaneamente sottodeterminato (troppe incognite e troppo poche equazioni) e sovradeterminato (troppi dati a disposizione). Di conseguenza la soluzione sarà molto sensibile all'errore nei dati e può dare distribuzioni di resistività irrealistiche.

Per questo motivo è necessario introdurre una funzione di penalità ( $\Psi_m$ ) che vincola la soluzione del problema [12].

Si riporta così l'inversione verso soluzioni più vicine a ciò che si ritiene accettabile.

Ad esempio è possibile avere una soluzione più vicina ad un modello già noto o che sia "liscia".

$$\Psi = \Psi_d + \alpha \Psi_m \quad (2.3)$$

Dove  $\alpha$  è un parametro di regolarizzazione, più è piccolo più peso hanno i dati rispetto vincolo imposto dalla funzione penalità.

Un metodo molto utilizzato è *l'inversione alla Occam* che prevede che la soluzione sia più semplice possibile e quindi più “liscia” [12].

Guglielmo di Ockham od Occam è stato un filosofo e teologo inglese del 1200 che ha dato un notevole impulso al metodo scientifico. Il principio su cui si fondava la teoria del filosofo era di eludere la postulazione di entità elaborate inutili per favorire la partenza da principi più semplici e arrivare così ad una soluzione dalla base più solida [1].

*«A parità di fattori, la spiegazione più semplice è da preferire»*

(Guglielmo di Occam)

Citazione che sintetizza la teoria del filosofo, tratta da [1].

Il modello di inversione impone una variazione spaziale graduale della resistività producendo così un modello “smussato” compatibile con di dati sperimentali entro un margine di errore prestabilito.

## Capitolo 3

### Elaborazione dei dati

In questo lavoro di tesi sono stati utilizzati dati reali di tomografie elettriche già acquisiti, provenienti da due siti diversi: il cantiere della nuova stazione ferroviaria dell'Alta Velocità di Bologna e l'argine ricostruito in seguito a rotta del fiume Frassine in località Megliadino San Fidenzio (PD), con lo scopo di elaborare e trattare i dati, di analizzare i risultati ottenuti dall'inversione e verificare così la qualità dei dati di tomografia elettrica.

La prospezione geofisica può essere suddivisa in tre fasi fondamentali: l'acquisizione del dato, il processo di trattamento-inversione e la fase di interpretazione [8].

Questo lavoro di tesi è centrato sul procedimento di trattamento e inversione del dato geofisico. Si è effettuato un lavoro di *modelling* di dati, con software di elaborazione, inversione e visualizzazione grafica.

Per l'elaborazione dei dati si procede per *step* successivi: (i) separazione delle misure dirette da quelle reciproche, (ii) inversione e creazione delle sezioni per una visualizzazione grafica dei risultati ottenuti per facilitare il confronto tra i risultati ottenuti.

#### 3.1 Separazione delle misure dirette da quelle reciproche

Per tutti i dataset provenienti dalle linee tomografiche a disposizione si è partiti dal file in formato "grezzo" ottenuto in campo.

Il file contiene una tabella con la posizione degli elettrodi del quadripolo, il valore di resistività apparente ( $\rho_a$ ), la differenza di potenziale tra gli elettrodi potenziometrici ( $\Delta V$ ) e l'intensità di corrente iniettata ( $I$ ).

Spa. 1	Spa. 2	Spa. 3	Spa. 4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In
1	6	2	7	63,22	0,2	0	-67,7	1886,082	118,398
1	6	7	12	20,12	0,3	0	67,5	-287,211	118,398
1	6	12	17	17,16	0,5	0	-48,7	-15,309	118,398
1	6	17	22	14,69	0,5	0	-757,5	-3,746	118,398
1	6	22	27	16,73	1,1	0	844,2	-1,804	118,398
1	6	27	32	15,31	2,8	0	-26	-0,852	118,398
1	6	32	37	16,76	3,9	0	-797,2	-0,544	118,398
1	6	37	42	19,3	8,2	0	-4	-0,397	118,398
1	6	42	47	17,41	9,3	0	45,8	-0,242	118,398
1	6	47	52	12,66	22,4	0	10,2	-0,124	118,398
1	6	3	8	36,53	0,1	0	11,6	372,246	122,218
1	6	8	13	17,1	0,1	0	-115,2	-98,994	122,218
1	6	13	18	17,3	0,5	0	80,3	-11,78	122,218
1	6	18	23	16,14	0,3	0	-798,9	-3,497	122,218
1	6	23	28	14,87	0,4	0	858,8	-1,432	122,218
1	6	28	33	16,04	1,7	0	-20,7	-0,821	122,218
1	6	33	38	16,63	1,6	0	-775,4	-0,506	122,218
1	6	38	43	21,3	2,1	0	-23,5	-0,417	122,218
1	6	43	48	19,82	0,6	0	40,8	-0,264	122,218
1	6	48	53	10,4	11,7	0	-38	-0,099	122,218
1	6	4	9	41,58	0,3	0	26	34,507	125,145
1	6	9	14	17,08	0,3	0	-364,2	-54,515	125,145
1	6	14	19	8,31	3	0	286,7	-4,42	125,145
1	6	19	24	16,63	0,5	0	-455,4	-3,077	125,145
1	6	24	29	14,1	1,3	0	97,4	-1,211	125,145
1	6	29	34	15,9	2,1	0	390,8	-0,745	125,145
1	6	34	39	18,84	2,9	0	74,2	-0,534	125,145
1	6	39	44	23,27	4,9	0	-140,2	-0,43	125,145
1	6	44	49	13,53	12,6	0	-201,2	-0,172	125,145
1	6	49	54	11,54	33,1	0	-482	-0,105	125,145
1	6	5	10	25,57	0,5	0	-20,1	-317,343	127,607
1	6	10	15	16,07	0,4	0	7,5	-32,376	127,607

Fig. 3.1: Esempio di file “grezzo” acquisito in campo.

I dati acquisiti direttamente in campo contenevano sia le misure dirette che quelle reciproche e, per poter fare un confronto tra i risultati ottenuti dall'inversione di misure dirette (e inverse) e misure passate al controllo dei reciproci, è stato necessario separarle.

Si è utilizzato il software di elaborazione dati *IRIS2Profiler* (si veda sezione 3.4.1), la scelta è ricaduta su questo tipo di eseguibile perché fornisce un file in output che visualizza le coppie di quadripoli di acquisizione sia diretti che reciproci con il relativo valore di resistenza [ $\Omega$ ].

Tramite questo particolare file di output è stata possibile la separazione delle misure dirette da quelle reciproche per poter così simulare un'acquisizione di dati ERT senza la tecnica dei reciproci.

```

reciprocal type 1          1          90
    1          2          3          4 -1.425673
    3          4          1          2 -1.428120
passed
reciprocal type 1          2         135
    1          2          4          5 -0.3955288
    4          5          1          2 -0.3990536
passed
reciprocal type 1          3         180
    1          2          5          6 -0.1330760
    5          6          1          2 -0.1301112
passed
reciprocal type 1          4         225
    1          2          6          7 -5.8401026E-02
    6          7          1          2 -6.3501328E-02
NOT passed
reciprocal type 1          5         270
    1          2          7          8 -2.5804292E-02
    7          8          1          2 -2.0115804E-02
NOT passed
reciprocal type 1          6         315
    1          2          8          9 -2.7232446E-02
    8          9          1          2 -2.9825306E-02
NOT passed
reciprocal type 1          7         360
    1          2          9         10 -1.0700701E-02
    9         10          1          2 -1.0404699E-02
passed
reciprocal type 1          8         405
    1          2         10         11 -7.6214620E-03
   10         11          1          2 -8.4582418E-03
NOT passed

```

Fig. 3.2: Esempio di file di output, *reciprocals.dat*.

Sono stati creati di conseguenza due opportuni file denominati *profiler.in*, uno per le misure dirette e uno per quelle inverse che saranno poi di input al successivo software di inversione *ProfileR* (Binley 2016) [2].

Il file *profiler.in* viene costruito sulla base delle modalità di acquisizione nel sito di interesse (si veda sezione 3.4.2). È possibile specificare in numero di elettrodi e la loro spaziatura, le coordinate degli elettrodi alle estremità dello stendimento, il tipo di array usato e il tipo di modellizzazione.

Si è scelto come valore di resistività uniforme iniziale,  $100 \Omega\text{m}$ , sarebbe quindi il valore di resistività che si avrebbe se il mezzo, attraversato dalla corrente, fosse omogeneo.

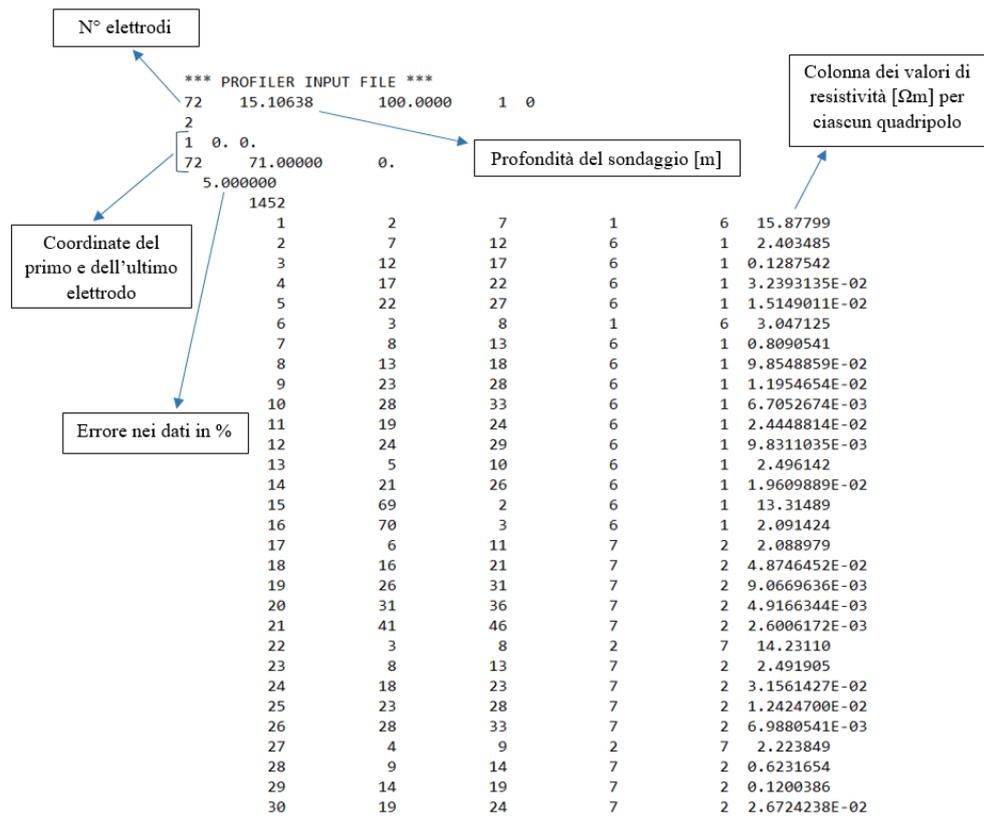


Fig. 3.3: Esempio di file di input del software *ProfileR* (*profiler.in*) (Binley 2016).

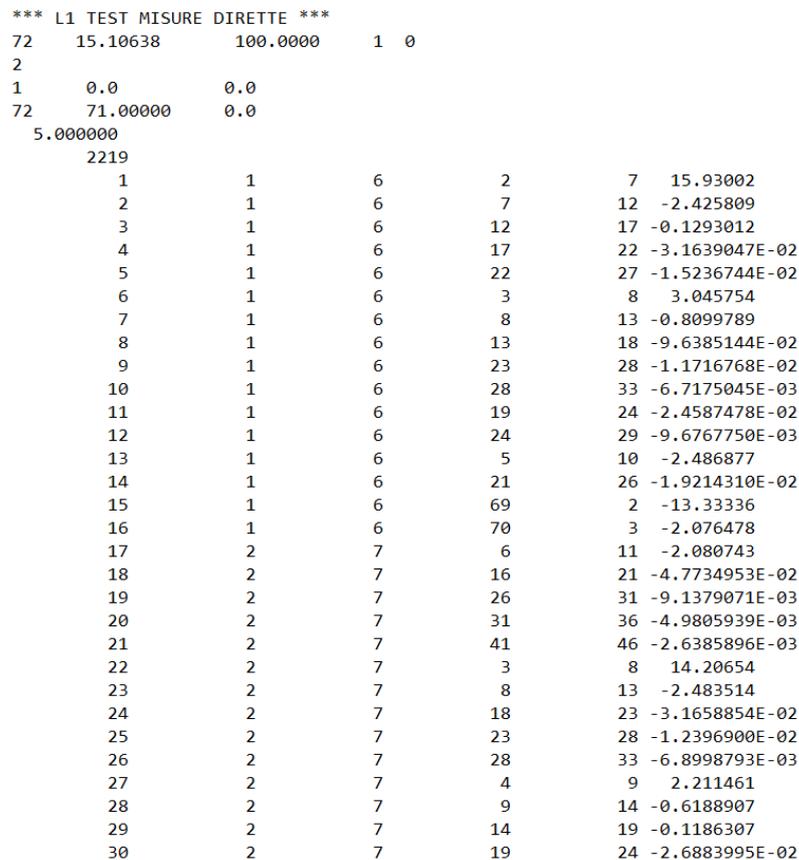


Fig. 3.4: *Profiler.in*, misure dirette.

```

*** L1 TEST MISURE RECIPROCHE ***
72  15.10638      100.0000      1  0
2
1   0.0          0.0
72  71.00000      0.0
5.000000
2219
1   2           7           1           6   15.82596
2   7           12          1           6   -2.381161
3   12          17          1           6   -0.1282073
4   17          22          1           6   -3.3147223E-02
5   22          27          1           6   -1.5061279E-02
6   3           8           1           6   3.048496
7   8           13          1           6   -0.8081294
8   13          18          1           6   -0.1007126
9   23          28          1           6   -1.2192539E-02
10  28          33          1           6   -6.6930298E-03
11  19          24          1           6   -2.4310149E-02
12  24          29          1           6   -9.9854320E-03
13  5           10          1           6   -2.505407
14  21          26          1           6   -2.0005468E-02
15  2           69          1           6   13.29643
16  3           70          1           6   2.106371
17  6           11          2           7   -2.097216
18  16          21          2           7   -4.9757954E-02
19  26          31          2           7   -8.9960201E-03
20  31          36          2           7   -4.8526749E-03
21  41          46          2           7   -2.5626449E-03
22  3           8           2           7   14.25566
23  8           13          2           7   -2.500297
24  18          23          2           7   -3.1463996E-02
25  23          28          2           7   -1.2452500E-02
26  28          33          2           7   -7.0762294E-03
27  4           9           2           7   2.236238
28  9           14          2           7   -0.6274402
29  14          19          2           7   -0.1214465
30  19          24          2           7   -2.6564481E-02

```

Fig. 3.5: *Profiler.in*, misure reciproche.

I due file *profiler.in*, rappresentati nelle figure 3.4 e 3.5, racchiudono quindi tutte le misure effettuate in campo senza alcun filtro e, tramite la loro inversione, si ottiene il risultato che normalmente si otterrebbe senza effettuare alcuna elaborazione del dato ovvero senza l'acquisizione dei reciproci.

*IRIS2Profiler* in realtà fornisce in automatico un file *profiler.in* con la lista dei quadripoli che hanno passato il controllo dei reciproci che opera il software, con una soglia di tolleranza scelta del 5%.

Vengono così mantenute le coppie che hanno una differenza di resistenza, in valore assoluto, inferiore ad un limite fissato, scartando tutte le altre e operando una media tra il valore di resistenza diretta e il valore di resistenza reciproca.

### 3.2 L'inversione

Il passo successivo è l'inversione dei dati per ricostruire la reale distribuzione di resistività del sottosuolo investigato o per lo meno quella che più si avvicina alla distribuzione reale.

Il software utilizzato, come già accennato, è l'eseguibile *ProfileR* (Binley 2016) (si veda sezione 3.4.2) che richiede in input il file *profiler.in* precedentemente creato[2].

Si è quindi operata l'inversione sia per le misure dirette che per quelle reciproche ed infine anche per il file *profiler.in* delle misure passate al controllo dei reciproci. Il software ha fornito in output un file (*profiler.dat*) contenente i valori di resistività in  $[\Omega\text{m}]$ , ottenuti dalla modellazione inversa con la loro relativa posizione nello spazio (coordinate x e z), oltre al valore del logaritmo base decimale della resistività.

X	Z	Resistivity	log10(resis)
0.25000	-0.21010	202.740	2.307
0.25000	-0.65132	202.740	2.307
0.25000	-1.13666	360.096	2.556
0.25000	-1.67054	360.096	2.556
0.25000	-2.25780	114.758	2.060
0.25000	-2.90379	114.758	2.060
0.25000	-3.61438	93.754	1.972
0.25000	-4.39602	93.754	1.972
0.25000	-5.25583	42.051	1.624
0.25000	-6.20163	42.051	1.624
0.25000	-7.24200	23.278	1.367
0.25000	-8.38641	23.278	1.367
0.25000	-9.64526	18.810	1.274
0.25000	-11.02999	18.810	1.274
0.25000	-12.55320	22.721	1.356
0.25000	-14.22873	22.721	1.356
0.75000	-0.21010	202.740	2.307
0.75000	-0.65132	202.740	2.307
0.75000	-1.13666	360.096	2.556
0.75000	-1.67054	360.096	2.556
0.75000	-2.25780	114.758	2.060
0.75000	-2.90379	114.758	2.060
0.75000	-3.61438	93.754	1.972
0.75000	-4.39602	93.754	1.972
0.75000	-5.25583	42.051	1.624
0.75000	-6.20163	42.051	1.624
0.75000	-7.24200	23.278	1.367

Fig. 3.6: Esempio di file di output, *profiler.dat*.

Il risultato ottenuto è stato poi rappresentato graficamente tramite il software *Surfer* (si veda sezione 3.4.4).

Come prima cosa si è creata una griglia con i dati da rappresentare graficamente (file *grid*), assegnando dei valori agli assi (xyz), in questo caso le due coordinate del punto di misura e il valore di resistività [32].

Il software *Surfer* permette di scegliere il tipo di interpolazione da usare nella rappresentazione del dato e la scelta è ricaduta sul *Kriging*.

Il *Kriging* è un metodo di interpolazione che permette di stimare una grandezza nel dominio in modo continuo avendo a disposizione valori in singoli punti di osservazione. Il *Kriging* è un metodo di tipo geostatistico, si tratta di un operatore di stima ottimale, ossia ottimizza la valutazione di una grandezza variabile nello spazio [19].

Successivamente si rappresenta l'immagine che ha come base il file *grid* creato precedentemente, ottenendo una sezione che fornisce la distribuzione di resistività elettrica del sottosuolo in esame.

Si otterrà così una sezione di resistività per le misure dirette, una per le misure inverse e una per le misure passate al controllo dei reciproci e questo è stato fatto per tutte le linee tomografiche a disposizione.

### **3.3 Localizzazione dei punti di misura**

Oltre alle sezioni di resistività, sono state create anche delle sezioni che rappresentano i punti dove è stata effettuata la misurazione e sezioni con il valore di resistività apparente relativo ad ogni punto (pseudosezioni).

Il software utilizzato è l'eseguibile *Readprof* (si veda sezione 3.4.3), che necessita in input del file *profiler.in* e fornisce in output il file *profiler\_location.dat* con le (coordinate x e z) del punto di misura di ciascun quadripolo investigato.

Questo file di output è stato utile per la localizzazione dei punti di misura e quindi avere un'idea quantitativa delle misure a disposizione.

Coordinate x e z			Posizione degli elettrodi (quadripolo)			
4.000000	-1.200000	1	2	7	1	6
6.500000	-2.200000	2	7	12	1	6
9.000000	-3.200000	3	12	17	1	6
11.500000	-4.200000	4	17	22	1	6
14.000000	-5.200000	5	22	27	1	6
4.500000	-1.400000	6	3	8	1	6
7.000000	-2.400000	7	8	13	1	6
9.500000	-3.400000	8	13	18	1	6
14.500000	-5.400000	9	23	28	1	6
17.000000	-6.400000	10	28	33	1	6
12.500000	-4.600000	11	19	24	1	6
15.000000	-5.600000	12	24	29	1	6
5.500000	-1.800000	13	5	10	1	6
13.500000	-5.000000	14	21	26	1	6
19.500000	-13.600000	15	2	69	1	6
20.000000	-13.800000	16	3	70	1	6
6.500000	-1.800000	17	6	11	2	7
11.500000	-3.800000	18	16	21	2	7
16.500000	-5.800000	19	26	31	2	7
19.000000	-6.800000	20	31	36	2	7
24.000000	-8.800000	21	41	46	2	7
5.000000	-1.200000	22	3	8	2	7
7.500000	-2.200000	23	8	13	2	7
12.500000	-4.200000	24	18	23	2	7
15.000000	-5.200000	25	23	28	2	7
17.500000	-6.200000	26	28	33	2	7
5.500000	-1.400000	27	4	9	2	7
8.000000	-2.400000	28	9	14	2	7
10.500000	-3.400000	29	14	19	2	7
13.000000	-4.400000	30	19	24	2	7
15.500000	-5.400000	31	24	29	2	7
18.000000	-6.400000	32	29	34	2	7
11.000000	-3.600000	33	15	20	2	7
18.500000	-6.600000	34	30	35	2	7
9.500000	-3.000000	35	12	17	7	2

Fig. 3.7: Esempio di file di output, *profiler\_location.dat*.

Successivamente con il software *Surfer*, utilizzando il comando *post map* si sono rappresentati i punti di misura del file *profiler\_location.dat* [34].

La stessa cosa è stata effettuata sia per le misure dirette e reciproche sia per le misure passate al controllo dei reciproci.

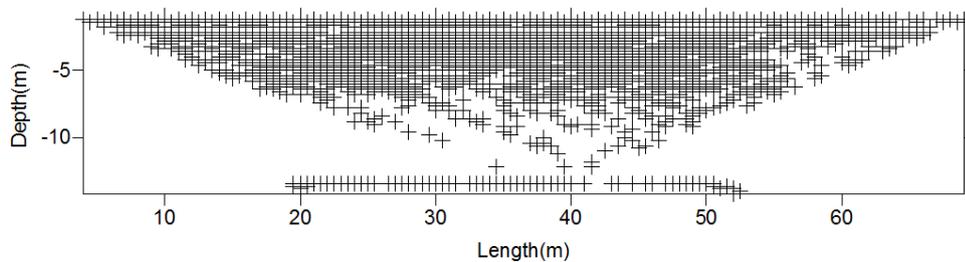


Fig. 3.8: Localizzazione nella sezione dei punti di misura di ciascun quadripolo. Immagine ottenuta con *Surfer*.

Oltre ai semplici punti di misura, si è voluto assegnare a ciascuno il valore di resistività apparente e per fare questo, si è usato lo stesso software eseguibile *Readprof*, modificato dal Dott. Boaga.

Anche in questo caso il file di input richiesto è *profiler.in* e il file di output *profiler\_location.dat* ma sono state aggiunte due colonne in più che contengono il valore di resistenza e il valore di resistività apparente di ciascun punto di misura.

Coordinate x e z		Posizione degli elettrodi (quadripolo)		Colonna dei valori di resistenza [ $\Omega$ ]	Colonna dei valori di resistività apparente [ $\Omega\text{m}$ ]
4.000000	-1.200000	1	6	15.93002	47.79006
6.500000	-2.200000	2	7	12 -2.425809	19.40647
9.000000	-3.200000	3	6	17 -0.1293012	17.06776
11.500000	-4.200000	4	6	22 -3.1639047E-02	14.68052
14.000000	-5.200000	5	6	27 -1.5236744E-02	16.71471
4.500000	-1.400000	6	6	3 8 3.045754	33.50329
7.000000	-2.400000	7	6	8 13 -0.8099789	17.00956
9.500000	-3.400000	8	6	13 18 -9.6385144E-02	17.25294
14.500000	-5.400000	9	6	23 28 -1.1716768E-02	14.85686
17.000000	-6.400000	10	6	28 33 -6.7175045E-03	16.04140
12.500000	-4.600000	11	6	19 24 -2.4587478E-02	16.62114
15.000000	-5.600000	12	6	24 29 -9.6767750E-03	14.08938
5.500000	-1.800000	13	6	5 10 -2.486877	24.86877
13.500000	-5.000000	14	6	21 26 -1.9214310E-02	18.09988
19.500000	-13.600000	15	6	69 2 -13.33336	106.6669
20.000000	-13.800000	16	6	70 3 -2.076478	76.82969
6.500000	-1.800000	17	7	6 11 -2.080743	20.80743
11.500000	-3.800000	18	7	16 21 -4.7734953E-02	14.32049
16.500000	-5.800000	19	7	26 31 -9.1379071E-03	15.17806
19.000000	-6.800000	20	7	31 36 -4.9805939E-03	14.80731
24.000000	-8.800000	21	7	41 46 -2.6385896E-03	19.34086
5.000000	-1.200000	22	7	3 8 14.20654	42.61962
7.500000	-2.200000	23	7	8 13 -2.483514	19.86811
12.500000	-4.200000	24	7	18 23 -3.1658854E-02	14.68971
15.000000	-5.200000	25	7	23 28 -1.2396900E-02	13.59940
17.500000	-6.200000	26	7	28 33 -6.8998793E-03	14.66914
5.500000	-1.400000	27	7	4 9 2.211461	24.32607
8.000000	-2.400000	28	7	9 14 -0.6188907	12.99671
10.500000	-3.400000	29	7	14 19 -0.1186307	21.23490
13.000000	-4.400000	30	7	19 24 -2.6883995E-02	15.13569
15.500000	-5.400000	31	7	24 29 -1.0336634E-02	13.10685
18.000000	-6.400000	32	7	29 34 -6.6869808E-03	15.96851
11.000000	-3.600000	33	7	15 20 -7.0393220E-02	16.54241
18.500000	-6.600000	34	7	30 35 -5.5541000E-03	14.82945
9.500000	-3.000000	35	7	12 17 -0.1585637	14.90499

Fig. 3.9: Esempio di file di output, *profiler\_location.dat* con la colonna dei valori di resistività apparente.

Per la rappresentazione grafica del risultato si è scelto ancora una volta il software *Surfer* e il comando *classed post map* [34].

Sono state realizzate in questo modo le pseudosezioni per ciascuna linea tomografica, sia per le misure dirette e indirette che per le misure passate al controllo dei reciproci.

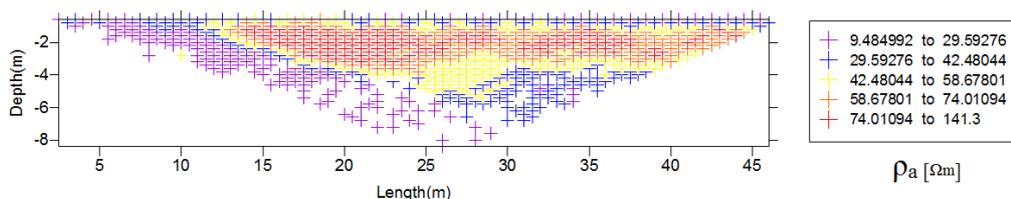


Fig. 3.10: Esempio di pseudosezione ottenuta con il valore di resistività apparente per ciascun punto di misura.

## 3.4 Software utilizzati per l'elaborazione ed l'inversione dei dati

### 3.4.1 IRIS2Profiler

*IRIS2Profiler* è un software eseguibile che permette di effettuare una scrematura nei dati a disposizione prima dell'inversione.

Accoppia le misure dirette alle relative misure reciproche e opera una media tra le due misure di resistenza. Fissata una percentuale di tolleranza (5%), esclude tutte le coppie che superano tale soglia e mantiene le altre (si veda formula 2.1).

Il software richiede in input il file "grezzo" dei dati acquisiti in campagna con estensione *.txt*.

Una volta che viene lanciato l'eseguibile *IRIS2Profiler*, fornirà una serie di file in output, tra questi:

- *reciprocal.dat*: che visualizza la lista delle misure dirette e reciproche di ciascun quadripolo, contiene i valori di resistenza e, per ciascuno, comunica se sono passate o meno al controllo dei reciproci effettuato dal software.
- *profiler.in*: file richiesto per la successiva inversione con *ProfileR* (Binley 2016) (si veda sezione 3.4.2). *IRIS2Profiler* fornisce automaticamente in output il file pronto per l'inversione con tutti i quadripoli passati al controllo dei reciproci.

### 3.4.2 ProfileR (Binley 2016)

Il codice *ProfileR* è stato realizzato dal Professor A. Binley dell'Università di Lancaster (UK) [2].

(<http://www.es.lancs.ac.uk/people/amb/Freeware/Profiler/Profiler.htm>)

*ProfileR* (Binley 2016) è un software di inversione usato per ricostruire la distribuzione bidimensionale della resistività basata sul calcolo del flusso di corrente tridimensionale con una maglia quadrata agli elementi finiti [2].

Permette quindi di tracciare un profilo di resistività per uno stendimento superficiale di elettrodi.

La soluzione inversa è basata su una funzione regolare combinata con i minimi quadrati pesati, un'inversione alla Occam [2] (si veda sezione 2.2.2).

*ProfileR* (Binley 2016) richiede un file di input (*profiler.in*) per generare una griglia di elementi finiti. Il *profiler.in* viene costruito sulla base alle modalità di acquisizione nel sito di interesse.

Si può specificare in numero di elettrodi e la loro spaziatura, le coordinate degli elettrodi alle estremità dello stendimento, il tipo di array usato e se si vuole procedere con modello diretto o inverso. È possibile anche rappresentare variazioni topografiche là dove sia necessario, specificando la posizione altimetrica degli elettrodi.

La griglia generata consiste in un'immagine in primo piano ed una seconda immagine invisibile all'utente. La prima immagine corrisponde all'area investigata alla quale è associata la variazione di resistività che si ottiene dall'inversione mentre, la seconda immagine, di sfondo, viene usata per rappresentare le condizioni al contorno dell'area in esame [2].

La griglia viene generata con due elementi finiti tra gli elettrodi in orizzontale, nell'immagine in primo piano. Nell'immagine di sfondo, la griglia si estende a destra e a sinistra dello stendimento degli elettrodi usando elementi ad incremento esponenziale.

La regione è parametrizzata i termini di blocchi di resistività equivalente e nello sfondo trasparente ciascun blocco è definito da un gruppo 2x2 di elementi [2].

Una volta che viene lanciato l'eseguibile *ProfileR* (Binley 2016), fornirà una serie di file in output:

- *profiler.log*: contiene la registrazione sequenziale e cronologica delle operazioni eseguite, le iterazioni.
- *profiler.blm*: contiene le coordinate orizzontali e verticali della regione in primo piano (posizioni espresse in metri).
- *electrodes.dat*: contiene le coordinate degli elettrodi dello stendimento
- *profiler.dat*: contiene i valori di resistività ottenuti dalla modellazione inversa.
- *profiler.err*: Contiene cinque colonne che sono composte da errore dei dati normalizzato, resistività apparente osservata e misurata e i pesi dei dati originali e finali.

Come si può dedurre facilmente *ProfileR* (Binley 2016) non ha un interfaccia grafica e quindi il file in output deve essere trattato con altri software che permettono la visualizzazione grafica e quindi la più facile comprensione del risultato ottenuto.

### 3.4.3 Readprof

*Readprof* è un software eseguibile che permette di localizzare i punti dove è stata effettuata la misurazione. Posiziona nello spazio il punto di misura relativo al quadripolo di acquisizione. Si tratta quindi di un semplice eseguibile di supporto nei calcoli da effettuare.

In input richiede il file *profiler.in* e in output fornisce un file, denominato *profiler\_location.dat*, che contiene le coordinate del punto di misura e la posizione dei quattro elettrodi del quadripolo.

In questo lavoro di tesi è stato usato inoltre l'eseguibile *Readprof*, modificato dal Dottor. Boaga, affinché il file di output fornisca in aggiunta anche i valori di resistenza e di resistività apparente per ciascun quadripolo dello stendimento.

### 3.4.4 Surfer

*Surfer* è un software a pagamento sviluppato dalla compagnia americana GOLDEN SOFTWARE, molto utile alla rappresentazione grafica dei dati e largamente utilizzato in vari ambiti quali: idrogeologia, geologia, geofisica, ingegneria, archeologia, biologia...

([www.goldensoftware.com/products/surfer](http://www.goldensoftware.com/products/surfer))

Questo software permette di convertire facilmente dati spaziali in immagini di interpolazione anche tridimensionali [34].

Per prima cosa è necessario creare una griglia con i dati che si vogliono rappresentare graficamente, assegnando dei valori agli assi (xyz) ed è possibile scegliere tra diversi metodi di interpolazione dei dati operando sui vari parametri a disposizione. Successivamente si rappresenta l'immagine che ha come base il file *grid* creato precedentemente [34].

*Surfer* permette la massima personalizzazione dell'immagine ottenuta in tutti i suoi elementi, al fine di raggiungere il risultato desiderato di più facile comprensione.

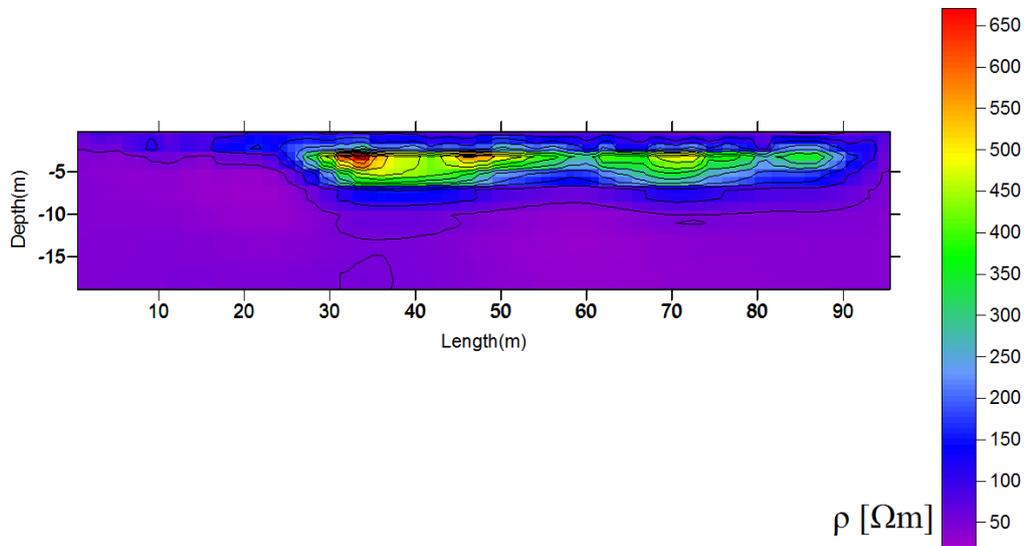


Fig. 3.11: Esempio di sezione di resistività, ottenuta con *Surfer*.

## **Capitolo 4**

### **Risultati ottenuti e discussioni**

Come risultato ottenuto dall'elaborazione e inversione dei dati si è creata una serie di sezioni, per ciascuna linea tomografica, che mostrano la variazione di resistività del dominio oggetto di studio.

Tramite il procedimento seguito, spiegato nel precedente capitolo, si è potuto confrontare le varie sezioni ottenute dall'inversione delle misure dirette e reciproche con le sezioni ottenute dall'inversione delle misure che hanno passato il controllo dei reciproci con errore del 5%.

In questo modo è stato possibile il confronto visivo delle sezioni, risultato dell'applicazione della tecnica di acquisizione dei reciproci, con quelle ottenute tramite la più tradizionale acquisizione delle misure, indagando ogni quadripolo un sola volta (sorvolando quindi sull'acquisizione dei reciproci).

È bene sottolineare che non sempre i risultati sono stati completamente soddisfacenti, soprattutto per le misure provenienti dalla linea L1 del cantiere della nuova stazione di Bologna, in quanto si trattava di una zona particolarmente problematica.

#### **4.1 Stazione di Bologna**

I dati utilizzati in questo lavoro di tesi provengono da due linee tomografiche effettuate nel cantiere della nuova stazione ferroviaria dell'Alta Velocità di Bologna (linea L1 e linea L2). Studio atto a indentificare la presenza di contaminante nel sottosuolo.

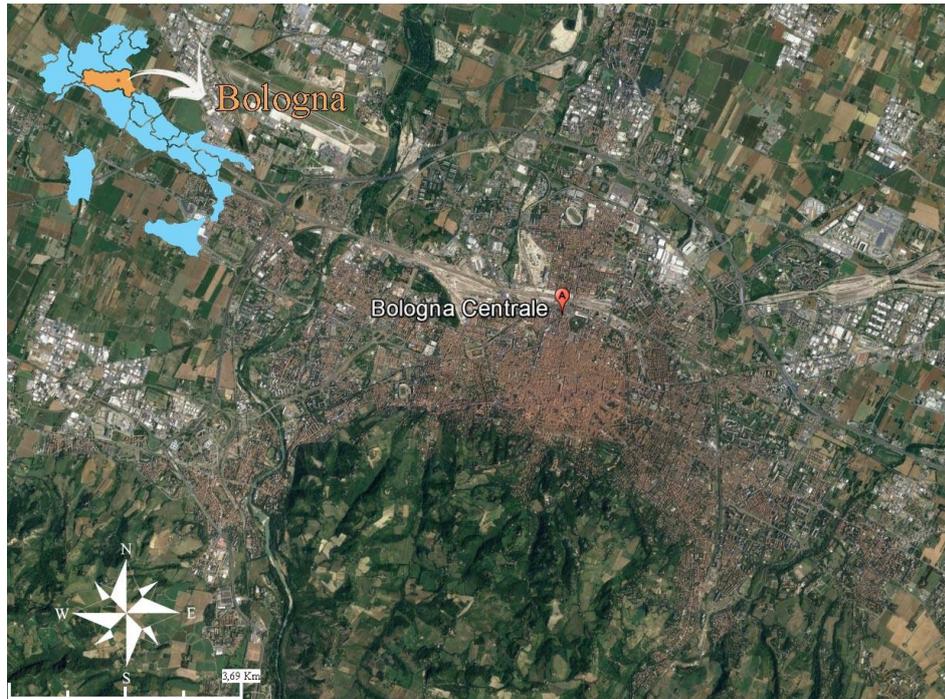


Fig. 4.1: Localizzazione del sito: Stazione di Bologna. Immagine tratta da Google Earth.

Si tratta di due stendimenti da 72 elettrodi ciascuno, posti alla distanza di 1m l'uno dall'altro con l'utilizzo dell'array Dipolo Dipolo. La profondità di investigazione, circa 1/4 della lunghezza dello stendimento, è di 15 metri.

Lo studio ha evidenziato una notevole differenza tra i profili ottenuti tramite l'inversione delle misure dirette e inverse, e quello ottenuto tramite l'inversione di misure passate al controllo dei reciproci.

Si tratta però di un sito particolarmente problematico: zona rumorosa e difficoltà di collegamento degli elettrodi e questo ha avuto ripercussione sulle misurazioni e quindi sui dati a disposizione.

Vi erano infatti numerosi quadripoli con valore di resistenza di 999 K $\Omega$  a causa del cattivo collegamento dell'elettrodo, valori che non sono stati inclusi nella creazione di file *profiler.in* delle misure dirette e reciproche [12].

#### 4.1.1 Linea d'acquisizione L1

-Puntando l'attenzione sulla figura 4.2, nella prima sezione, ottenuta dall'inversione di tutte le misure dirette, si osserva una bassa resistività complessiva con pochi

punti che assumono valori più alti a circa 2-3 metri dalla superficie.

I punti a maggiore resistività sono più numerosi e più evidenti nel secondo profilo e si estendono in profondità con resistività bassa.

Nella terza sezione si osserva ancora una bassa resistività complessiva in tutto il dominio, con alcuni punti di resistività maggiore sempre a circa 2-3 metri di profondità e due corpi relativamente più resistivi a profondità maggiore.

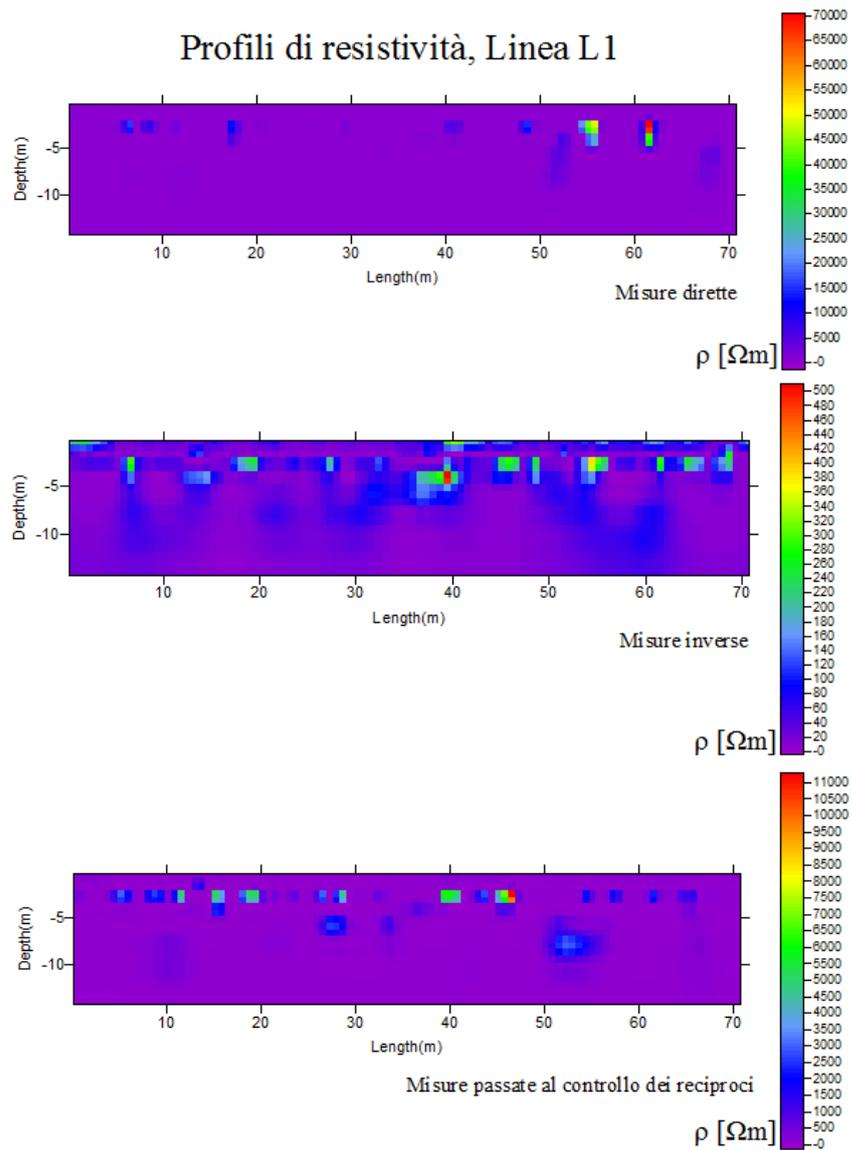


Fig. 4.2: Sezioni di resistività (linea L1 della stazione di Bologna).

Nelle prime due sezioni ottenute senza l'acquisizione dei reciproci si potrebbe cadere facilmente in errore, in quanto non si rileva la presenza dell'anomalia di resistività in profondità, che invece si osserva nella terza sezione.

-Dalle sezioni con i punti dove è stata effettuata la misurazione (si veda la figura 4.3) si osserva che, nelle prime due immagini, i punti ricoprono l'intero dominio di forma triangolare, si avranno così molte più informazioni riguardo la resistività del sottosuolo e una maggiore profondità di investigazione.

Nella terza immagine i punti di misura sono in numero notevolmente più basso e, per questo, il dominio in analisi si riduce, soprattutto nella zona a profondità maggiore e alle due estremità.

La linea di punti di misura nella parte bassa della sezione è propria del tipo di array scelto per l'acquisizione (Dipolo Dipolo).

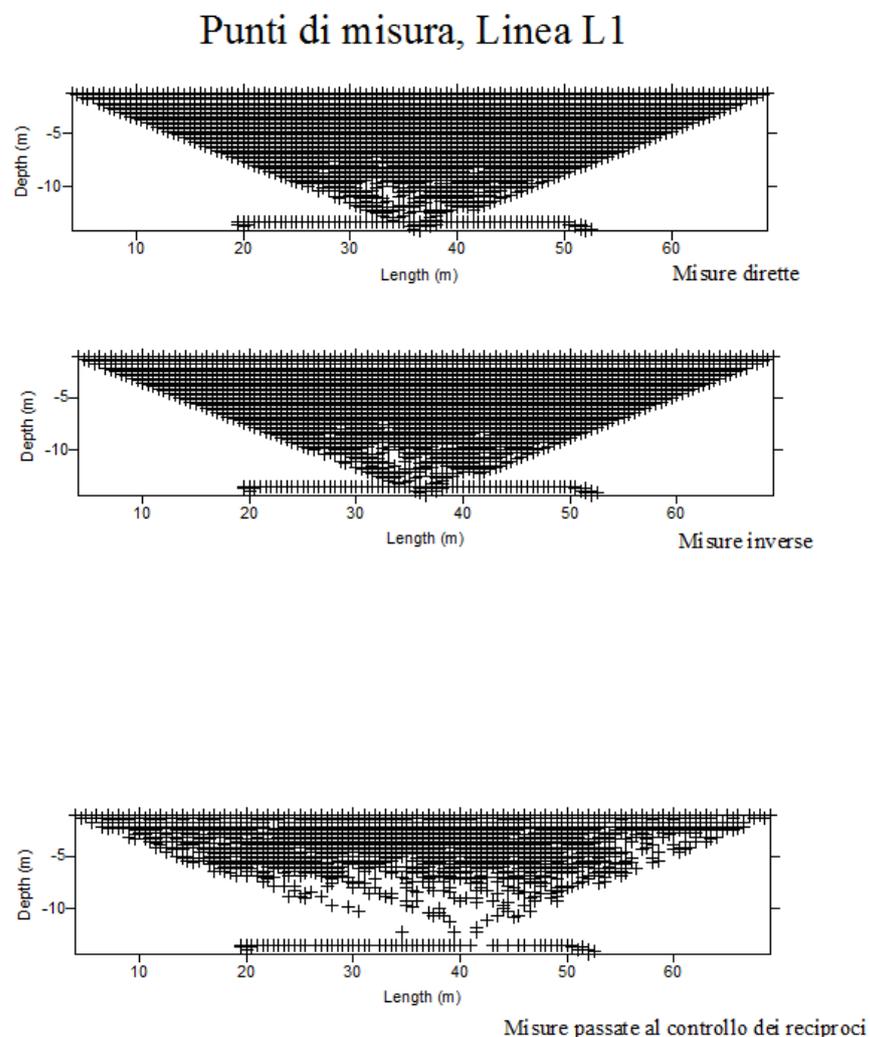


Fig. 4.3: Sezioni con i punti di misura (linea L1 della stazione di Bologna).

-Dalle prime due pseudosezioni (si veda figura 4.4) si osserva come siano presenti due corpi eterogeni, particolarmente estesi, di resistività maggiore dell'intorno, localizzati nella parte centrale del dominio.

Nella terza immagine, avendo un numero inferiore di punti di misura a disposizione, la profondità di investigazione è ridotta ma si riconoscono lo stesso i corpi più resistivi.

In tutte e tre le pseudosezioni si osserva una fascia resistiva prossima alla superficie.

### Punti di misura con valore di resistività apparente Linea L1

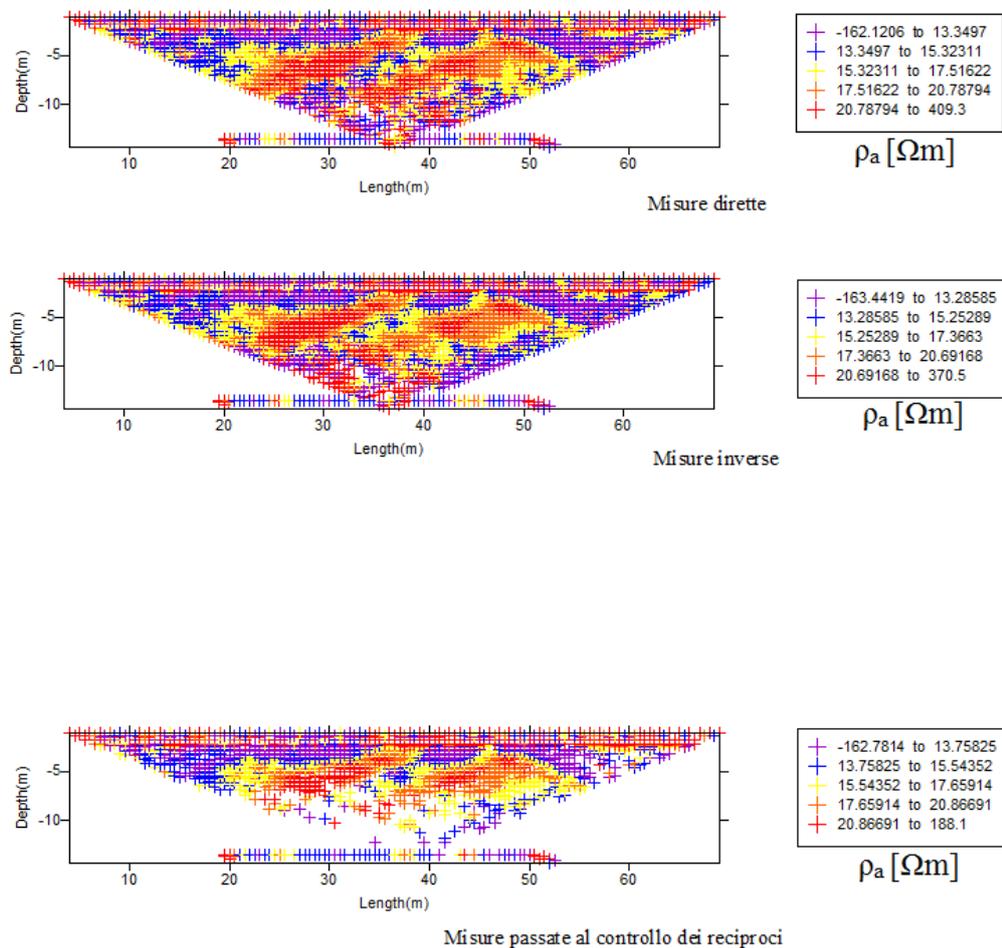


Fig. 4.4: Sezioni con valori di resistività apparente per ogni punto di misura (linea L1 della stazione di Bologna).

#### **4.1.2 Linea d'acquisizione L2**

-Focalizzando l'attenzione sulla figura 4.5, nella prima sezione, si osserva sempre una resistività complessiva bassa e una fascia non continua in superficie che assume valori più alti.

Alla profondità di circa 5 metri si rileva una zona a resistività maggiore del contorno, estesa orizzontalmente.

Si ripete, anche nella seconda sezione, una resistività generale molto bassa con alcuni punti isolati a circa 3 metri di profondità, con valori più alti.

Si osserva anche una zona a resistività elevata, a profondità compresa tra 4 e 10 metri localizzata sulla sinistra della sezione.

Nella terza sezione si può distinguere ancora una volta una zona a resistività maggiore dell'intorno a profondità tra 4 e 6 metri più estesa di quella del primo profilo e una fascia non continua, prossima alla superficie, con valore elevato di resistività.

In questa linea tomografica si osserva maggiormente che, il mancato utilizzo dei reciproci durante le acquisizioni tomografiche in campo, avrebbe portato alla sottovalutazione del corpo resistivo più profondo, particolarmente evidente nella terza immagine.

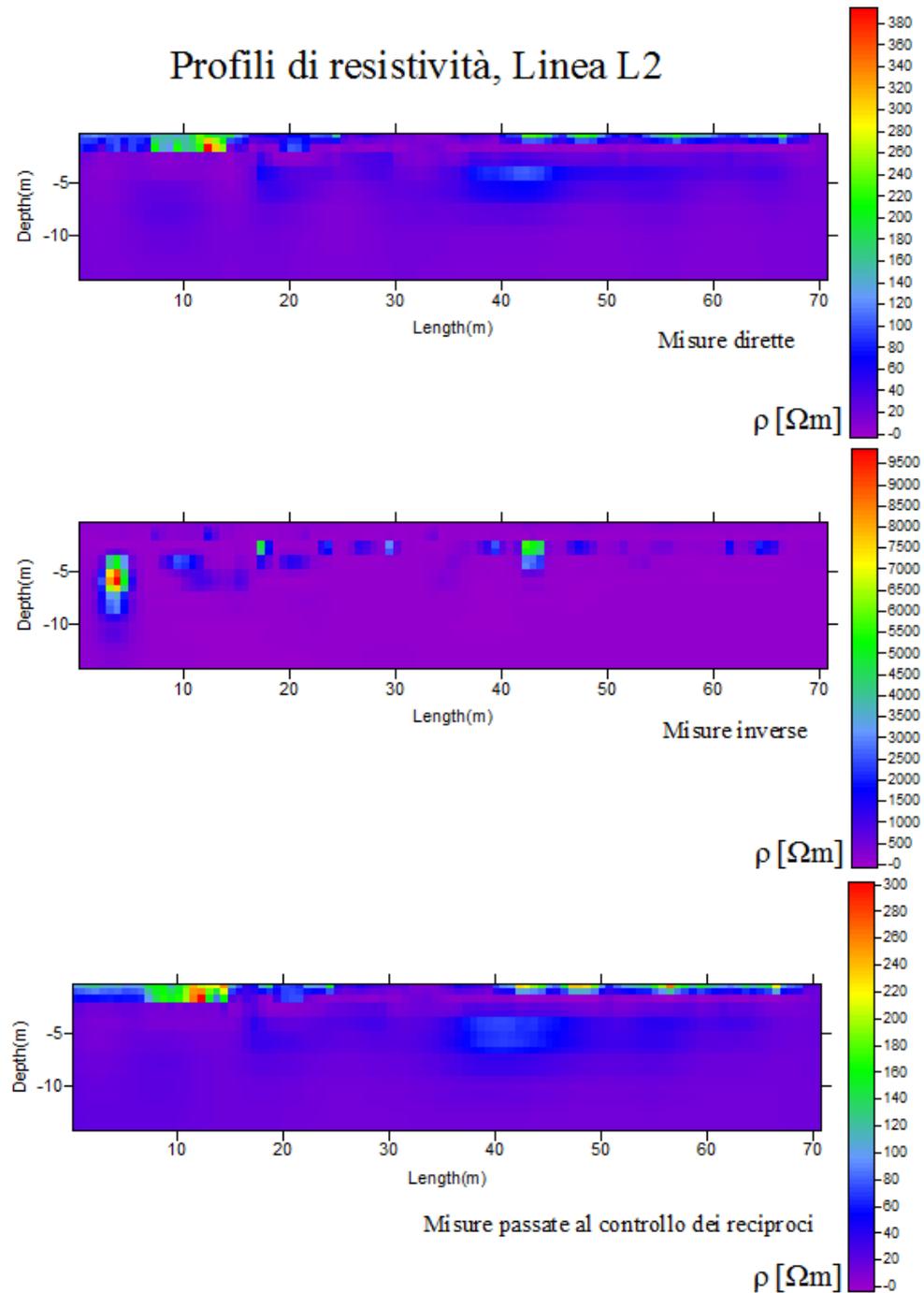


Fig. 4.5: Sezioni di resistività (linea L2 della stazione di Bologna).

-Dalle sezioni con i punti dove è stata effettuata la misurazione, (si veda la figura 4.6) si ottiene il medesimo risultato della linea tomografica precedente. Il numero di punti è notevolmente minore se si effettua il controllo dei reciproci sulle misure, al contrario se si utilizzano solo le misure dirette (o inverse), il numero di dati a disposizione è maggiore.

## Punti di misura, Linea 2

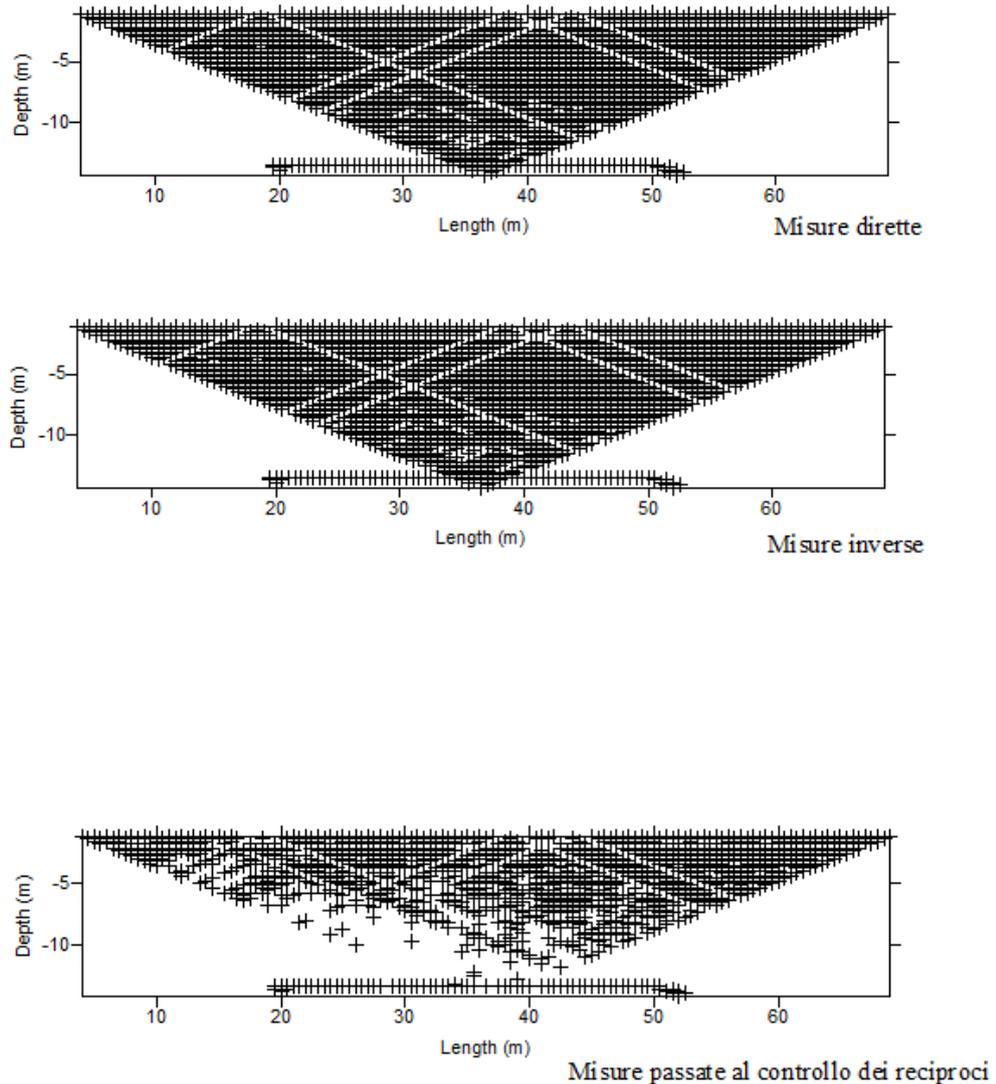


Fig. 4.6: Sezioni con la localizzazione dei punti di misura (linea L2 della stazione di Bologna).

-Nelle pseudosezioni, ottenute con i valori di resistività apparente per ogni punto di misura (si veda figura 4.7), si osserva ancora una volta, nella parte centrale del dominio, un corpo molto esteso più resistivo del contorno e una fascia più resistiva prossima alla superficie.

Come per la linea L1, il corpo è di dimensioni più contenute nella terza immagine, ottenuta dalle misure passate al controllo dei reciproci dell'eseguibile IRIS2Profiler.

## Punti di misura con valore di resistività apparente Linea L2

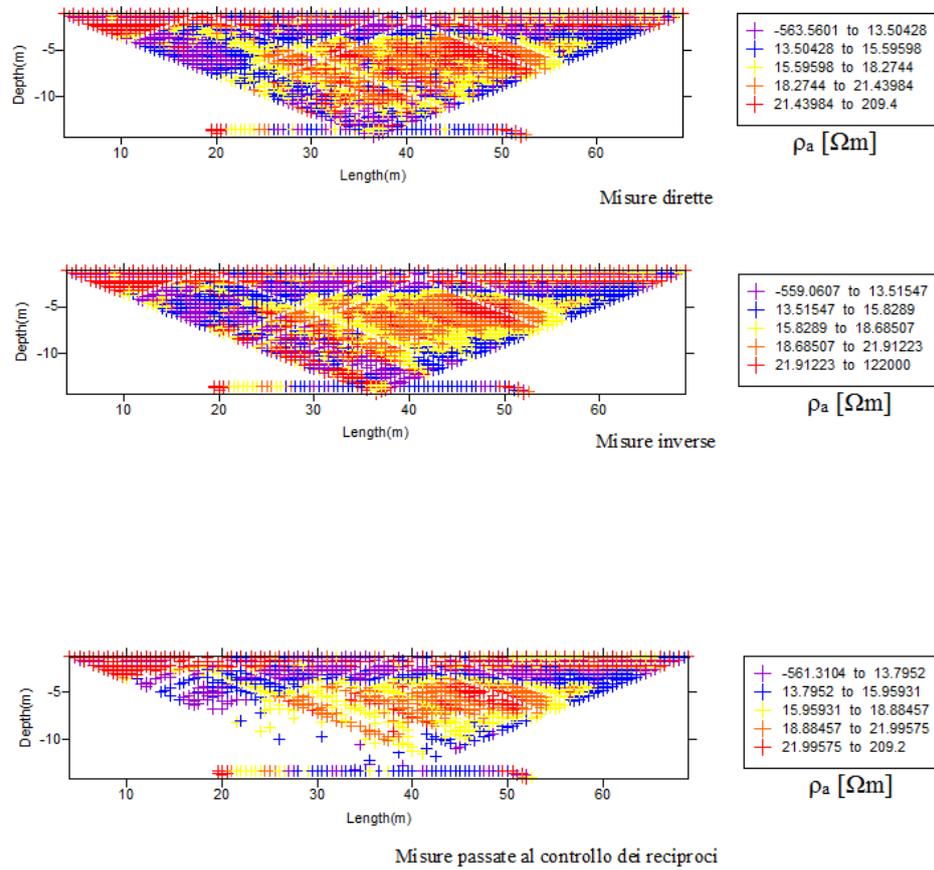


Fig. 4.7: Sezioni con valori di resistività apparente per ogni punto di misura (linea L1 della stazione di Bologna).

## 4.2 Argine del fiume Frassine (PD)

Ulteriori dati utilizzati per questo lavoro di tesi provengono da alcune tomografie elettriche effettuate lungo l'argine del fiume Frassine all'altezza del comune di Megliadino San Fidenzio (PD). Si tratta di uno studio del 2014 atto alla caratterizzazione di una struttura arginale ricostruita in tempi diversi che presentava infiltrazioni in diversi punti [10].

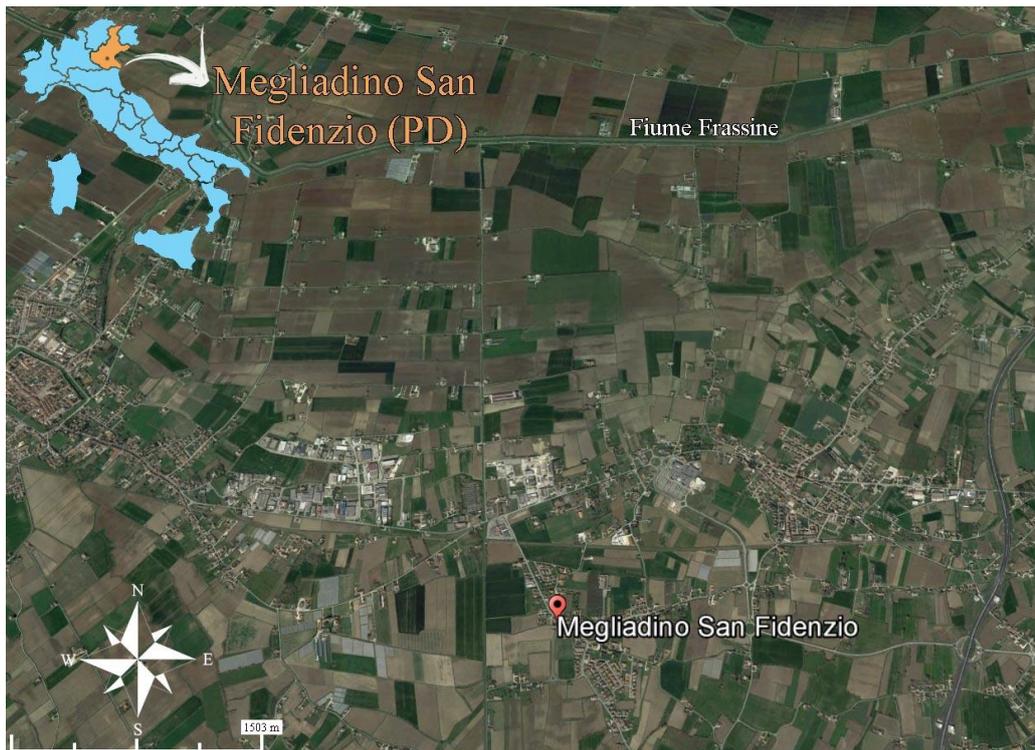


Fig. 4.8: Localizzazione del sito: Megliadino San Fidenzio (PD). Immagine tratta da Google Earth.

Sono state effettuate due linee tomografiche longitudinali di 48 elettrodi con spaziatura di 1m (profondità di investigazione di circa 10 m) e 2 m (profondità di investigazione di circa 20 m) con array Dipolo Dipolo e Wenner-Schlumberger, acquisite nei mesi di Ottobre e Novembre 2014 e Febbraio 2015 [10].

Dalla studio effettuato sui dati, si evince che le sezioni tomografiche ottenute dall'inversione di misure dirette e inverse sono molto diverse da quelle ottenute utilizzando i dati passati al controllo dei reciproci.

Nonostante in ogni caso venga evidenziata la presenza di un corpo più resistivo del contorno, la sua estensione varia sensibilmente e questo ha ovviamente influenza sulla corretta interpretazione dei risultati ottenuti.

Ancora una volta si osserva che effettuare l'acquisizione dei reciproci in campagna, porta a risultati molto diversi rispetto ai risultati ottenuti dal mancato utilizzo.

### 4.2.1 Misurazioni di Ottobre

-Dai profili ottenuti dall'inversione dei dati si osserva che si tratta di una zona ad elevata conducibilità e con evidente presenza di un corpo eterogeneo più resistivo. Dalla Linea 1, più di dettaglio (si veda la figura 4.9), si osserva che il corpo più resistivo assume un'estensione molto diversa nelle tre sezioni. Nella prima è molto ridotto e concentrato, nella seconda più esteso ed eterogeneo mentre nella terza le dimensioni ricoprono quasi l'intera sezione.

Anche nella Linea 2 (si veda la figura 4.10), che ha maggiore profondità di investigazione, si può individuare la presenza del corpo resistivo.

Dalle prime due immagini, la variazione di estensione è minima ma nella terza sezione il corpo assume dimensioni sensibilmente maggiori.

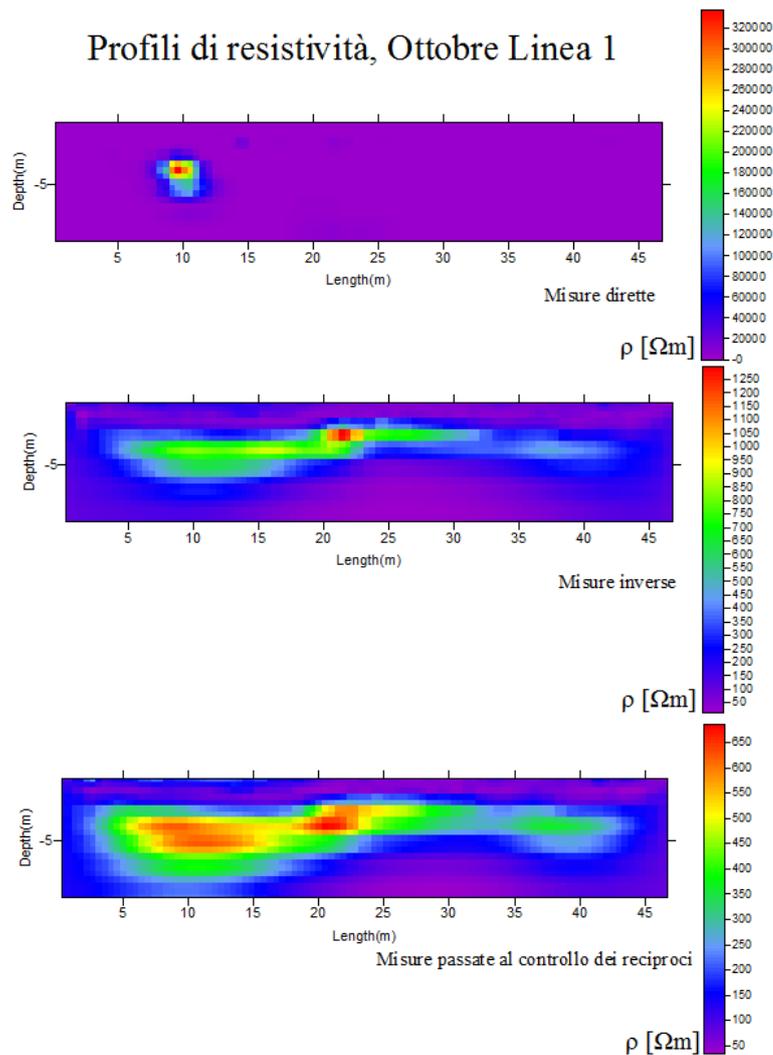


Fig. 4.9: Sezioni di resistività (linea 1, misurazioni di Ottobre).

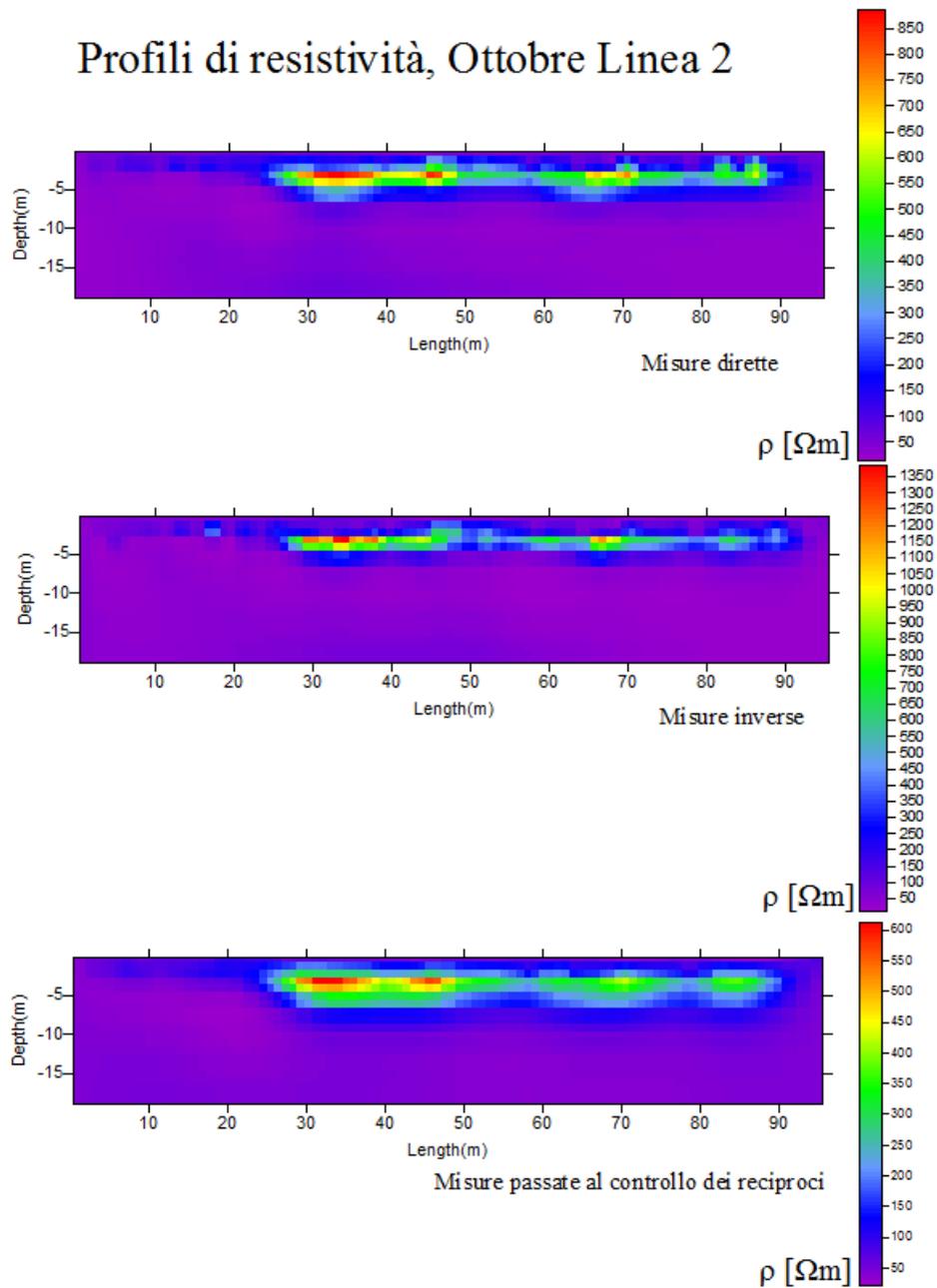


Fig. 4.10: Sezioni di resistività (linea 2, misurazioni di Ottobre).

-Puntando l'attenzione sulle figure 4.11 e 4.12, come per il caso della stazione di Bologna, i punti di misura, nelle prime due immagini di entrambe le linee di acquisizione, ricoprono l'intero dominio di forma triangolare, si avranno così molte più informazioni riguardo la resistività del sottosuolo e una maggiore profondità di investigazione.

Nella terza immagine i punti di misura sono in numero notevolmente più basso e, per questo, il dominio in analisi si riduce soprattutto nella zona a profondità maggiore e alle estremità.

### Punti di misura, Ottobre Linea 1

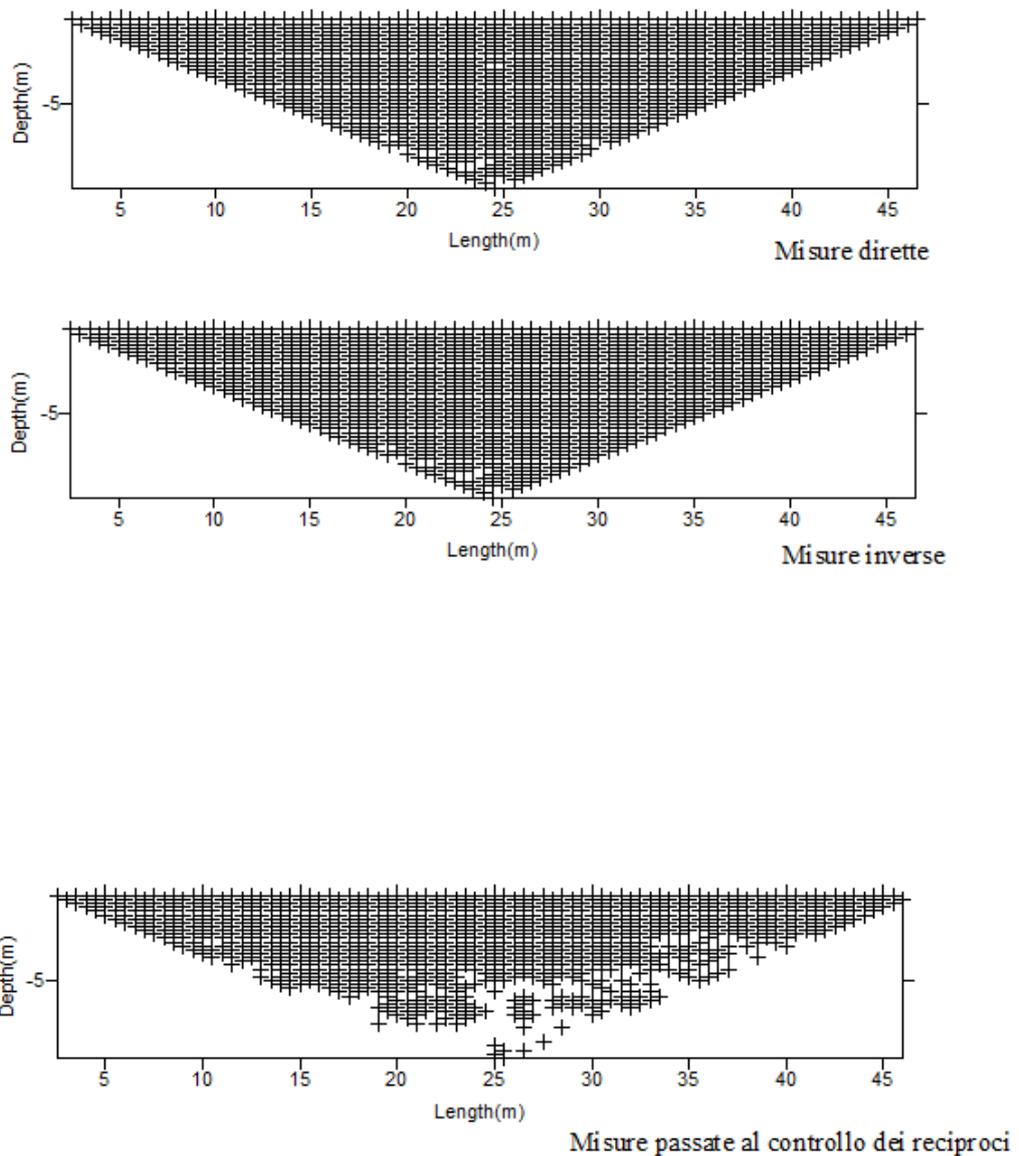


Fig. 4.11: Sezioni con la localizzazione dei punti di misura (linea 1, misurazioni di Ottobre).

## Punti di misura, Ottobre Linea 2

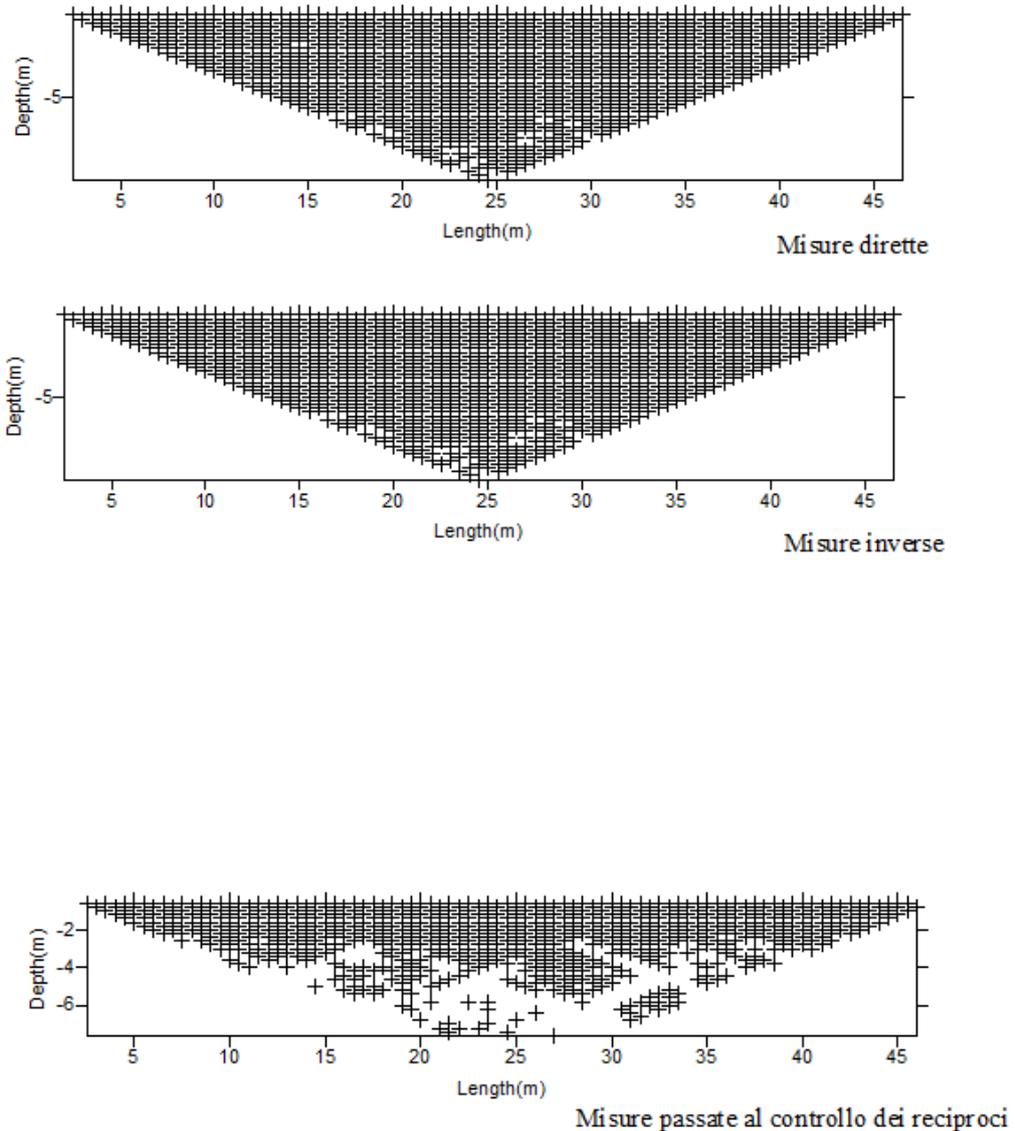


Fig. 4.12: Sezioni con la localizzazione dei punti di misura (linea 2, misurazioni di Ottobre).

-Nelle pseudosezioni, con il valore di resistività apparente per ciascun punto di misura (si veda figura 4.13 e 4.14), si osserva la presenza di un corpo resistivo molto esteso che occupa gran parte del dominio triangolare della pseudosezione. In entrambe le linee di Ottobre, la posizione e la forma del corpo è variabile. Nella terza immagine, con un numero di punti di misura ridotto, il corpo resistivo ha dimensioni leggermente più contenute rispetto alla prime due.

### Punti di misura con valore di resistività apparente Ottobre Linea 1

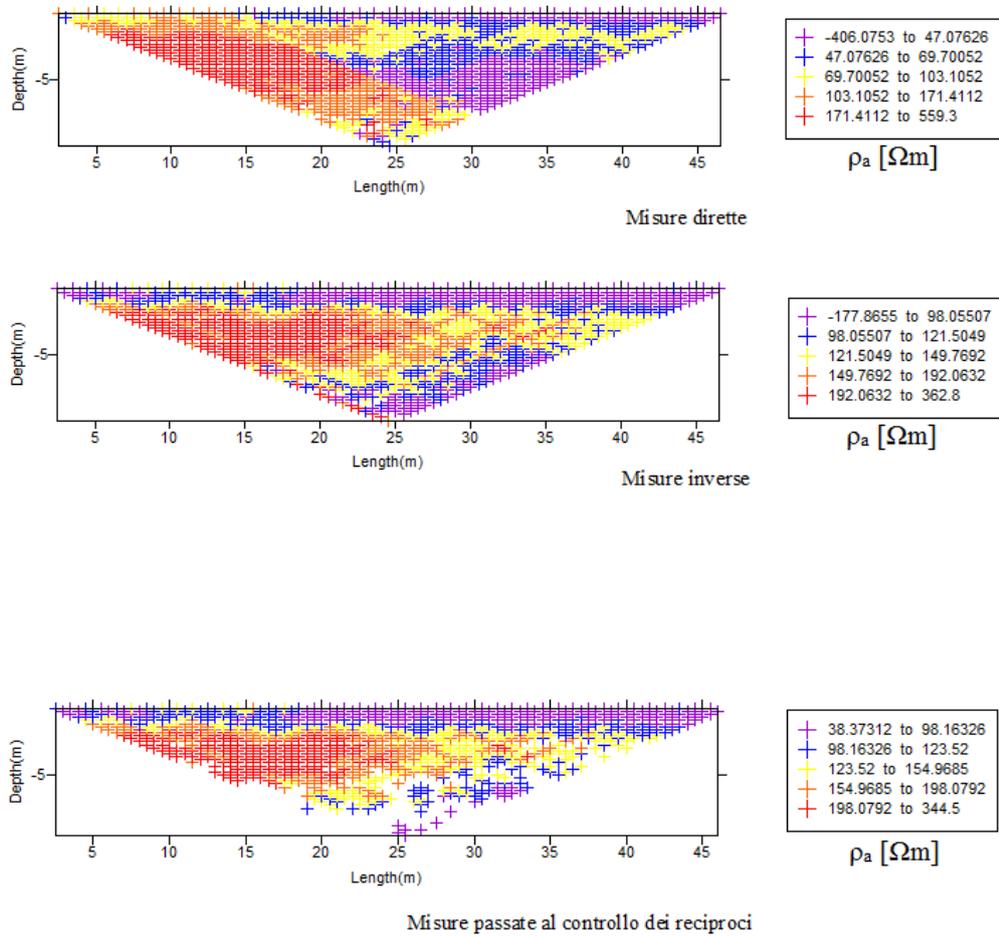


Fig. 4.13: Sezioni con valori di resistività apparente per ogni punto di misura (linea 1, misurazione di Ottobre).

## Punti di misura con valore di resistività apparente Ottobre Linea 2

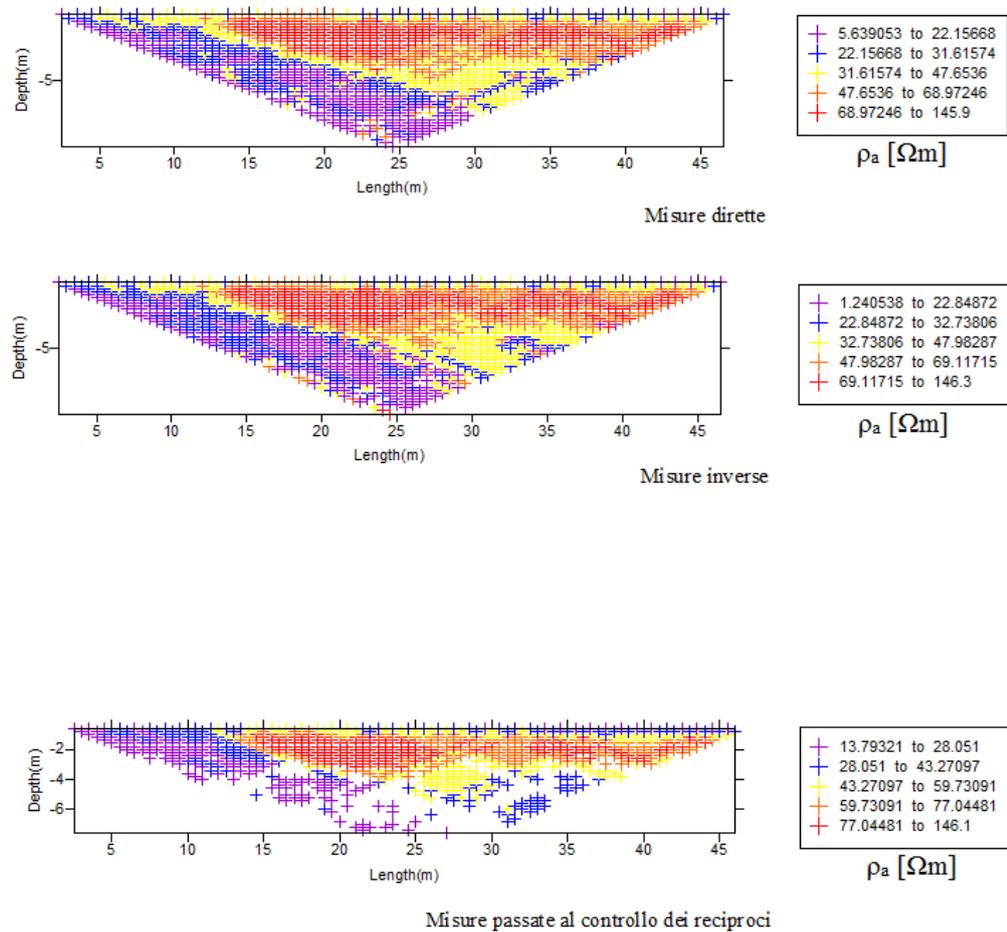


Fig. 4.14: Sezioni con valori di resistività per ogni punto di misura (linea 2, misurazione di Ottobre).

### 4.2.2 Misurazioni di Novembre

-Come per le due linee tomografiche di Ottobre, dalle figure 4.15 e 4.16 si osserva che si tratta di una zona ad elevata conducibilità e con evidente presenza di un corpo eterogeneo più resistivo che si estende orizzontalmente.

In questo caso, nelle sezioni ottenute dall'inversione delle misure dirette e inverse, la differenza è minima quasi nulla.

Nella terza sezione invece si osserva una visibile differenza di estensione del corpo resistivo.

## Profili di resistività, Novembre Linea 1

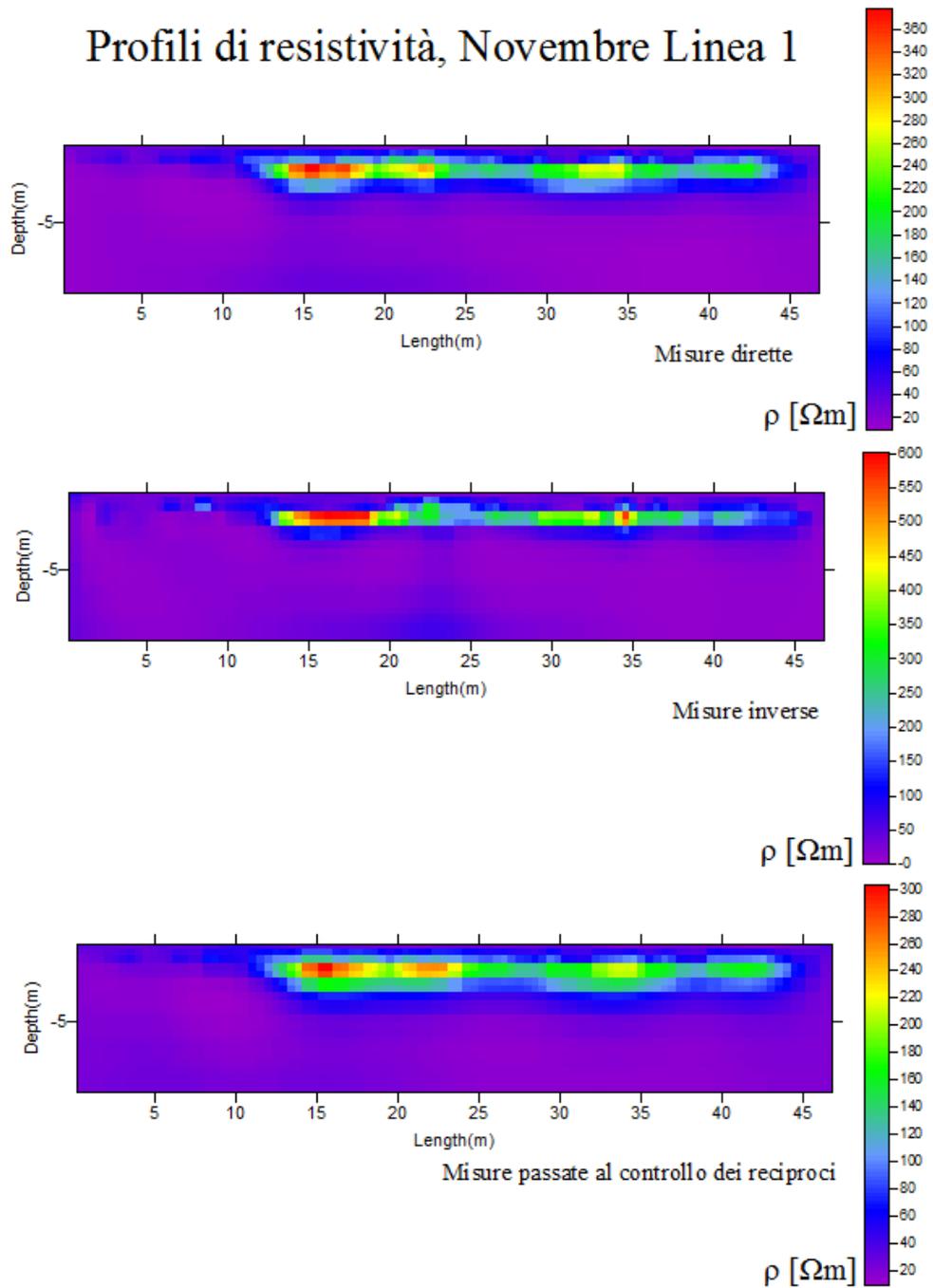


Fig. 4.15: Sezioni di resistività (linea 1, misurazioni di Novembre).

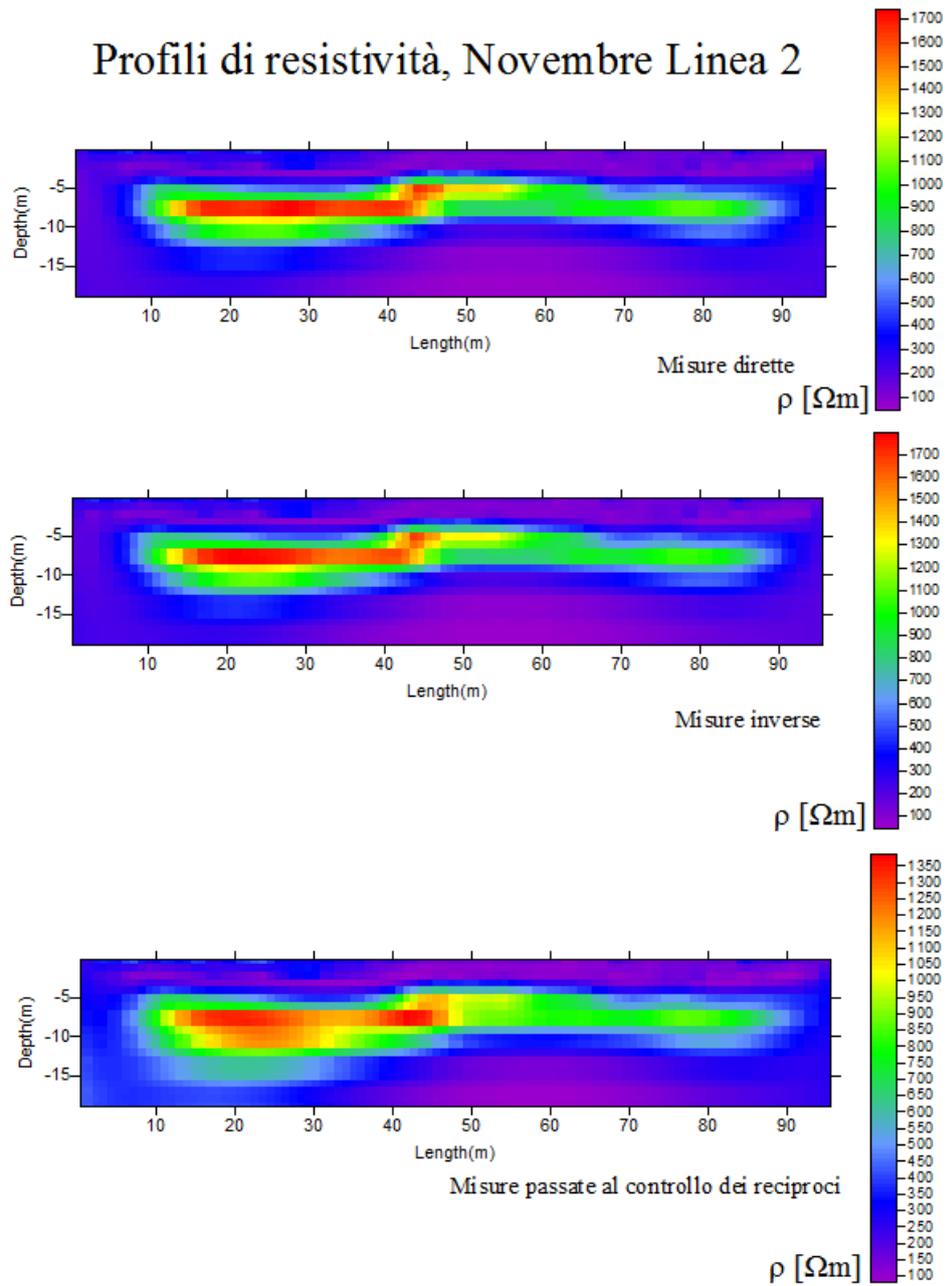
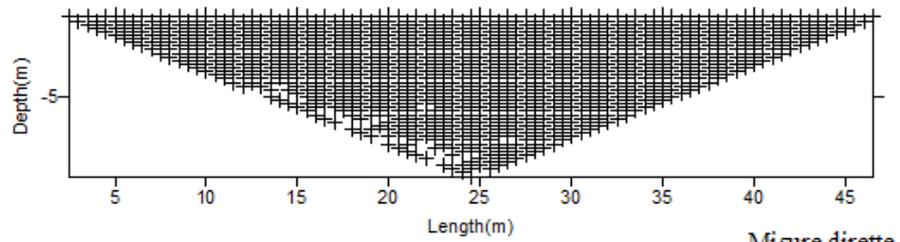


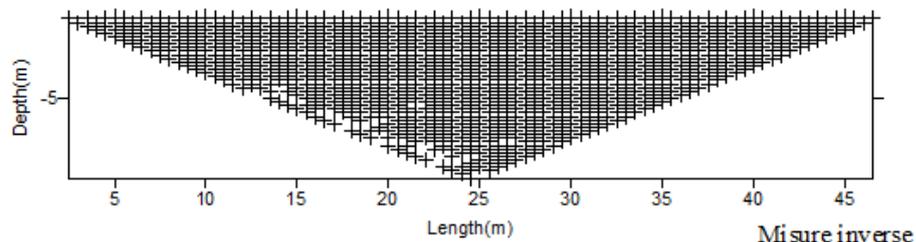
Fig. 4.16: Sezioni di resistività (linea 2, misurazioni di Novembre).

-Ancora una volta si osserva che il numero dei punti di misura a disposizione nelle sezioni con le misure dirette e inverse è maggiore del numero di punti delle sezioni ottenute dalle misure passate al controllo dei reciproci (si vedano le figure 4.17 e 4.18).

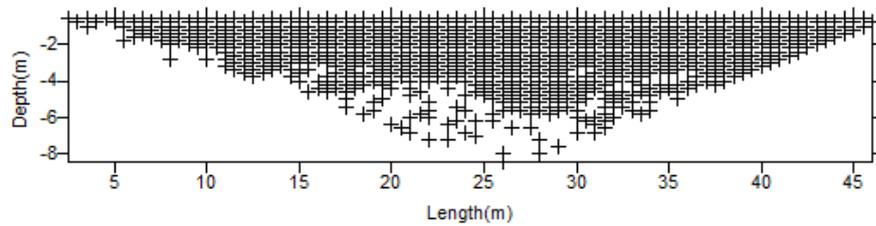
## Punti di misura, Novembre Linea 1



Misure dirette



Misure inverse



Misure passate al controllo dei reciproci

Fig. 4.17: Sezioni con la localizzazione dei punti di misura (linea 1, misurazioni di Novembre).

## Punti di misura, Novembre Linea 2

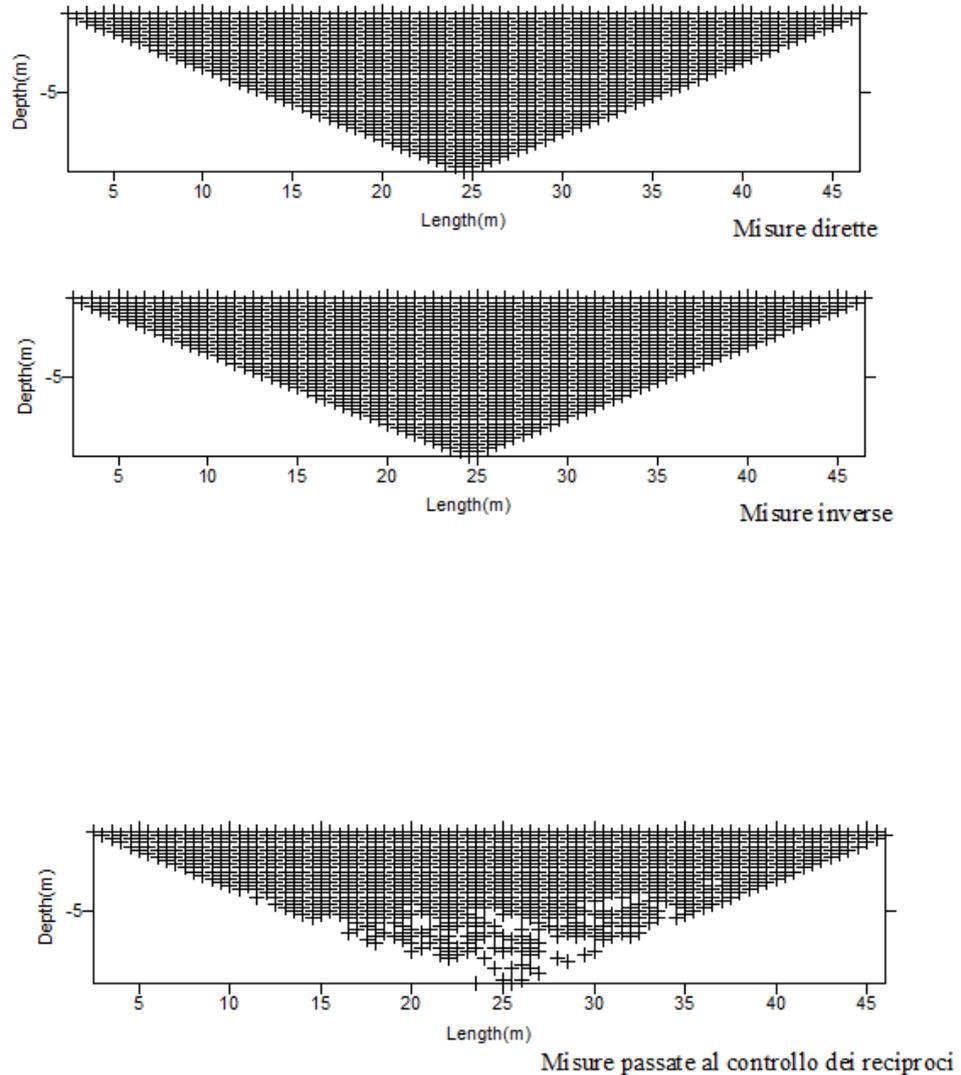


Fig. 4.18: Sezioni con la localizzazione dei punti di misura (linea 1, misurazioni di Novembre).

-Nelle pseudosezioni, con il valore di resistività apparente per ciascun punto di misura (si veda figura 4.19 e 4.20), si rileva la presenza di un corpo resistivo molto esteso che occupa gran parte del domino triangolare.

In entrambe le linee di Novembre si osserva una similitudine tra le prime due immagini. Nella terza immagine, con un numero di punti di misura ridotto, il corpo resistivo ha dimensioni leggermente più contenute rispetto alla prime due in quanto il numero di punti di misura è minore, come già affermato in precedenza.

### Punti di misura con valore di resistività apparente Novembre Linea 1

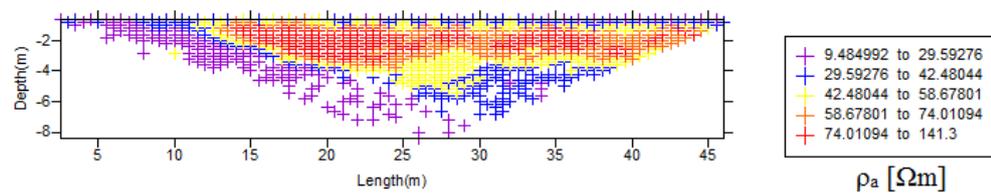
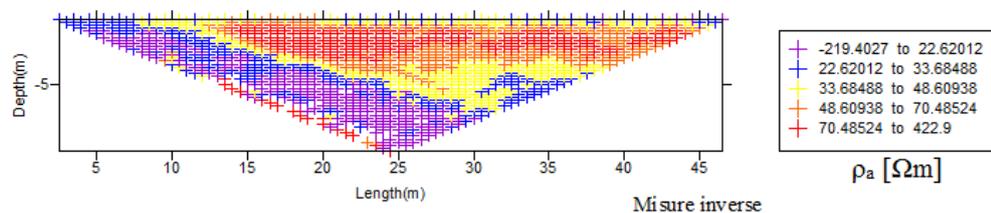
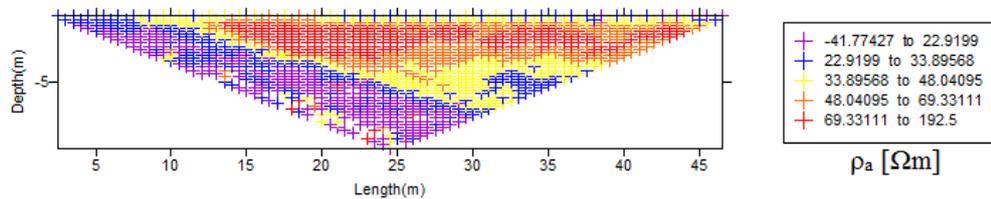


Fig. 4.19: Sezioni con valori di resistività apparente per ogni punto di misura (linea 1, misurazione di Novembre).

## Punti di misura con valore di resistività apparente Novembre Linea 2

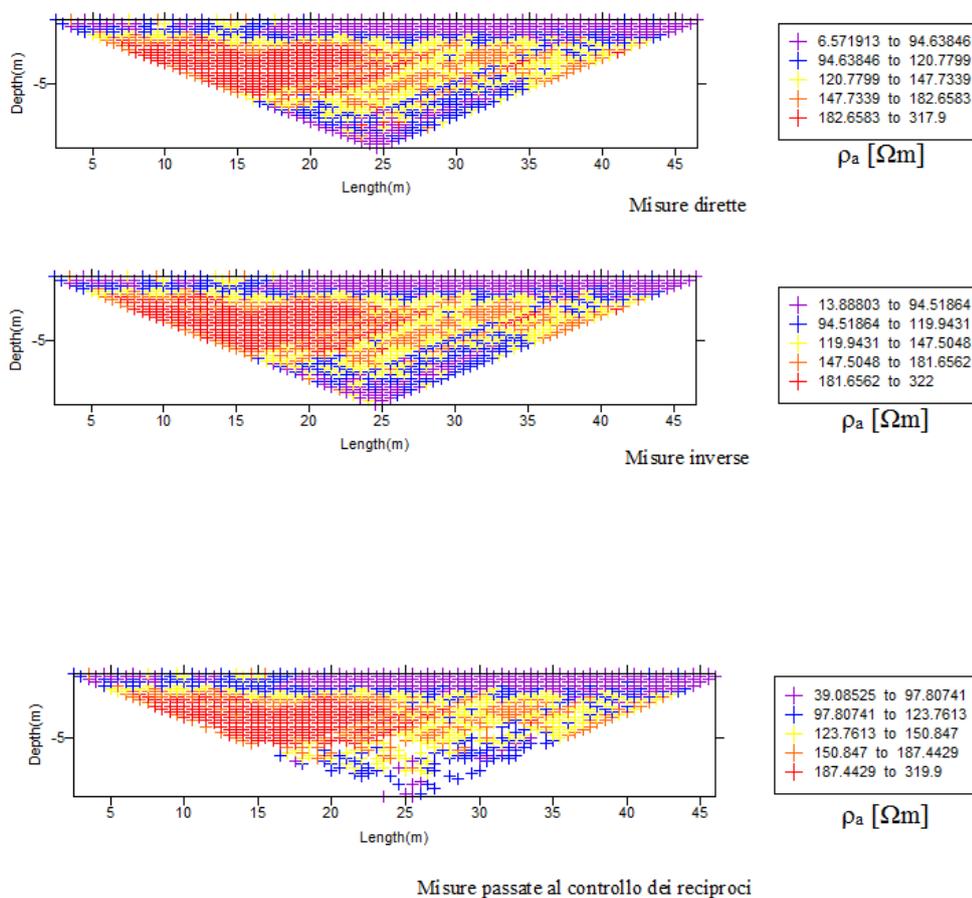


Fig. 4.20: Sezioni con valori di resistività apparente per ogni punto di misura (linea 2, misurazione di Novembre).

### 4.2.3 Misurazioni di Febbraio

Nelle sezioni di Febbraio (si veda la figura 4.21) si rileva sempre la presenza di corpo più resistivo in un dominio conduttivo.

Come nelle altre linee tomografiche effettuate lungo l'argine del fiume Frassine, dalle prime due immagini si osserva che il corpo si estende in lunghezza, ma molto poco in profondità (5-6 metri).

Dalla terza immagine invece si osserva che il corpo resistivo sembra arrivare a profondità maggiore (9-10 metri) e questo afferma ancora una volta quanto sia facile cadere in errore senza l'acquisizione delle misure reciproche.

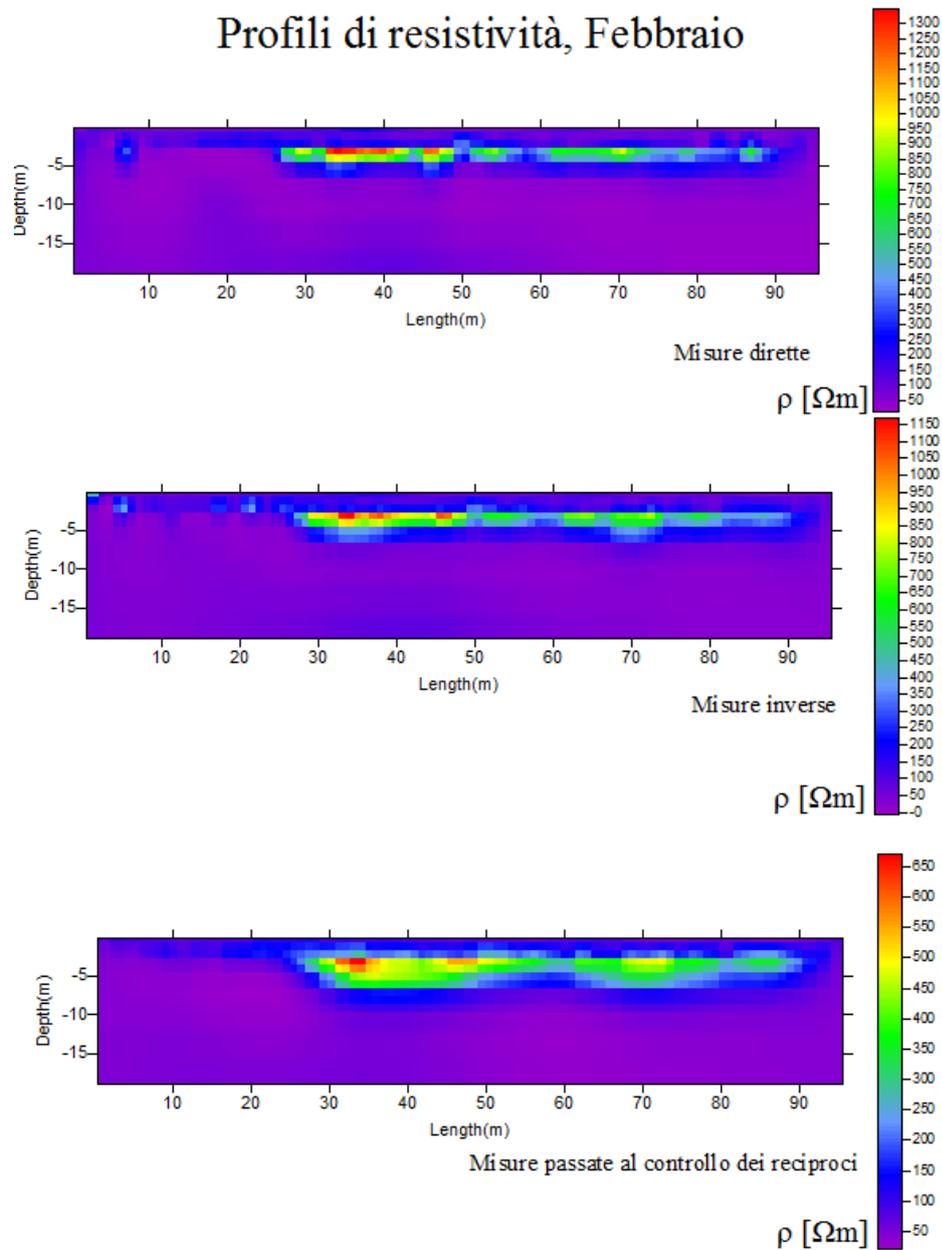


Fig. 4.21: Sezioni di resistività (misurazioni di Febbraio).

-Ancora una volta, dalla figura 4.22, si osserva che i punti di misura, nelle prime due immagini ricoprono l'intero dominio di forma triangolare, si avranno così molte più informazioni riguardo la resistività del sottosuolo e una maggiore profondità di investigazione. Nella terza immagine i punti di misura sono in numero notevolmente più basso e per questo il dominio in analisi si riduce soprattutto nella zona a profondità maggiore e alle estremità.

## Punti di misura, Febbraio

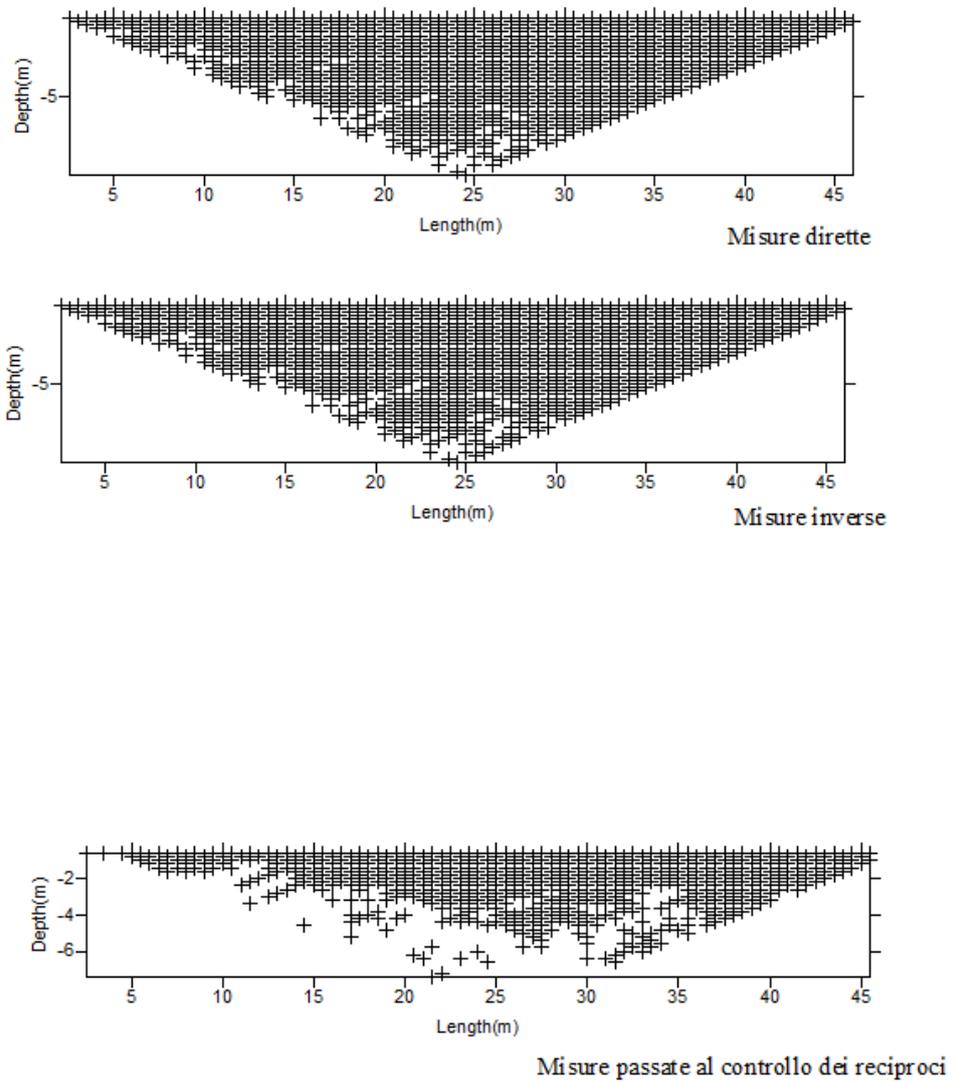


Fig. 4.22: Sezioni con la localizzazione dei punti di misura (misurazioni di Febbraio).

-Considerando la figura 4.23 si nota che, il corpo resistivo già osservato nelle precedenti pseudosezioni, ha estensione visibilmente maggiore nelle prime due immagini rispetto alla sezione ottenuta dalle misure passate al controllo dei reciproci.

## Punti di misura con valore di resistività apparente Febbraio

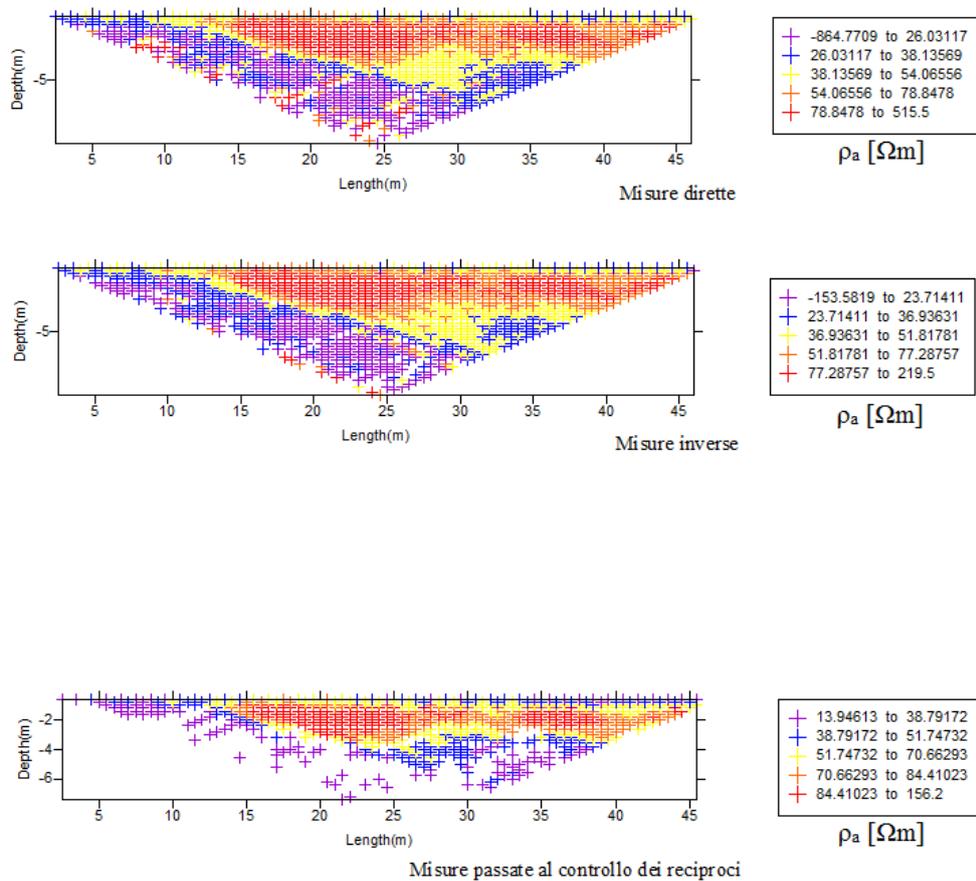


Fig. 4.23: Sezioni con valori di resistività apparente per ogni punto di misura (misurazione di Febbraio).

### 4.3 Confronto tra pseudosezioni e profili di resistività invertiti

Può essere interessante confrontare le pseudosezioni ottenute dai valori di resistività apparente, con le sezioni di resistività ottenute dopo l'inversione dei dati.

La visualizzazione preliminare della pseudosezione di  $\rho_a$  può essere di grande utilità perché permette di compiere un'analisi qualitativa dei dati a disposizione [12].

È bene tenere conto che si tratta di una visione approssimativa e distorta della reale distribuzione di resistività nel sottosuolo a causa del fatto che la forma delle iso-resistive dipende fortemente, oltre che dalla reale distribuzione della resistività, anche dal tipo di stendimento usato [20].

Come già affermato nel capitolo 1, la pseudosezione può essere però uno strumento molto utile per individuare i valori poco attendibili e quindi eliminarli e avere così un'idea generale della distribuzione della resistività reale del dominio di indagine. Permette di individuare anomalie date da valori di resistività troppo bassi o troppo alti (*outliers*) in modo da poterli eliminare prima di proseguire con l'inversione dei dati [20].

Di seguito si riporta le immagini a confronto delle pseudosezioni con i valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e le sezioni di resistività dopo l'inversione. Sono state scelte le immagini ottenute dalle misure passate al controllo dei reciproci e quindi le sezioni ottenute con l'acquisizione dei reciproci durante le misurazioni in campo.

– Stazione di Bologna:

Dalle pseudosezioni si rileva chiaramente la presenza di due corpi più resistivi del contorno la cui estensione è però molto più pronunciata rispetto alla sezione invertita, dove i corpi sono appena evidenti. La presenza del corpo resistivo è particolarmente evidente nella linea tomografica invertita L2.

I dati ottenuti dalla stazione di Bologna, come già affermato in precedenza, erano particolarmente rumorosi e, come ovvia conseguenza, si rende necessaria la pulizia preliminare del dato stesso da eventuali *outliers* per ottenere un modello che più si avvicina alla realtà

### Pseudosezione e sezione invertita, Linea L1

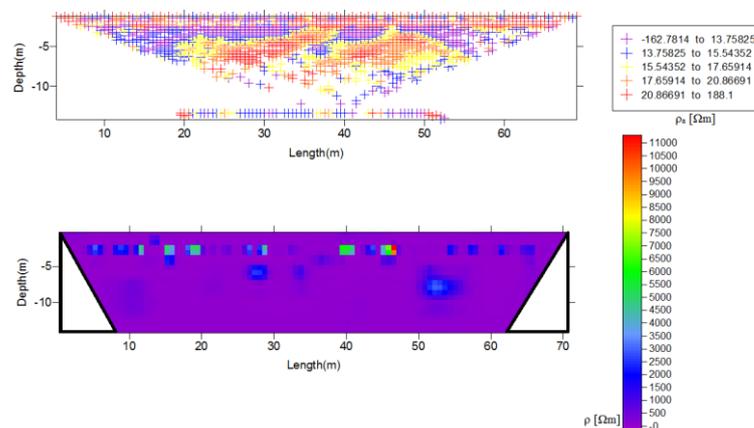


Fig 4.24: Pseudosezione con valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e sezione di resistività dopo l'inversione (Bologna, linea L1).

## Pseudosezione e sezione invertita, Linea L2

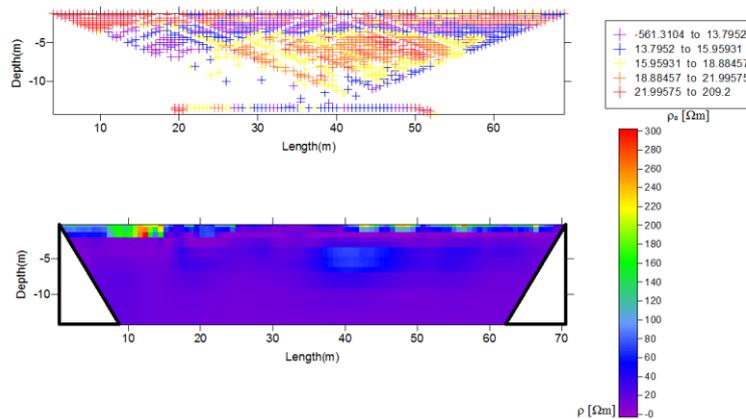


Fig. 4.25: Pseudosezione con valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e sezione di resistività dopo l'inversione (Bologna, linea L2).

– Argine del fiume Frassine (PD):

Le pseudosezioni di tutte le linee tomografiche rivelano la presenza di un corpo esteso orizzontalmente, più resistivo del dominio circostante e ciò è stato poi confermato dai profili di resistività invertiti.

In questo caso i dati a disposizione erano meno rumorosi e quindi si può chiaramente distinguere la presenza del corpo resistivo anche nelle sezioni di resistività invertite.

## Pseudosezione e sezione invertita, Ottobre Linea 1

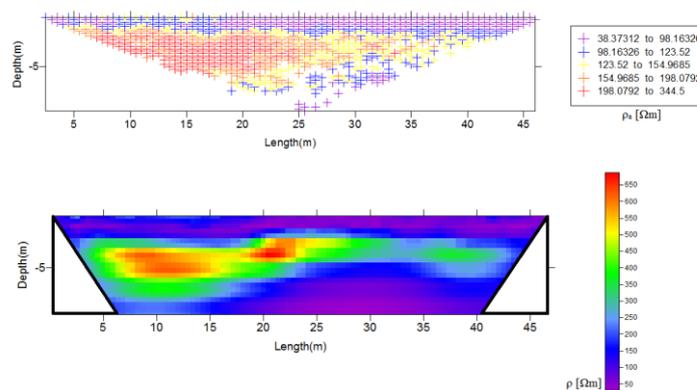


Fig. 4.26: Pseudosezione con valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e sezione di resistività dopo l'inversione (Frassine, misurazioni di Ottobre, linea 1).

### Pseudosezione e sezione invertita, Ottobre Linea 2

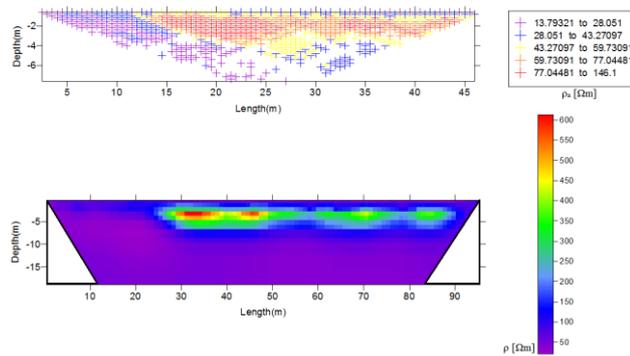


Fig. 4.26: Pseudosezione con valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e sezione di resistività dopo l'inversione (Frassine, misurazioni di Ottobre, linea 2).

### Pseudosezione e sezione invertita, Novembre Linea 1

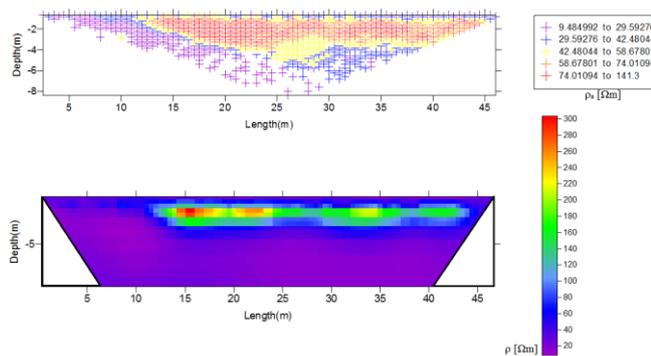


Fig. 4.27: Pseudosezione con valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e sezione di resistività dopo l'inversione (Frassine, misurazioni di Novembre, linea 1).

### Pseudosezione e sezione invertita, Novembre Linea 2

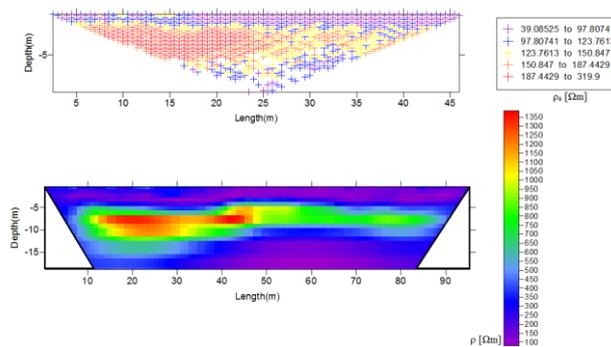


Fig. 4.28: Pseudosezione con valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e sezione di resistività dopo l'inversione (Frassine, misurazioni di Novembre, linea 2).

## Pseudosezione e sezione invertita, Febbraio

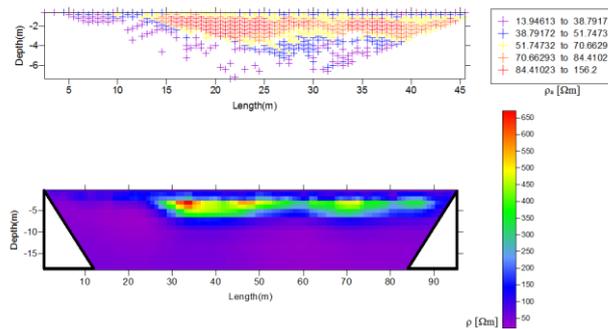


Fig. 4.29: Pseudosezione con valori di resistività apparente per ciascun punto di misura e sezione di resistività dopo l'inversione (Frassine, misurazioni di Febbraio).

### 4.4 Discussione dei risultati

I risultati ottenuti dal processo di inversione hanno permesso di avere un'idea delle differenze che si osservano tramite l'acquisizione delle misure reciproche e l'acquisizione semplice dei singoli quadripoli senza effettuare lo scambio.

In tutti le linee tomografiche studiate c'è una sostanziale disuguaglianza che porta ad un'inevitabile interpretazione differente dei risultati.

Come si visto dalle sezioni con la localizzazione dei punti dove è stata effettuata la misurazione (Fig. 4.11, Fig. 4.12, Fig. 4.17, Fig. 4.18 e Fig. 4.22), utilizzando la tecnica dei reciproci e quindi effettuando il controllo con una prefissata soglia di tolleranza, il numero di dati a disposizione diminuisce notevolmente. In questo modo viene ridotto il dominio di indagine e si avranno così minori informazioni a disposizione per l'interpretazione finale ma, conoscendo la soglia di errore, si avrà una maggiore credibilità dei dati rimasti (pochi dati ma molto più attendibili).

Di seguito si riporta una delle linee tomografiche studiate dove è maggiormente evidente l'effetto prodotto dal mancato utilizzo dell'acquisizione dei reciproci.

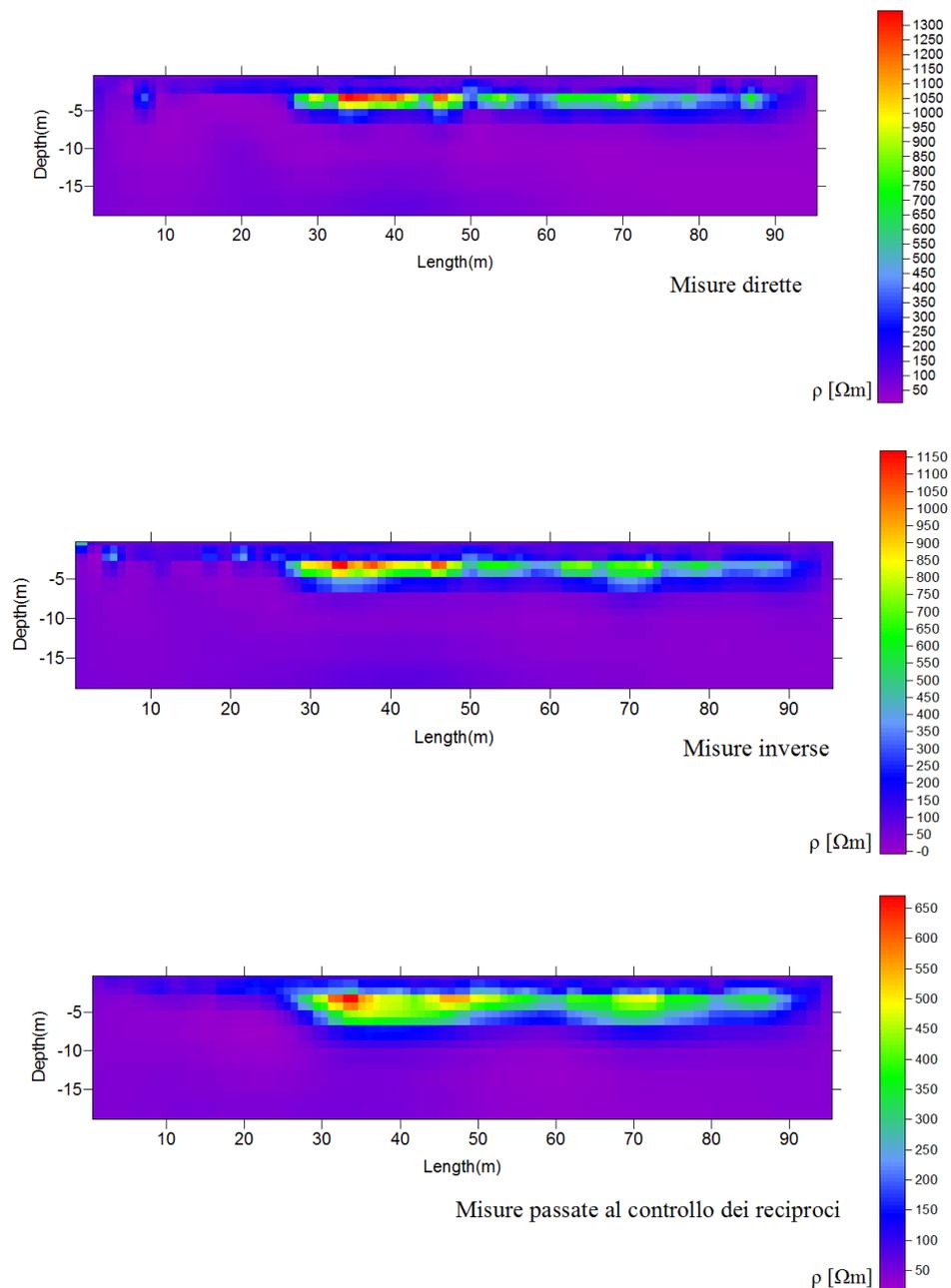


Fig. 4.30: Sezioni di resistività ottenute dall'inversione delle misurazioni di Febbraio effettuate lungo l'argine dei fiume Frassine (PD)

Dalle sezioni di resistività si nota distintamente come, la mancata acquisizione dei reciproci, porta alla sottovalutazione del corpo resistivo presente e di conseguenza ad un'errata interpretazione del risultato.

Dalle prime due sezioni si osserva che il corpo anomalo arriva ad una profondità di 5-6 metri circa, nella terza sezione invece arriva ad una profondità maggiore (9-10 metri).

L'acquisizione dei reciproci non comporta ulteriore lavoro da parte del geofisico, in quanto può essere effettuata direttamente dallo strumentazione o semplicemente invertendo i cavi collegati agli elettrodi potenziometrici e di corrente.

Anche l'opportuno trattamento successivo dei dati raccolti viene effettuato in automatico dai software e per questo non accresce il carico di lavoro da compiere. Viene però garantita una maggiore affidabilità dei risultati e quantificato l'errore di ciascuna misura.

## Conclusioni

Questo lavoro di tesi è focalizzato sul processo di *modelling* inverso di dati geofisici tomografici e quindi sulla procedura di trattamento e inversione di dati reali acquisiti. Sono stati eseguiti procedimenti di elaborazione e inversione di dati di tomografie di resistività elettrica (ERT) al fine di verificarne la qualità, valutando in particolare gli effetti sui risultati di inversione dell'acquisizione di misure dirette e reciproche. Scambiando gli elettrodi di potenziale con quelli di corrente per ciascun quadripolo di misura, si ottengono infatti, misure di resistenza dirette e misure di resistenza reciproche, permettendo così la determinazione dell'errore di ciascuna misurazione. La valutazione dell'errore così ottenuto consente di determinare la qualità dei dati a disposizione e di scartare quelli con percentuale di errore superiore ad una determinata soglia (5% in questo lavoro di tesi).

Lo studio effettuato su diverse linee tomografiche acquisite nel cantiere della nuova stazione dell'alta velocità di Bologna e lungo l'argine del fiume Frassine in località Megliadino San Fidenzio (PD), ha messo in luce l'effettiva necessità dell'utilizzo di misure reciproche nella raccolta dei dati ERT. In caso di mancata acquisizione dei reciproci, si è visto come sia possibile incorrere nell'errato posizionamento e dimensionamento di oggetti nel sottosuolo con valori di resistività diversi dal contorno. È reale inoltre il rischio di sovrastimare o sottostimare le effettive resistività presenti se non vengono acquisiti i reciproci delle misure e non viene quindi effettuato il successivo trattamento di scrematura con software appropriati.

Come si è visto in particolare dalle linee tomografiche della stazione di Bologna, dove i risultati ottenuti sono un po' meno soddisfacenti, è di fondamentale importanza la pulizia del dato dal rumore prima di procedere con l'inversione.

È quanto mai assodata l'utilità della geofisica, in particolare della tomografia elettrica, in campo ambientale come supporto alla metodologie dirette e spesso più

costose. Per questo è richiesta una particolare cura, non solo nell'acquisizione del dato, ma soprattutto nella successiva elaborazione ed inversione. Considerato che, l'acquisizione dei reciproci e il loro successivo trattamento non comporta un significativo lavoro ulteriore da parte del geofisico, può essere un approccio molto efficace per l'ottenimento di risultati molto buoni a livello pratico.

Migliore sarà la qualità dei dati a disposizione, tanto maggiore sarà l'affidabilità del risultato finale per trarne il massimo profitto dal punto di vista applicativo.

## Bibliografia

- [1] AA.VV., Wikipedia, l'enciclopedia libera. URL <https://it.wikipedia.org>.
- [2] Binley, A., Lancaster University. (2016) ProfileR, URL <http://www.es.lancs.ac.uk/people/amb/Freeware/Profiler/Profiler.htm>.
- [3] Binley, A., Cassiani, G., Deiana, R., (2010) Hydrogeophysics: Opportunities and Challenges. *Bollettino di Geofisica teorica e applicata*, 51(4), 267-284.
- [4] Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., & Winship, P. (2002). Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 267(3), 147-159.
- [5] Binley, A., Hubbard, S. S., Huisman, J. A., Reil, A., Robinson, D. A., Singha, K., & Slater, L. D. (2015). The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water resources research*, 51(6), 3837-3866.
- [6] Binley, A., Kemna, A., (2005) DC resistivity and induced polarization methods. Springer Science & Business Media, First Edition. *Hydrogeophysical*, Volume 50 of the series *Water Science and Technology Library*, 129-156.
- [7] Binley, A., Ramirez, A., Daily, W., (1995) Regularised image reconstruction of noisy electrical resistance tomography data. *Process Tomography (1995)* Beck MS et al (Eds). *Proceedings of the 4th Workshop of the European Concerted Action of Process Tomography*, Bergen. 401-410.
- [8] Boaga, J., Il dato e l'interpretazione: il problema mal posto. Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.
- [9] Busato, L., Non-invasive methodologies for the characterization of the Earth's critical zone. Tesi di dottorato. Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.

- [10] Busato, L., Boaga, J., Peruzzo, L., Himi, M., Cola, S., Bersan, S., Cassiani, G. (2016) Combined geophysical surveys for the characterization of a reconstructed river embankment. *Engineering Geology*, 211, 74-84.
- [11] Caforio, A., Ferilli, A. (2004) *Physica 2000*. Le Monnier.
- [12] Cassiani, G., (A.A. 2010/11) Materiale fornito durante le lezioni di Geofisica Applicata 1. Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.
- [13] Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., & Binley, A. M. (2006). A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 244-259.
- [14] Constable, S.C., Parker, R.L, Constable, C.G. (1987) Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300.
- [15] Corrao, M., Coco, G., (2009) *Geofisica applicata, con particolare riferimento alle prospezioni sismiche, elettriche, elettromagnetiche e geotermiche*, II Edizione. Dario Flaccovio Editore.
- [16] Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y. J., Tabbagh, A., & Charlery, Y. (2006). Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, 60(3), 165-178.
- [17] Daily, W., Ramirez, A., Binley, A., (2004) Remote Monitoring of Leaks in Storage Tanks using Electrical Resistance Tomography: Application at the Hanford Site. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 9(1), 11-24.
- [18] Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D., & Nitao, J. (1992). Electrical resistivity tomography of vadose water movement. *Water Resources Research*, 28(5), 1429-1442.

- [19] D'Alpaos, A., (A.A. 2011/12) Materiale fornito durante le lezioni. Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.
- [20] Deiana, R., (A.A. 2010/11) Materiale fornito durante le lezioni. Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.
- [21] Godio, A., Strobbia, C., & De Bacco, G. (2006). Geophysical characterisation of a rockslide in an alpine region. *Engineering Geology*, 83(1), 273-286.
- [22] Kemna, A., (2000) Tomographic inversion of complex resistivity: theory and application. Der Andere Verlag. *Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum, Institut für Geophysik*, Edizione 56.
- [23] Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa, B., & Vereecken, H. (2002). Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models. *Journal of Hydrology*, 267(3), 125-146.
- [24] LeBrecque, D.J., Mietto, M., Daily, W., Ramirez, A., Owen, E., (1996) The effect of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data. *Geophysics*, 61(2), 538-548.
- [25] Loke, M.H., (2002) Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys.
- [26] National Research Council. (2001). *Basic research opportunities in Earth Science*. National Academies Press.
- [27] Oldenborger, G. A., Routh, P. S., & Knoll, M. D. (2005). Sensitivity of electrical resistivity tomography data to electrode position errors. *Geophysical Journal International*, 163(1), 1-9.
- [28] Parker, R.L., (1994) *Geophysical Inverse Theory*. Princeton University Press.

- [29] Perri, M. T., Cassiani, G., Gervasio, I., Deiana, R., & Binley, A. (2012). A saline tracer test monitored via both surface and cross-borehole electrical resistivity tomography: comparison of time-lapse results. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 6-16.
- [30] Pirttijärvi, M., University of Oulu. (2003) DCINV, Version 1.2 (c).
- [31] Resnick, R., Halliday, Krane, K.S., (1997) Fisica, vol 2. Edizione italiana a cura di Lo Russo, S., Mazzi, G., Taffara, L., Casa Editrice Ambrosiana.
- [32] Reynolds, J.M. (2005) An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Son Ltd.
- [33] Robert, T., Caterina, D., Deceuster, J., Kaufmann, O., & Nguyen, F. (2012). A salt tracer test monitored with surface ERT to detect preferential flow and transport paths in fractured/karstified limestones. *Geophysics*, 77(2), B55-B67.
- [34] Surfer, User's guide. Contouring and 3D, surface mapping for scientists and Engineers. Golden Software, Inc, URL <http://www.goldensoftware.com>.
- [35] Tarantola, A., (2005) Inverse Problem Theory. Ed. SIAM
- [36] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff. R.E., (2010) Applied geophysics, Second Edition. Cambridge University Press.
- [37] Tychonoff, A.N., Arsenin V.Y., (1977) Solution of ill-posed Problems. Washington, Winston & Sons Edition.
- [38] Zaja, A., (A.A. 2005/06) Materiale fornito durante le lezioni di Laboratorio Applicazioni Geofisiche. Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.

## Ringraziamenti

*Desidero ringraziare per primo il prof. Giorgio Cassiani per la gentile disponibilità e l'aiuto fornito durante tutte le fasi di questo lavoro di tesi.*

*Ringrazio anche il Dott. Jacopo Boaga e la Dott.ssa Laura Busato per la pazienza, il tempo dedicatomi e i preziosi chiarimenti che mi hanno permesso di cominciare e completare il lavoro con soddisfazione.*

*Un doveroso ringraziamento va anche alla Dott.ssa Rita Deiana i cui preziosi consigli, forniti ormai qualche anno fa, sono stati ancora estremamente utili.*

*Un ringraziamento particolarmente sentito e un abbraccio va alla mia famiglia che, con il suo costante sostegno e affetto, mi ha permesso di raggiungere finalmente questo traguardo. Non dimentico tutte le volte che mia mamma mi ha "interrogato" prima di un esame con infinita pazienza e le volte che mio papà ha risolto con successo svariati problemi informatici del mio computer. Grazie!*

*Non può mancare un ringraziamento speciale ai miei amici di Università, ne abbiamo passate tante insieme in questi anni e non posso che dire che ormai siete diventati amici di vita.*

*Ringrazio anche la mia vecchia e più cara amica di scuola, non dimenticherò mai quanto ci siamo divertite con la nostra scuola-no-stop. Ricordati di Tonga!*

*Ringrazio inoltre la prof.ssa Anna Collauto del liceo, forse non leggerà mai queste parole ma è stata un'ispirazione per affrontare i momenti più difficili.*

*Un ultimo ringraziamento va a loro, Brick e Lilo, i miei preziosi amici pelosi che hanno vegliato su di me con pazienza durante tutti questi anni di studio. Sanno un sacco di cose di geologia!*