



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

**MONITORAGGIO GEOFISICO DI TECNICHE DI  
BONIFICA DI SITI CONTAMINATI**  
**GEOPHYSICAL MONITORING OF CONTAMINATED  
SITE REMEDIATION TECHNIQUES**

Relatore: *prof. Giorgio Cassiani*  
Correlatore: *dott. Jacopo Boaga*<sup>(1)</sup>  
*prof. Marco Petrangelo Papini*<sup>(2)</sup>

*(1) Università degli Studi di Padova*

*(2) Sapienza Università di Roma*

*Laureando: dott. Marco Marin*  
*Matricola: 1114714*

ANNO ACCADEMICO 2016 / 2017



## Indice

1. Introduzione .....	5
1.1. Abstract.....	5
1.2. Introduzione alla lettura.....	7
2. Teoria e principi fisici dell'indagine geofisica .....	9
2.1. Scopi e vantaggi dell'indagine geofisica .....	9
2.2. Principi di geoelettrica.....	15
2.2.1. Elementi di elettrica e campo elettrico .....	15
2.2.2. Profili di resistività elettrica del terreno .....	21
2.3. Data processing ERT .....	25
2.3.1. Modello inverso e rappresentazione dei dati ERT .....	25
2.3.2. Modello diretto tramite codice R3t .....	31
2.3.3. Approccio al time – lapse dei dati ERT .....	33
3. Sito campagna delle indagini .....	35
3.1. Descrizione del sito ed inquadramento geologico .....	35
3.2. Cenni sulla tecnologia di bonifica monitorata .....	43
3.2.1. Natura chimica dei contaminanti.....	45
3.2.2. Concetti sulla dechlorinazione riduttiva.....	47
3.2.3. Sostanze utilizzate per il rimedio nel sito.....	50
3.2.4. Cronoprogramma.....	53
3.3. Progetto della campagna di indagine .....	55
3.4. Verifica conducibilità dei prodotti iniettati.....	59
4. Risultati del monitoraggio geofisico .....	63
4.1. Premessa .....	63
4.2. Valori assoluti e sezioni di resistività .....	65

4.3. Sezioni di resistività in time – lapse .....	69
4.4. Modello diretto di resistività elettrica.....	73
5. Discussione e considerazioni finali.....	81
6. Ringraziamenti .....	87
7. Bibliografia .....	89

# 1. Introduzione

## 1.1. *Abstract*

Electric resistivity tomography (ERT) is a common tool used for several kinds of activities, both for in situ survey and for research purposes. This geophysics tool is usually applied for targets with well-defined electric properties, and monitored in time when they are modified naturally or artificially.

In this work ERT is applied for monitoring the efficiency of a recent remediation technology over time. The electric parameters of sub-soil are in fact affected by the mix of substances injected for the environmental recovery of a polluted site.

The investigated site is located in the city of Bologna (Italy). The area is owned by the national railway company, and it is affected by contamination of organic solvents. The contamination was due to the machines degreasing and cleaning activities, related to the railway line activity of the Bologna station. The contaminated underground is characterized by alluvial sandy and silty layers, that constitute the main aquifers. Inside the soil chlorinated organic compounds are concentrate over time, because of their insolubility, in the first twenty meters from the surface into two known aquifers. The remediation activity is performed by bioattenuation of PCE and TCE in healthy compounds. For the first time in Europe is chosen to inject colloidal coal into the aquifer; this is a new technology performed by a company with the support of La Sapienza University of Rome.

The purpose of the geological survey is monitoring the injections into the aquifer, and verify their efficiency over time. The ERT lines were acquired several times keeping fixed the electrodes position, in order to have information's in time – lapse. Every activity in the field was performed with the remediation company and the research team. They are interested in verifying the affective distribution of the injected mixture in the underground throw a non invasive – survey from the surface. The outcome of this work proves a further use of geophysics to get quickly useful information, with a sufficient resolution to be helpful for the purpose of a remediation project.



## ***1.2. Introduzione alla lettura***

Questo trattato scritto descrive l'intera esperienza acquisita in un lavoro che si concentra prevalentemente nel campo della geofisica. L'intero documento nelle prossime pagine viene strutturato per descrivere nei dettagli i passaggi tra le fasi di lavoro, partendo dalla progettazione di un monitoraggio geofisico da superficie fino all'elaborazione dei dati di campagna con la relativa interpretazione del fenomeno scrutato.

Il tema principale si pone nell'applicazione di una indagine geofisica, mediante tomografia di resistività elettrica, per monitorare nel tempo una bonifica ambientale. Tutto il contesto che viene esposto nelle seguenti pagine rientra in un esperimento in piccola scala, condotto da un gruppo di ricerca del dipartimento di Chimica de La Sapienza Università di Roma, gestito dal prof. Marco Petrangelo Papini, noto specialista nel campo del trattamento di differenti situazioni di contaminazione. Da parte sua è stato richiesto un contributo per svolgere un monitoraggio geofisico all'interno del loro sito sperimentale, dove erano a lavoro per mettere in pratica un test in piccola scala per bonificare un sito contaminato da un contesto industriale. Questa tecnologia, discussa in seguito, punta a stimolare in maniera alternativa la bioattenuazione per il trattamento di determinanti composti organici presenti all'interno di acque di falda. Essa risulta innovativa in quanto si è provato per la prima volta ad inserire direttamente nell'acquifero il carbone attivo mediante una sospensione acquosa colloidale, con l'obiettivo di distribuirlo all'interno della porosità del sottosuolo con il compito di adsorbire sulla sua superficie i contaminanti, rendendoli facilmente disponibili ed accessibili ai microorganismi competenti nel complesso ciclo della bioattenuazione.

Tenendo conto della tipologia di intervento, della posizione del sito e delle caratteristiche del sottosuolo, il contributo da parte nostra durante il periodo di attività della bonifica si è basato essenzialmente sull'applicazione di tomografie elettriche in più sezioni e in diversi momenti nel tempo. Si intende verificare se il monitoraggio geofisico può risultare sensibile alla distribuzione di questo trattamento nell'acquifero, tendendo un monitoraggio da superficie per intercettare

la distribuzione dei prodotti inseriti. Oltre alla verifica di sensibilità per una variazione al di sotto della falda, l'interesse personale su questo lavoro ricade sull'applicazione della figura del geologo in un contesto multi – disciplinare, dove ne viene richiesta una consulenza per comprendere un dettaglio nel primo suolo partendo da osservazioni limitate alla superficie del piano campagna.

Sono infine discusse in maniera conoscitiva le caratteristiche chimiche e fisiche dei contaminanti. Questi elementi sono da considerare nel momento in cui si vuole comprendere lo scopo del recupero ambientale e le loro modalità, in quanto ogni progetto di bonifica viene costruito appositamente sulle caratteristiche geologiche del sito e sulle proprietà peculiari della contaminazione da rimuovere.

## **2. Teoria e principi fisici dell'indagine geofisica**

### **2.1. *Scopi e vantaggi dell'indagine geofisica***

La geofisica è considerato in genere lo strumento che può venire incontro a numerose problematiche che si possono riscontrare nelle indagini geologiche per la caratterizzazione di un sito. Infatti sotto diversi gli aspetti che possono spaziare in numerosi campi, dalla geologia alle problematiche ambientali.

Nella comune pratica della progettazione di un piano di indagine in un generico sito, il primo problema che si incontra è sempre legato al numero di indagini dirette necessarie da eseguire per identificare le caratteristiche fisiche e geologiche, oppure nell'identificazione di strutture geologiche dove esse non sono affioranti in superficie. Inoltre ogni indagine deve risultare sufficientemente rappresentativa, per cui la densità di punti di indagine risulta discriminante nel definire la risoluzione dell'informazione ottenuta. Per indagare grandi aree, quindi grandi volumi nel sottosuolo occorrono un certo numero di indagini che nel complesso possono elevare il costo totale delle indagini.

Le investigazioni geologiche di tipo diretto prevedono l'estrazione di una porzione di terreno dal sottosuolo per valutare ed identificare determinati parametri fisici dei materiali, ricostruendo anche la stratigrafia. I carotaggi vengono effettuati con scavi tramite pozzetti geognostici di diametro solitamente non superiore a qualche decimetro, con estrazione di campioni rappresentativi del sottosuolo tramite carotieri di diverso tipo a seconda del tipo di indagine. Molto spesso il numero di punti dove investigare il suolo e sottosuolo è piccolo, per cui tutte le proprietà fisiche e geotecniche che caratterizzano l'intero volume del sito da investigare dipendono da questi pochi punti, discorso che rientra nell'argomento della rappresentatività della dimensione della carota nei confronti dell'intera area del sito.

Le investigazioni di tipo indiretto possono venire incontro alla problematica del numero di campioni e dati acquisiti perché in genere ogni tipologia di strumentazione è in grado di investigare in un tempo breve grandi volumi. Da

questo concetto intendo indicare in seguito l'importanza che l'indagine geofisica può portare come strumento per l'attività del geologo, in quanto offre potenzialmente numerosi strumenti per risolvere differenti problematiche, ma richiede la corretta conoscenza dei principi fisici per identificare anche i limiti di ogni tecnologia e fisica analizzata. Una misura geofisica consiste sempre nell'investigare un dominio del sottosuolo senza effettuare sondaggi o scavi, risultando alla fine dei lavori meno onerosa rispetto alle indagini geologiche di tipo diretto. In realtà a costare poco sono solo le indagini da applicare nel sito; i reali costi lievitano se si considera il singolo strumento perché si deve pagare la tecnologia applicata dal costruttore, o i software necessari per l'interfaccia grafica dei dati campionati. In genere le strumentazioni geofisiche hanno un costo impegnativo nel momento dell'acquisto, legato al tipo di attività svolta o alla tipologia di problema che più frequentemente viene richiesto di risolvere dalla pratica dell'attività, mentre le manutenzioni nel tempo in generale risultano molto semplici.

La prima distinzione nei metodi geofisici può sicuramente ricadere sull'applicazione in sito attraverso la superficie oppure tramite pozzo. Per una stessa strumentazione esiste spesso una sua applicazione in pozzo; di seguito verrà osservato solamente l'applicazione della strumentazione per compiere una indagine da superficie. Le indagini da superficie possono essere pensate come le più semplici da eseguire in termini di applicazione. Si possono citare numerosi esempi di applicazione per diversi campi: geofisica applicata al campo minerario per la ricerca, applicata ai siti archeologici, applicata all'ingegneria per la caratterizzazione di fondazioni delle strutture ad esempio, applicazioni ambientali e in particolare ai corpi idrici ed acque sotterranee, infine anche all'approccio forense della geofisica.

Nonostante possano sembrare numerosi i vantaggi, la geofisica applicata dalla superficie può risentire di numerosi problemi e difetti che la possono fare passare in secondo piano. Primo fra tutti, il problema della massima profondità di investigazione è una domanda difficile da rispondere a priori, in quanto la

risoluzione della strumentazione può dipendere fortemente dalle caratteristiche fisiche del terreno e dei materiali al suo interno, incidendo anche sulla portata massima di investigazione stimabile. Le proprietà dei corpi solidi che costituiscono il sottosuolo sono sempre da considerare anisotrope perché il terreno stesso è un mezzo eterogeneo. La risoluzione di molte strumentazioni geofisiche sono in grado di fornire informazioni a diverse scale, a seconda del tipo di problema richiesto da risolvere o interpretare. La maggior parte dei progetti di investigazione geofisica si pone in un limite di 30m di spessore massimo investigato, e raramente vengono svolte indagini per superare le centinaia di metri di profondità.

Altro problema che si incontra è la rappresentatività del dato ottenuto; ogni indagine geofisica non mostrerà mai una immagine reale delle caratteristiche del sottosuolo ma solamente una rappresentazione della distribuzione nel piano (o nello spazio in 3 dimensioni) del valore assoluto che può ottenere una determinata grandezza fisica. Questa distribuzione può essere identificata come diverse zone, o facies geofisiche, che vengono associate ad una facies geologica solamente in seguito all'inversione dei dati ottenuti.

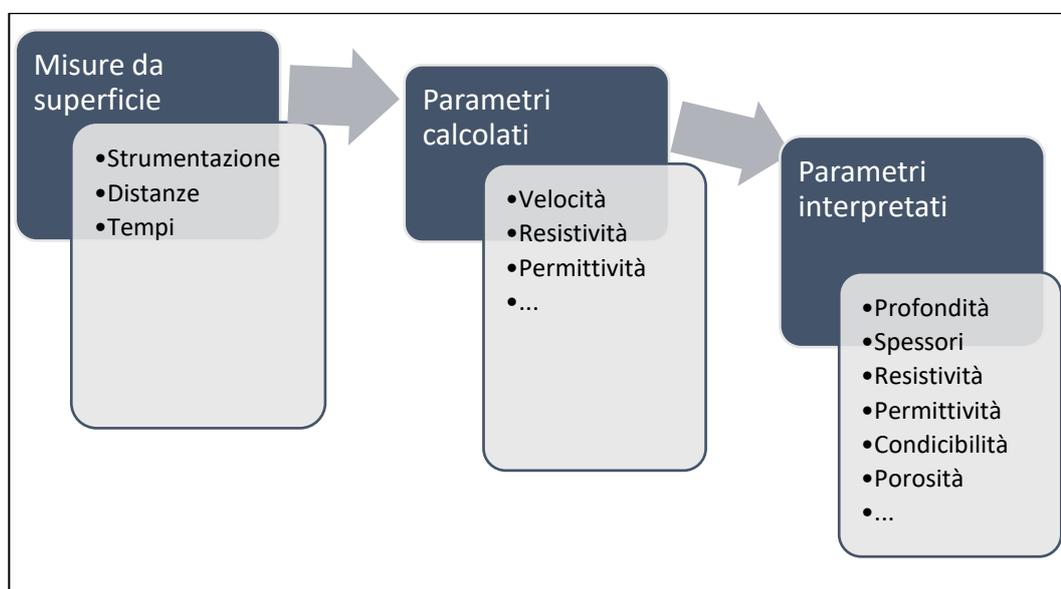


fig. 2.1 schema semplificato del processo che parte dalla misura sul campo per giungere all'interpretazione.

Questo discorso si può semplificare in tre punti chiave, come indicato in fig. 2.1:

- (1) ogni indagine parte sempre da misure sul sito. La strumentazione può determinare le dimensioni spaziali del campo di indagine.
- (2) dalle misure di superficie si passa al calcolo di determinati parametri fisici, attraverso semplici relazioni tra due o più grandezze fisiche misurate dagli strumenti sul terreno.
- (3) l'interpretazione dei parametri permette di identificare uno o più parametri di un corpo nel sottosuolo. Per giungere a questa fase si deve svolgere un confronto con un modello, diretto o inverso. Spesso vengono incontro determinate leggi, ad esempio quelle petrofisiche.

Solitamente gli strumenti geofisici che lavorano sul bordo del dominio geologico, sono limitati dal fatto che investigano solo da un unico punto di vista. Possono fornire ottime risoluzioni anche se si perdono per attenuazione naturale del segnale nello spazio. Per questo motivo si è sviluppato fortemente anche l'applicazione di indagini geofisiche da pozzo, le quali forniscono risoluzioni ed una mole di informazioni maggiori: quest'ultime risultano generalmente più costose da applicare perché richiedono la presenza nel sito di una o più perforazioni. Sono state largamente sviluppate dal campo petrolifero e solo successivamente hanno iniziato a trovare nuove applicazioni in altri campi di studio.

Ogni strumento è dotato di un sensore o antenna per la misura di una quantità geofisica ( $G$ ), risposta diretta di una proprietà o grandezza fisica ( $P$ ) identificata per un punto infinitesimo all'interno del dominio, una volta che viene interessato da un determinato segnale ( $F$ ).

$$G = G(P, F)$$

Non tutti gli strumenti sono emettitori di un segnale, per cui si distinguono due grandi gruppi. Gli strumenti geofisici di tipo attivo sono dotati di un emettitore di segnale diretto all'interno del dominio da investigare, per studiare la risposta tramite il sensore ricevitore. Al contrario le strumentazioni geofisiche di tipo passivo campionano un segnale che viene naturalmente generato in natura.

Ogni dato è registrato dallo strumento, per cui viene estratto ed elaborato in maniera differente in base al tipo di fisica che vi sta dietro. Ogni dataset contiene sempre errori sistematici che non possono mai essere rimossi, dovuti a difetti prevedibili o meno del funzionamento dell'intera strumentazione, mancanza di contatti nel corso del tempo, o altri elementi non prevedibili. Il lavoro dietro ad ogni dato deve tenere in considerazione il concetto che non esiste una relazione univoca tra la campionatura svolta durante la campagna di indagini e il modello ottenuto al termine. La risposta al segnale geofisico ottenuta sul campo deve essere confrontata con un modello diretto, simulando la risposta di un modello concettuale idealizzato sulle conoscenze geologiche del sito. Il modello inverso richiede una sua discussione in un paragrafo dedicato.

Al termine di queste operazioni, ogni dato viene rappresentato graficamente per mostrare la distribuzione di un certo parametro allo scopo di risolvere la questione iniziale che ha portato a progettare l'indagine geofisica. È fondamentale assumere che nessuna immagine rappresenta inizialmente la reale immagine della geologia del dominio investigato, ma viene ad essa associata in un momento successivo. Spesso ogni immagine è costituita da una mappatura con isolinee di una grandezza fisica del fenomeno, non un terreno come se fosse esso affiorante.

La geofisica risulta alla fine uno strumento che non ricade solo nel campo di applicazione del geologo per la geologia. Se si osserva solo questa figura professionale si potrebbero citare numerose applicazioni, della geofisica in campo minerario per la ricerca e prospezione, nel campo dell'idrogeologia e caratterizzazione dei corpi idrici, oppure per applicazioni ambientali. Al di fuori essa si applica fortemente nel campo dell'archeologia e nella ricerca archeologica nel primo sottosuolo, oppure viene apprezzata in campo ingegneristico nella caratterizzazione delle fondamenta durante la costruzione di edifici o opere, oppure anche puntare ad applicazioni forensi della geologia.



## 2.2. *Principi di geoelettrica*

### 2.2.1. Elementi di elettrica e campo elettrico

L'indagine elettrica applicata al campo della geologia deve la sua nascita grazie al contributo che storicamente è stato fornito da numerosi scienziati in diversi campi. Per citarne alcuni, risulta sicuramente fondamentale il contributo del tedesco Georg Ohm (Erlangen 1789 – München 1854) nello studio del passaggio di corrente nei materiali solidi tramite i suoi esperimenti. Nel 1827 viene pubblicato un trattato fisico-matematico dove descrive il lavoro svolto con le sue considerazioni che sono identificate oggi nella legge che porta il suo nome. Essenzialmente il suo esperimento consisteva nell'applicare alle estremità di un campione di materiale solido, dalle dimensioni geometriche definite, una differenza di potenziale tramite la connessione ad una batteria. La corrente elettrica in grado di attraversare un corpo solido possiede una intensità  $I$  che è linearmente dipendente dalla differenza di potenziale  $\Delta V$  applicata al mezzo, moltiplicato per un fattore che nella legge di Ohm è riconosciuta come la resistenza elettrica  $R$ . Tale legge viene indicata nella eq. 1.

$$\Delta V = I \cdot R$$

*eq. 1*

Il parametro fisico della resistenza elettrica  $R$  dipende direttamente dalla geometria del materiale e la sua unità di misura. Nel sistema internazionale (SI) prende il nome di Ohm in suo onore.

$$R = [\Omega] = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

*eq. 2*

Nella eq. 2 si osserva che la resistenza elettrica dipende dalla geometria del materiale, per cui risulta poco utile il suo uso nel campo delle investigazioni geologiche, per cui si preferisce utilizzare un altro parametro elettrico che ne risulta essere indipendente. In geofisica si parla infatti sempre di resistività ( $\rho$ ), parametro fisico indipendente dalla geometria del mezzo e legato solamente alla composizione naturale del materiale.

Nella formulazione mostrata in eq. 3 si tiene conto di un volume solido di lunghezza  $L$ , sezione di area  $A$  e resistenza elettrica  $R$ , formulazione per la quantificazione della resistività è identificata nella seguente equazione:

$$\rho = [\Omega \cdot m] = \frac{R \cdot A}{L} = \frac{1}{\sigma}$$

eq. 3

La resistività elettrica è la misura della capacità di un materiale solido ad opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche al suo interno. Da questa definizione si percepisce che questo parametro è perfettamente il reciproco della conducibilità elettrica ( $\sigma$ ), o attitudine di un materiale solido a farsi attraversare dalle cariche elettriche. Per questo motivo i materiali considerati resistivi possiedono una bassa conducibilità nei confronti della corrente elettrica e viceversa.

Se si considera ora l'immissione di corrente elettrica tramite l'uso di un singolo elettrodo inserito in un terreno solido, il quale risulta essere omogeneo ed isotropo nelle sue caratteristiche fisiche. Il singolo elettrodo funge da sorgente puntiforme di linee di corrente, le quali escono per distribuirsi nello spazio in modo uniforme. Si considerino ora due superfici equipotenziali di raggi  $r$  e  $r + dr$  rispetto al punto di sorgente delle linee di corrente, in esse si identifica una porzione infinitesima di spazio interpretabile come un piccolo cilindro di materiale che viene interessato da una differenza di potenziale calcolabile con la eq. 4.

$$dV = -\rho \cdot \frac{I}{4\pi r^2} dr$$

eq. 4

L'intensità di corrente che scorre in un piccolo arco di circonferenza diminuisce mentre si aumenta la distanza dal centro dell'elettrodo, in quanto le linee di corrente si distribuiscono nello spazio secondo la superficie di una sfera. Il potenziale elettrico in un secondo punto generico posto ad una distanza generica  $r_i$  è calcolato nella eq. 5 come integrazione della precedente equazione tra  $r_i$  ed  $\infty$ :

$$dV = \int_{r_i}^{\infty} -\frac{\rho \cdot I}{4\pi r^2} dr = \frac{\rho \cdot I}{4\pi r_i}$$

eq. 5

Questa formulazione vale per una geometria sferica nello spazio, ma se l'elettrodo viene infisso sulla superficie del terreno si ottiene che la distribuzione delle superfici equipotenziali al suo interno risultano delle semisfere, per cui la precedente formulazione ora assumerà l'espressione di eq. 6.

$$dV = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r_i}$$

*eq. 6*

Nella pratica dei metodi geoelettrici si utilizzano attualmente strumentazioni con configurazioni che richiedono l'impiego di 4 elettrodi sul terreno. Il reale vantaggio di questo accorgimento risiede nella possibilità di usare due elettrodi per formare un circuito elettrico con il suolo insieme ad una sorgente di forza elettromotrice, mentre gli altri due elettrodi sono inseriti nel suolo per misurare con un circuito separato la differenza di potenziale. Nella geoelettrica il circuito elettrico risente di una resistività del terreno e due resistenze di contatto degli elettrodi nel terreno. Il passaggio della corrente tra l'elettrodo e il suolo avviene con un elettrone che deve compiere il passaggio tra il metallo e il suolo per scorrere per via elettrolitica e viceversa, comportando così un consumo di energia ed una resistenza che influenza il segnale misurato se si utilizzava un unico circuito tramite due soli elettrodi.

Se si considerano due elettrodi di corrente, chiamati generalmente A e B e posizionati ad una distanza  $r_1$  ed  $r_2$  da un punto generico M, il potenziale in M è calcolato in eq. 7 come somma dei potenziali dovuti rispettivamente all'elettrodo A ed elettrodo B.

$$V_M = V_{M_A} + V_{M_B} = \frac{\rho I}{2\pi r_1} - \frac{\rho I}{2\pi r_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

*eq. 7*

Seguendo lo stesso ragionamento, se si considera il potenziale elettrico presente in un generico punto N si ottiene che anch'esso risente della distribuzione delle linee equipotenziali del campo elettrico tra i due elettrodi di corrente A e B, insieme ad un fattore che dipende direttamente dalla distanza tra loro due, con una scrittura in eq. 8 che ricalca fedelmente la eq.7.

$$V_N = V_{N_A} + V_{N_B} = \frac{\rho I}{2\pi r_1} - \frac{\rho I}{2\pi r_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'} \right)$$

eq. 8

Nella configurazione a quadripolo si pongono nel terreno due elettrodi M ed N per misurare la differenza di potenziale tra due punti nella superficie, dove l'espressione di questo parametro è indicata nella eq. 9 come somma delle differenze di potenziale applicati nei due elettrodi.

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1'} + \frac{1}{r_2'} \right)$$

eq. 9

La differenza di potenziale misurata con due elettrodi nel terreno è funzione della geometria del quadripolo, ovvero dalle distanze dei due elettrodi di corrente rispetto agli elettrodi potenziali. Nel corso del tempo sono state ideate diverse configurazioni geometriche nel terreno per svolgere misure elettriche, per cui ad ogni configurazione corrisponde una determinata geometria che viene indicata opportunamente per ottenere il parametro desiderato dalle indagini elettriche, ovvero la resistività elettrica del mezzo attraversato. Ad ogni configurazione corrisponde non solo la distribuzione spaziale degli elettrodi ma anche determinate capacità tecniche di inserimento delle linee di corrente nel suolo, ovvero la risoluzione del dato che si ottiene dalla campagna di indagini.

Tra le numerose configurazioni, le più note ed utilizzate nella pratica delle misure geoelettriche in campagna sono indicate in fig. 2.1 e descritte di seguito:

- configurazione Wenner, quattro elettrodi sulla stessa linea alla stessa distanza, elettrodi AB esterni e MN interni. Sia  $a$  l'interdistanza, significa che  $r_1 = r_2' = a$  e  $r_1' = r_2 = 2a$ .
- configurazione Schlumberger, quattro elettrodi allineati tra di loro dove la distanza tra i due elettrodi potenziali MN è molto più piccola rispetto alla distanza degli elettrodi di corrente AB. Sia  $a$  l'interdistanza tra MN, e sia  $L$  l'interdistanza AB, le corrispettive geometrie sono rispettivamente  $r_1 = r_2' = \frac{L-a}{2}$  e  $r_1' = r_2 = \frac{L+a}{2}$

- configurazione dipolo – dipolo, i quattro elettrodi lungo lo stendimento a coppie dove la misura del potenziale avviene al di fuori della linea ideale vista in precedenza. Gli elettrodi AB ed MN hanno uguale interdistanza  $a$  tra di loro ma sono separati tra di loro di una distanza indicata come  $na$ , per cui il potenziale misurato corrisponde ad un punto nel piano posizionato a  $1/2 na$ . Questa configurazione rispetto alle precedenti risulta più sensibile alle strutture verticali a discapito della risoluzione orizzontale.

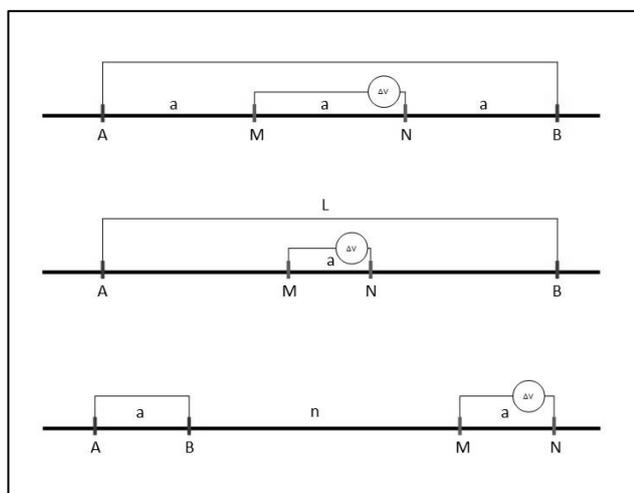


fig. 2.2 schema grafico delle principali configurazioni note nella geoelettrica. In ordine dall'alto verso il basso Wenner, Schlumberger e dipolo – dipolo.

Il movimento delle cariche elettriche è permesso tramite l'esistenza di tre percorsi differenti: conduzione elettronica, conduzione dielettrica e contatto elettrolitico. La conduzione elettronica è il classico passaggio di elettroni che interessa i materiali metallici, la conduzione dielettrica corrisponde ad un flusso lento di cariche sulla superficie ed è tipica dei materiali isolanti, mentre la conduzione tramite contatto elettrolitico interessa scambi di elettroni in soluzioni che contengono ioni e risultano legati alla loro concentrazione e mobilità. All'interno delle rocce la corrente elettrica si sposta soprattutto per effetto dell'acqua e sue caratteristiche da solvente, quindi la presenza di soluti al suo interno incide fortemente sulla distribuzione delle cariche elettriche. Per questo motivo la strumentazione per indagine elettrica trova numerosi impieghi in campo idrogeologico. La presenza di acqua controlla molto il flusso di corrente nel sottosuolo, tenendo conto che le acque sotterranee sono tendenzialmente ricche in sali.

I minerali e rocce non sono mezzi isotropi per tante caratteristiche fisiche, e la resistività elettrica non fa eccezione in questo caso. I range di valori ottenibili sono molto vari, ma per i terreni sono raggiunti mai resistenze che superano l'ordine dei 1000  $\Omega m$ . I valori medi per un terreno insaturo sono compresi tra 30 – 100  $\Omega m$  mentre per un terreno saturo si parla di 15 – 30  $\Omega m$ . Esistono in bibliografica numerose tabelle che raccolgono queste informazioni, ma risulta essenziale tenere in considerazione che la saturazione incide fortemente sul valore assoluto di questo parametro fisico.

La resistività di un corpo geologico dipende in primo luogo dalle sue caratteristiche tessiturali: forma, dimensione dei grani, porosità e suo grado di saturazione, soluzione contenuta nella sua porosità ed eventuale presenza di elettroliti nel solvente. La presenza di acqua condiziona fortemente il segnale elettrico, così come il grado di saturazione del materiale, eventuale presenza di soluto e concentrazione di esso. Da questo comportamento si basano diverse relazioni petrofisiche, come ad esempio la più nota indicata da Archie (1942) che correla la conducibilità elettrica al grado di saturazione del mezzo geologico, applicata nel campo delle indagini petrolifere per determinare la presenza di olio o acqua.

### *2.2.2. Profili di resistività elettrica del terreno*

Le prime vere applicazioni che hanno visto l'impiego della corrente elettrica per svolgere una indagine nel suolo sono riconosciute in bibliografia dai fratelli Schlumberger nel 1912. Viene citato storicamente l'uso di due paia di elettrodi metallici posizionati direttamente sulla superficie del terreno per l'immissione di corrente e misura del potenziale, per individuare la presenza di materiali resistivi o conduttivi in miniera; nello specifico venne eseguito per individuare mineralizzazioni di solfuri. Queste prime applicazioni nel campo delle esplorazioni minerarie hanno portato nel tempo a proseguire i loro esperimenti su diversi tipi di rocce, portando alla nascita delle prospezioni elettriche. La configurazione geometrica degli elettrodi applicata in quella situazione prende tutt'ora il loro nome.

I metodi basati sulla resistività elettrica sono stati largamente utilizzati durante il XX secolo, con forti limitazioni riguardo alla velocità di realizzazione di grandi numeri di misure. Si deve attendere lo sviluppo informatico per vedere crescere fortemente questo tipo di indagine, sostanzialmente un sistema di acquisizione informatico in grado di controllare un grande numero di elettrodi in contemporanea. L'indagine che viene svolta da superficie punta a determinare la distribuzione spaziale della resistività del terreno attraverso l'uso di diversi elettrodi nel terreno, ed un numero elevato di circuiti elettrici per ottenere al termine un profilo di resistività rappresentativo di un volume di sottosuolo. Le dimensioni delle indagini nello spazio sono legate dal tipo di configurazione e dimensione dello stendimento di elettrodi scelto.

Le tomografie di resistività elettriche hanno trovato un largo impiego per la caratterizzazione di diverse caratteristiche fisiche dei terreni in differenti campi di applicazione, ma sicuramente uno dei più sfruttati ricade nell'ambito idrogeologico. Differenti sono le applicazioni note per classiche indagini mirate allo studio delle unità idrogeologiche, stima della permeabilità o dispersività degli acquiferi mediante test con traccianti, identificazione flussi e movimenti di soluti, determinazione di plum dovuto dalla presenza di sostanze come contaminanti per

ricerche in campo ambientale<sup>1</sup>. Tra questi i test con traccianti sono stati largamente usati dagli anni '80, monitorando dalla superficie un segnale generato dalla differente conducibilità elettrica di una soluzione salina inserita nell'acquifero, ottenendo alla fine importantissime informazioni per caratterizzare i corpi idrogeologici. Il principale vantaggio delle tomografie elettriche anche nei costi contenuti per raggiungere un risultato ad ottima risoluzione. La facilità di applicazione delle tomografie elettriche da superficie si deve però scontrare con determinati problemi come la limitata risoluzione verticale, fortemente influenzata dalla configurazione operativa e dalla spaziatura sul terreno degli elettrodi. Spesso i dati richiedono un confronto più chiaro, in quanto l'inversione non fornisce mai una unica soluzione esatta del problema e l'interpretazione richiede sempre di informazioni supplementari dall'esterno. Ci sono anche diversi problemi legati alla natura stessa del sito, come ad esempio la presenza di orizzonti conduttivi in superficie che possono cortocircuitare nel complesso le linee di corrente, riducendo di fatto la profondità di investigazione massima.

Oltre alle applicazioni da superficie ci sono numerosi usi e studi svolgibili in pozzo; in questo caso è possibile investigare con migliore risoluzione anche gli orizzonti più distanti dal piano campagna, richiedendo però un data processing più complesso oltre ad un costo maggiore per la predisposizione di uno o più pozzi nel sito.

La progettazione di una campagna di indagine deve tenere in considerazione la massima profondità verticale di indagine della tomografia elettrica, compreso tra 1/4 e 1/10 della lunghezza dello stendimento. Aumentando la distanza degli elettrodi di potenziale si incrementa la profondità di investigazione massima, a discapito però della risoluzione del dato.

Nata con l'uso di pochi elettrodi da spostare nel terreno, l'indagine geoelettrica al giorno d'oggi è evoluta rapidamente grazie allo sviluppo tecnologico in seguito alla progettazione dei georesistivimetri; questi strumenti possono essere collegati

---

<sup>1</sup>Osiensky, J.L., Donaldson, P.R., 1995. *Electrical flow through an aquifer for contaminant source leak detection and delineation of plume evolution. Journal of Hydrology* 169, 243–263.

contemporaneamente a numerosi elettrodi tramite cavi multicanale, controllati tramite un proprio sistema informatico per produrre le numerose combinazioni di circuiti con il terreno necessarie tramite le configurazioni standard, od altre impostate personalmente dall'utente. Essi controllano in contemporanea l'intensità di corrente trasmessa, il suo tempo, e misurano la differenza di potenziale. La sorgente di corrente è costituita spesso da una comune batteria. In genere si usa sul terreno sempre un numero di elettrodi pari a 24 o un suo multiplo; non è una vera e propria convenzione ma è una quantità alla quale si sono adottate molte aziende produttrici degli strumenti.

La tecnologia strumentale, e i tempi di acquisizione ridotti, permettono quindi di lavorare rapidamente identificando valori di pseudo – resistività per ogni singola combinazione di quadripoli, lavorando tramite due elettrodi che trasmettono corrente elettrica al terreno per costruire un circuito insieme ad altri due per il calcolo della resistenza elettrica.

La distribuzione spaziale della resistività del terreno viene rappresentata come un profilo, termine da non confondere con il corrispettivo nel campo geologico perché ogni prodotto rappresenta la variazione di un determinato segnale nel piano indagato.

Il passaggio all'uso dei quattro elettrodi ha portato rapidamente alla nascita delle tomografie di resistività elettriche. È interessante osservare che la parola tomografia è stata associata come termine tecnico per indicare una immagine del sottosuolo, per cui anche le successive evoluzioni che hanno portato alla nascita di indagini 3D o le più recenti frontiere del 4D mantengono sempre il termine tomografia.

L'informazione che viene ottenuta in seguito alla campagna di indagini sul terreno è rappresentata dalle pseudo – sezioni, ovvero piani bidimensionali dove non è corrisposta la reale profondità e ad ogni punto sono associate due coordinate ed un valore di pseudo – resistività. Il numero e la posizione di questi punti dipendono strettamente dalla configurazione di elettrodi selezionata. È facile concludere che per un medesimo profilo geologico investigato, se si applicano due configurazioni

differenti si otterranno due differenti pseudo – sezioni in quanto la distribuzione delle linee di corrente segue degli schemi differenti.

La facilità di applicazione sul campo si scontra anche con determinati problemi. Uno dei più comuni è la mancanza di contatto tra elettrodo e terreno, in particolare nelle stagioni calde, oppure in mezzi completamente insaturi e quindi meno capaci di trasmettere corrente. Si riscontrano resistenze elevate nel momento in cui gli elettrodi sono inseriti in sabbie secche, ciottoli, asfalto, oppure anche nel ghiaccio. La presenza di lenti di materiale differente possono far convergere le linee di corrente se esse sono costituite da argilla, oppure al contrario divergere le linee se si tratta di corpi sabbiosi all'interno di una più grande massa costituita da materiale granulometricamente più fine.

Altro problema è la polarizzazione dell'elettrodo per accumulo di cariche elettriche su di esso, in quanto in genere si utilizzano elementi di acciaio. Per evitare questo problema il georesistivimetro viene impostato in modo che il circuito elettrico viene mantenuto per un tempo estremamente piccolo (ad esempio per 250ms); esistono in commercio elettrodi costituiti da materiale impolarizzabile ma richiedono un costo decisamente consistente rispetto ai classici materiali.

## **2.3. *Data processing ERT***

### **2.3.1. *Modello inverso e rappresentazione dei dati ERT***

Il punto chiave di tutto il lavoro ricade senza dubbio nell'applicazione del modello inverso, fase delle operazioni da svolgere dopo ogni indagine. I dati grezzi ottenuti dal lavoro sul campo richiedono un loro processo per giungere all'elaborazione finale, con relativa interpretazione.

Il dato crudo di campagna che viene fornito dal georesistivimetro è una pseudo – sezione, ossia si presenta con una serie di punti distribuiti in un piano. Ad ogni quadripolo è assegnato un valore di pseudo – resistività. Il processo di inversione punta a convertire questo dato crudo in una sezione reale, tramite confronto del dato con un modello sintetico. Queste analisi sono svolte tramite diversi software, dove ad ognuno è associato un determinato approccio alla risoluzione del problema dell'inversione. Diversi metodi di inversione producono risultati differenti.

Il primo passaggio nel data processing del dato ERT crudo di campagna è stabilire la qualità del dataset ottenuto, in maniera da rimuovere tutti i dati che sono frutto di errori di calcolo o di problematiche che possono esser avvenute alla strumentazione durante le operazioni sul campo. Questo step viene svolto con un semplice accorgimento che tiene in considerazione che, tra le numerose combinazioni di quadripoli che la strumentazione svolge, si troveranno sempre due quadripoli che effettuano la misura della resistività elettrica per un unico punto del terreno, semplicemente invertendo l'ordine delle due coppie in essi contenute. La configurazione contiene delle combinazioni che effettua la misura di un quadripolo definito diretto, ed una seconda misura definito reciproco in quanto sono invertite le due coppie di elettrodi energizzanti e potenziometrici; se si considera ad esempio la combinazione di elettrodi AB (1, 2) e MN (4, 5), il suo reciproco corrisponde alla combinazione AB (4, 5) e MN (1, 2). Dato che per geometria queste due combinazioni vengono identificate nello stesso punto nello spazio, effettuando la misura nello stesso momento dovrebbero identificare lo stesso valore di pseudo – resistività. Come spesso accade in questi contesti, anche questo dettaglio risulta

influenzato da numerose incognite e per cui è normale che qualche, lieve, differenza possa esistere tra i due valori identificati. È possibile però sfruttare la presenza di quadripoli diretti e reciproci per quantificare la qualità del dataset ottenuto, semplicemente effettuando un confronto tra i due valori e scartare l'intera coppia nel caso in cui esista una differenza percentuale troppo elevata. Queste differenze possono essere attribuite a numerose cause, dal più comune problema alla strumentazione, cavi e contatto dell'elettrodo ad altre problematiche che possono interessare il lavoro di campagna. Viene fissato un limite percentuale di errore per filtrare il dato grezzo di campagna: percentuali elevate possono far passare al successivo passaggio del data processing dei dataset con numerosi quadripoli, mentre una percentuale molto restrittiva e bassa potrebbe rimuovere un numero eccessivo di quadripoli ed ottenere in seguito delle immagini molto "lisce".

A questo punto del lavoro si entra nel campo dell'inversione del dato, per passare da una pseudo – sezione alla rappresentazione di un reale parametro fisico distribuito nello spazio. Nella geofisica il discorso del modello inverso risulta piuttosto complicato in quanto, prima di tutto, non esiste una vera definizione di un modello inverso. Occorre tenere in considerazione alcuni aspetti importanti in questo punto:

- (1) ogni misura contiene al suo interno degli errori sistematici, anche non casuali, e l'inversione del dato risente fortemente di questo dettaglio.
- (2) ogni misura è influenzata dalla configurazione di elettrodi prescelta, per cui differenti configurazioni generano differenti sezioni.
- (3) ogni inversione non genera mai un risultato univoco.

L'inversione del dato è una procedura che produce sempre un modello accettabile della distribuzione di un dato. Lo sviluppo del calcolo numerico in seguito ha portato grandi vantaggi anche in questo aspetto del lavoro.

Il procedimento numerico richiede tre elementi: un modello diretto della distribuzione di resistività in 2D o 3D, una funzione obiettivo e un algoritmo per andare a definire la distribuzione ottimale del parametro.

La soluzione analitica al problema viene risolta discretizzando la regione in un numero  $M$  di blocchi o elementi, dove ad ognuno viene assegnato un parametro  $m^*$ , descritto in forma vettoriale nella eq. 10.

$$m_M^* = \sigma_M^*, (j = 1, \dots, M)$$

eq. 10

Il modello diretto contiene la distribuzione del parametro fisico, determinato a priori sulle osservazioni dell'utente. Matematicamente viene espresso nell'eq. 11 ad un caso bidimensionale, dove  $\lambda$  è la trasformata di Fourier in corrispondenza della direzione  $y$  e  $v^*$  è il complex potential.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma^* \frac{\partial v^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma^* \frac{\partial v^*}{\partial z} \right) - \lambda^2 \sigma^* v^* = -I \delta(x) \delta(z)$$

eq. 11

Durante l'inversione si intende determinare il miglior set di vettori  $m^*$  (eq. 10) che meglio fitta con i dati utilizzati nel modello diretto (eq. 11) dalle misure sul campo. Per una determinata configurazione di elettrodi si ottengono  $N$  misure di differenza di potenziale calcolata dal georesistivimetro. Come funzione obiettivo si può prendere il misfit dei dati  $m^*$ .

$$\Psi(m^*) = \Psi_d(m^*) + \Psi_m(m^*)$$

$$\Psi(m^*) = \|W_d^* [d^* - f^*(m^*)]\|^2 + \alpha \|W_m^* [m^* - m_0^*]\|^2$$

eq. 12

Nella eq. 12  $W_d$  è una matrice di peso (complex data weighting matrix),  $\alpha$  è il parametro di regolarizzazione,  $W_m$  è una matrice di distribuzione spaziale di ogni parametro (roughness matrix),  $m_0^*$  è il valore atteso del parametro.

Quest'ultima equazione è composta da due parti ben distinte. Nella prima è indicato il misfit tra il modello diretto ed inverso, mentre nella seconda i valori noti dei parametri sono regolati opportunamente per giungere ad una soluzione stabile. A sua volta la matrice "di scabrezza" può essere modificata per rappresentare meglio situazioni anisotrope, dove le differenze tra due direzioni nel piano sono molto differenti.

Infine la regolarizzazione può avvenire tramite diverse strade, come tutto il calcolo numerico appena descritto; le equazioni vengono risolte sia procedendo tramite differenze finite che con elementi finiti.

Con i dati di campagna che si ottengono sul campo si possono svolgere inversioni attraverso un diverso numero di software, i quali non fanno altro che risolvere il problema richiedendo spesso il minimo intervento dall'operatore. Nonostante questo, sapere a priori come opera un sistema informatico permette di comprendere come esso fornisce un risultato.

Nel dettaglio di questo lavoro, le inversioni dei dataset vengono effettuate tramite il programma ProfileR, eseguibile distribuito gratuitamente online dal Prof. Andrew Binley<sup>2</sup>, il quale a sua volta consiste in una versione semplificata del software R2. Questo programma è indicato per profili di resistività semplici su una topografia orizzontale in quanto genera una mesh semplificata automaticamente. Entrambi i programmi lavorano con una mesh agli elementi finiti, dove viene individuata una soluzione sfruttando l'inversione alla Occam. Questo metodo è di semplice applicazione perché si basa sulla regolarizzazione ai minimi quadrati di una funzione obiettivo (eq. 12). Per pura curiosità, il termine Occam prende nome da Guglielmo di Occam (Ockam 1285 – München 1347), il quale è noto per aver espresso un principio metodologico alla base del pensiero scientifico moderno. Sua è la seguente citazione: *“le ipotesi non dovrebbero essere inutilmente complicate né inutilmente numerose”*. Su questa base, la soluzione che viene fornita dall'algoritmo presente nei programmi lavora riducendo fortemente i valori più estremi del sistema e fornendo al termine una soluzione liscia.

Il procedimento suggerito da Constable<sup>3</sup> (1986) di adottare una inversione liscia trova in questo caso un ottimo compromesso, in quanto permette di ottenere tramite questo risolutore un modello molto semplice per rappresentare un dominio investigato costituito da un numero limitato di strati, come accade nella maggior

---

<sup>2</sup> Lancaster Environment Centre, Lancaster University,

<sup>3</sup> 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, Vol. 52, Issue 3, p. 289 – 300.*

parte delle applicazioni sul campo delle indagini geoelettriche. L'inversione che si basa sul ragionamento di Occam indica di raggiungere un risultato tramite l'ottimizzazione della funzione obiettivo, come indicata nella forma in eq. 12, puntando a minimizzare al meglio lo scarto quadratico medio tra i dati di campagna ed un modello avente un valore di resistività elettrica assegnato omogeneo. Questi risultati si presentano molto "lisci", dove in genere non sono individuati valori assoluti troppo grandi né troppo piccoli.

Il software utilizzato svolge in un processo iterativo l'operazione che viene indicata in seguito nella eq. 13.

$$\begin{cases} (J^T W_d^T W_d J + \alpha R) \Delta m = J^T W_d^T (d - f(m_i)) - \alpha R m \\ m_{i+1} = m_i + \Delta m \end{cases}$$

eq. 13.

All'interno di questa operazione sono indicati con  $m$  il parametro fisico (in questo caso la resistività elettrica),  $d$  il vettore,  $W$  la matrice dei pesi che deriva dalle informazioni sugli errori dei dati,  $f$  l'operatore che viene usato nella soluzione del modello diretto.

Al software viene fornito il dataset ed un unico valore di resistività che costituisce una distribuzione omogenea del parametro. Con l'avvio dei calcoli il valore di alpha, definito dall'autore<sup>4</sup> parametro di regolarizzazione, viene modificato continuamente fino a che non viene raggiunta la convergenza; un buon risultato viene ottenuto con un numero basso di iterazioni. Ad ogni step viene calcolato il valore di alpha e dell'RMS. Quest'ultimo, indicato in eq. 14, rappresenta la somma dei quadrati degli scarti ed è l'obiettivo per considerare conclusa la serie di calcoli. Il programma infatti punta alla minimizzazione dell'RMS, o misfit, fino a che esso non raggiunge la convergenza desiderata (solitamente pari ad 1).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right)^2}$$

eq. 14

---

<sup>4</sup> Binley, A. R3t version 1.8, March 2013.

Nei codici è possibile indicare l'errore dei dati. Questo valore può incidere fortemente sulla soluzione finale. Per prassi, è buona norma svolgere la inversione con un errore pari a quello utilizzato per filtrare i dati di partenza tra reciproci e diretti.

Al termine del processo di inversione si ottengono dati che possiedono una determinata coordinata nel piano insieme ad un valore di resistività, adesso reale. Questi dati possono essere processati tramite diversi programmi, fornendogli la palette di colore e la rappresentazione desiderata per la successiva fase di interpretazione.

Si ricordi comunque che ad ogni inversione dei dati geoelettrici, che essi siano di resistività elettrica o di altro tipo di indagine sulla stessa fisica, non viene mai corrisposta l'univocità del risultato. L'inversione di per sé richiede di confrontare i dati di campagna con un modello prefissato, dove si modificano determinati parametri per raggiungere l'obiettivo finale. Risulta pertanto molto complesso definire un unico modello perché possono esistere risultati molto simili tra loro basati su modelli aventi un diverso numero di strati, diversi valori di resistività, diverse geometrie.

Infine la risoluzione delle tomografie ottenute sono sempre influenzate dallo schema degli elettrodi applicato dalla geometria del sito e dal rapporto segnale/rumore che viene generato.

### 2.3.2. Modello diretto tramite codice R3t

Nel corso del lavoro è giunta la necessità di utilizzare un modello diretto di resistività, per venire incontro all'interpretazione dei modelli inversi che sono stati generati dai dataset durante l'attività di campagna. Per la costruzione di un modello diretto viene scelto di utilizzare il codice R3t (versione 1.8), pubblicato da Lancaster University<sup>5</sup> e distribuito grazie al contributo del professore Andrew Binley. Si tratta di un programma eseguibile freeware, quindi di libero accesso su internet ed utilizzo su qualsiasi computer.

Il codice lavora agli elementi finiti, con prismi aventi quattro o sei nodi. Viene richiesta una mesh di elementi già costruita precedentemente dall'utente, con all'interno gli elettrodi rappresentati come nodi sulla superficie del dominio.

Sono presenti numerosi programmi, sempre freeware, per la costruzione di una mesh con le dimensioni desiderate; tra i suggerimenti indicati viene scelto di utilizzare il software Gmsh © del professore Christophe Geuzaine dell'Università di Liège<sup>6</sup> e dal professore Jean – François Remacle dell'Université Catholique de Louvain<sup>7</sup>.

La costruzione di un volume dove svolgere il modello diretto deve tenere conto di alcuni importanti criteri. Per prima cosa gli stendimenti di elettrodi sono posizionati solitamente al centro, in un volume dalle dimensioni di diverse volte maggiore rispetto alla loro lunghezza totale. Si intende sempre modificare la dimensione degli elementi andando verso l'esterno in quanto le informazioni che si ottengono sono sempre meno esplicative. Si deve distinguere all'interno del dominio la *foreground region*, ovvero l'area dove si intende ottenere una risoluzione maggiore della soluzione del flusso di corrente nel volume riducendo le dimensioni degli elementi. Questa area corrisponde al volume sotteso alle linee elettriche, insieme ad una porzione di volume verso l'esterno.

---

<sup>5</sup> Lancaster Environment Centre

<sup>6</sup> Department of Electrical Engineering and Computer Science

<sup>7</sup> Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering

In seguito si distingue la *background region*, porzione di volume maggiore che viene costruita con elementi aventi dimensioni maggiori, per ridurre il numero totale di calcoli necessari in quanto andando sempre più verso l'esterno si perdono sempre più informazioni.

La costruzione di una mesh richiede il rispetto di una certa scala di azioni e processi per giungere un risultato idoneo. Si parte sempre da punti per gli elettrodi e per i vertici dei poligoni. Ogni punto deve essere connesso tramite una linea ad un altro punto. Dalle linee si possono costruire successivamente superfici e, infine, dalle superfici si costruiscono volumi. Il software costruisce una mesh usando un passo fisso o variabile che viene indicato dall'operatore manualmente.

Per rispettare la separazione tra la *foreground* e la *background region*, ogni mesh viene costruita tramite tre differenti volumi: un primo volume che comprende l'area in superficie intorno agli elettrodi e di profondità pari a 16m (per rispettare il modello inverso e svolgere le opportune osservazioni), un secondo volume che circonda il primo appena descritto con passo della mesh maggiorato, ed infine il terzo poligono che costituisce un unico volume dove vengono contenuti i due precedenti.

### 2.3.3. *Approccio al time – lapse dei dati ERT*

All'interno di questo lavoro è stato un elemento portante la valutazione della variazione nel tempo della resistività elettrica del sito in seguito al trattamento indotto nelle acque sotterranee. La possibilità di poter confrontare dataset di uno stesso profilo nel tempo è stato un punto fondamentale nello studio e monitoraggio di diversi esperimenti che hanno interessato le acque sotterranee, perché risulta molto semplice da svolgere sul campo e non troppo dispendiosa da calcolare.

Le tomografie in time lapse offrono come reale vantaggio quello di poter monitorare la variazione di un parametro fisico, rendendolo indipendente dall'influenza delle strutture che si trovano nell'intorno e all'interno, in quanto quest'ultime sono sempre costanti e fisse nel tempo nella quale si effettua il confronto nel tempo. Per questo motivo la tomografia elettrica in time – lapse trova largo impiego in diverse esperienze in campo idrogeologico, ad esempio per monitorare i processi di trasporto nel sottosuolo per stimare parametri tramite test di infiltrazione nel suolo<sup>8</sup>.

Per poter valutare ogni tipo di variazione occorre in primo luogo assicurarsi che la sezione di tomografia sia sempre la stessa, ovvero che la posizione dei quadripoli sia identica. Ripetendo la misura sullo stesso stendimento di elettrodi in due tempi distinti si ottengono due tomografie dove la posizione dei quadripoli è identica.

Uno degli approcci più semplici per effettuare una valutazione in time lapse è osservare il rapporto delle resistenze elettriche nell'intervallo di tempo. Il calcolo in eq. 15 permette di rappresentare la sezione come variazione percentuale della resistività elettrica.

$$\frac{Rt_1}{Rt_0} \cdot 100 = \Delta\rho\%$$

eq. 15

---

<sup>8</sup> Cassiani et al. (2006) *A saline trace test monitored via time – lapse surface electrical resistivity tomography.*

Tenendo presente che  $Rt_1$  è il valore della resistività di un quadripolo al tempo 1 mentre  $Rt_0$  è la resistività del medesimo punto ad un tempo precedente, variazioni maggiori del 100% indicano che nel corso del tempo la resistività elettrica è aumentata, al contrario valori minori del 100% indicano una riduzione della resistività elettrica. La rappresentazione di questa grandezza fisica come variazione temporale è un metodo di rapida applicazione che permette di rimuovere le variazioni di resistività dovute dalla geologia del sottosuolo, come si osserva nelle sezioni con valori assoluti. L'interpretazione dei risultati in time-lapse permette di comprendere i comportamenti in sistemi molto eterogenei, come risulterà in seguito l'elaborazione dei dati campionati durante questo lavoro (vedi capitolo 4.3).

### **3. Sito campagna delle indagini**

#### **3.1. *Descrizione del sito ed inquadramento geologico***

L'indagine geofisica tramite tomografia elettrica viene eseguita in un unico sito inquinato posizionato nell'area urbana della città di Bologna. L'area interessata, come evidenziato in fig. 3.1, è un terreno di proprietà della R. F. I. S.p.A. - Rete Ferroviaria Italiana, posizionato a nord ovest rispetto alla stazione ferroviaria di Bologna Centrale (identificata come Via de' Caracci). Questa zona è soggetta negli ultimi anni da una evidente attività di recupero e ripristino dal vecchio scalo ferroviario, evidenti in zona dalla mole di attività cantieristiche dedicate a costruzioni avente differenti destinazioni d'uso, con lo scopo comune di riqualificare il quartiere. Questo punto trova conferma attraverso una rapida osservazione delle immagini satellitari e foto aeree dell'area negli ultimi dieci anni; le linee ferroviarie originariamente adibite a vie di transito secondarie per il deposito dei materiali rotabili sono state rimosse per far spazio ad una nuova area che verrà, probabilmente, recuperata completamente nei prossimi anni. Un rapido rilievo attuale nella zona tramite foto storiche, inserite in fig. 3.2, è sufficiente per evidenziare il grosso impegno che sta portando la città di Bologna a guadagnare questa vecchia area in disuso.

L'interesse generale che ha portato le diverse aziende a discutere della bonifica risiede sulla presenza nelle acque sotterranee della zona indicata di una concentrazione di composti organico-clorurati maggiore di 10 volte le concentrazioni soglia contaminazione (CSC) indicate dalla legislazione<sup>9</sup>. Questi valori sono però troppo basse per essere trattate facilmente con i classici sistemi di bonifica. Per rimuovere il contaminante viene scelto di applicare una nuova strategia, inserendo il carbone attivo direttamente nell'acquifero per interagire direttamente con il contaminante. Questa soluzione dovrebbe poter raggiungere gli obiettivi di bonifica impiegando tempi minori rispetto a soluzioni convenzionali.

---

<sup>9</sup> Vedi tab. 1 – Allegato V – Parte IV- D. Lgs 152/81

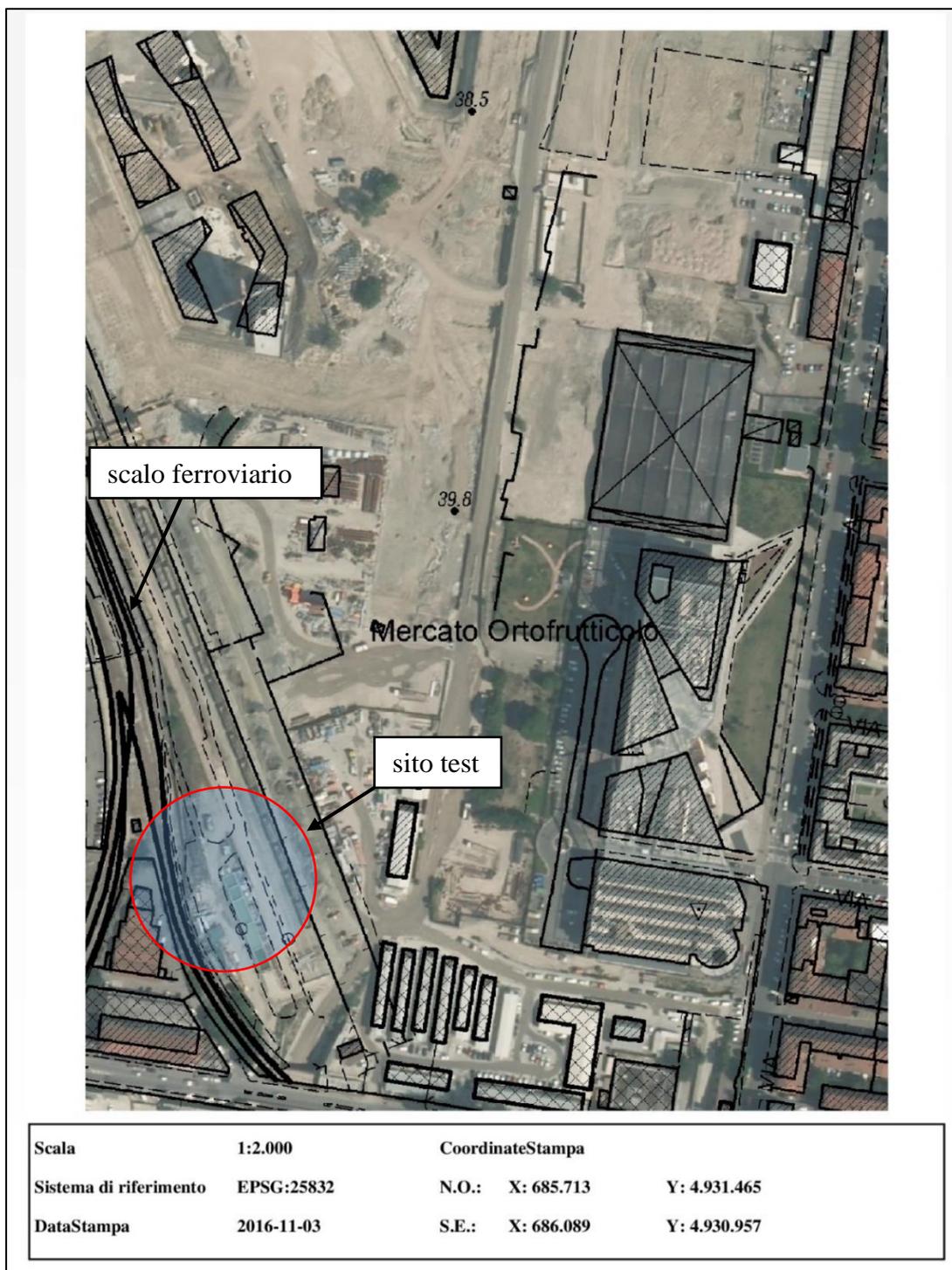


fig. 3.1 carta CTR in scala 1:2000, insieme a foto satellitare. Viene evidenziata la posizione del sito sperimentale ai fini della bonifica studiata. Fonte: portale ambiente Emilia – Romagna.



fig. 3.2 immagini satellitari che mostrano come è stato modificato nel tempo la destinazione d'uso dell'area, con intervallo dal 2003, 2007, 2009 e 2014. Fonte: (Google Earth ®)

L'inquadramento geologico dell'area si riferisce in prima approssimazione ad un classico esempio di terreno di origine alluvionale. I diversi orizzonti individuati presentano una forte alternanza ed eterogeneità delle granulometrie, da argille limose a sabbie e ghiaie. Questo primo sottosuolo contiene all'interno una serie di falde freatiche sovrapposte con una soggiacenza che viene indicata molto variabile tra 5.5m e 30m; questo dettaglio è da prendere puramente indicativo in quanto nel periodo della bonifica discussa in questo elaborato (estate 2016) la soggiacenza della prima falda era vicino ai 4m.

L'interpretazione geologica che viene fornita dall'azienda esecutrice dei lavori è stata concepita in seguito a numerosi sondaggi geognostici, svolti prima della messa in posto dei pozzi per le iniezioni durante la bonifica. Dalle carote prelevate si definiscono almeno cinque orizzonti.

- (1) tra 0 – 1 m.d.p.c. si trova un suolo estremamente alterato, interessato dalle attività antropiche avvenute al di sopra. Al suo interno sono presenti numerosi scarti come metalli e ferri residui delle vecchie traverse ferroviarie, plastica, vetri e rifiuti. (vedi fig. 3.3).
- (2) tra 1 – 4 m.d.p.c. si evidenzia un corpo argilloso avente una bassa conducibilità idraulica, il quale costituisce un orizzonte di separazione tra il piano campagna e il primo acquifero interessato dalla bonifica. (vedi fig. 3.3).
- (3) tra 4 – 11 m.d.p.c. si presenta il primo acquifero trattato durante le attività di bonifica nel sito. Dal punto di vista litologico è composto da una sabbia medio – fine contenente una buona frazione di limo. Questo dettaglio si rispecchia sulla conducibilità idraulica fornita dalla ditta, compresa tra i valori di  $k = 1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ . (vedi fig. 3.4).
- (4) tra 11 – 16 m.d.p.c. si posiziona un corpo a bassa permeabilità, composto da una argilla molto fine. Esso funge da acquiclude che separa l'acquifero sovrastante da un secondo acquifero che viene interessato dal trattamento della bonifica. (vedi fig. 3.5).
- (5) tra 16 – 20 m.d.p.c. si trova il secondo acquifero, composto da una litologia sabbiosa con presenza di ghiaia. Quest'ultimo elemento si rispecchia anche nella conducibilità idraulica in quanto è maggiore rispetto all'acquifero precedentemente descritto; i range di valori sono pari a  $k = 7 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . (vedi fig. 3.6).

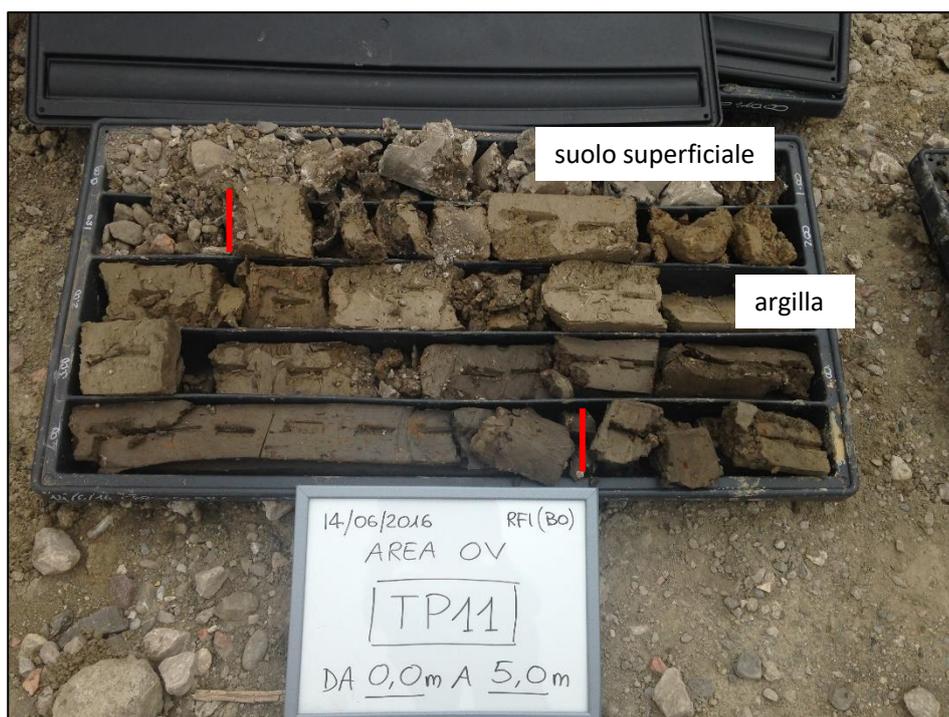


fig. 3.3 nella fotografia è presente il contenitore del materiale prelevato tra 0 - 5 m.d.p.c. Foto: Regensis.

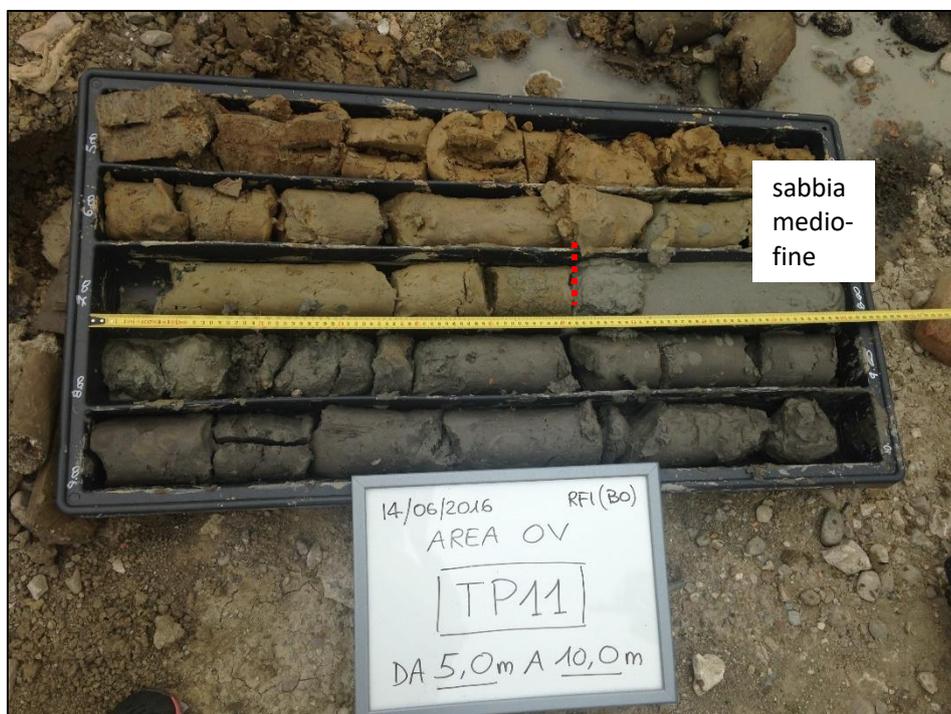


fig. 3.4 nella fotografia è presente il contenitore del materiale prelevato tra 5 - 10 m.d.p.c. Foto: Regensis.



fig. 3.5 nella fotografia è presente il contenitore del materiale prelevato tra 10 - 15 m.d.p.c. Foto: Regenesis.



fig. 3.6 nella fotografia è presente il contenitore del materiale prelevato tra 10 - 20 m.d.p.c. Foto: Regenesis.

Riassumendo la descrizione, il sito contiene una alternanza di litologie dalla sabbia verso una componente predominante di limo ed argilla, generalizzato con due acquiferi separati da un orizzonte meno permeabile. Ai fini del recupero dell'area, la contaminazione da trattare è presente all'interno dei due acquiferi, ed ha interessato anche l'orizzonte argilloso che nel mezzo li separa. Materiale appartenenti alla classe delle ghiaie sono presenti solamente in piccoli orizzonti nella porzione più profonda precedentemente osservata.

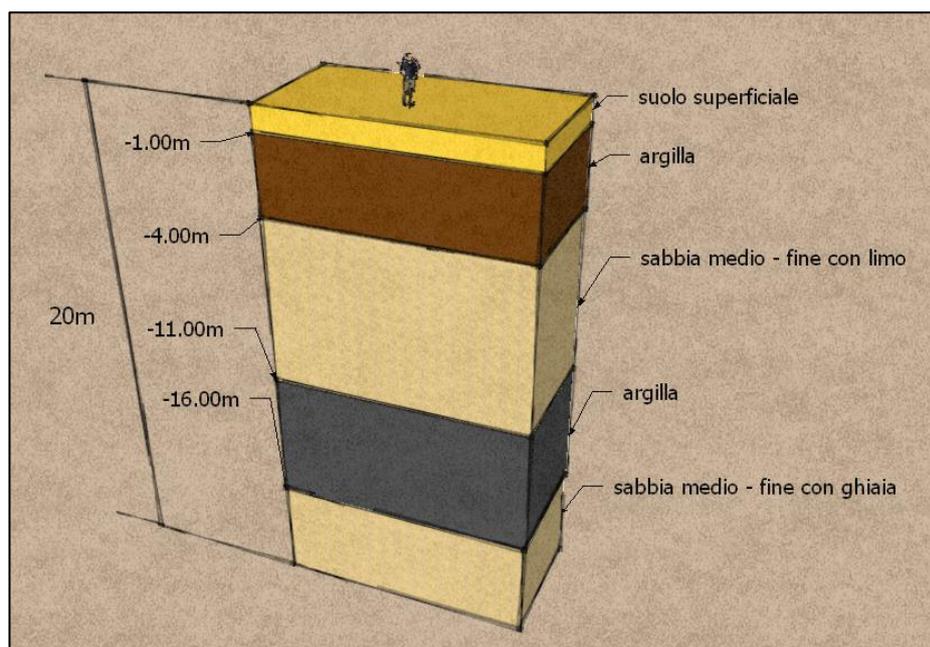


fig. 3.7 colonna stratigrafica semplificata, ricostruzione tridimensionale degli orizzonti e indicazione delle principali granulometrie per un modello concettuale.

Osservando gli elementi che sono riportati sulla carta geologica dell'ISPRA, questa area è contenuta all'interno della carta CARG 221 – Bologna, nella zona più sud – occidentale. In essa è indicato come affiorante il Subsistema di Ravenna, identificato nella carta e nelle note illustrative allegate con la sigla AES<sub>8</sub>. La descrizione indicata all'interno delle note illustrative confermano la stratigrafia osservata dalle diverse carote campionate nel sito (vedi pagine precedenti).

Questa unità è una suddivisione di rango inferiore rispetto all'unità a più grande scala, che viene identificata come Sintema Emiliano – Romagnolo Superiore (AES), alla quale appartiene gran parte dell'area compresa in questa carta

geologica. A questa unità appartengono sedimenti di origine continentale che appoggiano in discordanza su depositi marini più antichi, sedimenti di ghiaie, sabbie ed argille che formano canali e terrazzi fluviali che si propagano verso la piana inondabile; sono descritti diversi gradi di pedogenizzazione. La suddivisione in numerose unità a rango inferiore si basa su diversi criteri, in primo luogo tra le porzioni intervallive e lungo il margine appenninico, poi dall'origine da specifici corsi d'acqua.

Dal punto di vista geologico l'intero volume del sub – sistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>) ha età compresa tra il Pleistocene superiore e l'attuale Olocene (ovvero età massima di 12.000 anni), con il tetto che coincide con il piano campagna a comporre l'elemento più sommitale dell'intero Sistema. La sua base è posta in prossimità di una superficie di discontinuità, lacuna stratigrafica che viene descritta nelle note illustrative di un'altra carta geologica d'Italia (foglio 223 – Ravenna). Al tetto è presente un suolo pedogenizzato che coincide con il piano campagna. Come già indicato, la sua origine è strettamente legata all'ambiente fluviale: i sedimenti sono distribuiti nella pianura bolognese nella forma di terrazzi fluviali e di rotte fluviali, per cui si identificano depositi sabbioso – limosi di canale, sedimenti di piana esondabile. Sono indicati pochi corpi ghiaiosi, rari e concentrati solamente alla base dell'unità.



fig. 3.8 porzione del foglio CARG 221 - Bologna dell'area della città, con indicato la zona del sito. Come indicato dalla legenda, la città giace su terreni di natura alluvionale e di età quaternaria.

### **3.2. Cenni sulla tecnologia di bonifica monitorata**

Nell'area ferroviaria del bolognese questo tipo di situazione è nota da diverso tempo. Nello specifico, l'agenzia regionale ARPAE identifica una simile situazione nelle acque sotterranee in altri siti<sup>10</sup> nella pianura bolognese. Il comune di Bologna avvia un procedimento nel'anno 2004 nella zona di via de' Caracci (posizione del sito studiato qui), in seguito alla cantierizzazione che ha portato all'espansione delle linee ferroviarie con l'aggiunta dell'alta velocità ferroviaria. La causa della contaminazione principale è attribuita all'attività di manutenzione e lavaggio del materiale rotabile mediante l'uso di solventi alogenati, dispersi dalla superficie e concentrati nei primi orizzonti del suolo all'interno di una falda freatica ed una confinata. Un nuovo procedimento viene avviato nel 2011 al momento della cantierizzazione per l'area della nuova stazione centrale della città; anche in questo caso si identifica la medesima contaminazione, della quale l'origine è comune.

La posizione del plum rende sicuramente difficile individuare una soluzione efficace in quanto si pone in un'area complicata sotto numerosi aspetti. Essa infatti si distribuisce al di sotto delle linee ferroviarie che costituiscono un principale nodo per il trasporto nazionale. Ad essa si deve aggiungere anche la difficoltà di accesso per le operazioni tramite gli strumenti e macchinari necessari allo scopo.

Inoltre c'è anche da considerare il fattore temporale nell'evoluzione del plum, sia dal punto di vista della natura del contaminante (composti organici subiscono naturale riduzione nel tempo) che per quanto riguarda la sua mobilità. Si osserva nella fig. 3.8 che dalla caratterizzazione studiata nel 2004 la contaminazione viene delimitata in una posizione arretrata rispetto a quella attuale.

---

<sup>10</sup> ARPAE (2015) *Catasto dei siti contaminati*

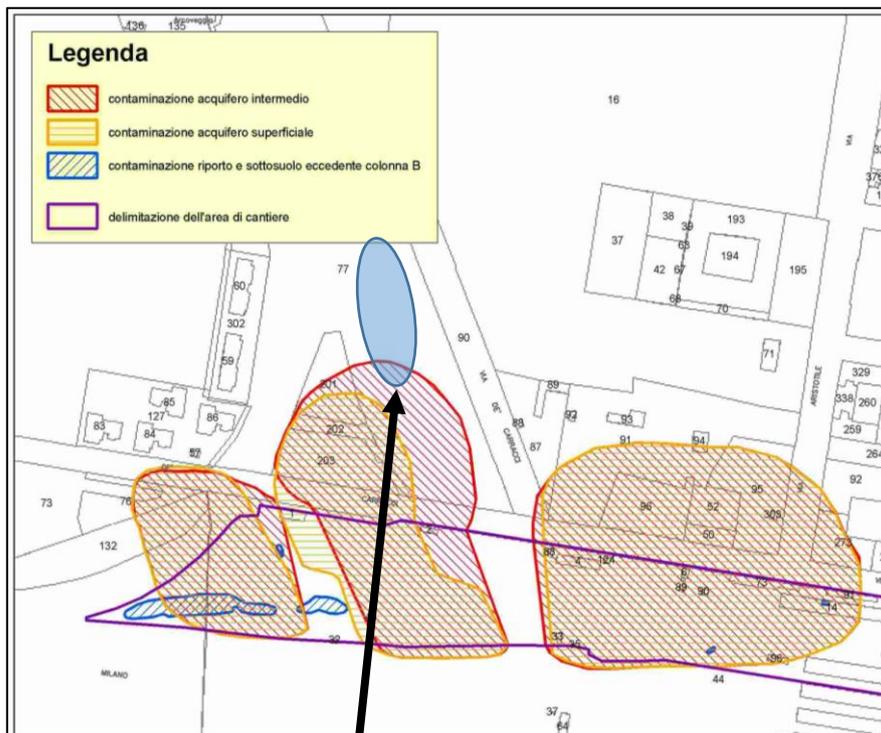


fig. 3.9 sopra, ritaglio dell'allegato del rapporto istruttorio presentato al comune di Bologna che rappresenta lo stato del plum nel 2005. Sotto, foto aerea dell'area ferroviaria di Bologna dove viene evidenziato il sito test nel 2016, attualmente interessato dalla contaminazione.

### 3.2.1. Natura chimica dei contaminanti

All'interno della falda acquifera è stato rilevato da molto tempo la presenza di determinati composti organici clorurati. Queste sostanze costituiscono negli ultimi anni una problematica sempre più crescente, dovuto senza dubbio al largo utilizzo di questi composti in diversi campi e alla comprensione dei meccanismi di inquinamento. Nel dettaglio sono due le sostanze che sono identificate e trattate dalla bonifica attuata:

(1) tetracloroetilene, noto anche come percloroetilene (con la sigla PCE) o tetracloroetilene.

(2) tricloroetilene (con la sigla TCE), noto anche con il nome di tricloroetene.

Entrambe le sostanze sono caratterizzate da un diene alla base, due atomi di carbonio uniti in un doppio legame (vedi fig. 3.10) ; progressivamente una sostituzione di idrogeno con rispettivamente quattro e tre atomi di cloro. Entrambe sono sostanze che alle condizioni standard si presentano in forma liquida, con densità maggiore dell'acqua e limitata solubilità in essa. Costituiscono fasi separate o immiscibili (fase densa non acquosa, o DNAPL). Se disperse in falda tendono a migrare verticalmente ed accumularsi nella porzione di letto dell'acquifero nel punto in cui incontrano orizzonti impermeabili. Sono entrambe sostanze volatili, comportando anche rischi alla salute per inalazione.

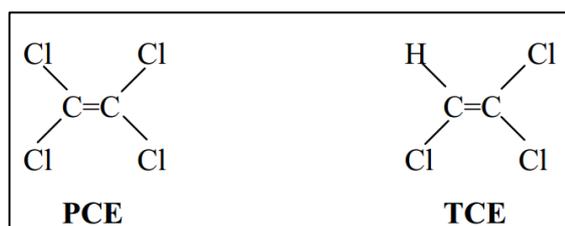


fig. 3.10 formula di struttura degli eteni clorurati descritti.

Queste sostanze sono piuttosto utilizzate come solventi nello sgrassaggio dei metalli e come solventi nell'industria chimica. Dal punto di vista della salute la loro pericolosità è legata principalmente all'ingestione e all'inalazione. Sono noti problemi al sistema nervoso centrale, fegato e reni nel breve periodo. In riferimento a quanto stabilito dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (ARIC),

queste sostanze sono indicate come potenzialmente dannose all'interno del gruppo 2°.

Dal punto di vista ambientale non sono sostanze che dovrebbero essere presenti nell'ambiente, in quanto di produzione antropica. La massima concentrazione limite ammessa nelle matrici ambientali è indicata all'interno del D. Lgs. 152 / 2006, Parte IV, Titolo V, All. 5, Tab. 1

Sostanza	Siti ad uso Verde	Siti ad uso	Acque sotterranee
	Tab. 1 – A	Commerciale	Tab. 2
		Tab. 1 – B	
TCE	1 mg/kg	10 mg/kg	1.5 µg/L
PCE	0.5 mg/kg	20 mg/kg	1.1 µg/L
DC	0.1 mg/kg	1 mg/kg	
CV	0.01 mg/kg	0.1 mg/kg	

*tab. 1 concentrazioni massime indicate nel D. Lgs 152/2006 per i principali composti clorurati.*

Dal punto di vista della reattività queste sostanze possono andare incontro a diverse direzioni. Esistono diverse vie di attenuazione naturale, ad esempio tramite sostituzione del gruppo alogenato o ossidazione. La velocità delle reazioni dipende sempre dalle condizioni nell'intorno, cinetiche e redox. PCE e TCE sono recalcitranti alla sostituzione in ambiente aerobio, mentre invece esiste la possibilità di sostituire i gruppi alogenati in condizioni anaerobiche.

La contaminazione nel sito presenta valori rispetto alle massime concentrazioni ammesse per legge di più di 10 volte le CSC. Questo significa che sono presenti valori medi di 15 µg/L di TCE e 11 µg/L di PCE nelle acque nel sito, con punte massime indicate dall'azienda esecutrice dei lavori di 100 µg/L in punti che sono però al di fuori del sito studiato.

### 3.2.2. *Concetti sulla dechlorinazione riduttiva*

In ogni progetto di bonifica si deve sempre partire dalla caratterizzazione della contaminazione in ogni suo aspetto: natura chimica, distribuzione spaziale e temporale del plum, .... Oltre a questo dettaglio segue sempre una caratterizzazione del sito anche dal punto di vista della geologia, struttura granulometrica e tessiturale del suolo al di sotto del piano campagna, presenza di falda e sue variazioni nel tempo, ed altre numerose caratteristiche. Tutti questi numerosi dettagli e fattori vengono presi in considerazione nel momento in cui si predispone il progetto per la bonifica, in particolare per trovare la migliore tecnologia che risulti nel complesso la più efficiente per il trattamento della contaminazione in un determinato sito. Da quest'ultimo concetto si può affermare infatti che qualsiasi decisione è strettamente sito – specifica, per cui una soluzione utilizzata per un determinato sito che ne sia risultata efficace può non esserselo per una seconda area differente nonostante la stessa tipologia di contaminazione. Criteri principali per l'identificazione della migliore tecnologia sono senz'altro (1) la efficienza del trattamento come appena descritto, (2) la facilità di applicazione in aree di difficile accesso come è caratterizzato il sito bolognese in area urbana, ed infine (3) l'accettabilità sociale del trattamento, che a sua volta si correla con le problematiche ambientali del punto precedente.

La contaminazione presente all'interno del sito bolognese, nonostante sia ben oltre i limiti indicati (vedi CSC in tab. 1, pagina precedente), non è sufficiente per fornire una buona resa con i trattamenti classici come il pump – and – treat oppure per avanzare verso la bioattenuazione naturale. Proprio in questo contesto vi è l'intenzione di sfruttare la via della biodegradazione dei composti organici, la quale ricade in uno dei naturali processi di attenuazione (insieme a dispersione, volatilizzazione ed adsorbimento). In accordo a quanto indicato dai protocolli dell'EPA<sup>11</sup>, la decisione di porre il rimedio ambientale ai processi di attenuazione

---

<sup>11</sup> *Environment Protection Agency, (1998) Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water.*

naturale avviene solo in seguito alla dimostrazione che essi possano offrire un reale vantaggio, in un definito intervallo di tempo rispetto ad altri metodi; EPA infatti non considera l'attenuazione naturale un rimedio di default per questo tipo di situazioni. La stessa agenzia indica anche il dettaglio della caratterizzazione del sito necessaria, imponendo anche un programma di monitoraggio a lungo termine.

I solventi clorurati come il percloroetene (PCE) e il tricloroetene (TCE) sono sostanze biodegradabili per natura grazie alla presenza di determinati microorganismi all'interno del suolo superficiale; la biodegradazione è in genere il più importante processo di riduzione di queste sostanze nelle acque. Esistono comunque diverse strade, riassunte nell'uso di questi composti come accettori di elettroni, donatori di elettroni o degradati tramite il cometabolismo dei batteri. Il primo di questa lista è indicato come più importante, e vede l'impiego di PCE e TCE come accettori di elettroni<sup>12</sup> in ambiente anaerobio, essendo in una forma molto ossidata, all'interno della dechlorinazione riduttiva. L'intero fenomeno consiste in una serie di reazioni dove viene sostituito un atomo di cloro con un atomo di idrogeno (vedi fig. 3.11), portando il PCE in TCE, poi in di-cloroetilene (DCE), poi in cloruro di vinile (VC) ed infine in etene. L'intera reazione comporta nel tempo aumento di cloro nel sistema, e porta soprattutto alla formazione e presenza di sostanze che sono più pericolose per la salute umana come il cloruro di vinile. In tal caso è fondamentale assicurarsi che l'intera catena di reazioni possa giungere alla conclusione, verificando il tasso e resa delle reazioni.

Numerosa bibliografia dimostra che esiste una grande varietà di microorganismi che intervengono, in quanto spesso non esiste un'unica specie in grado di compiere l'intera catena di reazione, ma ognuna si concentra solamente su una o due reazioni. Sono tra i più rappresentativi quelli appartenenti al genere *Dehalcoccoides*. Gran parte di essi sono naturalmente presenti all'interno del suolo; una fase fondamentale

---

<sup>12</sup> def. Composto in grado di accettare elettroni durante REDOX, generalmente molto ossidati. I microorganismi sfruttano queste reazioni per ottenere energia.

è la verifica della loro presenza, in quanto non è possibile secondo la normativa vigente inserire microrganismi all'interno delle acque sotterranee.

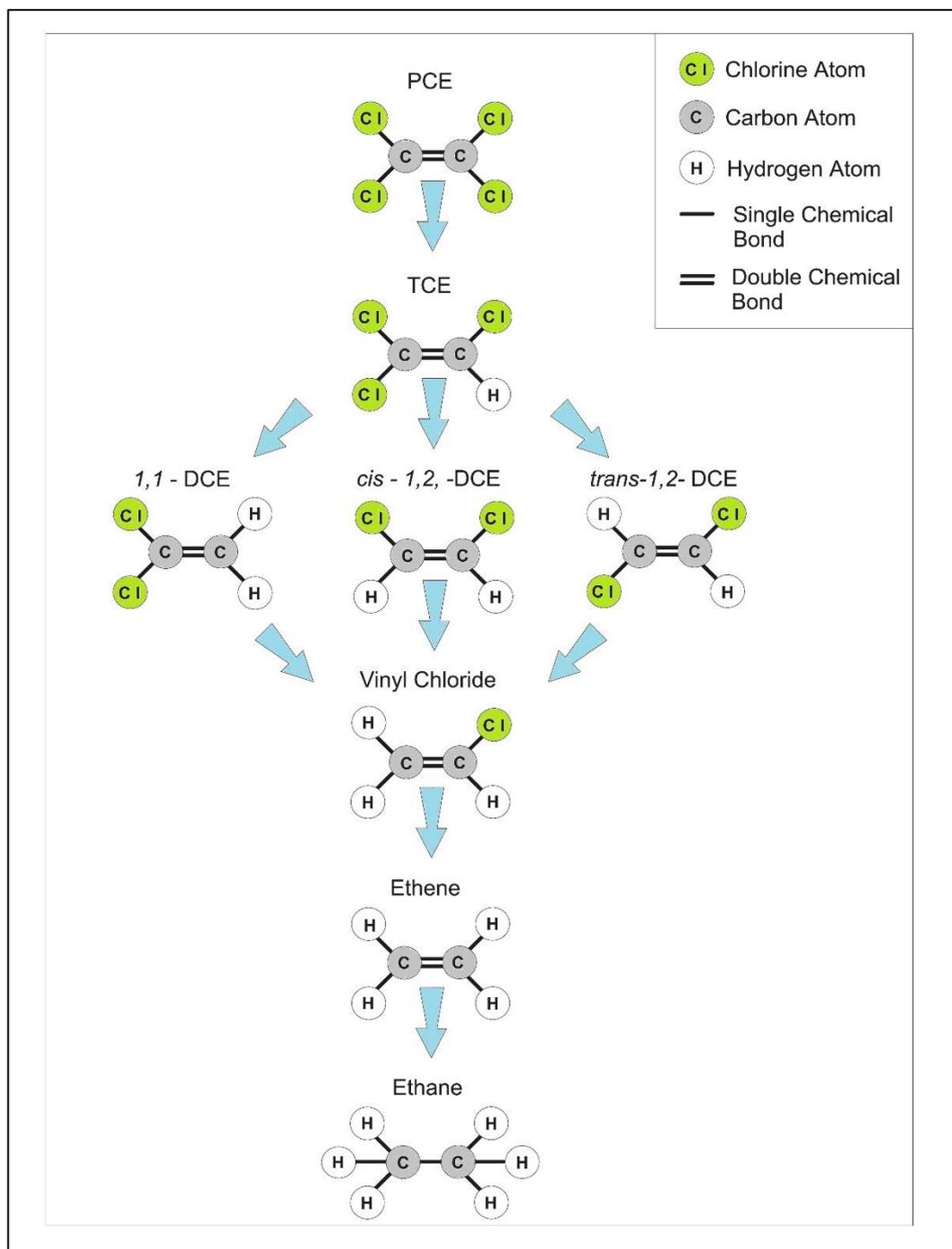


fig. 3.11 schema della dealogenazione dei solventi clorurati presenti in sito. Durante la catena di reazione viene sostituito progressivamente un atomo di cloro con uno di idrogeno. Etene, ed etano, risultano sempre molto meno pericolosi nei confronti della salute umana rispetto a PCE e TCE.

### *3.2.3. Sostanze utilizzate per il rimedio nel sito*

Per la risoluzione della problematica appena descritta, l'intenzione principale presa dalle diverse aziende è quella di sfruttare la biodegradazione. Le basse concentrazioni presenti in falda limitano di fatto la resa di questa soluzione, per cui intendono trovare una strada alternativa. Il progetto della bonifica è basata sul trattamento in situ del plum con una combinazione di adsorbimento dei composti clorurati insieme alla riduzione biologica degli stessi.

Per svolgere questo lavoro la compagnia che svolge la bonifica intende sfruttare un prodotto specifico, sperimentato insieme all'Università La Sapienza di Roma. In questa situazione risulta anche la prima applicazione in Europa di questo tipo di trattamento nei confronti di solventi organici clorurati in acquifero. Non si intende estrarre acqua ma solo inserire nel terreno del carbone attivo in soluzione; nello scopo diretto di questo lavoro di tesi si intende solo osservare se il monitoraggio geofisico è suscettibile all'inserimento e distribuzione di questa soluzione acquosa all'interno dell'acquifero, verificandone anche eventuali variazioni nel corso del tempo a breve termine.

Regenesis è anche la stessa azienda che produce i prodotti usati per il recupero del sito, quindi si è occupata anche della preparazione delle soluzioni e loro iniezione nelle acque sotterranee. Per fornire una descrizione semplice ed esaustiva, sono due gli elementi fondamentali che caratterizzano questa tipologia di bonifica.

(1) carbone attivo colloidale, identificato con il suo nome commerciale PlumeStop®. Questo è l'agente adsorbente che si pone in prima linea nel trattamento della contaminazione. Si tratta di particelle di carbone dalle dimensioni estremamente piccole, dal diametro inferiore di 2.5µm, per poter essere sospesa in una soluzione acquosa. La sostanza viene costruita appositamente per questo utilizzo e si prevede che sia temporaneamente mobile all'interno del suolo. La sospensione si presenta con un colore nero. Non sono disponibili informazioni dal produttore sulla degradabilità del prodotto nel tempo.

(2) ammendanti zuccherini, sostanze donatrici di elettroni necessarie essenzialmente per sostenere la crescita della carica microbica nel suolo, quindi

innescare rapidamente la bioattenuazione. Viene aggiunto in mix di più sostanze, principalmente acido lattico e glicerolo (vedi fig. 3.12). Si presenta come un liquido dal colore giallo inodore.

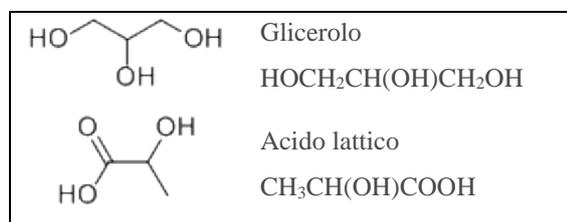


fig. 3.12 formule di struttura dei due ammentanti. Fonte: chemicalbook.com, CAS list.

Come indicato, il protagonista nel trattamento ricade nel carbone, costruito appositamente con grani dalle dimensioni veramente ridotte (1 – 2 µm). La sua struttura estremamente fine gli permette di permeare all'interno della porosità, dove aderisce alle particelle solide come un microfilm. Le ridotte dimensioni forniscono elevata superficie specifica per operare sui contaminanti adsorbendoli. Il processo è estremamente rapido ma non consiste in una reazione con i contaminanti: PCE e TCE vengono estratti direttamente dalla fase acquosa per renderli disponibili ai microorganismi che effettuano la bioattenuazione. Allo stesso tempo il carbone serve per offrire anche una superficie utile alla colonizzazione dei microorganismi.

La soluzione viene preparata in sito (vedi fig. 3.13) e immesso all'interno dell'acquifero tramite iniezioni a basse pressioni da pozzi predisposti nel sito, in modo che possa distribuirsi con un flusso dispersivo; le basse pressioni sono necessarie per non indurre fratturazioni, le quali potrebbero costituire vie di fuga per la soluzione.

Esso viene progettato per lavorare seguendo un ciclo ben preciso; all'adsorbimento segue l'attività microbiologica per la degradazione della sostanza organica, permettendo alla particella di adsorbire altre sostanze. Questo ciclo innesca nell'acqua un movimento del contaminante dalla fase acquosa al carbone, elemento fondamentale perché non viene mai immesso all'interno degli orizzonti a minore conducibilità idraulica, come lo è di fatto lo strato argilloso che intercorre tra i due acquiferi di questo sito (colonna stratigrafica, 11 – 16m). Un contaminante nell'acquifero si concentra preferibilmente nella zona a maggiore conducibilità

idraulica, ma progressivamente l'instaurarsi di diversi fenomeni tende ad accumularlo in piccole dosi nelle zone a minore permeabilità per diffusione chimica (differenza di gradiente di concentrazione in soluzione). Queste masse sono critiche per diversi contesti in quanto lentamente possono uscire dall'acquitarzo/acquiclude che li contiene; ad esempio in seguito ad un classico trattamento di pump – and – treat la rimozione dell'acqua porta nel sistema nuova acqua, che a sua volta innesca un movimento chiamato “di retrodiffusione” o *background* per differenza di gradiente dall'acquiclude/acquitarzo che lo delimita.

Quest'ultimo fenomeno viene preso in considerazione durante l'adsorbimento del contaminante dall'acqua, quindi PCE e TCE tendono nel tempo a muoversi dall'orizzonte argilloso verso i due acquiferi per andare incontro alla bioattenuazione prevista dal trattamento.



*fig. 3.13 impianto sul posto per la preparazione della soluzione. L'acqua viene portata dall'esterno tramite una cisterna. Ad ogni pozzo l'azienda prepara la soluzione con una determinata concentrazione, sulla base del loro studio preliminare.*

### 3.2.4. Cronoprogramma

Il progetto della bonifica ha seguito un cronoprogramma che si può ritenere veramente rapido per questo tipo di operazioni, in quanto è intercorso un intervallo di tempo relativamente breve dai primi test in laboratorio fino al full – scale desiderato.

(1) Le prime prove di laboratorio vengono svolte presso il Dipartimento di Chimica de La Sapienza Università di Roma entro la fine del 2014, con test in colonna sull'efficacia del carbone attivo per il trattamento. Questa prova consiste in una colonna verticale nella quale viene inserito materiale simile a quello in sito, insieme ad acqua contenente una concentrazione dei contaminanti pari a quella presente nel sito bolognese. In essa viene pompata lentamente una soluzione di carbone all'interno della colonna, dove il suo movimento viene controllato grazie al deciso colore del prodotto. Questi test puntano a verificare la quantità di carbone che rimane adesa con i grani, l'effettiva capacità di abbattimento della contaminazione, l'eventuale washing – out dovuto all'iniezione di nuova acqua pulita.

(2) Il pre – test viene svolto durante il mese di ottobre. In una limitata area nel sito vengono predisposti 6 pozzi ciechi (vedi fig. 3.14) di lunghezza massima 20 metri, dotati di valvole per l'iniezione della soluzione solamente all'interno degli acquiferi e quindi tra 4 – 11m e 16 – 20m. Questa fase è sempre prevista all'interno di un progetto di bonifica, per testare l'efficacia del trattamento in una prova a piccola scala. Nello specifico viene usata una soluzione contenente solamente carbone, ad una concentrazione dichiarata di 100g/L per un volume totale di 4m<sup>3</sup> di soluzione per ogni pozzo.

(3) il full – scale viene implementato rispetto al pre – test con l'aggiunta di 13 nuovi pozzi multivivello, valvolati ogni 33cm con le medesime profondità all'interno dell'acquifero. Inizialmente previsto per maggio, viene invece effettuato a partire dal 21 luglio 2016 con una serie di operazioni che si concludono il 10 agosto 2016. È nella fase di full – scale che entra in gioco il monitoraggio geofisico che viene analizzato in questo lavoro di tesi magistrale in geofisica.



fig. 3.14 posizione dei pozzetti usati durante i pre – test, insieme agli stendimenti evidenziati dalle linee rosse..

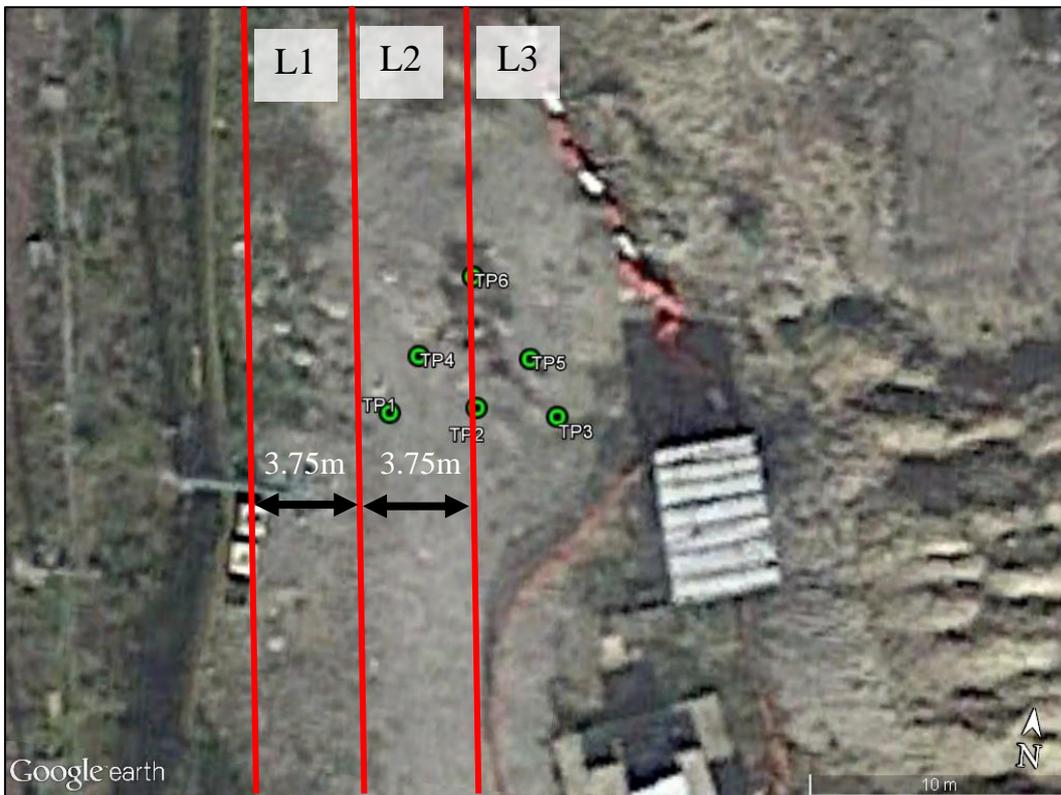


fig. 3.15 immagine zoomata rispetto alla precedente, per focalizzare la posizione dei pozzetti.

### **3.3. *Progetto della campagna di indagine***

Elemento chiave di qualunque lavoro che prevede una campagna di indagine nel terreno è senza dubbio la scelta della strumentazione, posizione dei punti di campionamento, organizzazione delle tempistiche di lavoro. Considerando che viene iniettata una soluzione acquosa all'interno della falda, la strumentazione deve essere in grado di fornire un segnale ben discriminato al di sotto della tavola d'acqua.

La tomografia elettrica è stata individuata come strumento che meglio si può applicare in un contesto idrogeologico, con il principale obiettivo quello di quantificare una variazione nella resistività elettrica indotte dalle operazioni di recupero del sito contaminato.

Data la piccola area disponibile del sito, e altrettanta piccola area di lavoro dove sono presenti i pozzi, l'esperimento sul campo viene svolto ponendo nel sito tre stendimenti di elettrodi paralleli tra di loro. Le misure vengono effettuate con un largo salto temporale, in particolare ad una settimana di distanza durante l'attività del cantiere perché sono lunghe le tempistiche delle loro operazioni. Per assicurarsi la posizione fissa delle sezioni si decide di lasciare in posizioni fisse nel suolo gli elettrodi; con questo accorgimento la posizione non può mai cambiare nel tempo e si riduce anche il tempo di lavoro per la preparazione della strumentazione durante la giornata di raccolta dati.

Per le misure è utilizzato un IRIS Syscal Pro 72, della Iris Instrument, georesistivimetro in dotazione al Dipartimento di Geoscienze (vedi fig. 3.16) insieme al resto del materiale accessorio. A questo strumento sono collegabili 72 elettrodi tramite tre cavi multicanali, ventiquattro per ciascuno elemento.

Lo strumento viene connesso ad una batteria esterna per mantenere costante la sua potenzialità, mentre il contatto con il terreno avviene tramite elettrodi di acciaio.



fig. 3.16 Georesistivimetro IRIS Syscal Pro 72, strumento utilizzato per questo lavoro.

Per le linee viene scelta la configurazione dipolo – dipolo con schema skip – 4, ovvero uno schema di combinazione AB – MN dove ogni coppia di elettrodi è distanziata da altri quattro (es. 1 – 6 e 7 – 12). Questa configurazione contiene 5179 combinazioni di quadripoli, riducendo il tempo di acquisizione a circa 30 minuti e mantenendo un buon rapporto segnale/rumore. La collocazione delle linee deve tenere in considerazione la posizione dei pozzetti (vedi fig. 3.14) e dell'area effettivamente disponibile (vedi fig. 3.17).

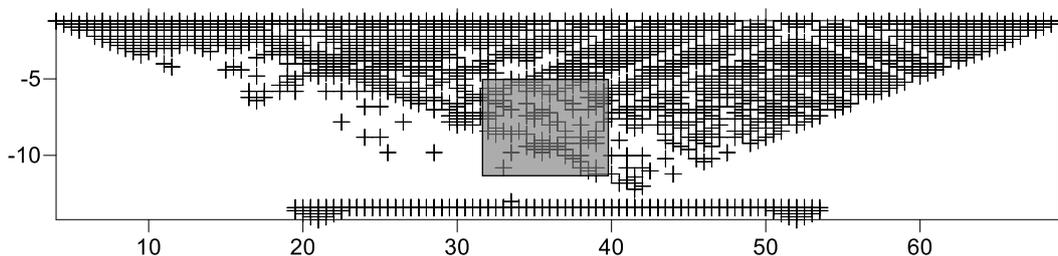


fig. 3.17 posizione dell'anomalia prevista dalle iniezioni e distribuzione spaziale dei quadripoli nella sezione, secondo la configurazione dipolo – dipolo skip 4.

La prima giornata sul campo è stata usata per identificare la reale situazione del sito e dell'area libera alle operazioni, per poi effettuare una prima indagine. Ogni stendimento contiene 72 elettrodi con spaziatura di 1m, per un totale di 71m; sono parallele tra loro e distanziate di 3.75m.

Le linee hanno direzione NS rispetto al sito, con L1 più a ovest ed L3 più a est. Gli elettrodi sono posizionati a terra facilmente nella parte iniziale in quanto il suolo sembra meno disturbato, mentre nella parte più inferiore è presente asfalto in diversi punti ed è stato necessario bucarlo per inserire gli elettrodi.

Il progetto iniziale ha subito modifiche nel corso del lavoro per una serie di problematiche incontrate nelle tempistiche e nel sito stesso. Lo spostamento del cronoprogramma della bonifica, inizialmente indicate in maggio, hanno seguito anche altre operazioni nel sito tra predisposizione di nuovi pozzi e rimozione dei vecchi materiali depositati che hanno comportato una parziale perdita di una parte degli elettrodi, dovendoli ripristinare. Difficoltà operative hanno coinvolto anche la linea L3, la quale non è stato possibile posizionare con elettrodi fissi sia per le modificate dimensioni del sito disponibile all'attività studiata (accanto era in corso uno scavo archeologico, il sito confinava con il deposito del materiale scavato), per la presenza di asfalto in punti precedentemente coperti e per l'interferenza con le attività in atto.



*fig. 3.18 a sinistra, linea L2 canale 48-72, elettrodi fissi all'interno dell'asfalto. A destra linea L3, con elettrodi differenti che vengono posizionati durante la giornata di acquisizione dati.*

La linea L3 viene modificata durante il lavoro riducendone la sua dimensione; vengono utilizzati 48 elettrodi con spaziatura 1m. L'acquisizione dati con schema skip – 4 riduce il numero di combinazioni a 2105 quadripoli e il tempo di acquisizione a 10 minuti. Viene scelto di mantenere comunque questa linea in quanto il tempo necessario per la sua acquisizione è notevolmente minore rispetto a quello richiesto per raggiungere il sito e preparare la strumentazione. La posizione dell'area di lavoro e delle linee viene indicata nella fig. 3.19.

La fig. 3.18 viene inserita per mostrare le condizioni operative nel sito, quindi le difficoltà di contatto che possono aver incontrato gli elettrodi nelle diverse giornate di acquisizione dati.



fig. 3.19 sopra immagine satellitare dell'area, sotto immagine tridimensionale per esplicitare meglio le dimensioni operative dell'area.

### **3.4. Verifica conducibilità dei prodotti iniettati**

Uno degli elementi che non è stato tenuto in considerazione immediatamente durante le attività sul campo è stato misurare la conducibilità elettrica del prodotto iniettato nel sito e l'acqua utilizzata. Questa mancanza è stata osservata solamente nel momento in cui è stato necessario interpretare il dato ottenuto.

Per verificare dal punto di vista qualitativo la variazione di conducibilità dei prodotti rispetto all'acqua è stato richiesto una piccola quantità di queste sostanze alla Regenesis, azienda produttrice. Le misure di conducibilità elettrica sono state svolte usando due strumenti portatili in dotazione al Dipartimento di Geoscienze, su soluzioni preparate in laboratorio in base delle concentrazioni effettivamente immerse nel sito.

Gli strumenti utilizzati sono i seguenti (vedi anche fig. 3.20):

(1) conduttimetro portatile della Hanna Instruments ®, modello HI 8033, chiamato in seguito Hanna nelle tabelle che riportano i valori di conducibilità elettrica misurati. È uno strumento portatile di facile utilizzo, dotato di una sonda in PVC che contiene al suo interno il trasduttore per la misura e che viene semplicemente immerso all'interno della soluzione. Può misurare con diverse scale un range di valori compresi tra 0 – 1999  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con la possibilità di aumentare la precisione compensando la temperatura per mezzo di una manopola presente nella parte frontale dello strumento.

(2) conduttimetro LAQUAtwin della Horiba ®, modello B-771, chiamato in seguito Aqua nelle tabelle che riportano i valori di conducibilità elettrica misurati. È uno strumento veramente portatile, dove il sensore è compatto con il corpo e il campione viene posizionato su di esso con una pipetta, potendo effettuare una misura su poche gocce di soluzione (minimo 0.12ml). Le misure richiedono pochi secondi e vengono forniti con una gamma compresa tra 0 – 199  $\text{mS}/\text{cm}$ , con una risoluzione pari a 0.01  $\text{mS}/\text{cm}$ . Possiede anche un sensore per la misura della temperatura, rendendo più accurato il valore indicato.



fig. 3.20 a sinistra il conduttivimetro Hanna, a destra il conduttivimetro di fabbricazione della Horiba.

Le misure risultano molto qualitative, sicuramente non accurate quanto una medesima misura sfruttando strumenti di laboratorio. Sono comunque ritenute sufficienti per ottenere un valore qualitativo da inserire poi nella valutazione ed interpretazione dei dati.

L'acqua utilizzata nel sito viene portata da un cantiere adiacente tramite botti, ma non è stato possibile definire la sua reale origine. È probabile che possa trattarsi di normale acqua prelevata dal sistema di acquedotti, ma è una supposizione non verificabile in quanto non è stata portata dalla compagnia che effettuava i lavori nel cantiere, né è stato un loro interesse misurarne il parametro fisico.

Per le misure in laboratorio viene usata normale acqua di rubinetto, per misurare la variazione prima e dopo l'aggiunta dei prodotti. La compagnia Regenesi ha fornito le concentrazioni preparate da loro sul sito, dove ci sono differenze per ogni pozzo che variano tra 70 – 94 g/L di carbone, eccetto per i primi 6 pozzi dove sono state iniettate concentrazioni inferiori in quanto già utilizzati durante il pre – test. La

soluzione rappresentativa per le iniezioni del 2016 viene basata sul pozzo TP12 pari a 80.63g/L di carbone nel primo acquifero. La conduttività misurata corrisponde a (1) usando l'Hanna 1.135 mS/cm e (2) usando l'aquatwin 1.16 mS/cm.

L'aggiunta dell'ammendante zuccherino, sempre secondo le originali dosi usate dalla compagnia, porta la soluzione a valori di (1) usando l'Hanna 1.816 mS/cm e (2) usando l'aquatwin 1.85 mS/cm.

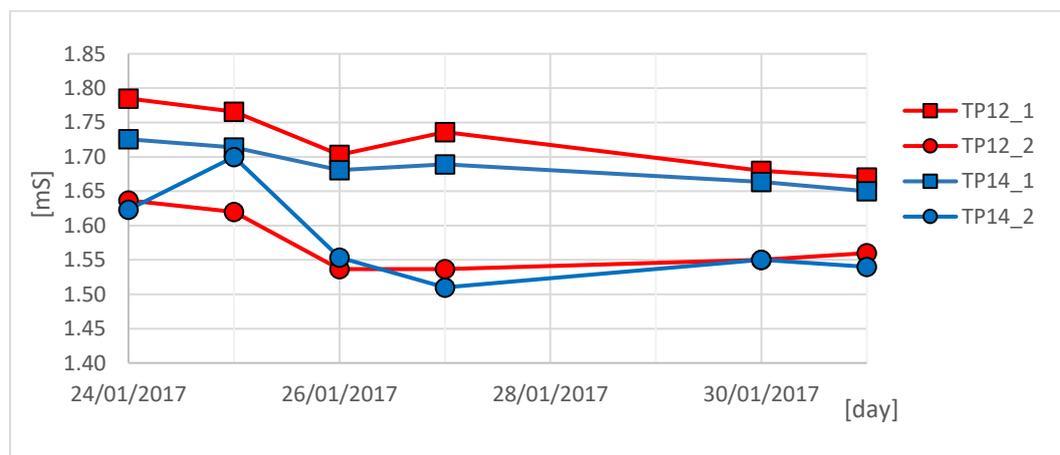
Con questi valori si stima che la conducibilità media delle soluzioni inserite dovrebbero aggirarsi a valori intorno a 5.4 – 5.5  $\Omega$  m.

È chiaro che l'aggiunta degli zuccheri incide fortemente sulla proprietà elettrica della soluzione. Un dettaglio che non viene considerato preventivamente nella campagna di indagine è la presenza nel sito di carbone già inserito durante il pre – test. Tale materiale infatti è presente e potrebbe influenzare il dato che corrisponde al primo background acquisito dal lavoro di aprile. In quella fase del piano di bonifica viene provata la tecnologia inserendo 3m<sup>3</sup> per ciascun pozzo, ognuna preparata sul sito con una concentrazione di carbone pari a 100 g/L. Si tratta di valori che superano di molto quelle utilizzate durante il full – scale. La conduttività elettrica misurata per una soluzione preparata in laboratorio ha valori che intercorrono tra 1.341 mS/cm – 1.39 mS/cm, ovvero si stima una resistività intorno ad 8  $\Omega$ m.

Questo dato non tiene in considerazione la originale composizione dell'acqua utilizzata, né si hanno informazioni sulle condizioni dell'acqua all'interno della falda acquifera. Essa potrebbe essere anche molto differente in quanto nelle condizioni operative in luglio è stata inserita acqua stoccata temporaneamente in una cisterna all'aperto, quindi relativamente più calda rispetto alle temperature in sito (una differenza tra 25 30°C e 15°C circa non è così errata come supposizione). La conducibilità elettrica cambia del 2% per ogni grado centigrado.

Durante queste misure si vuole anche testare una seconda ipotesi, sulla durabilità dell'effetto di variazione della resistività elettrica dei prodotti inseriti nel tempo. Questa domanda nasce tenendo in considerazione la natura di tale sostanze. Lo zucchero infatti è l'elemento che modifica in maniera incisiva la resistività, ma dalle indicazioni del produttore l'ammendante si idrolizza in acqua fornendo composti organici più semplici. Inoltre vengono utilizzate per essere materia prima di rapido consumo, per facilitare lo sviluppo batterico e sostenere energeticamente le reazioni di bioattenuazione precedentemente discusse.

In un breve esperimento volto un piccolo esperimento monitorando due soluzioni per due settimane, misurando a cadenza giornaliera la conduttività con gli strumenti sopracitati. Gli esiti non confermano l'ipotesi, anche se è evidente una lieve riduzione, non così significativa da poter essere evidenziata con il monitoraggio geofisico.



graf. 1 il simbolo quadrato indica le misure con lo strumento Hanna, il cerchio lo strumento Aquatwin. Viene misurato un debole abbassamento nel corso del tempo, legato alla degradazione degli ammendanti.

Nella lettura del graf. 1 si tenga in considerazione che lo strumento numerato come (1) è lo strumento Hanna, quindi il (2) è l'aquatwin. Nel dettaglio dell'esperimento:

- TP12 contiene una concentrazione di 80.63 g/L di carbone, più 9.41 g/L di ammendante zuckerino.
- TP14 contiene una concentrazione di 69.735 g/L di carbone, più 9.31 g/L di ammendante zuckerino.

## 4. Risultati del monitoraggio geofisico

### 4.1. *Premessa*

Le prime ipotesi che sono nate in seguito al suddetto lavoro di campagna ha dovuto tenere in considerazione anche informazioni e dati ottenuti sul campo in un tempo precedente allo svolgimento del full – scale monitorato ad agosto del 2016. In questo paragrafo viene quindi raccolto un riassunto di queste informazioni, in quanto risultano importanti per discutere dei risultati ottenuti dal lavoro di campagna.

Come già citato in precedenza, la fase preliminare della bonifica è stata svolta con iniezioni di piccoli volumi di soluzione in un'area limitata di circa 50m<sup>3</sup>. In tale contesto viene svolto un primo monitoraggio tramite due stendimenti di elettrodi, per provare a raccogliere una informazione possibilmente valida. Il dato ottenuto in questo contesto è risultato molto disturbato, ed è stato possibile svolgere una inversione di due dataset di una linea in due momenti successivi, con un time – lapse da discutere.

Il background mostrato in fig. 4.1 presenta la condizione indisturbata del sito, mentre il secondo dataset viene ottenuto in seguito alle iniezioni. Dalle sezioni si identifica un primo orizzonte dal piano campagna molto conduttivo. Segue poi l'orizzonte interessato dalle quote delle iniezioni con corpi a diverse, quindi l'acquifero, contenente diversi corpi con resistenze elettriche differenti. Le differenze di resistività elettrica non sono molto marcate tra tutti i corpi; i valori sono generalmente contenuti al di sotto dei 100  $\Omega\text{m}$ , con valori minimi di 15 – 20  $\Omega\text{m}$  all'interno dell'acquifero.

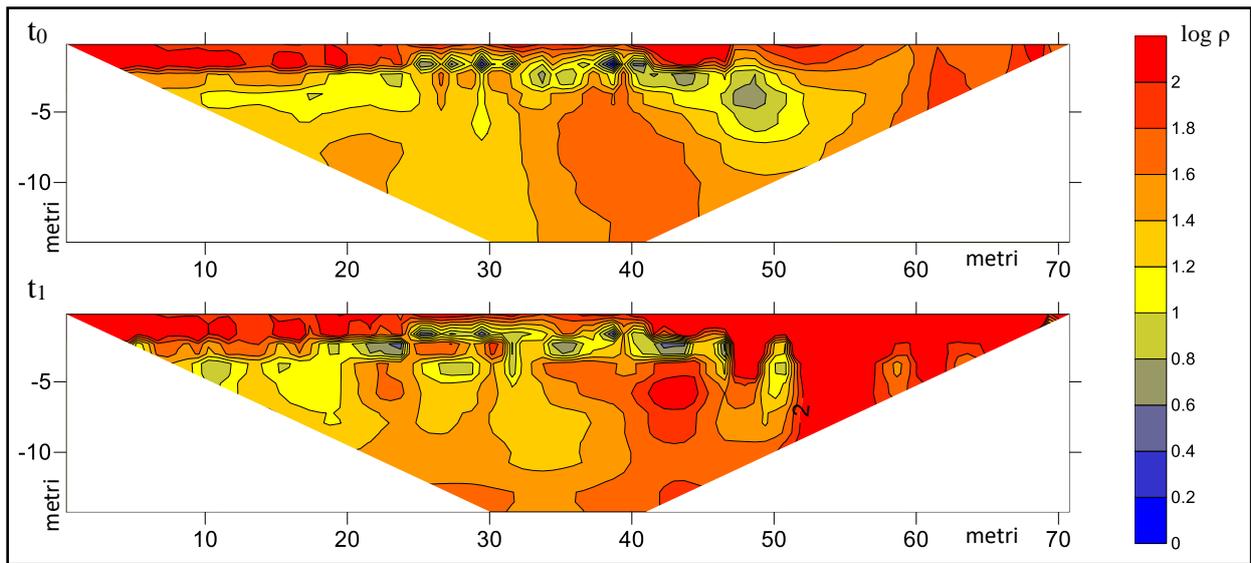


fig. 4.1 informazioni provenienti dal pre - test. In queste sezioni si osserva un sensibile aumento di resistività nel tempo nella porzione centrale, dove si trovano i pozzi e viene inserito il carbone.

L'azione delle iniezioni in questo caso ha comportato nel tempo l'aumento della resistività elettrica in due zone all'interno dell'acquifero. Esse si pongono ai lati dei pozzi usati per inserire il carbone nell'acquifero, il quale occupa quindi la zona rappresentata da un segnale più conduttivo. La posizione di queste piccole iniezioni, circa  $3\text{m}^3$  per ciascuno dei sei pozzi, sono indicate qualitativamente nella fig. 4.2. Queste brevi informazioni, antecedenti alla fase di full -scale, sono da tenere ugualmente in considerazione nel momento di interpretazione del dato finale in quanto verrà osservato continuamente nel tempo un sottosuolo già interessato da un trattamento artificiale.

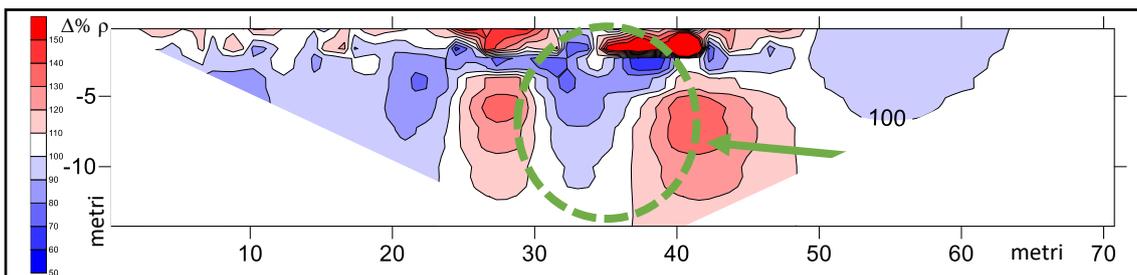


fig. 4.2 time - lapse dei dataset del pre - test, visti in fig. 4.1. Il debole abbassamento di resistività elettrica si pone nella zona dei pozzi dove si inserisce il carbone.

Questi dataset non possono essere confrontati facilmente con i dati ottenuti durante il monitoraggio svolto in quanto la sezione non corrisponde a quelle progettate. La fig. 4.1 proviene da un profilo proiettato circa N-S tra le linee L1 ed L2 e viene campionata come un dipolo – dipolo skip 0.

## 4.2. Valori assoluti e sezioni di resistività

Il monitoraggio del sito nel tempo viene svolto partendo da un progetto iniziale, con relative modifiche dovute a diverse complicazioni non previste riscontrate sul sito durante le operazioni.

In primo luogo occorre precisare che nelle successive immagini non verranno mai mostrate né discusse tomografie o sezioni ottenute dalla linea L3, in quanto nonostante sia stata svolta la misura ad ogni giornata sul campo, i dati ottenuti contengono disturbi e rumori (noising) del segnale, rendendolo di fatto inutilizzabile per eventuali valutazioni nell'area. Questo dettaglio è una gran perdita in questo lavoro in quanto, potenzialmente, con un numero di sezioni maggiori questo tipo di indagine potrebbe portare ad una valutazione della distribuzione del parametro indagato tramite modelli tridimensionali.

Ogni dataset viene trattato per l'inversione del dato come descritto nel paragrafo 2.3, mantenendo i quadripoli reciproci che non superino una soglia di errore del 10% ed una inversione con la stessa soglia di errore percentuale.

La prima assunzione che si può trarre dall'analisi qualitativa delle due stringe di elettrodi è un generale trend di aumento di resistività elettrica avvenuta nel tempo. Tutte le sezioni presentate hanno seguito il data processing descritto in precedenza, mantenendo una buona qualità dei dati una volta eliminati i quadripoli che hanno subito problemi sul campo. La risoluzione orizzontale è garantita dalla scelta della sequenza dipolo – dipolo. Come indicato in fig. 4.3, le dimensioni dello stendimento sono tali per cui la risoluzione verticale ottenuta sia ottima per osservare nel completo il comportamento dell'acquifero più vicino al piano campagna. Le quantità di soluzione acquosa inserite sono puntuali e hanno interessato un ordine di volume limitato.

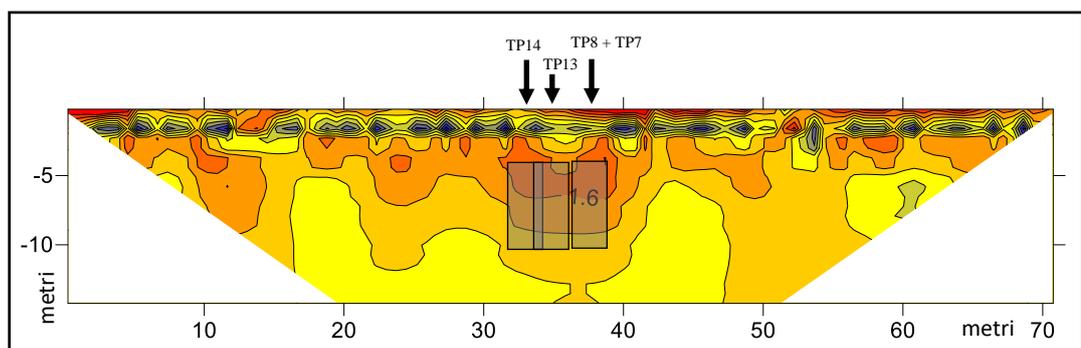


fig. 4.3 la risoluzione verticale è tale da occupare pienamente la zona interessata dalle iniezioni. I volumi e le posizioni di alcune di esse sono indicate con dei poligoni all'interno della sezione.



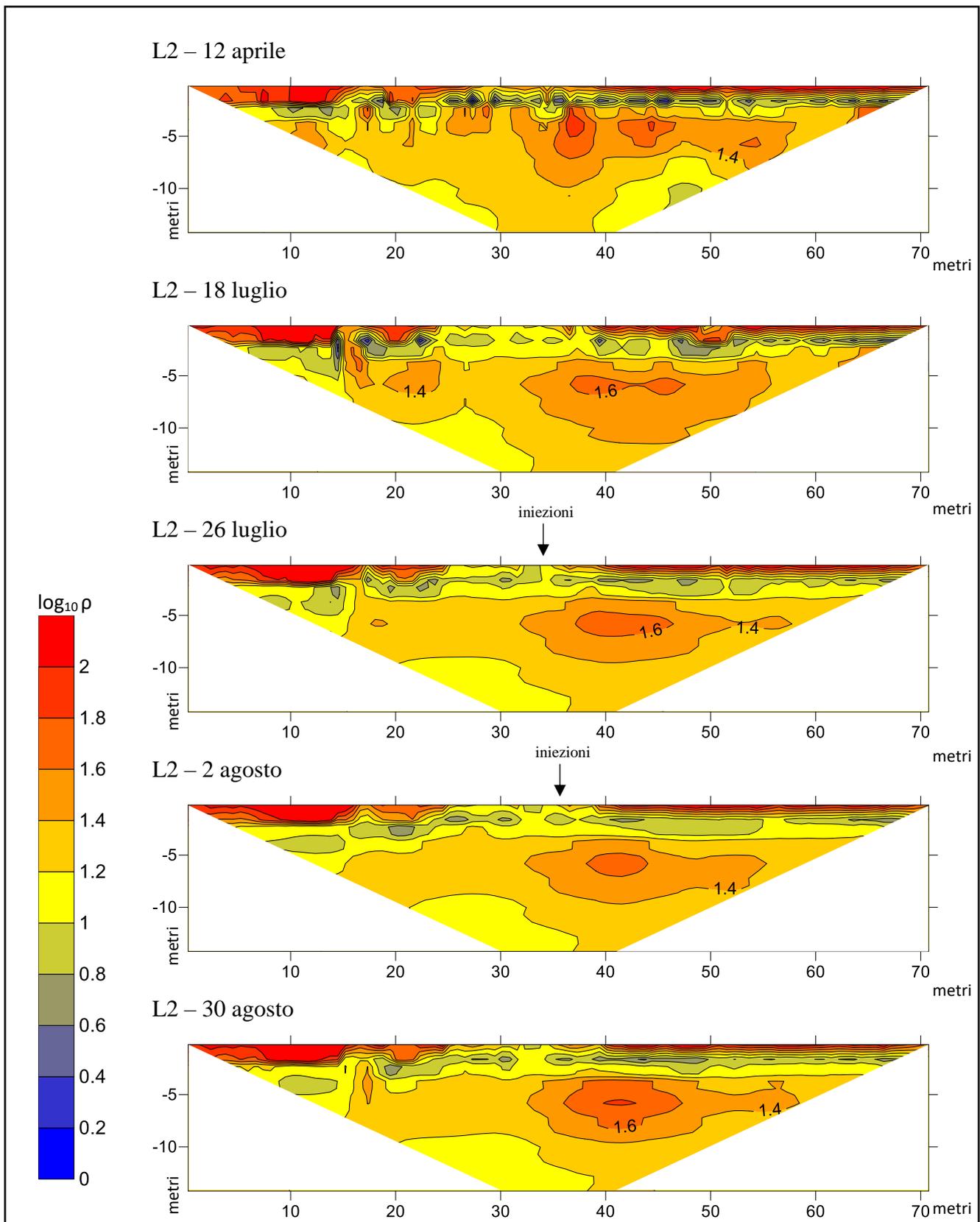


fig. 4.5 sezioni L2 con valori assoluti di resistività elettrica espressi in scala logaritmica. Da queste sezioni si apprezza meno l'aumento di resistività elettrica che sta avvenendo nel corso del tempo, nella zona di iniezione del carbone.

In totale sono svolte cinque giornate: le prime due giornate sono stati sopralluoghi sul sito per posizionare gli elettrodi e misurare il background di partenza del sito, successivamente due giornate vengono svolte in contemporanea all'attività del cantiere e per ultima un'unica giornata per la valutazione dopo due settimane dal trattamento svolto.

All'interno del background iniziale il segnale non mostra particolari variazioni di resistività, le quali rientrano in un range al di sotto dei  $100 \Omega m$ . Nei profili spicca un primo spessore al di sotto del piano campagna, circa 2 metri, dove il segnale ottenuto mette in evidenza un orizzonte estremamente conduttivo. Esso corrisponde all'argilla più superficiale, materiale che si caratterizza per natura elettricamente più conduttivo rispetto al sottostante orizzonte sabbioso, ma il segnale potrebbe risentire anche di altro materiale metallico o ferroso presente al suo interno. Si osserva, sia in L1 (fig 4.4) che in L2 (fig. 4.5), nello spessore corrispondente all'acquifero superficiale la presenza di più corpi resistivi. Si potrebbe assumere che la loro presenza sia associata a porzioni dell'orizzonte più ricche in sabbia, osservazione che nasce dalla consapevolezza della forte eterogeneità presente nel sito. Andando più in profondità il segnale si mostra meno resistivo ma la risoluzione si riduce sensibilmente, completandosi con una profondità di indagine che per la configurazione scelta e distribuzione degli elettrodi è approssimabile a circa 15m.

### **4.3.      *Sezioni di resistività in time – lapse***

Per poter apprezzare meglio in quale direzione si sta muovendo la variazione del parametro elettrico misurato si procede ad una valutazione in time – lapse tra i vari dataset. Queste immagini non rappresentano il valore assoluto della resistività elettrica ma rappresentano bensì la sua variazione percentuale ad un tempo rispetto ad un tempo precedente. Queste variazioni sono positive se avviene aumento nel tempo, viceversa sono negative nel caso di decremento del suo valore assoluto.

Tra le due linee le maggiori differenze si possono osservare prevalentemente su L1. Nel corso del tempo si apprezza un sensibile aumento della resistività, predominante nella zona centrale delle sezioni dove corrisponde pressoché ai punti in cui è inserita la soluzione in falda acquifera. Il segnale elettrico aumenta di un ordine tra il 15 – 30%. Dalle immagini in fig. 4.6 si può osservare anche che tra il background e l'inizio delle operazioni la zona che diventando più conduttiva è il primo suolo e i primi metri del sito. Tale comportamento potrebbe essere giustificato assumendo una variazione nel contenuto d'acqua del terreno legato al periodo stagionale in corso.



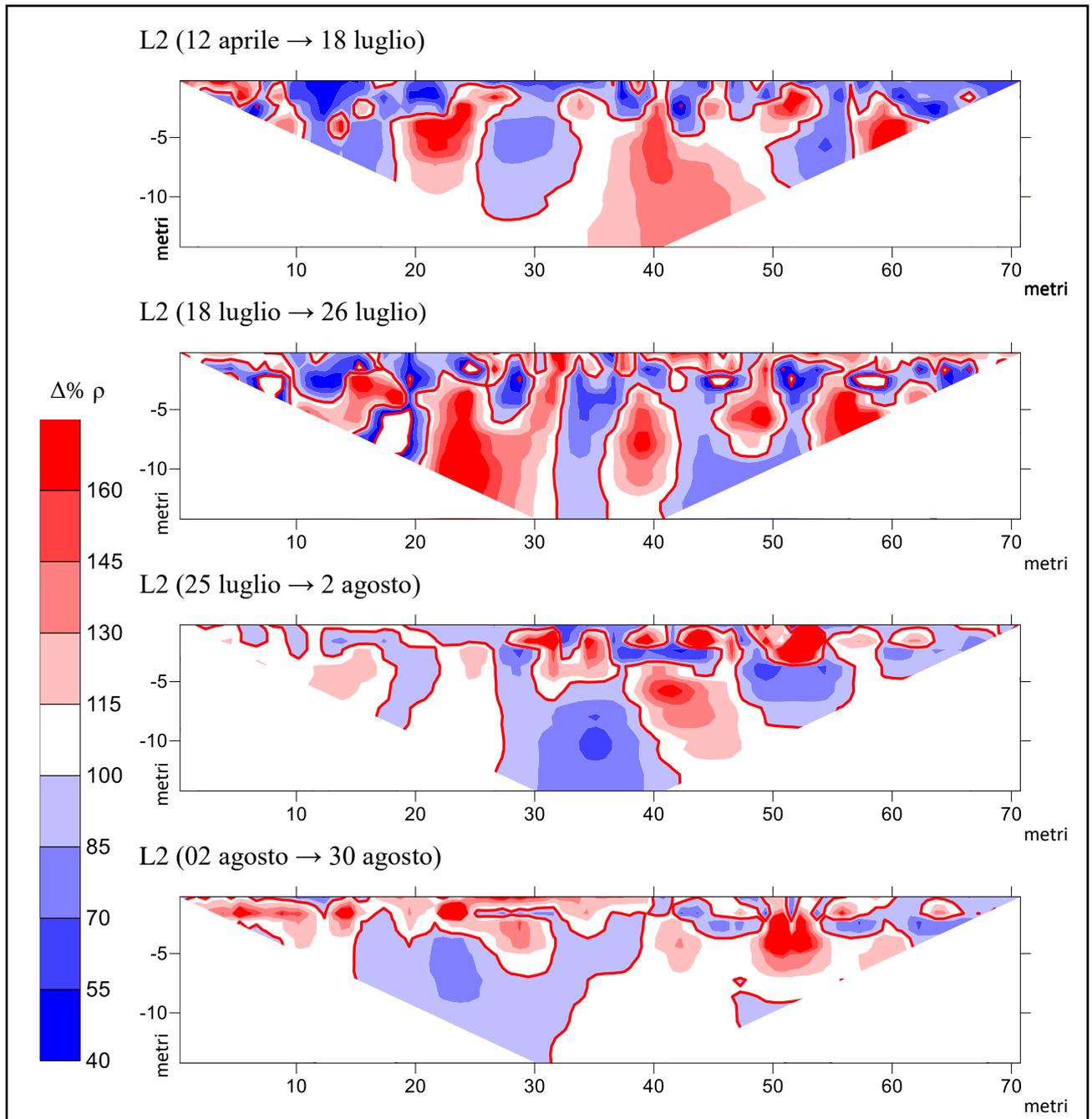


fig. 4.7 time lapse delle sezioni L2, espresse in variazioni percentuali nel tempo. In rosso la resistività elettrica aumenta, viceversa in blu diminuisce. La resistività elettrica aumenta in zone limitrofe alle iniezioni, e diventa predominante nella sezione ottenuta ad attività concluse.

Risultati analoghi possono essere individuati anche attraverso il time lapse dei dataset della stringa di elettrodi di L2. I volumi di sostanze inserite nell'acquifero sono concordi con le dimensioni delle anomalie che si apprezzano in queste numerose sezioni. Anche in questa posizione si osserva un crescente aumento di resistività elettrica, con variazioni del 15 – 30%. Il dataset risulta di una qualità migliore rispetto alla linea precedente, oltre ad essere ben posizionata e centrata rispetto all'area di lavoro. È osservabile in fig. 4.7 anche un time – lapse tra il background di luglio e le prime iniezioni nella settimana successiva. Il suolo risponde con un trend positivo per tutto il periodo delle operazioni. Le variazioni sono di minore entità solamente nell'ultimo dataset, ovvero ad operazioni concluse. Come nel caso precedente, le zone in cui il segnale indica un abbassamento della resistività elettrica si pone pressoché nei primi 1 – 2m di terreno e suolo; questa porzione non viene interessata dalla bonifica mentre potrebbe essere un effetto della stagionalità.

#### 4.4. *Modello diretto di resistività elettrica*

Una delle operazioni che si dovrebbero compiere all'inizio del progetto di monitoraggio è verificare se la strumentazione è effettivamente in grado di misurare il segnale da studiare. Nel caso specifico, occorre valutare se la strumentazione ERT è in grado di essere sul terreno suscettibile a delle variazioni che possono essere ricondotte dall'inserimento di materiale a differente resistività elettrica nel terreno. Questo tipo di operazioni possono essere verificate in fase preliminare effettuando un modello diretto del sito, calcolando un simulato del sito in condizioni indisturbate e un secondo simulato nel sito interessato dalla bonifica discussa.

Per la costruzione di un modello diretto occorre senza dubbio conoscere preventivamente la stratigrafia del sito, proprietà elettriche degli orizzonti, presenza di eterogeneità. Maggiori elementi possono rendere il modello molto fedele alla realtà, ma occorre reperire questo tipo di informazioni sul campo o da altre fonti.

Il modello diretto che viene discusso in seguito viene idealizzato considerando le informazioni base note dell'area investigata. Esso consiste in una successione di quattro strati: (1) 4m di argilla, (2) 7m di orizzonte sabbioso, (3) 5m di argilla, (4) 5m di sabbia. Il simulato al tempo successivo alla bonifica (vedi fig. 4.8, pagine successive) integra anche i pozzi, dove le iniezioni sono rappresentati come elementi parallelepipedi inseriti nel secondo orizzonte. La loro dimensione viene calcolata tenendo conto degli effettivi volumi di acqua inseriti (informazioni fornite dall'azienda esecutrice dei lavori), considerando una stima del contenuto massimo di acqua all'interno del suolo. Per stimare il volume totale di terreno si può considerare il contenuto volumetrico di acqua  $\theta_w = [adim]$ , indicata in eq. 16 ottenuto come rapporto tra il volume di acqua e il volume totale del terreno.

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_{tot}}$$

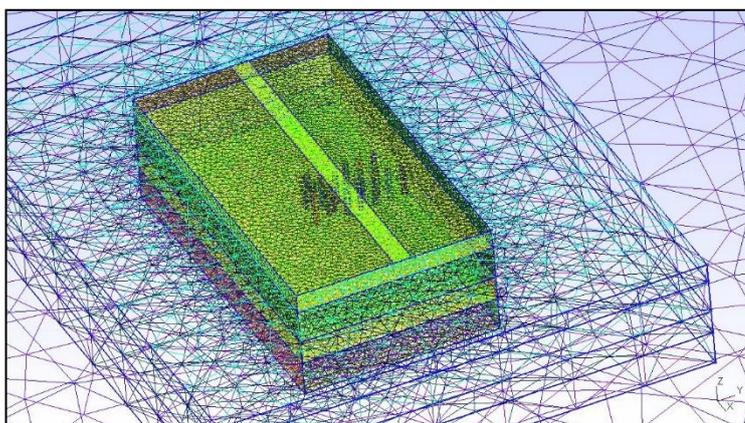
eq. 16

Considerando un valore medio per questo tipo di terreno e granulometria di  $\theta_w = 0.3$ , dal volume di acqua totale inserito viene calcolato il volume di terreno teoricamente permeato dalla soluzione, se si assume che essa entrando nel suolo

sposti e sostituisca completamente l'acqua presente all'interno della porosità. I calcoli sono riassunti nella tab. 3, dove dai volumi indicati dall'azienda esecutrice dei lavori sono ricavati i volumi di terreno interessati, quindi successivamente è possibile determinare le dimensioni dell'anomalia rappresentata dalla soluzione di carbone nello spazio.

Data	Volume soluzione iniettata = $V_w$			Volume terreno = $V_s$	
		[L]		[m <sup>3</sup> ]	
3-ago-16	TP1	1833		12.64	
3-ago-16	TP2	1833		12.64	
3-ago-16	TP3	1633		11.26	
3-ago-16	TP4	1833		12.64	
3-ago-16	TP5	1833		12.64	
3-ago-16	TP6	1603		11.06	
2-ago-16	TP7	3150		21.72	
28-lug-16	TP8	3150		21.72	
27-lug-16	TP9	3150		21.72	
2-ago-16	TP10	3150		21.72	
29-lug-16	TP11	3150		21.72	
1-ago-16	TP12	3150		21.72	
28-lug-16	TP13	3150		21.72	
27-lug-16	TP14	3150		21.72	
25-lug-16	TP15	3150		21.72	
26-lug-16	TP16	3150		21.72	
21-lug-16	TP17	3150		21.72	
22-lug-16	TP18	3150		21.72	
26-lug-16	TP19	3150		21.72	
<b>Totale [m<sup>3</sup>]</b>			<b>51.5</b>	<b>Totale [m<sup>3</sup>]</b>	<b>355</b>

tab. 2 volumi inseriti all'interno del primo acquifero e stima dei volumi di terreno interessati, necessari per determinare i volumi dell'anomalia nel modello diretto di resistività elettrica.



*fig. 4.8 mesh tridimensionale del modello simulato nel sito, con i diversi orizzonti e volumi delle iniezioni.*

Oltre ai volumi, il modello diretto richiede la resistività elettrica dei materiali. Per gli orizzonti del terreno sono scelti valori osservando il primo background: (1) 25 ohm m, (2) 40 ohm m, (3) 15 ohm m, (4) 40 ohm m. Per la soluzione iniettata viene scelto un valore basato sulle misure in laboratorio sui campioni dei prodotti inseriti (vedi cap. 4), scegliendo un unico valore medio pari a 6 ohm m.

Tenendo in considerazione un errore del 5% nell'inversione del dato, si osserva tra i due istanti che l'anomalia modifica nello spazio la distribuzione delle isolinee in fig. 4.9. Qualitativamente la soluzione porta un segnale conduttivo, espresso con una riduzione del parametro elettrico dal simulato.

Nella quantificazione della variazione del segnale si può discutere con le prossime due immagini. Le sezioni precedenti si basano su tutta l'intera sequenza di acquisizione della strumentazione, assumendo quindi che la strumentazione non abbia mai alcun problema che comporti perdita di quadripoli. Nella fig. 4.10 è conturizzata una immagine che si basa sulla differenza percentuale dei valori di queste due sezioni. Nella zona di interesse dalla bonifica sono quantificati riduzioni della resistività elettrica fino al 10%. Questa immagine è solamente frutto di una differenza matematica.

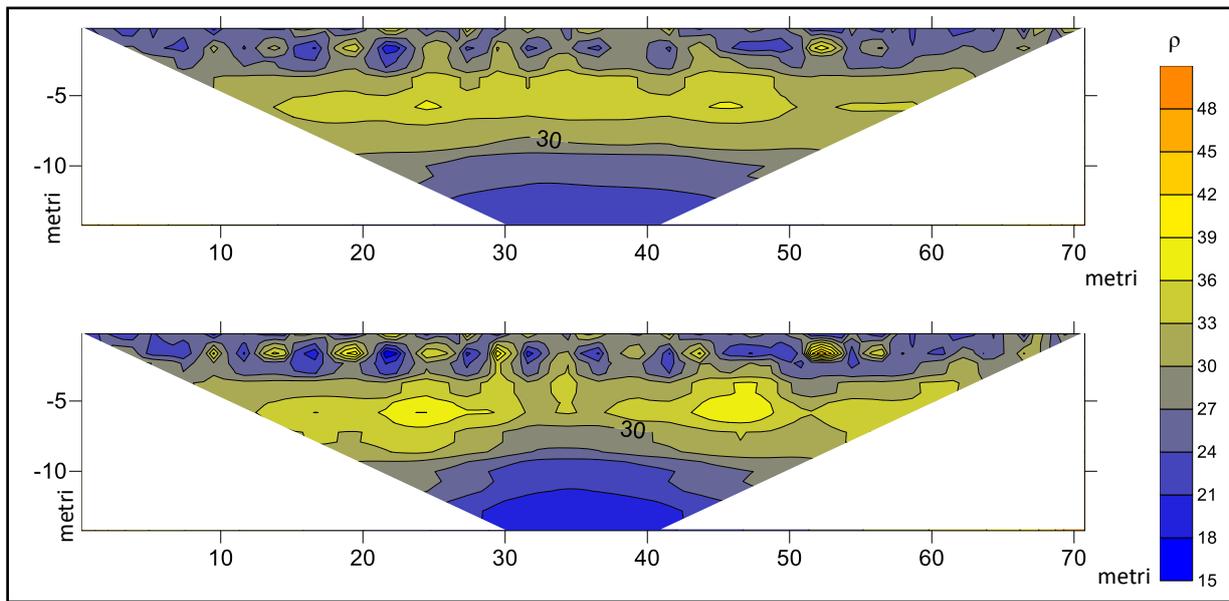


fig. 4.9 forward simulato della linea L1, sopra indisturbato, sotto in presenza del carbone inserito nel suolo.

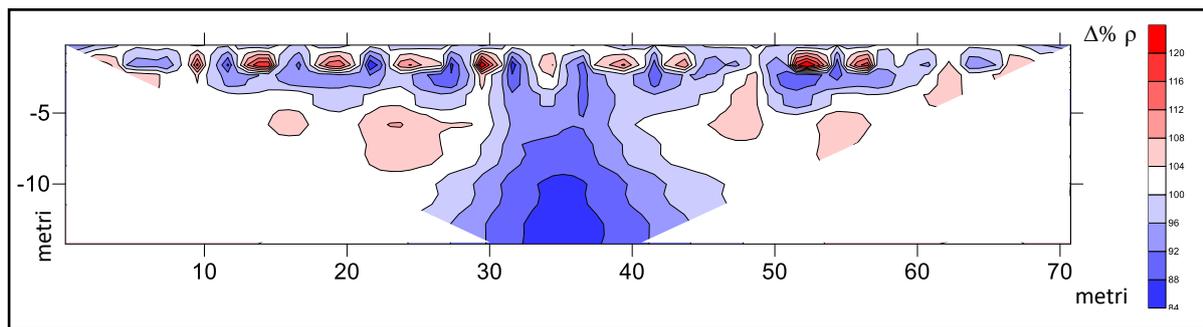


fig. 4.11 variazione percentuale della resistività elettrica tra i due istanti simulati nel forward.

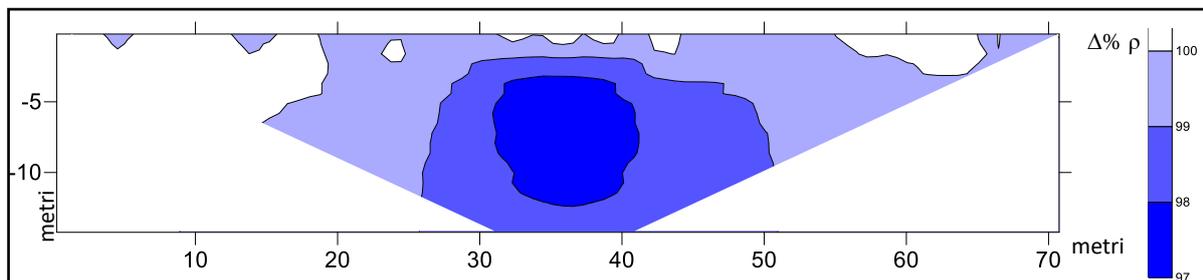


fig. 4.10 time - lapse ottenuto dall'inversione del rapporto tra i due dataset in fig 4.9. L'abbassamento della resistività elettrica misurato è molto lieve.

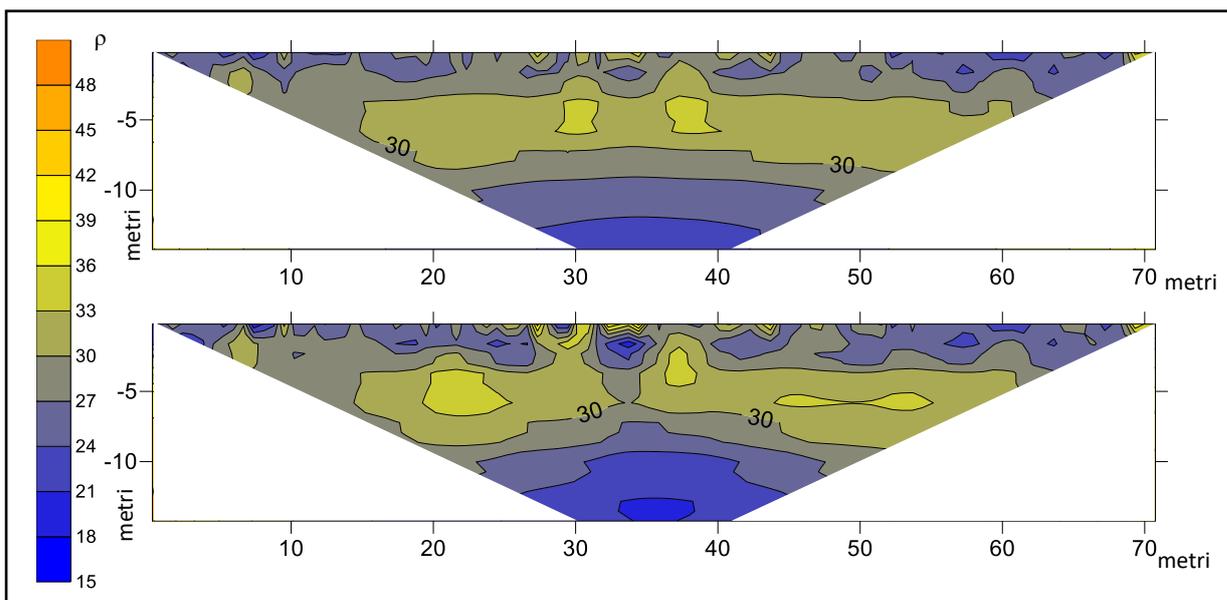


fig. 4.12 forward simulato della linea L2, sopra indisturbato, sotto in presenza del carbone inserito nel suolo.

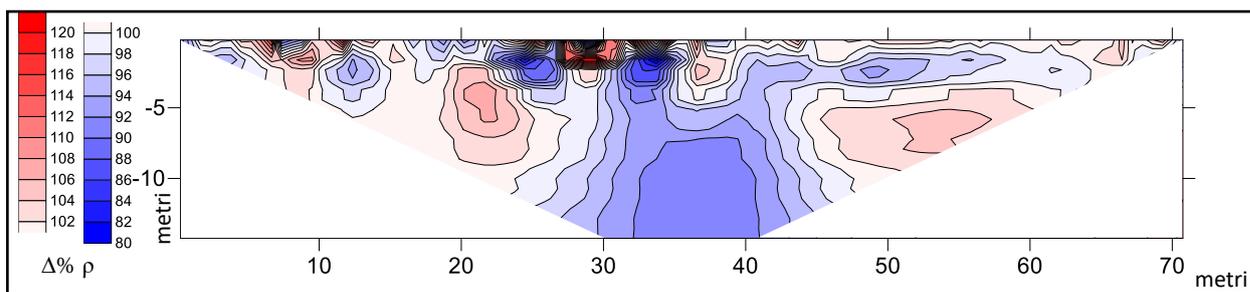


fig. 4.14 variazione percentuale della resistività tra le due sezioni del forward, in fig. 4.12.

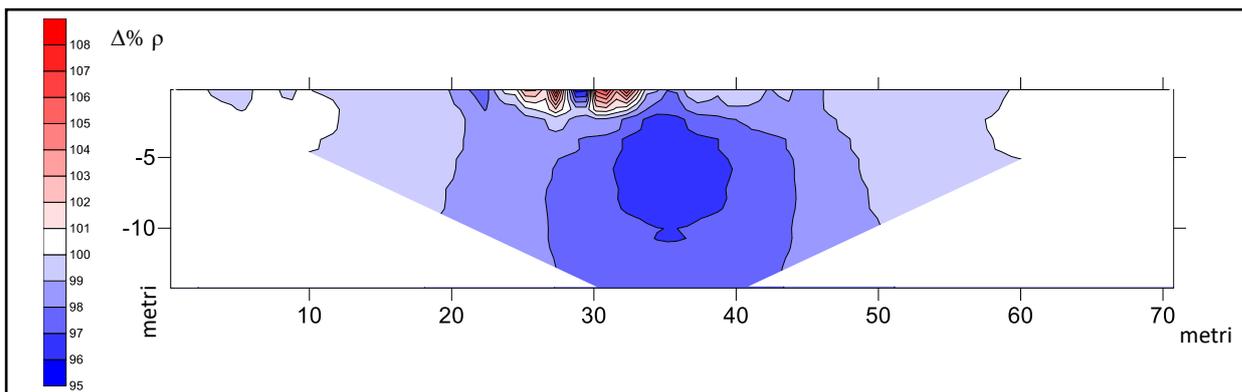


fig. 4.13 time - lapse ottenuto dall'inversione del rapporto tra i due dataset in fig 4.12

Per svolgere una valutazione più reale, ovvero simulare più fedelmente una situazione reale sul campo, si procede riducendo il numero di quadripoli dai dataset appena visti sulla base dei quadripoli ottenuti da una misura sul sito, di numero inferiore perché sono stati preventivamente rimossi i problemi dovuti al misfit tra reciproci e diretti.

Quello che si ottiene, come mostrato in fig. 4.11, è una sezione che risente di un abbassamento nel segnale di un valore molto ridotto, di circa 3% rispetto al caso di partenza.

Un secondo simulato viene effettuato in maniera analoga sulla linea L2, posizione più centrale rispetto alla posizione dei pozzi. I valori assoluti che il modello ha calcolato in fig. 4.12 sono molto simili a quelli visti nella fig. 4.9, mentre è la variazione nel tempo che risulta molto differente.

È plausibile che la posizione favorevole della linea rispetto ai pozzi compita in questo caso un segnale di abbassamento molto più evidente rispetto al dato simulato della linea L1. Tra i due dataset è misurabile una differenza del 10 - 20% nella zona di interesse di questo monitoraggio.

L'inversione del dato in time – lapse viene espresso dalla fig. 4.14, confermando nuovamente un abbassamento dell'ordine massimo del 5% nella porzione più interessata dai prodotti per il trattamento.

Bisogna nuovamente sottolineare che all'interno di questo paragrafo viene rappresentato sempre una situazione estremamente omogenea delle condizioni del sito. Ai diversi orizzonti vengono assegnate resistività teoriche, mentre l'anomalia è stimata sui dati di laboratorio. Queste simulazioni possono solo confermare che la strumentazione geofisica e la sequenza di quadripoli selezionata possono essere suscettibili alle operazioni sul campo.

Le numerose simulazioni per ora non hanno fornito una chiara indicazione sul comportamento visto nel sito durante le iniezioni monitorate nell'estate del 2016. All'interno Per avvicinarsi maggiormente alle reali condizioni occorre aggiungere una difficoltà in più al modello. È sicuramente appurato che all'interno del sito sia presente un piccolo volume di carbone. Viene quindi simulato tale elemento all'interno della mesh, in un istante in cui il carbone è presente solamente in prossimità dei primi pozzi costruiti ed un secondo istante di tempo quando viene inserito l'intero nuovo volume, spostando verso l'esterno il primo trattamento.

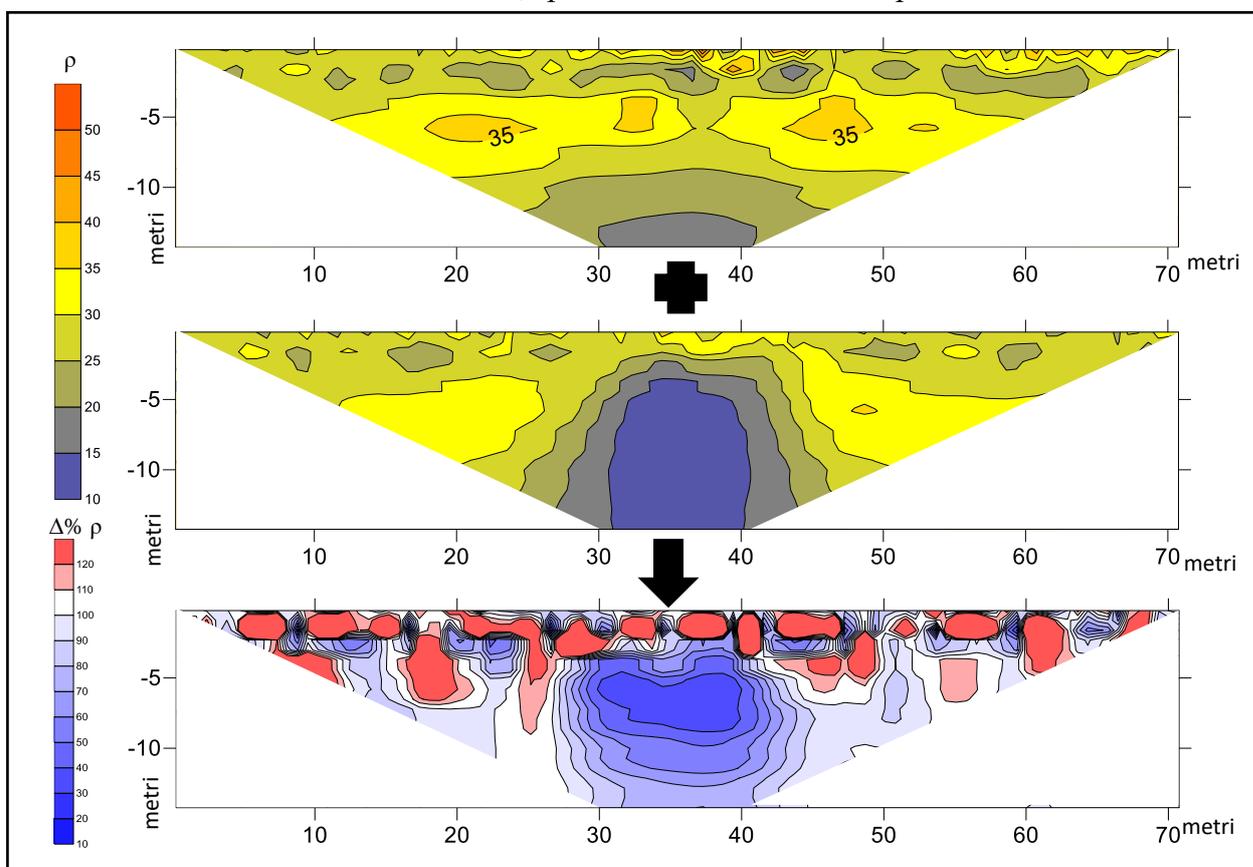


fig. 4.15 simulazione di L1 più fedele alla reale situazione, ovvero in presenza di un piccolo volume di carbone nel suolo. Questo time lapse risulta più complicato da interpretare, ma si avvicina alla situazione realmente vista nei dati di campagna.

La situazione che si presenta alla vista della fig. 4.15 e fig. 4.16 è la presenza di una forte anomalia, con una variazione del parametro elettrico nello spazio che punta sempre nella direzione di un abbassamento. La grande differenza rispetto alle prime simulazioni si apprezza nella quantificazione di questa variazione, e nella presenza di maggiori zone dove la resistività è in aumento relativo nel tempo.

Tramite quest'ultima osservazione è possibile affermare che la situazione vista nel sito potrebbe essere modellata con un opportuno modello. Il problema risulta sempre nell'approssimare al meglio le eterogeneità e le numerose variazioni che avvengono nella realtà in numerosi aspetto del sottosuolo. Risulta quindi difficile simulare l'effetto pistone, ovvero lo spostamento delle vecchie masse di acqua rispetto a quelle nuove inserite durante il full – scale, perché non sono disponibili altre informazioni in merito a caratteristiche come la distribuzione della permeabilità, o contenuto in fini..

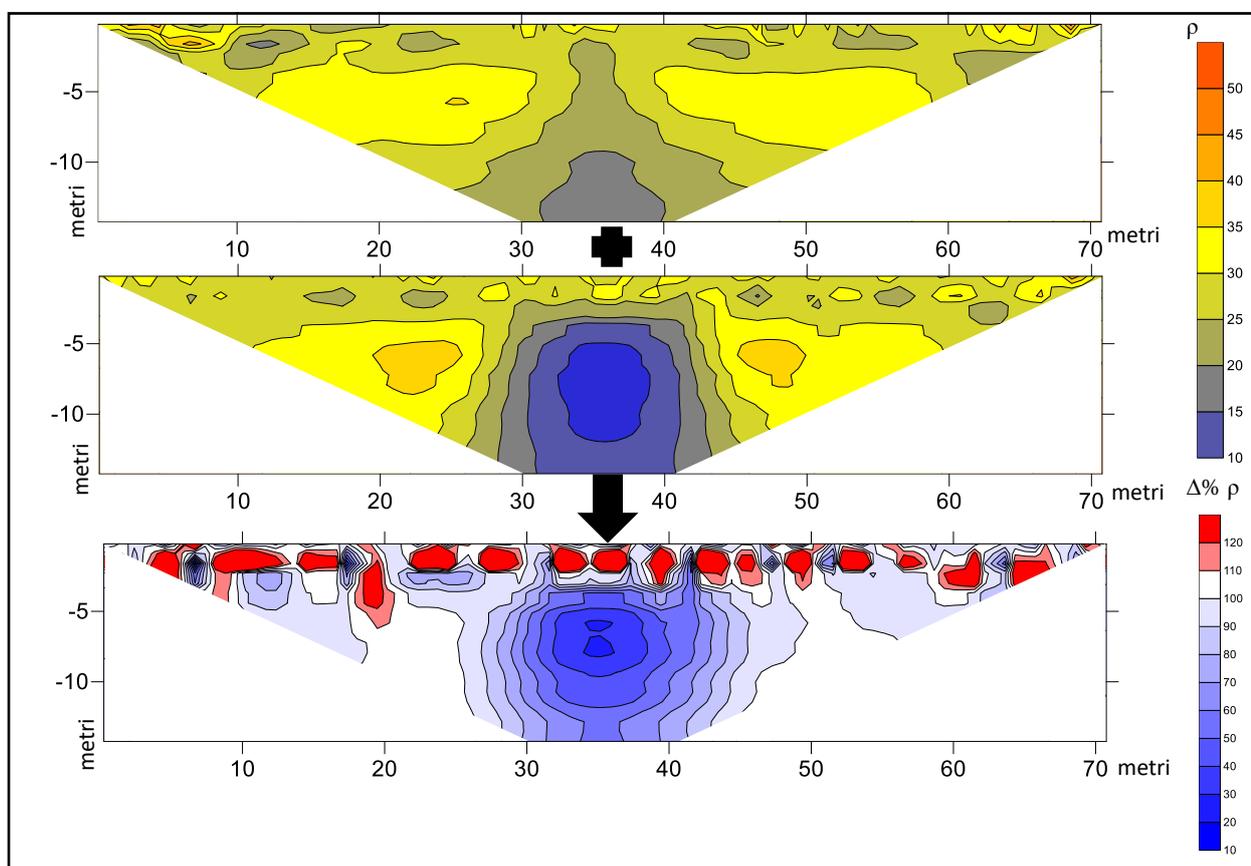


fig. 4.166 simulazione di L2, dove sono più intense le variazioni di resistività misurate in time – lapse. Sopra la situazione prima del nuovo trattamento visto nel 2016, sotto il sito in presenza di tutto il volume inserito nel sottosuolo per il recupero ambientale.

## 5. Discussione e considerazioni finali

Partendo dal progetto della campagna di indagine da affiancare alla fase di full – scale della bonifica in atto sul sito test bolognese, il lavoro sul terreno ha prodotto una serie di dati che sono stati analizzati e verificati nei capitoli precedenti. L'attività di campagna ha fornito quindi dei valori ed indicazioni che sono state confrontate attraverso dati di laboratorio e simulazioni matematiche del dominio investigato. In prima conclusione, la geofisica applicata per questo studio sul campo si è dimostrato positivo agli scopi previsti inizialmente. La suscettibilità della succitata tecnica di bonifica alla strumentazione ERT è direttamente connessa al fatto che le iniezioni hanno proprietà fisiche tali da cambiare le proprietà elettriche del sottosuolo indagato. In questo contesto la geofisica è stata in grado di osservare un cambiamento del dato parametro fisico nel corso del tempo, in un dato volume che viene interessato da un progetto più grande.

L'indagine di campagna durante il full – scale nel tempo ha prodotto una serie di sezioni di resistività elettriche, le quali discriminano all'interno del suolo zone a differente comportamento. Tutte le variazioni del parametro elettrico sono originate dal trattamento di bonifica e possono essere tracciate nel corso del tempo. I dati geofisici possiedono la risoluzione laterale e verticale sufficiente per studiare il comportamento del materiale iniettato all'interno dell'acquifero.

Risulta fondamentale evidenziare il fatto che, all'inizio della fase di full – scale della bonifica, le sezioni di resistività elettrica ottenute non rappresentano in alcun caso una situazione naturale. Il sito è stato ospite del pre – test, momento dove sono stati inseriti all'interno soluzioni a composizione e concentrazioni differenti. La fase di pre – test è una tappa fondamentale nella normale procedura di bonifica ambientale in quanto permette di osservare, in una scala piccola e limitata, la possibile efficacia e resa del trattamento selezionato. I prodotti inseriti nel pre – test svolto alla fine del 2015 si ritrovano all'interno del terreno anche durante la fase di full – scale, per cui dal background all'interpretazione dei dati ottenuti dalla

descrizione di questo lavoro si deve tenere presente che il sottosuolo osservato contiene già un volume alterato dalle pregresse attività artificiali.

Le misure svolte sul campo durante il pre – test della bonifica, insieme alle simulazioni con modello diretto, dimostrano che i volumi di soluzioni acquose inserite nel sottosuolo sono identificate con un segnale di abbassamento della resistività elettrica nello spazio e nel tempo, rese molto evidenti in particolare dal time – lapse in fig. 5.1.

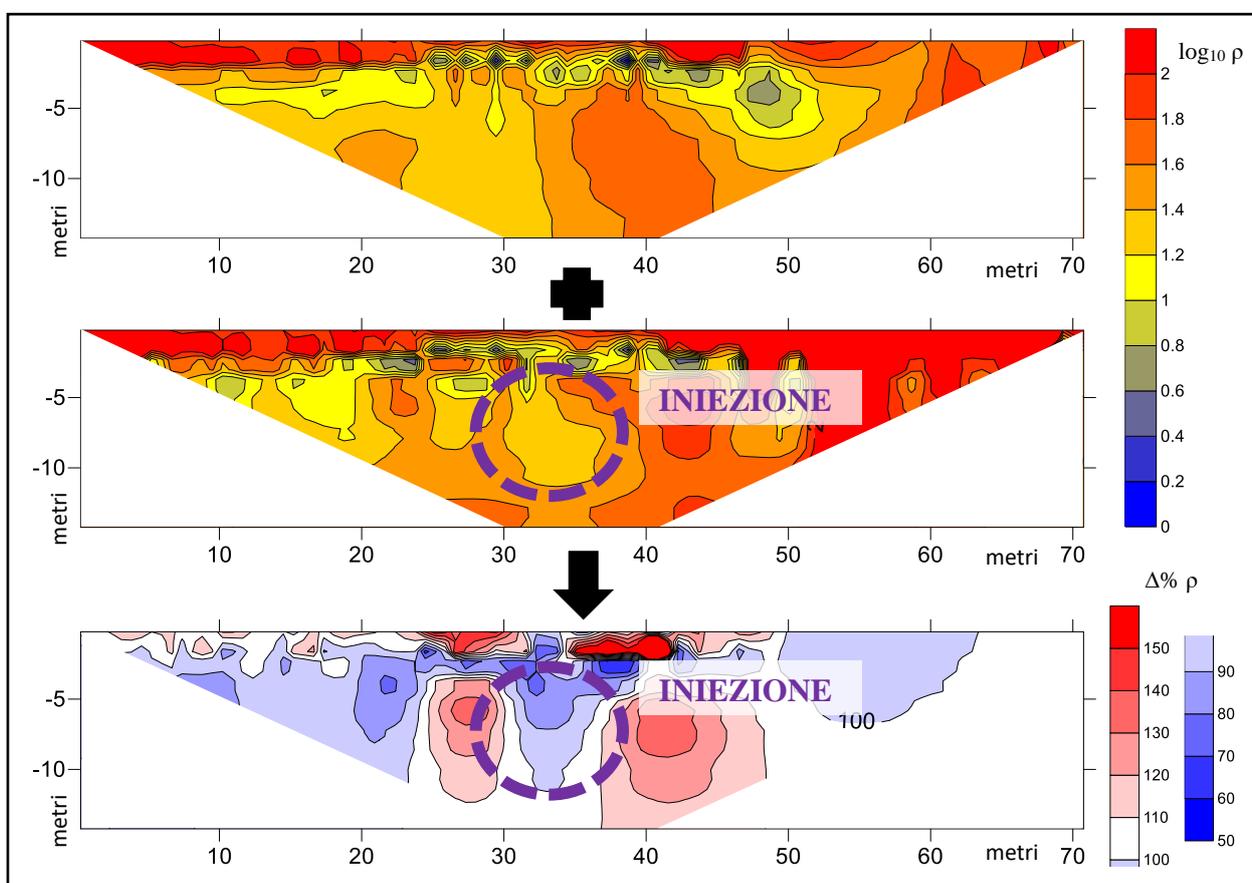
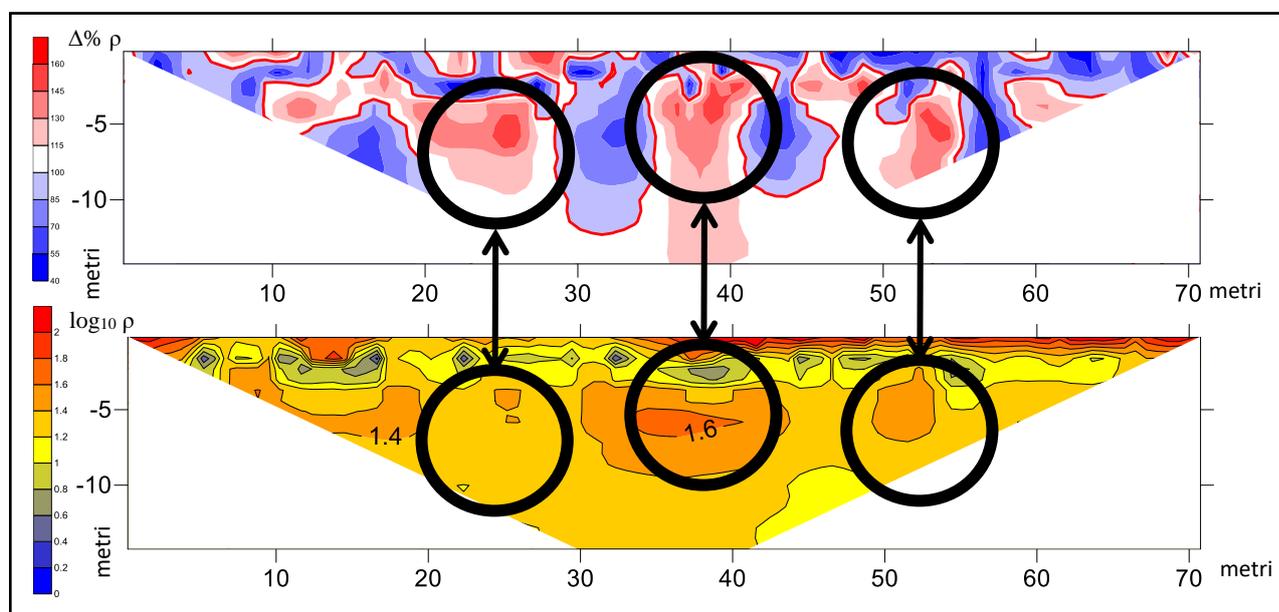


fig. 5.1 guardando il time - lapse dei dataset campionati nel pre - test viene identificato una anomalia negativa, ovvero abbassamento della resistività elettrica, nella zona dove viene inserito il carbone.

Durante le operazioni di full – scale, svoltesi tra luglio ed agosto del 2016, sono stati campionati diverse sezioni in istanti di tempo differente. I dati ottenuti durante sono risultati di ottima qualità, offrendo informazioni distribuiti con una risoluzione verticale ed orizzontale desiderata dal progetto di campagna. L'interpretazione del dato di campagna ha richiesto una osservazione più attenta per giungere ad una espressione definitiva.

Il trattamento applicato nell'estate del 2016 ha visto usare nell'acquifero una serie di sostanze chimiche specificatamente ideate per la problematica ambientale da risolvere. Le loro proprietà elettriche sono state quantificate in laboratorio, per poi simulare il trattamento svolto come una anomalia all'interno del sito bolognese. La presenza di sostanze non naturali all'interno del suolo viene rappresentato durante il full – scale dalla posizione di corpi nel quale la resistività elettrica è in aumento nel corso del tempo. Questi valori sono quantificati tramite le analisi in time – lapse nell'ordine di 15 – 45 % in media. Come si può osservare nella fig. 5.2, i corpi resistivi individuati nei rapporti delle resistenze elettriche nel tempo sono posizionati in punti dell'acquifero dove vi sono i corpi più sabbiosi.



*fig. 5.2 nella zona delle iniezioni si pone una anomalia positiva (incremento resistività elettrica). Lo stesso comportamento si pone in altre due zone, tutte posizionate all'altezza di quelli che per valori assoluti di resistività elettrica possono corrispondere a corpi più ricchi in sabbia. La sezione è L1 con time – lapse tra aprile e agosto.*

L'acquifero è composto difatti da una litologia fortemente eterogenea nello spazio; variazioni del rapporto sabbia su limo sono in grado di generare una differenza nella permeabilità tale da guidare la distribuzione delle linee di flusso nello spazio.

Nel time – lapse di questi dati si apprezza un decisivo aumento di resistività elettrica nel corso del tempo. Questo comportamento, apparentemente anomalo, deve essere confrontato con la fase di pre – test, precedentemente sintetizzata.

All'inizio della fase di full – scale l'acquifero contiene al suo interno un piccolo volume ad elevate concentrazioni di carbone. Il sito è complesso in quanto il suolo è già disturbato dal primo trattamento, il quale è ancora presente nel momento in cui la bonifica entra nella fase più importante del suo progetto. L'inserimento di volumi maggiori e sostanze differenti ai fini del trattamento progettato comporta un movimento nell'acquifero in grado di spostare acqua e materiale molto conduttivo. La loro distribuzione nello spazio è quindi in grado di muovere il materiale precedentemente inserito, spostandolo secondo le linee di flusso che possono instaurarsi all'interno dell'acquifero.

Quando in un punto nello spazio è presente materiale conduttivo, ed in un istante successivo si viene a posizionare materiale meno conduttivo, nei due momenti le proprietà elettriche cambiano nella direzione di un abbassamento della conducibilità elettrica, o aumento della resistività elettrica a seconda della grandezza fisica desiderata.

Si può quindi ipotizzare che l'aumento di resistività elettrica nel corso del tempo identificano in questa situazione la distribuzione del trattamento. Questa ipotesi trova conferma nelle proprietà elettriche della nuova soluzione inserita. Essa contiene meno carbone attivo insieme a zuccheri, elettricamente conduttivi. Nel tempo la loro presenza si riduce in quanto vengono consumati dall'attività biologica, scopo principale del loro inserimento. Anche questo dato indica che la soluzione stessa riduce nel corso del tempo la sua resistività elettrica, segnale che viene identificato con ottima risoluzione dai dati di campagna.

Tutte le modifiche delle proprietà elettriche osservate nel sito sono state tutte legate ai prodotti inseriti per il recupero ambientale del sito. Con la geofisica è stato possibile tracciare nel tempo diversi aspetti innescati nel sottosuolo; quanto volume è cambiato nel tempo e per quanto tempo l'effetto si è prolungato nel tempo. I volumi sono concordi con la natura litologica del sottosuolo, mentre i tempi sono stati legati anche dall'attività biologica stimolata per il trattamento finale dei contaminati.

Viene quindi dimostrato all'interno di questo elaborato che la strumentazione geofisica è in grado di inseguire tali cambiamenti nel tempo, in una risoluzione verticale ed orizzontale tale da poter essere di aiuto ai fini del progetto di un piano di bonifica. L'associazione diretta dell'ERT sul campo per questa tipologia di recupero ambientale si unisce con la natura del trattamento e con le caratteristiche intrinseche del sito, fisiche e geologiche.

In conclusione, tutto il lavoro descritto ha raccolto l'esperienza sul campo nelle sue diverse fasi per confermare l'efficienza della strumentazione ERT nella caratterizzazione di proprietà del primo sottosuolo ed acquiferi. Tutto il dominio in prossimità del piano campagna, zona che maggiormente viene interessata dalle bonifiche ambientali da contaminazioni, è facilmente investigabile con questo tipo di strumentazioni. Risulta quindi vantaggioso ai fini del progetto di una bonifica tenere in considerazione l'applicazione di un piano di indagine per caratterizzare meglio nel corso del tempo l'azione di un trattamento, anche in corso d'opera delle fasi di lavoro. Poter valutare rapidamente i volumi di suolo, con costi relativamente contenuti, rende alla geofisica un ruolo fondamentale in questo contesto.



## **6. Ringraziamenti**

Si ringrazia l'azienda Regenesis e i suoi dipendenti per aver permesso di svolgere le operazioni sul campo durante le loro attività lavorative. Sono riconoscente in particolare nei riguardi di Dott. Marcello Carboni e Ing. Paola Gorla per la fornitura dei materiali da analizzare in laboratorio ed informazioni utili ai fini dei risultati qui discussi.

La completezza delle informazioni sul progetto di bonifica viene garantita grazie al supporto del prof. Marco Papini e al suo team di ricerca, i quali mi hanno accolto per discutere della loro parte del lavoro.

Infine ringrazio il dott. Jacopo Boaga e il dipartimento di Geoscienze per il contributo alle numerose trasferte richieste per svolgere le attività di monitoraggio in campagna.



## 7. Bibliografia

- A.P.A.T. (2008) Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai contaminanti. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- ARPA Emilia – Romagna (2015) Catasto dei siti contaminati.
- Binley A., Kemna A., (2005) Electrical Methods. Hydrogeophysics. Ed. Springer, p. 129 – 156.
- Butler D. K., (2005) What is near – surface geophysics?. Near – Surface Geophysics, ed. Society of Exploration Geophysicists, p. 1 – 6.
- Carsel R. F., Parrish R. S. (1988) Developing joint probability of soil water retention characteristics. Water Resources Research, Vol. 24, 755 – 769
- 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, Vol. 59, p. 244 – 259.
- Comune di Bologna, Area Urbanistica, Ambiente e Mobilità. (2005) [www.atti.comune.bologna.it/atti](http://www.atti.comune.bologna.it/atti)
- 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, Vol. 52, Issue 3, p. 289 – 300.
- Daily W., Ramirez A., Binley A., LaBrecque D. (2005) Electrical resistance tomography – Theory and practice. Near – Surface Geophysics, ed. Society of Exploration Geophysicists, p. 525 – 550.
- De Carlo L., Perri M. T., Caputo M. C., Deiana R., Vurro M., Cassiani G. (2013) Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. Journal of Applied Geophysics, Vol. 98, p. 1 – 10.

Everett, M. E. (2013) Near – Surface Applied Geophysics.

Martelli, L., Amorosi, A., Severi, P. (2009) Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 221 Bologna, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Stracqualursi, N. (2005) Organic solvent contaminated groundwater bioremediation: study and development of advanced in – situ processes and definition of an evaluation protocol for the better remediation strategy. Doctorate thesis, University of Tor Vergata, Rome.

Norinelli, A. (1982) Elementi di geofisica applicata, Ed. Pàtron.

Regenesis©, (2016) PlumeStop Technical Bulletin. [www.regenesis.com](http://www.regenesis.com)

1.1 Distribution through a permeable medium. p. 7.

2.1 Sorption of contaminants from solution: terms & principles. p. 7.

2.2 Sorption of contaminants from solution – column study. p. 7.

2.4 Regeneration of sorptive capacity. p. 7.

Reynolds J. M. (2011) Electrical resistivity methods. An introduction to Applied and Environmental Geophysics. Ed. Wiley – Blacwell, p. 289 – 346.

Vanderbrought J., Kemna A., Hardelauf H., Vereecken H. (2005) Potential of electrical resistivity tomography to infer aquifer transport characteristics from traces studies: a synthetic case study. Water Resources Research, Vol. 41, p. 1 – 23.

Wiedemeir T. H., Swanson M. A., Moutoux D. E., Gordon E. K., Wilson J. T., Wilson B. H., Kampbell D. H., Haas P. E., Ross N., Hansen M. Hansen M., Ross N., Chapelle F. H. (1998) Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.