

Introduzione

L'identificazione e localizzazione di contaminanti organici nel sottosuolo è un obiettivo di primaria importanza nella caratterizzazione e progettazione di bonifiche per siti contaminati. L'utilizzo di tecniche tradizionali, quali perforazioni, carotaggi e campionamento delle acque, è spesso indispensabile ma altrettanto frequentemente insufficiente ad offrire un'immagine completa e coerente del sottosuolo in termini di presenza dei contaminanti.

A supporto dei metodi tradizionali esiste tuttavia un vasto ambito di ricerca focalizzato sullo sviluppo di tecniche geofisiche non invasive in grado di complementare le informazioni offerte dalle tecniche tradizionali, mappando il sottosuolo in modo pressoché continuo. Queste tecniche vanno dalla scala di campo alla recente analisi dei campioni alla scala di laboratorio.

Tra le tante tecniche che trovano da tempo impiego nelle esplorazioni profonde, solo alcune si sono rivelate in grado di mappare zone contaminate più superficiali. Una di queste è la Polarizzazione Indotta che grazie ai recenti sviluppi nella strumentazione consente di operare in multifrequenza (IP spettrale o SIP). Le misure SIP, come quelle di resistività in corrente continua, possono essere acquisite in configurazioni tomografiche da superficie, in multi-pozzo e in laboratorio su campioni di suolo. Lo scopo principale della presente Tesi è quello di studiare la risposta IP di formazioni in sabbie e ghiaie non consolidate, tipiche della Pianura Padana, soggette a contaminazioni da idrocarburi. Il sito di studio proposto si trova presso Trecate (Novara), ove è presente un inquinamento del sottosuolo causato da petrolio greggio. Nel 1994, infatti, nei pressi di Trecate (provincia di Novara), a seguito dell'esplosione di un pozzo dell'Agip-Eni è avvenuta un'estesa contaminazione. In un primo tempo si è provveduto a ripulire la superficie della zona ed in seguito anche i primi metri del

sottosuolo. Negli anni successivi, dopo alcune analisi mirate al monitoraggio del sito, si è visto che il contaminante era penetrato a profondità ben maggiori di quelle stimate inizialmente. Si è deciso allora di eseguire indagini geofisiche più approfondite, per avere una visione concreta e più generale della situazione e nell'ambito del progetto di ricerca dal titolo Model PROBE (Model driven Soil Probing, Site Assessment and Evaluation) finanziato dalla comunità europea, si è deciso di integrare le indagini non invasive a diversa scala. Le ricerche effettuate in campo consistono in indagini: geoelettriche (ERT e IP), Georadar (GPR), misure del potenziale spontaneo (SP) ed elettromagnetiche nel dominio della frequenza (EM). Sulla base delle risultanze emerse dalle indagini alla scala di campo si è deciso, a posteriori, di eseguire dei sondaggi nella zona contaminata e in quella non contaminata. Su determinati campioni, estratti dalle carote, sono state eseguite quindi misure di polarizzazione indotta spettrale (SIP) in laboratorio. Il presente lavoro di Tesi è pertanto incentrato sul lavoro effettuato in laboratorio e su i dati ottenuti e sulla comparazione tra questi ultimi e quelli delle indagini realizzate con metodi non invasivi alla scala di campo e sulle importanti considerazioni che si possono desumere da questo confronto.

1. Inquadramento dell'area di studio e del problema ambientale

1.1 Il sito di Trecate

1.1.1 Inquadramento geografico

L'area in studio è collocata in una zona agricola in prossimità del comune di Trecate, in provincia di Novara. In particolare il sito è situato tra gli abitati di Trecate e Romentino, nella medesima zona dove scorre il fiume Ticino (Figura 1.1).

Dal punto di vista cartografico, la tavoletta I.G.M. d'interesse è inserita nel foglio 44 II S.E., denominato "Novara" (scala 1:25.000), mentre nella Carta Tecnica Regionale il sito ricade nella sezione numero 117140 (scala 1:10.000). La quota media della zona in studio è di 130 m.s.l.m.

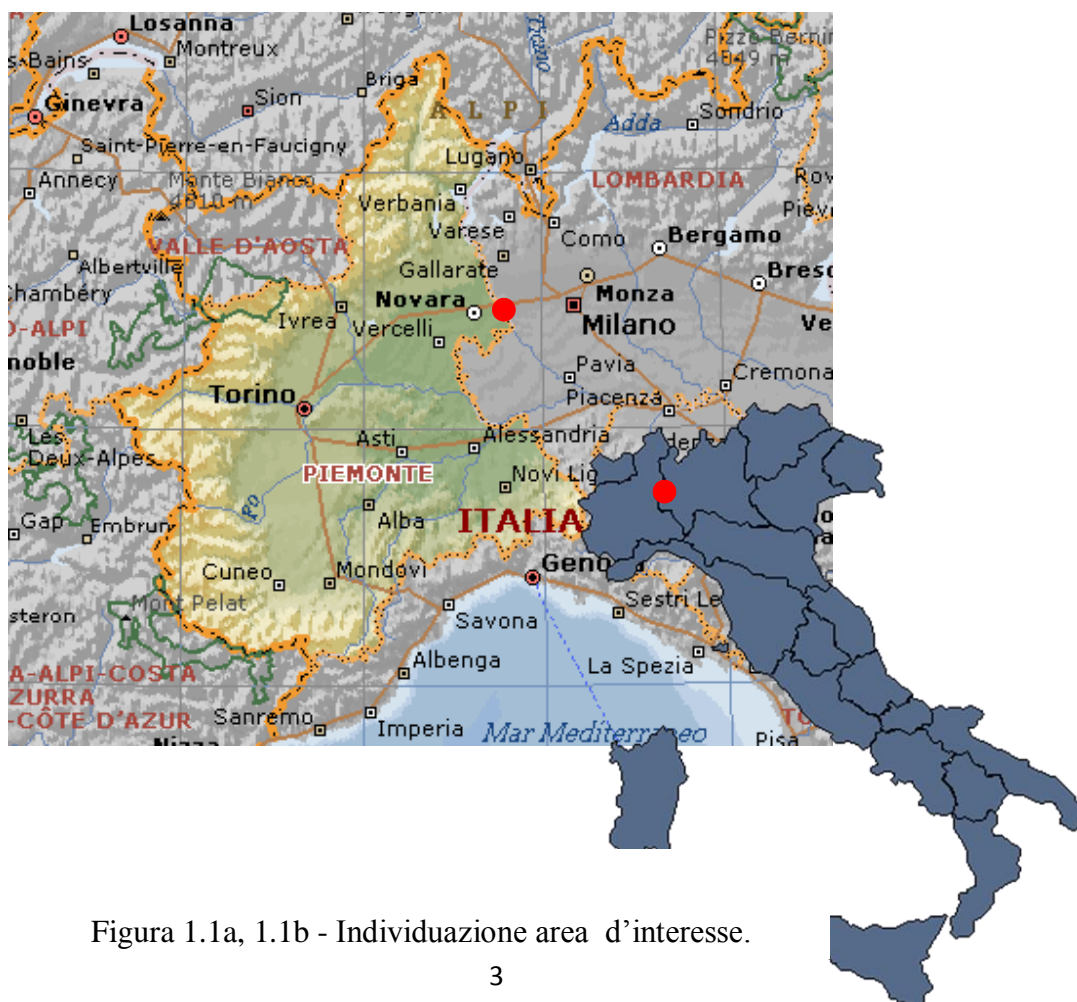


Figura 1.1a, 1.1b - Individuazione area d'interesse.

1.1.2 Geologia

Il territorio in esame è ricoperto da spessi banchi di conglomerato fortemente cementato, di origine fluviale, denominato “Ceppo”. Al di sopra di questi banchi sono presenti svariati accumuli di depositi morenici derivanti dalle varie glaciazioni, che si sono susseguite nell’arco di migliaia di anni (dalla più antica abbiamo in sequenza Mindel, Riss e Wurm), queste glaciazioni hanno largamente rimaneggiato ed incrementato gli spessori di questi grandi quantitativi di ciottoli, ghiaia e sabbia. Altro fenomeno che ha agito sui depositi in questione è rappresentato dai torrenti glaciali generati dall’acqua di fusione; questi ultimi infatti trasportavano il materiale morenico a valle depositandolo poi secondo varie stratificazioni di sedimenti, contribuendo così in maniera determinante alla formazione di quel che poi è risultata una “pianura fluvio-glaciale”. Vari sono i fattori che hanno controllato l’interazione tra questi fenomeni e di conseguenza hanno contribuito a formare la situazione morfologica attuale, i più evidenti sono le variazioni climatiche, la posizione del fronte glaciale e la morfologia superficiale.

1.1.3 Geomorfologia

Le forme del paesaggio della regione sono il risultato delle continue modificazioni causate dagli agenti naturali all’aspetto iniziale dell’intera zona. Evidenti sono le tracce lasciate lungo le valli dalla presenza delle passate glaciazioni (quattro per l’esattezza) e delle fluttuazioni delle stesse in dipendenza di temperatura, entità delle precipitazioni, vento e qualità della radiazione solare diretta. E’ facile individuare le zone interessate un tempo dai ghiacci, esaminando le forme naturali e soffermandosi sui diversi cumuli di deposito morenico ampiamente rielaborati dagli avanzamenti e successivi ritiri della massa glaciale, essi ai margini pedemontani del rilievo alpino si uniscono a formare quelli che vengono chiamati anfiteatri morenici.

In particolare l’area in studio è generalmente pianeggiante, tipica morfologia derivante da fenomeni fluvio-alluvionali. Infatti, il Ticino scorre per il primo tratto incassato in grandi masse di detrito e quindi, nel corso del tempo, ha eroso e trasportato a valle grandi quantitativi di

materiale; si è quindi creata la sovrapposizione di depositi alluvionali intercalati da quelli glaciali.

Altro fattore che ha contribuito a modificare la morfologia, in particolare reindirizzando il tracciato naturale del fiume Ticino è stata l'attività antropica.

1.1.4 Idrografia

Il principale corso d'acqua presente nell'area è il fiume Ticino, con una lunghezza di circa 248 Km e un bacino sviluppato su 7401 km² di superficie rappresenta uno dei maggiori fiumi italiani. L'unico affluente di un certo rilievo è il torrente Terdoppio che si estende per circa 40 km. Entrambi questi corsi d'acqua hanno direzione preferenziale NO-SE. Il Ticino è un tipico fiume a meandri (o "braided"), Figura 1.2, caratterizzato da successive separazioni e ricongiungimenti della corrente attorno ad isole alluvionali; questa configurazione è in continua evoluzione, infatti vi sono zone soggette ad erosione ed altre a rideposizione, che determinano così il continuo spostamento dei canali e dei sedimenti, soprattutto nelle fasi di piena. E' stato dimostrato che una struttura del genere si sviluppa dove la pendenza media della zona è debole, come in questo caso, attorno al 2 per mille. La portata annua di questo fiume è attorno ai 299 m³ al secondo e la velocità della corrente è molto elevata.

Accanto a questi sistemi naturali è stata costruita un'articolata rete di canali e derivazioni artificiali a scopo irriguo e per la produzione di energia idroelettrica.

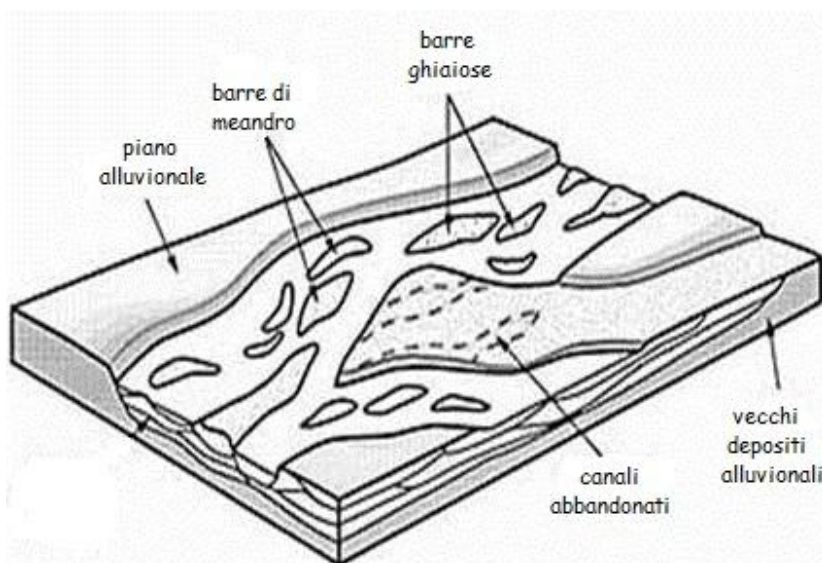


Figura 1.2 - Fiume di tipo braided.

1.1.5 Idrogeologia

Come è stato già accennato il Ticino, nella sua parte più a monte, scorre incassato nei sedimenti. Spostandosi più a Sud si riscontra un abbassamento delle sponde accompagnato da un progressivo allargamento delle stesse, in queste zone si realizza un fenomeno che prende il nome di “risorgenza in alveo” e che consiste nel drenaggio, da parte del fiume, delle acque di falda che circolano nella pianura e sono ad una quota superiore rispetto a quelle del corso d’acqua. Altro evento frequente in questa zona è la presenza di fontanili, che si formano lungo una determinata fascia, pressappoco parallela all’asse del Ticino e con origine strettamente legata alla situazione della falda freatica ed alla diversa permeabilità delle alluvioni del Würm-Riss in relazione a quelle del Würm (le ultime sono più permeabili e si lasciano quindi attraversare più facilmente dalla massa d’acqua). Ancora più a Sud il livello della falda si abbassa fino quasi a raggiungere quello del fiume e si verificano così passaggi di acqua da uno all’altra a seconda che ci si trovi nel periodo di magra o in quello di piena.

Nelle zone collinari la falda ha caratteristiche piuttosto irregolari, mentre altrove i parametri sono più omogenei e non si discostano di molto da quelli delle altre zone della Pianura Padana. La profondità della falda varia principalmente in dipendenza di fattori climatici e ubicazione geografica e la sua direzione è preferenzialmente NO-SE.

1.2 L'incidente

Il 28 febbraio 1994 è iniziata la perforazione del pozzo dell'Agip nominato Trecate 24 (TR 24), giunti a 4800 metri di profondità si è verificata una serie di inconvenienti, ovvero il distacco di alcune tubazioni e la loro successiva deformazione sotto lo sforzo provocato dalla pressione esistente nel pozzo. Questa pressione eccessivamente alta (circa 500 atmosfere) ha generato un'esplosione e il successivo innalzamento di un pennacchio formato da petrolio greggio, gas e acqua alto più di un centinaio di metri (Figura 1.3). Il vento e la pioggia di quei giorni hanno contribuito in maniera determinante alla dispersione del contaminante.

Il blow-out è cessato spontaneamente 36 ore più tardi, in seguito al collasso della struttura del pozzo. Si stima che su un'area di 5 km^2 , siano stati dispersi circa 12.600 m^3 di petrolio greggio insieme a $1.000.000 \text{ m}^3$ di gas naturale e 1.000 m^3 di acqua. Inoltre, durante l'esplosione, è stato sprigionato anche acido solforico che per fortuna si è mantenuto in concentrazioni molto inferiori a quella della soglia di pericolo.



Figura 1.3 - Esplosione pozzo Trecate 24 (TR24).

1.2.1 Delineazione del problema

L'incidente di Trecate ha sicuramente avuto pesanti ripercussioni sul territorio, visto che la pioggia mista a petrolio ha ricoperto vaste zone agricole, Figura 1.4, (in particolare molte risaie) e per alcuni km lo sviluppo del Ticino. Ha poi causato non pochi disagi alla popolazione, infatti il traffico è stato bloccato su alcune strade tra cui anche la statale 11 Novara Trecate, ha paralizzato anche un tratto della ferrovia Milano -Torino, ed alcune famiglie sono state evacuate.

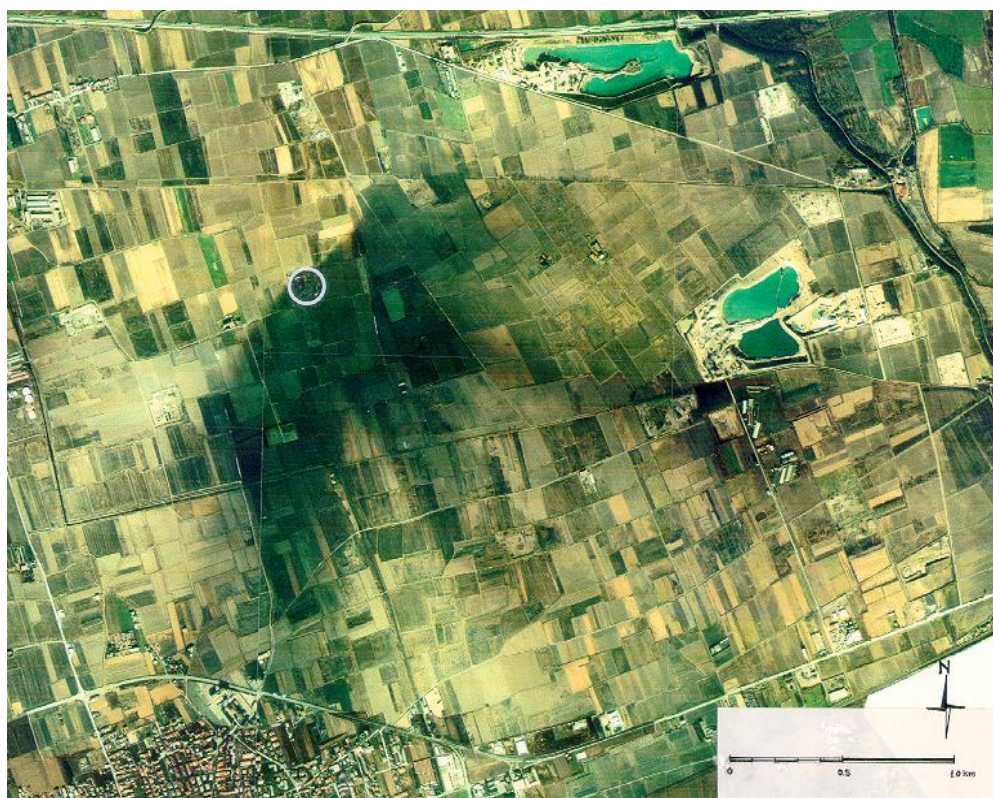


Figura 1.4 - Il cerchio individua la posizione del pozzo Trecate 24 (TR 24), la zona più scura è l'area contaminata (da notare la direzione del vento che in quei giorni spirava verso Sud-SudOvest).

1.3 Il piano di emergenza, il monitoraggio e il piano di bonifica

In breve tempo si sono precipitate sul posto alcune squadre di esperti dell'Agip-Eni, per delineare ed attuare nel più breve tempo possibile un piano d'emergenza.

Come prima cosa si è intervenuti controllando che nell'atmosfera intorno al pozzo non ci fossero miscele esplosive in atto, successivamente l'intera zona interessata dall'incidente è stata ripulita tramite l'assorbimento del greggio galleggiante e la rimozione della parte più superficiale del terreno, controllando anche lo stato dei corsi d'acqua (Figura 1.5). Si sono poi resi necessari, da parte dell'Eni, interventi di ripristino o di sostituzione dei piezometri danneggiati, in modo da garantire la possibilità di eseguire i campionamenti per l'analisi dello stato della falda acquifera.



Figura 1.5 - Rimozione del petrolio greggio presente sulla superficie.

Il giorno 11 marzo 1994, nella sede della Prefettura di Novara, è stato redatto un protocollo finalizzato a richiedere all'Agip-Eni la presentazione di un piano di monitoraggio ambientale e un piano di bonifica delle aree

soggette alla contaminazione. Il piano di monitoraggio è tuttora attivo, anche se nel corso degli anni è stato modificato ed adattato a seconda delle necessità; esso ha riguardato terreni superficiali, inquinamento atmosferico, corpi idrici superficiali, acque sotterranee, flora e fauna prendendone in considerazione la situazione iniziale al momento dello scoppio e le successive evoluzioni.

Per quanto riguarda il piano di bonifica, la caratteristica fondamentale era quella di mantenere inalterate le proprietà tessiturali e agronomiche del terreno, questo come ovvia conseguenza della destinazione d'uso del territorio come zona agricola.

Non essendoci in Italia una normativa di bonifica specifica riguardo a casi come quello d'interesse è stato deciso di applicare come riferimento la normativa olandese (nota come "Moen 88"), la quale stabiliva come valore di riferimento un limite di 50 mg di idrocarburi per kg di terreno secco.

Sono stati poi eseguiti degli studi preliminari che hanno dato credito alla buona capacità delle popolazioni batteriche autoctone nella degradazione degli idrocarburi contenuti nel contaminante. Questo risultato è servito come linea guida base della gara indetta dall'Agip per lo sviluppo del progetto esecutivo di bonifica in cui hanno preso parte nove compagnie internazionali. Il progetto selezionato, con l'aggiunta di alcune integrazioni dietro richiesta delle autorità di controllo, è stato infine approvato dalla regione Piemonte il 17 ottobre 1994.

Le tecniche adottate per la Bioremediation dei terreni superficiali sono state:

- ✓ *Landfarming* per quanto riguarda terreni con contaminazione di 10.000-20.000 mg/kg di idrocarburi sul secco;
- ✓ *Biopile* per i terreni con contaminazione di 20.000-50.000 mg/kg.

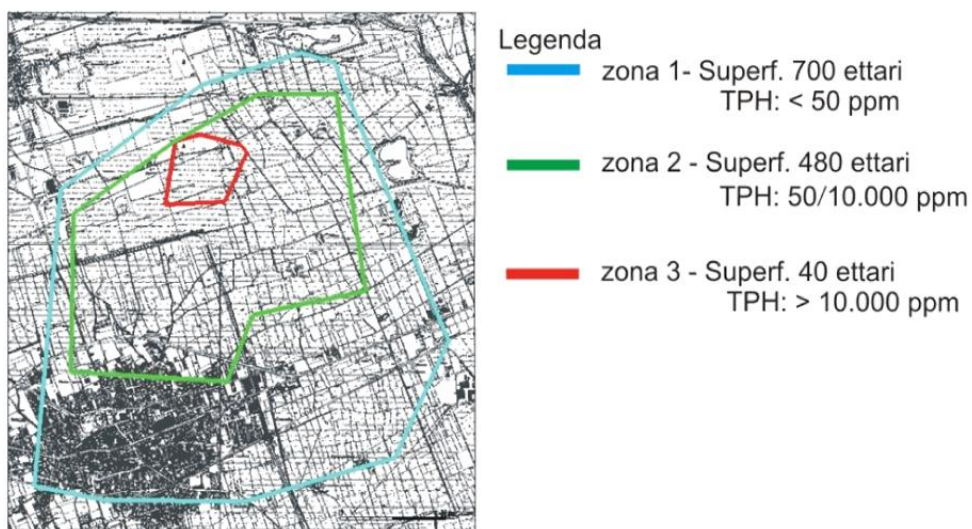


Figura 1.6 - Estensione areale della contaminazione da idrocarburi (THP), a seguito degli studi preliminari svolti da Battelle Memorial Institute.

La prima di queste due metodologie consiste nell'arare e rivoltare il terreno, in modo da ossigenarlo regolarmente e da facilitare così l'attività metabolica di alcuni microrganismi aerobici che consumano i contaminanti organici.



Figura 1.7 - Attuazione della tecnica di Landfarming.

La seconda tecnica invece è più invasiva, consta infatti nell'escavazione dei terreni contaminati e talvolta nella loro combinazione con ammendanti, il materiale viene poi stoccato in cumuli che vengono lavorati fino a quando le

concentrazioni dei contaminanti, come conseguenza della degradazione, non scendono sotto livelli prefissati. Per agevolare la biodegradazione aerobica il materiale viene, anche in questo caso, periodicamente rivoltato e in alcuni casi vengono aggiunti anche agenti rigonfianti. Il tutto viene effettuato in aree adeguatamente recintate, impermeabilizzate ed isolate per evitare ogni contatto tra il terreno contaminato e l'area circostante. In alternativa si può ossigenare il terreno mediante un'apposita rete di aspirazione-insufflazione forzata di aria.

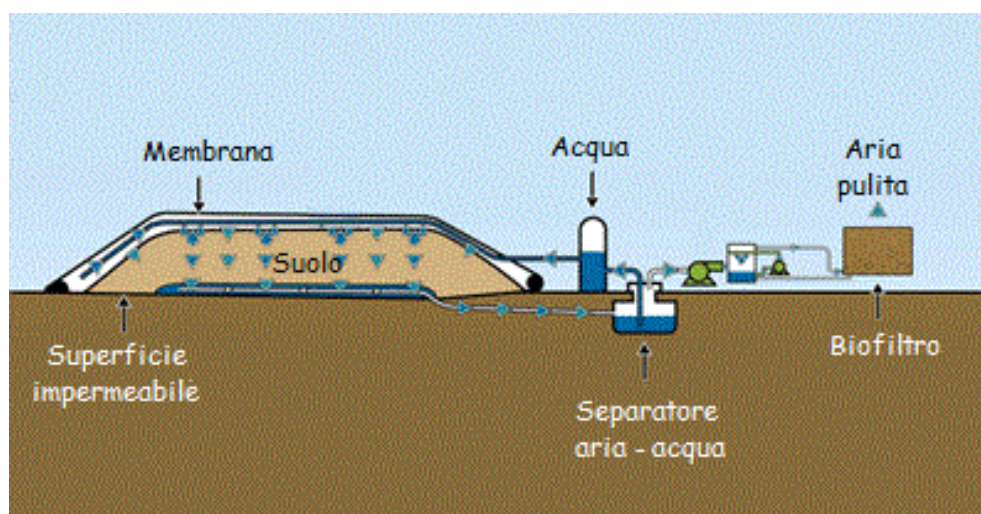


Figura 1.8 - Schema del funzionamento di una biopila.

Nel caso specifico di Trecate sono stati asportati i primi 20-30 cm di terreno per un'area di circa 13 ha. Il materiale è stato essiccato al 15-25% di umidità e successivamente mescolato con cippato, utile per aumentare la permeabilità, ed infine disposto in due biopile di 15.000 e 12.000 m^3 . Queste biopile sono state dotate di sistemi di insufflazione dell'aria, adduzione di acqua e nutrienti, sistemi di monitoraggio di umidità e temperatura e campionamento dei gas interstiziali.

Nei diciotto mesi successivi all'intervento, secondo quanto affermano gli esperti dell'Agip-Eni, il trattamento mediante biopile ha ridotto di oltre il 95% la concentrazione iniziale di idrocarburi. Nel giugno 1997, a seguito di tali risultati e di verifiche svolte dalle Autorità di Controllo, Agip ha ottenuto l'autorizzazione dalla Regione di smantellare le biopile e procedere a ridistribuire il terreno trattato sui campi.

Nell'autunno 1995, durante ulteriori indagini più approfondite riguardanti la contaminazione, è emerso che una certa quantità di idrocarburi era penetrata nel suolo a profondità maggiori di quelle che si erano prese in considerazione fino a quel momento. La causa principale di questo ulteriore inquinamento è attribuire ai pozzetti di drenaggio delle risaie. Si è iniziato così a pensare ad un piano di bonifica per il sottosuolo, che prevedesse interventi di *bioventing* ed eventuale recupero sotto vuoto della fase separata di idrocarburi (*bioslurping* e V.E.R. – *Vacuum Enhanced Recovery*) secondo lo schema riportato in Figura 1.9.

Il *bioventing* consiste nel movimento forzato di ossigeno nel terreno insaturo contaminato, immissione e successiva estrazione dell'aria, allo scopo di aumentare la concentrazione di ossigeno e favorire così il risanamento dei terreni contaminati da idrocarburi. A questo scopo ci si è avvalsi di 26 pozzetti per l'insufflazione dell'aria e 36 *clusters* per il monitoraggio del processo.

Il sistema V.E.R. (*vacuum enhanced free-product recovery*) non è altro che un trattamento combinato al *bioventing* tramite il quale viene estratto il contaminante presente nella frangia capillare e galleggiante (Light Non-Aqueous Phase Liquid) al di sopra della superficie piezometrica della falda acquifera.

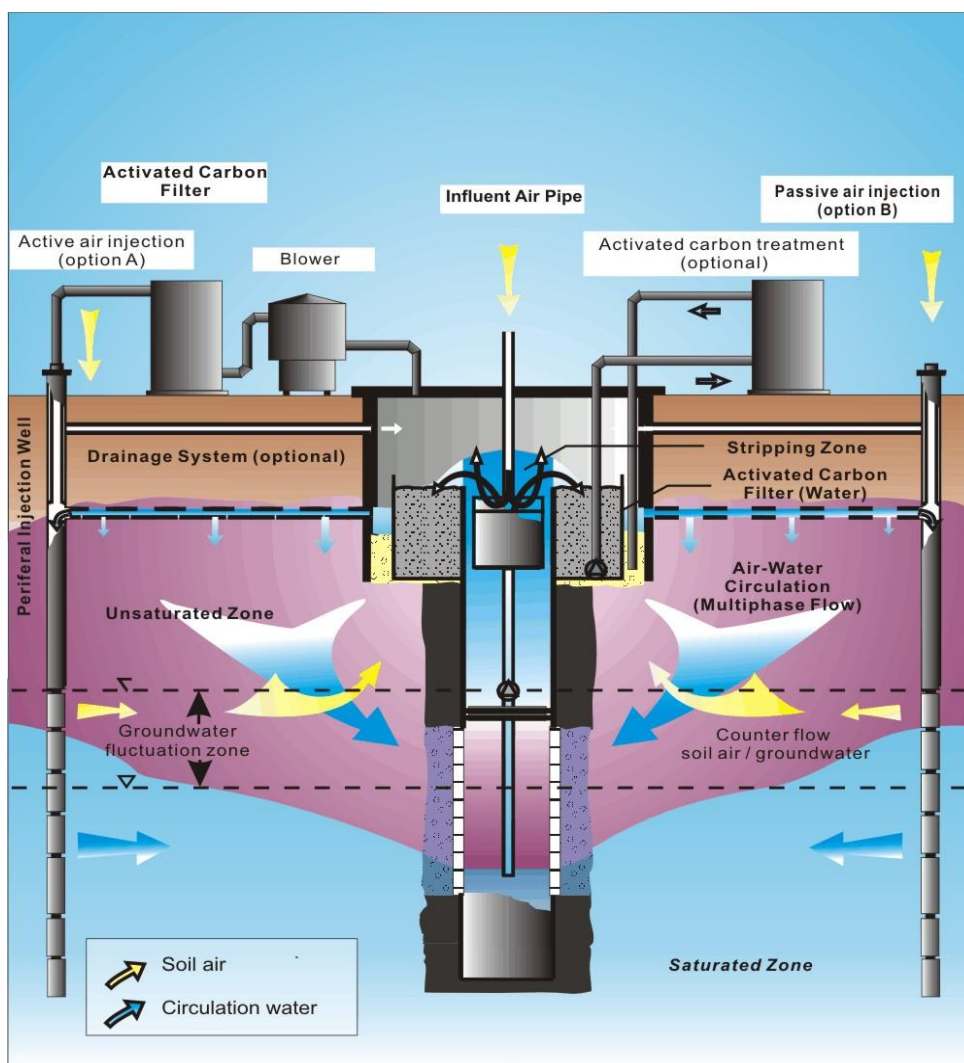


Figura 1.9 - Schema del funzionamento del bioventing e V.E.R.

A completamento delle tecniche su descritte è stato anche realizzato un sistema di monitoraggio della “bioattenuazione spontanea”, in seguito al ritrovamento di idrocarburi in fase separata galleggianti al di sopra della falda. Il sistema è stato studiato in modo da coprire l’area maggiormente contaminata a mezzo di una maglia di diciassette pozzetti ed ha permesso di studiare l’evoluzione del fenomeno nel tempo, grazie al controllo dei seguenti parametri: ossigeno disciolto, solfati, nitrati, ferro, acido solfidrico, pH e potenziale redox. L’ultima campagna di monitoraggio risale all’autunno del 2007.

Dal giugno 2008 l’Università di Padova col Dipartimento di Geoscienze è coinvolta in un progetto di ricerca cofinanziato dall’Unione Europea, da 10

Università, 2 Centri di Ricerca Nazionali e 5 Piccole e Medie Imprese con obiettivo lo sviluppo di tecnologie e strumenti per la caratterizzazione dei siti potenzialmente contaminati, attraverso l'uso di tecniche avanzate, basate sull'utilizzo combinato della geofisica applicata, delle indagini dirette e dell'analisi della vegetazione presente in loco. Il progetto di ricerca dal titolo Model PROBE (Model driven Soil Probing, Site Assessment and Evaluation) vede il sito di Trecate tra i siti oggetto di studio. Le indagini previste nel progetto, a basso impatto ambientale, hanno lo scopo di localizzare l'estensione, il livello di contaminazione presente e l'eterogeneità dei terreni. Tutto ciò, unito all'indagine diretta nel sottosuolo, con tecniche di campionamento di tipo *direct push*, eventualmente integrate con misure dei parametri chimici, fisici ed idraulici in situ, permetterà di ricostruire il modello concettuale del sito contaminato con ragionevole precisione e con costi accettabili. Infine una parte del progetto di ricerca prevede anche l'impiego di biosensori, di microcosmi in situ, di biomarcatori e di isotopi stabili che, con opportuna combinazione dei dati ottenuti, consentirà di stimare l'andamento di bonifica nei trattamenti che prevedono la degradazione dei contaminanti per opera di processi biologici come la biodegradazione, la precipitazione e la mobilizzazione.

2. La polarizzazione indotta spettrale

2.1 Principi fisici e origine del fenomeno della polarizzazione indotta

2.1.1 Evoluzione del metodo nel corso degli anni

Il fenomeno della polarizzazione indotta è stato scoperto nei primissimi decenni del 1900 da Conrad Schlumberger, la sua prima pubblicazione riguardante la descrizione di questo nuovo metodo risale al 1920. Durante il 1930 e 1940 questa metodologia è stata ampiamente testata nell'esplorazione petrolifera in USA e URSS. In seguito a questi progetti di ricerca, nel 1950, il metodo IP diviene ampiamente riconosciuto, soprattutto per quanto riguarda la prospezione di mineralizzazione di solfuri. A partire dal 1960 sono state intraprese indagini più complesse, nel campo della polarizzazione indotta, analizzando sia fase che ampiezza, in modo da discriminare fra i vari tipi di solfuri (infatti questi parametri variano per esempio in relazione alla tessitura e al grado di mineralizzazione). Nel corso degli anni '80 la polarizzazione indotta è stata usata sempre di più per applicazioni ambientali e per l'industria petrolifera (rilevamento di anomalie geochimiche causate dalla presenza di idrocarburi ad alte profondità). Dal 1990 c'è stata una crescente evoluzione della strumentazione di laboratorio; le innovazioni, dal punto di vista tecnologico e d'interpretazione delle misure, avvenute recentemente, hanno reso possibile l'uso della polarizzazione indotta per quanto riguarda la caratterizzazione idrogeologica della parte più superficiale del terreno, l'individuazione ed il monitoraggio di contaminazioni.

2.1.2 Principi fisici alla base del metodo

La resistività, caratteristica propria del mezzo, viene misurata iniettando una corrente elettrica I nel sottosuolo e misurando la differenza di potenziale ΔV ottenuta tra due definiti punti. Il campo elettrico è generato da una coppia di elettrodi di corrente ed il potenziale viene misurato tramite un'altra coppia

di elettrodi; la corrente può essere costante (caso menzionato come *direct current*, DC) oppure alternata nel tempo (*alternating current*, AC). Nel primo caso la resistenza R è definita dalla legge di Ohm come rapporto tra la tensione e la corrente, ossia:

$$R = V/I \tag{2.1}$$

Il parametro resistività deriva dall'applicazione di un fattore di correzione geometrica alla resistenza misurata. Nel secondo caso (AC) oltre alla resistenza deve essere presa in considerazione anche la capacità elettrica (o capacitanza) del mezzo, in questo caso la legge di Ohm viene generalizzata ottenendo così:

$$Z = V/I = R + jX \tag{2.2}$$

dove Z è l'impedenza del mezzo, R è la resistenza, j è l'unità immaginaria e X è la reattanza, associata a fenomeni di accumulo di energia .

Si è visto infatti che quando si interrompe l'iniezione di corrente nel sottosuolo, il potenziale tra i due elettrodi non decade istantaneamente, ma inizia a calare in modo graduale nel tempo (il tutto ha una durata da qualche secondo a pochi minuti) fino ad azzerarsi. Questo avviene sostanzialmente perché, in determinate condizioni, il terreno ha la capacità di accumulare temporaneamente carica, comportandosi così come un condensatore elettrico. Successivamente, anche quando la corrente ricomincia ad attraversare il terreno, il potenziale non presenta un picco istantaneo (Fig. 2.1), ma necessita di un certo periodo per arrivare al valore massimo (*rise-time*). Il *rise-time* dipende sia dalla strumentazione che dalla natura del materiale che vogliamo investigare.

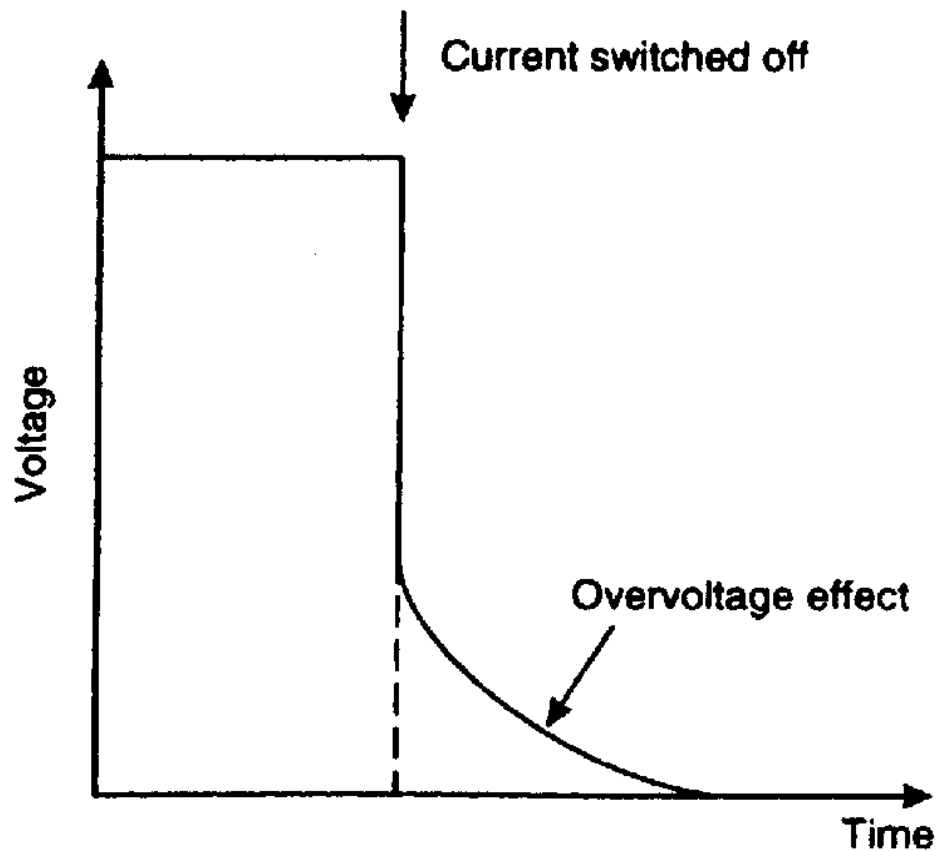


Figura 2.1 –Schema del fenomeno di decadimento graduale del potenziale all'interruzione della corrente.

Durante una misurazione della resistività elettrica, la tensione misurata a qualsiasi frequenza di eccitazione induce un ritardo di fase nel tempo, rispetto alla corrente di eccitazione. La resistività e il ritardo di fase della tensione misurato sono spesso funzione della frequenza di eccitazione. In generale, infatti, il suolo inibisce il passaggio della corrente (agendo appunto come un condensatore) tanto più quanto la frequenza è alta.

Il metodo della polarizzazione indotta ricade tra i metodi geofisici di tipo attivo, in quanto la corrente viene immessa nel mezzo da investigare da un operatore con l'ausilio di una strumentazione, la quale misurerà anche la risposta del mezzo e ne registrerà il valore.

2.2 Metodi per la misurazione dell'effetto di polarizzazione indotta

Esistono differenti modi per misurare la polarizzazione indotta:

- nel *dominio del tempo*;
- nel *dominio della frequenza*: nel quale la resistività apparente viene misurata con due o più frequenze;
- come *polarizzazione indotta spettrale (SIP)*, vedi par. 2.3).

La polarizzazione indotta, infatti, viene misurata come una variazione di potenziale che può essere osservata in funzione del tempo o della frequenza.

Nel dominio del tempo, sostanzialmente, viene misurato il decadimento del potenziale che si viene a creare tra gli elettrodi di potenziale nel momento in cui viene interrotta la corrente.

Il parametro misurato in questo modo è la caricabilità m , che generalmente è espressa come:

$$m = \frac{V_s}{V_p \left(\frac{mV}{V} \right)} \quad (2.3)$$

dove V_p è la misura effettuata tra gli elettrodi di potenziale nell'attimo in cui è appena iniziata l'iniezione di corrente e V_s è la misura registrata quando la corrente è stata appena interrotta. Questo parametro è indice di quanto è "caricabile" il mezzo investigato.

Nel dominio della frequenza, invece, viene iniettata una gamma di correnti a diverse frequenze (da 0,001 Hz a 10 Hz) nel terreno e vengono misurate l'ampiezza e la fase della risposta in termini di potenziale.

In questo caso il parametro misurato è il *Frequency Effect (FE)*, così espresso:

$$FE = \frac{\rho_b - \rho_a}{\rho_a} \quad (2.4)$$

dove a sta ad indicare la resistività apparente ottenuta dall'utilizzo di un'alta frequenza e b indica la resistività apparente derivante dall'uso di una bassa frequenza.

Altro parametro d'interesse per questo metodo è il *Metal Factor* (MF):

$$MF = \frac{FE}{\rho_b} 2\pi 10^5 \quad (2.5)$$

Questi due parametri forniscono una misura dell'intensità della polarizzazione.

I dati ottenuti dalle prove effettuate nel dominio del tempo possono essere trasportati nel dominio della frequenza tramite la trasformata di Fourier.

2.3 La polarizzazione indotta spettrale (SIP)

Si supponga di avere quattro elettrodi allineati sul terreno, nei due esterni iniettiamo la corrente I (elettrodi di corrente) e tra quelli interni misuriamo la differenza di potenziale ΔV che viene a crearsi (elettrodi di potenziale).

Come già accennato nel paragrafo 2.1.2 il suolo ha, in determinati casi, la capacità di mantenere la carica anche dopo l'interruzione della corrente. Per questa ragione quando, in determinate condizioni, applichiamo un campo elettrico sinusoidale al terreno, possiamo notare un certo ritardo tra la corrente in ingresso I e la tensione ΔV tra gli elettrodi di potenziale, dipendente dalla frequenza. Il parametro che definisce il comportamento geoelettrico del sottosuolo è la resistività ρ , oppure la conducibilità σ , esse sono legate dalla relazione $\sigma = 1/\rho$.

La conducibilità della matrice solida del suolo è praticamente trascurabile, pertanto il mezzo attraverso il quale la corrente elettrica si muove è rappresentato principalmente dall'acqua presente o che si muove negli interstizi e da quella che aderisce ai pori. Ovviamente la conducibilità maggiore o minore dell'acqua presente nel sistema influenza la risposta in termini di conducibilità o di resistività del sistema stesso. La legge di Archie descrive il comportamento del sistema suolo + acqua in termini di conducibilità elettrica e grado di saturazione del sistema:

$$\sigma_{el} = \frac{\Phi^m}{a} \sigma_w S_w^n$$

(2.6)

dove σ_{el} è la conducibilità elettrolitica del mezzo, Φ è la porosità, σ_w è la conducibilità dell'acqua, S_w è la saturazione ed m , n , a sono costanti di proporzionalità legate alla geometria dei pori (rispettivamente pari a circa 2, 2 e 1). Naturalmente anche temperatura e viscosità hanno una importante influenza quando si parla del movimento di un fluido attraverso un mezzo poroso.

In una soluzione acquosa le cariche elettriche sono in equilibrio fino a quando viene applicato un campo elettrico; solo allora infatti le cariche tendono ad andare nella direzione del polo di carica opposta alla loro. Questo fenomeno è detto di polarizzazione ionica ed è strettamente dipendente dalla frequenza. Infatti, più la frequenza è elevata più lo è la polarizzazione (vedi Falkenhagen, 1971).

La polarizzazione elettronica si manifesta sulla superficie dei grani, dove è presente un accumulo di cariche; più nel dettaglio avvengono degli scambi cationici che determinano la così detta polarizzazione d'interfaccia o di membrana.

2.4 I modelli empirici

2.4.1 Modello di Cole-Cole

Questo modello è stato originariamente sviluppato da Cole e Cole (1941) per descrivere il comportamento della polarizzazione. In geofisica applicata, la resistività di Cole-Cole è di solito espressa come resistività complessa (Pelton et al., 1978):

$$\rho_1(\omega)^* = \rho_1^0 [1 - m(1 - 1/(1 + A))]^2$$

con $A = (i\omega t)^c$

(2.7)

In alternativa si può utilizzare la conducibilità complessa:

$$\sigma_{(\omega)}^* = \sigma_0 [1 + m(1 + A - mA)] \quad (2.8)$$

dove ρ_0 e σ_0 sono rispettivamente resistività e conducibilità in DC, $m = (\rho_b - \rho_a) / \rho_b = 1 - \sigma_b / \rho_a$ è la caricabilità, t è la costante di rilassamento, c dipende dalle frequenza e A dipende dai percorsi della corrente all'interno dei pori.

Pelton (Pelton et al., 1978) ha dimostrato che questo modello può essere utilizzato per riconoscere i diversi tipi di mineralizzazione e la granulometria delle inclusioni mineralizzate. I parametri ρ_0 , σ_0 , m , c e t sono ottenuti fittando il modello utilizzando impedenza ed ammettenza. Il parametro m descrive l'avanzamento dell'effetto di polarizzazione, mentre t è legata al tempo di rilassamento e indica la posizione (frequenza) del picco di fase $f_{picco} = 1/2 \pi \tau (1 - m)^{0.5c}$. Tuttavia, in rocce mineralizzate, i parametri di Cole-Cole, m e t , dipendono generalmente dalla quantità di elementi polarizzabili e dalla loro dimensione (Pelton et al., 1978 Luo e Zhang, 1998). L'esponente c dipende della distribuzione degli elementi polarizzabili (Vanhala, 1997; Luo e Zhang, 1998). Binley (Binley et al., 2005) ha dimostrato che esiste una forte relazione tra i parametri di Cole-Cole, determinati nel dominio della frequenza, e la conduttività idraulica di arenarie sature ed insature.

2.4.2 Modello dell'angolo di fase costante

Indagini sperimentali su campioni di roccia hanno mostrato in numerosi casi (depositi di porfido e alcune rocce sedimentarie) che le parti reale ed immaginaria dell'impedenza obbediscono alle stesse leggi di frequenza della corrente. Questi dati sono rappresentati nel cosiddetto modello Drake, anche detto modello CPA. Questo può essere espresso dall'equazione:

$$\rho_{(\omega)}^* = \rho_0 \left[\frac{1}{(1 + i\omega t)^a} \right] \quad (2.9)$$

Alle alte frequenze ($\omega t \gg 1$) l'ampiezza è data da $|\rho_{(\omega)}^*| = \rho_0 (\omega t)^{-a}$ e la fase è data da $\varphi = a\pi/2$.

Binley ha esaminato la risposta spettrale dell'IP di alcuni campioni presi da un acquifero composto da arenarie e comparato i parametri misurati con le

proprietà fisiche ed idrauliche. Questi mostravano che i loro dati SIP erano sovrapponibili con il modello Cole-Cole.

2.5 Applicazioni della polarizzazione indotta ai problemi ambientali

Nel metodo SIP i parametri fondamentali di interesse sono resistività ρ e fase φ , ed essi variano in funzione della frequenza. La loro misurazione può fornire importanti informazioni riguardanti le caratteristiche mineralogiche e strutturali del suolo, come la dimensione dei pori o il contenuto di argilla, così come sulle variabili di stato, come la saturazione dei pori e la salinità del fluido presente negli stessi.

Per investigare questi effetti, alcuni ricercatori hanno condotto misurazioni di laboratorio SIP su campioni di terreno contaminati artificialmente o su roccia, per esempio Olhoeft (1986), Vanhala et al. (1992), Soininen e Vanhala (1996), Vanhala (1997), Binley et al. (2005). Tutti gli studi di cui sopra hanno dimostrato che la risposta SIP del suolo e delle rocce è sensibile ai cambiamenti nelle proprietà delle superfici dei grani (dimensione e forma dei grani, spazio tra le particelle di terreno) corrispondentemente a contaminanti organici e inorganici

La tecnica SIP, negli ultimi anni, è stata utilizzata per determinare la conducibilità idraulica sia in laboratorio che in campo; infatti sono stati stabiliti dei collegamenti tra SIP e le proprietà meccaniche dei terreni e delle rocce, nonché quelle idrauliche in ambiente saturo ed insaturo. Un utilizzo interessante di questo metodo risiede, infine, nella comprensione dei meccanismi di contaminazione organica dei suoli e delle falde acquifere. Questa applicazione ha subito una accelerazione, di recente, con l'uso delle misurazioni SIP in laboratorio. Infatti è stato dimostrato che dette misure sono in grado di valutare, su campioni, le attività microbiche e quindi di rilevare la contaminazione organica (in generale si è visto che un aumento dell'attività biologica di microbi corrisponde a livelli più elevati di materia organica negli acquiferi).

3. Misure geofisiche sul sito di Trecate alla scala di campo

Nel 2009 nell'ambito del progetto di ricerca Model PROBE (Model driven Soil Probing, Site Assessment and Evaluation) sono state realizzate misure geofisiche alla scala di campo che hanno interessato la zona evidenziata in rosso in Figura 3.1.

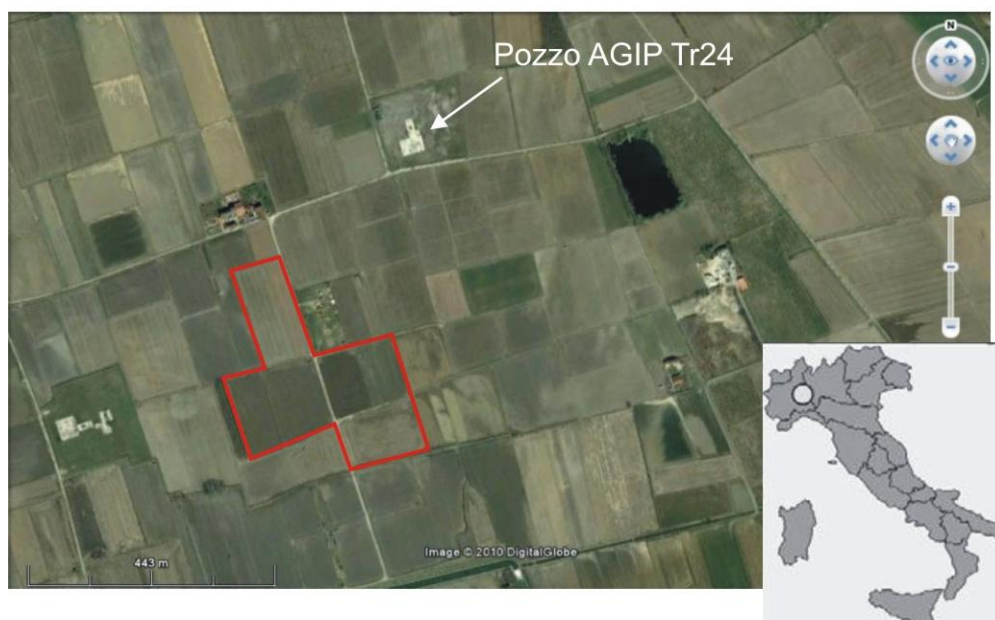


Figura 3.1 - Zona di studio (immagine estratta da Google Maps).

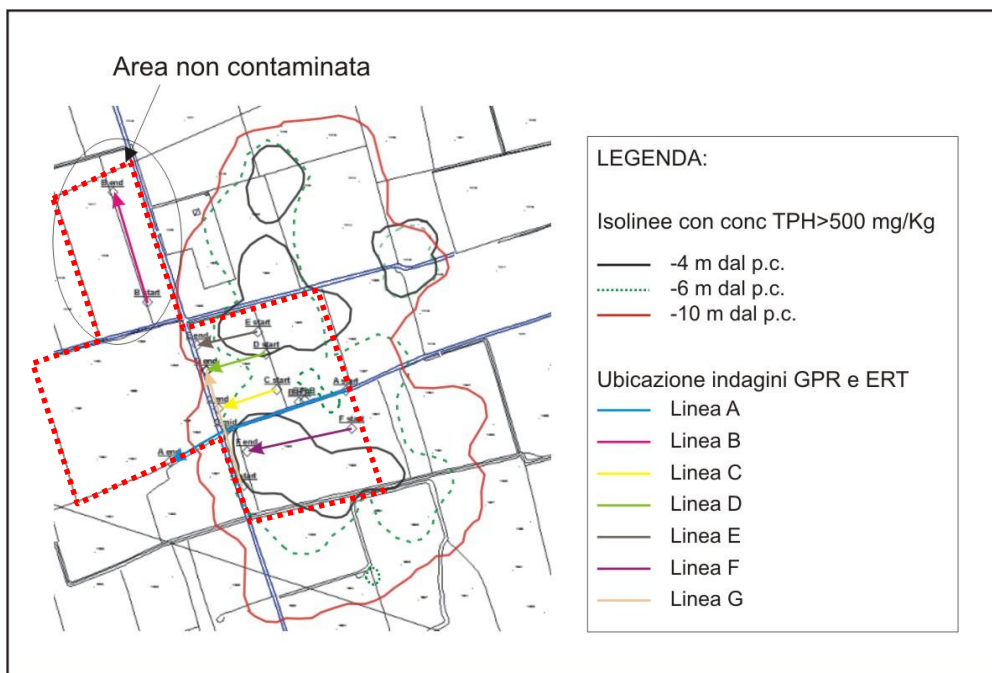


Figura 3.2 - Zona di studio (tratteggiato in rosso) sovrapposta alla mappa di contaminazione (dati Eni).

Sulla zona in esame sono state realizzate misure EM, misure ERT , GPR, IP e SP. Di seguito verranno illustrati alcuni dei risultati prodotti da queste indagini, sulla base dei quali si è impostato il presente lavoro di Tesi.

3.1 Indagini effettuate in campo

3.1.1 Indagini elettromagnetiche (EM)

Il metodo elettromagnetico (EM) si basa sulla teoria delle leggi di Maxwell:

- ✓ Legge di Gauss o teorema di flusso per il campo elettrico (un campo elettrico attraverso una superficie chiusa dipende solo dalla carica elettrica al suo interno):

$$\nabla \cdot \bar{D} = 0 \quad (\text{in assenza di cariche libere}) \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \text{densità di cariche} \quad (\text{in presenza di cariche libere}) \quad (3.2)$$

- ✓ Legge di Faraday o dell'induzione elettromagnetica (un campo magnetico variabile nel tempo genera un campo elettrico):

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

- ✓ Legge di Gauss o teorema di flusso per il campo magnetico (il campo magnetico attraverso una qualsiasi superficie chiusa è nullo):

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (3.4)$$

- ✓ Legge di Ampère-Maxwell (una corrente di conduzione o di spostamento genera un campo magnetico):

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (3.5)$$

dove:

\bar{B} : vettore densità di flusso magnetico [$\text{Wb}/\text{m}^2 = \text{V} \times \text{s}/\text{m}^2$],

\bar{H} : vettore intensità di campo magnetico [A/m],

\bar{E} : vettore intensità di campo elettrico [V/m],

\bar{D} : vettore induzione elettrica [C/m^2],

\bar{J} : vettore densità di corrente elettrica [A/m^2].

Sulla base di questa teoria e di numerose considerazioni sulla propagazione delle onde elettromagnetiche, i metodi EM si suddividono in metodi a induzione, per i quali vale l'equazione della diffusione e metodi per i quali vale l'equazione d'onda (GPR).

I metodi a induzione a loro volta vengono classificati in metodi nel dominio della frequenza (FEM) e metodi nel dominio del tempo (TEM o TDEM).

Nel caso di Trecate l'acquisizione dei dati è stata realizzata con l'utilizzo di un elettromagnetometro a induzione di tipo FEM (SLINGRAM) prodotto dalla GF Instruments (CMD), il quale lavora a frequenza costante (10 kHz) e che, con l'utilizzo di diverse sonde, consente di investigare il sottosuolo con profondità che vanno da 0.75 m sino a 6 m, a partire dal piano campagna.

Lo strumento, collegato ad un GPS, consente di mappare intere aree secondo profili o seguendo un percorso casuale, in quanto ad ogni punto di misura (conducibilità e componente in fase legata alla suscettività magnetica dei corpi) viene correlata una coordinata che consente in fase di restituzione del dato di ricostruire una mappa georeferenziata dei valori.

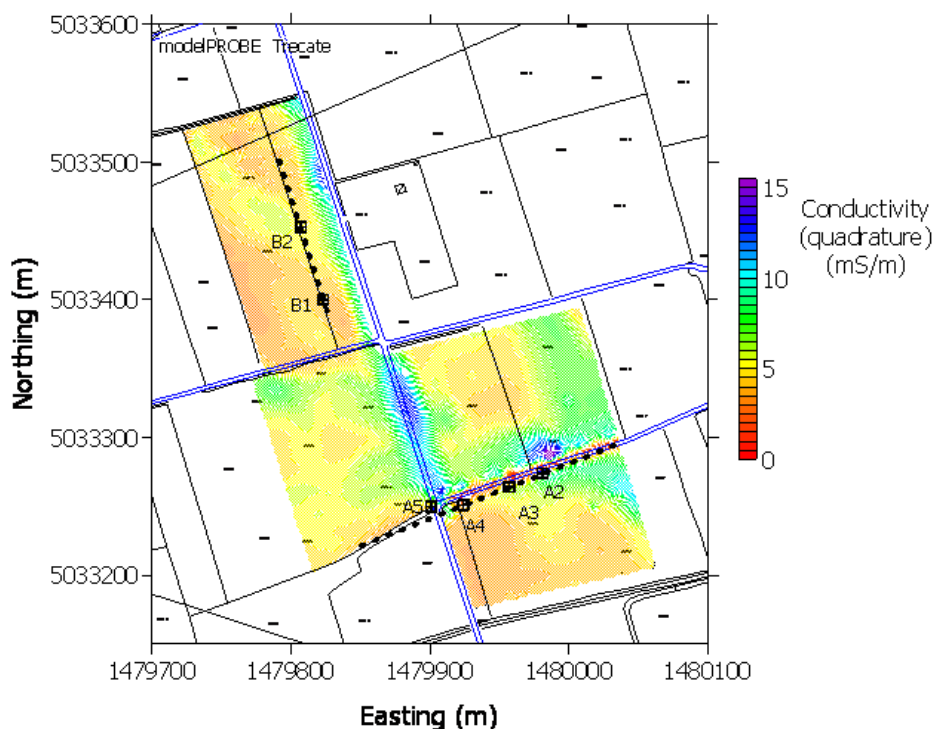


Figura 3.3 - Ubicazione delle indagini EM sul sito di Trecate.

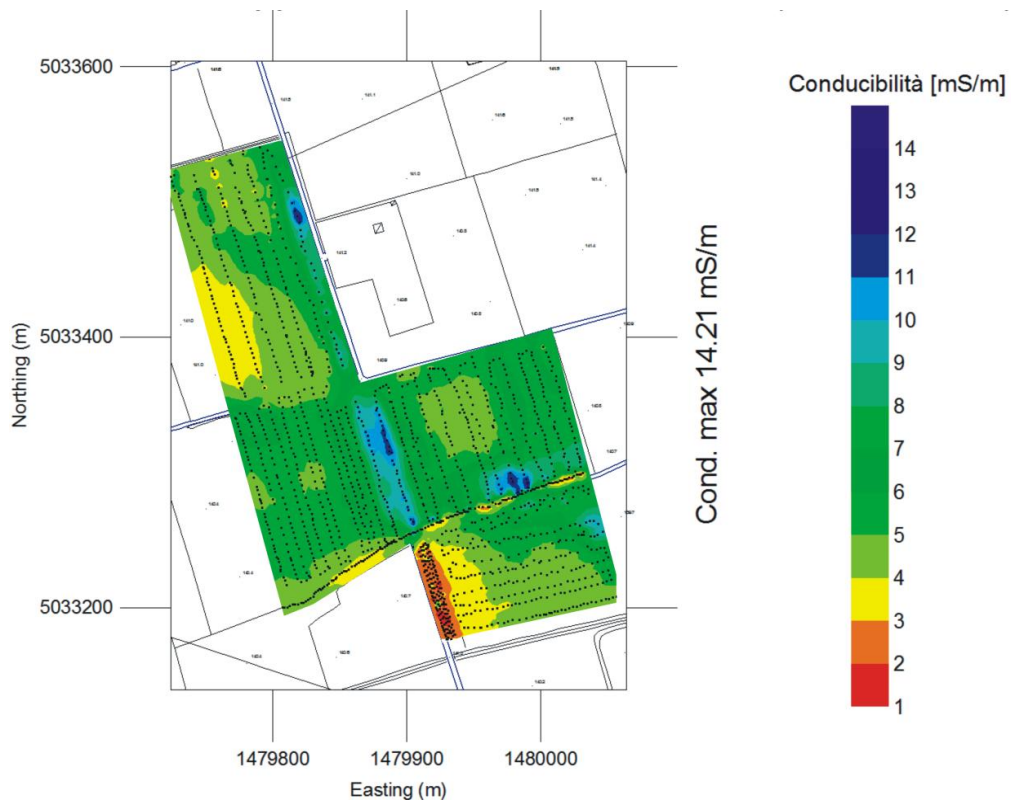


Figura 3.4 - Mappa della conducibilità apparente, riferita ad una profondità di 6 m dal piano campagna (acquisizione con sonda CMD 4).

In Figura 3.4 è riportata la mappa dei valori di conducibilità misurati a Trecate nel Novembre 2009 sino ad una profondità di circa 6 m dal piano campagna. Dall'analisi della suddetta mappa risultano evidenti alcune zone anomale, che presentano valori di conducibilità più alti (in azzurro) e più bassi (in giallo) rispetto all'andamento predominante riscontrato nel campo (in verde). Tuttavia risulta difficile, solo dall'analisi di risultati EM, correlare le anomalie riscontrate con il pattern di contaminazione riportato in Figura 3.2, in quanto evidentemente solo la parte più ad EST della mappa ricade nella zona contaminata, mentre il risultato EM evidenzia la variabilità dei suoli nell'area in esame, segnale prevalente, complessivamente, sull'eventuale segnale dovuto alla sola contaminazione.

3.1.2 Indagini georadar (GPR)

Il Georadar (GPR) fa parte di quei metodi EM per i quali vale il principio dell'equazione d'onda secondo quanto descritto nel paragrafo 3.1. Il GPR (Ground Penetrating Radar) è composto da un'antenna trasmittente e da una ricevente (modalità bistatica), o una sola che svolge entrambe le funzioni (modalità monostatica). In entrambi i casi le antenne sono solitamente utilizzate a contatto con il terreno in modo da garantire un segnale più forte. L'antenna trasmittente emette impulsi EM in alta frequenza (compresi in un range tra 10 MHz e 1.5 GHz) che, una volta penetrati nel sottosuolo, vengono riflessi ogni qual volta incontrano un mezzo a differente impedenza elettromagnetica. Il segnale riflesso viene quindi captato dall'antenna ricevente e il controller, che gestisce le antenne, registra il tempo che intercorre tra il momento dell'emissione dell'impulso partito dalla trasmittente ed il momento di ricezione del segnale di ritorno alla ricevente. La velocità del segnale Georadar è dipendente dalla costante dielettrica del mezzo investigato e pertanto sono potenzialmente visibili a tale indagine tutti i mezzi che presentino una sostanziale variazione di questo parametro, comprese le variazioni di contenuto idrico ed eventuali contaminazioni che alterino le caratteristiche del suolo.

Nel caso di Trecate è stato utilizzato il sistema PulseEKKO PRO della Sensor&Software Ltd con antenne da 100 MHz e 50 MHz in configurazione bistatica.

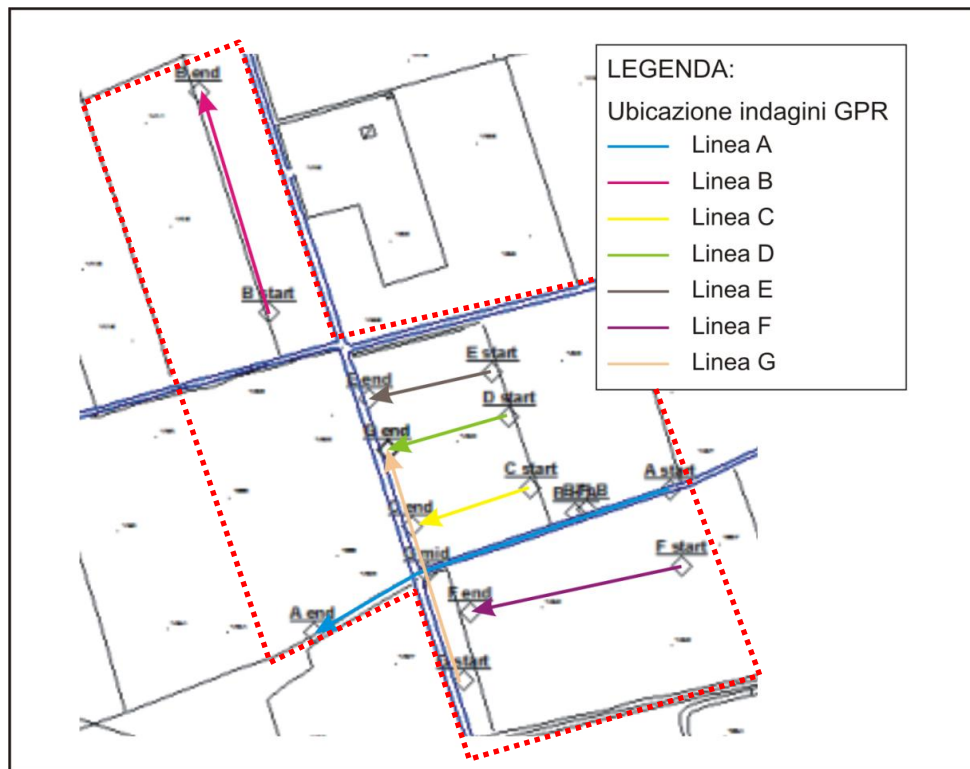


Figura 3.5 - Ubicazione delle sezioni GPR nell'area oggetto di studio (tratteggiata in rosso).

Nell'immagine riportata in Figura 3.5 sono evidenziate le acquisizioni Georadar eseguite nel Novembre 2009 sull'area oggetto di studio. Si riportano per i fini legati al presente lavoro di Tesi solo le sezioni Georadar indicate con A e B, rispettivamente incidenti sulla zona contaminata e su quella non contaminata.

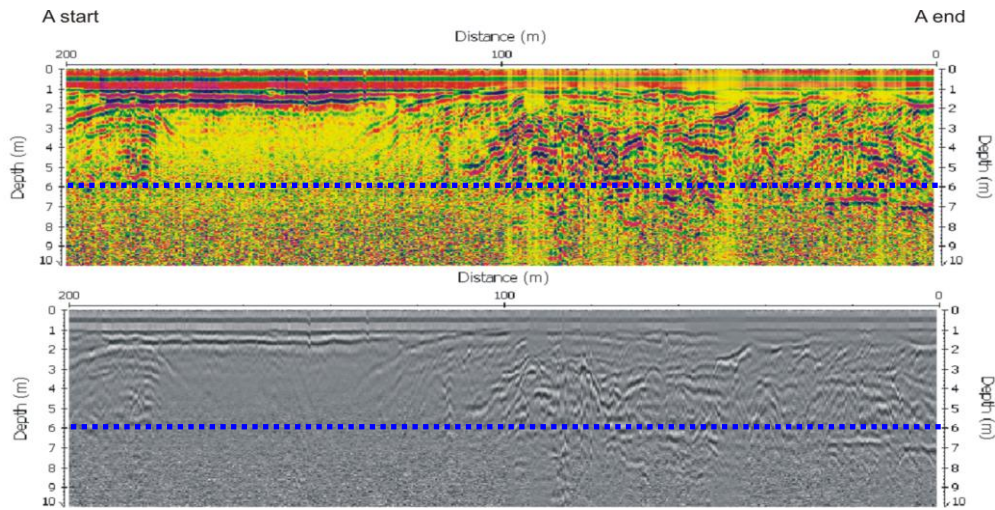


Figura 3.6 - Sezione A GPR realizzata con antenna da 100 MHz (nella zona contaminata).

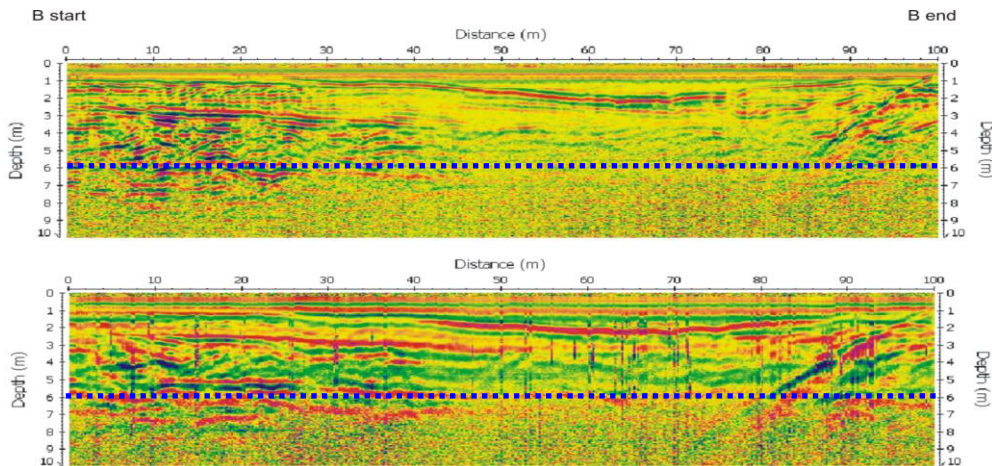


Figura 3.7 - Sezione B GPR realizzata con antenna da 100 MHz in alto e 50 MHz in basso (nella zona non contaminata).

Entrambe le sezioni (A e B) mettono in risalto abbastanza chiaramente la geologia del sistema, ma nella sezione A è particolarmente evidente una netta variazione associata ad un assorbimento del segnale tra la progressiva 100 m e 200 m. Questa anomalia risulta correlabile con la zona contaminata più

superficiale così come indicato nella mappa di Figura 3.2 con la linea nera ed inoltre parrebbe sovrapporsi con l'anomalia conduttiva (in azzurro) rilevata nella mappa EM (6 m di profondità di investigazione).

3.1.3 Tomografie elettriche di resistività (ERT) e tomografie di polarizzazione indotta (IP)

Il metodo geoelettrico di resistività si basa sulla legge di Ohm, secondo la quale se si inietta una corrente I tra due elettrodi (A e B) è possibile misurare una differenza di potenziale ΔV ai capi di altri due elettrodi (M e N). Questa differenza di potenziale sarà data dal prodotto della corrente iniettata e della resistenza al passaggio della stessa corrente offerta dal mezzo investigato (3.6).

Le formule fondamentali nell'utilizzo di questa metodologia sono:

$$\Delta V = IR \tag{3.6}$$

$$R = \frac{\rho L}{S} \tag{3.7}$$

dove I è la corrente che passa attraverso un conduttore cilindrico di lunghezza L , sezione S e resistenza R , ai capi del quale è stata indotta una differenza di potenziale ΔV e ρ è una caratteristica propria del mezzo denominata resistività (il suo inverso è pari alla conduttività elettrica $\sigma = 1/\rho$). Questo concetto applicato elementarmente a 4 elettrodi (quadripolo), può essere facilmente esteso ad un consistente numero di elettrodi sistemati simultaneamente sul terreno (stendimento – tomografia ERT) e gestiti automaticamente da uno strumento (georesistivimetro) secondo configurazioni prestabilite e scelte di volta in volta dall'operatore. La

penetrazione della corrente nel terreno e la conseguente profondità di investigazione sono strettamente legate alla lunghezza dello stendimento (si raggiunge una profondità di circa 1/4-1/5 della lunghezza), ma dipendono anche dalla corrente iniettata, dal tipo di suolo e dal dispositivo adottato. La risoluzione è molto buona in prossimità degli elettrodi e peggiora man mano che si va in profondità. Se si aumenta il tempo di acquisizione e si usa una corrente alternata, parallelamente al dato ERT si può registrare anche il dato di polarizzazione indotta (IP) che fornisce una misura della carcabilità dei mezzi presenti nel sottosuolo investigato. Questo metodo si basa sul concetto che se si immette nel terreno una corrente e dopo un certo tempo si interrompe bruscamente il suo passaggio, si può notare che la tensione tra gli elettrodi di potenziale non si annulla istantaneamente, ma, dopo un iniziale netto decremento fino ad un certo valore, essa decade piuttosto lentamente verso lo zero. Questo tempo di decadimento può essere dell'ordine dei secondi o dei minuti. In modo analogo, quando la corrente viene riattivata, la tensione impiega lo stesso periodo di tempo finito per raggiungere il suo valore massimo. Riferendoci al processo di scarica, il fenomeno è spiegabile se si immagina che durante il passaggio di corrente il terreno abbia immagazzinato una certa quantità di energia, ossia si è polarizzato; questa energia viene poi rilasciata, in un intervallo di tempo finito, durante la fase di scarica stessa. Le cause di questo fenomeno non sono ancora chiare, ma è noto che può essere originato da molteplici meccanismi: spostamento reciproco degli elettroni e del nucleo (polarizzazione elettronica), spostamento degli ioni nei reticoli cristallini (polarizzazione ionica), isoorientazione di molecole già elettricamente polari (polarizzazione molecolare), situazioni di contatto tra materiali (polarizzazione interfacciale), fenomeni elettrochimici (polarizzazione elettrochimica).

Sul sito di Trecate sono state effettuate indagini tomografiche ERT e IP, basate sui principi sopra citati. Lo strumento utilizzato è un

georesistivimetro SYSCAL PRO 72 della IRIS Instruments. Questo è composto da un generatore di corrente continua, da un amperometro che misura la corrente iniettata, da un voltmetro che misura la differenza di potenziale. e calcola conseguentemente registra la resistenza e i parametri di acquisizione in una memoria interna allo strumento.

Nel sito in studio le misure ERT sono state effettuate secondo lo schema riportato nella Figura 3.2. Di seguito, per il presente lavoro, saranno analizzati i risultati delle tomografie realizzate lungo i due stendimenti A e B (Figura 3.8).

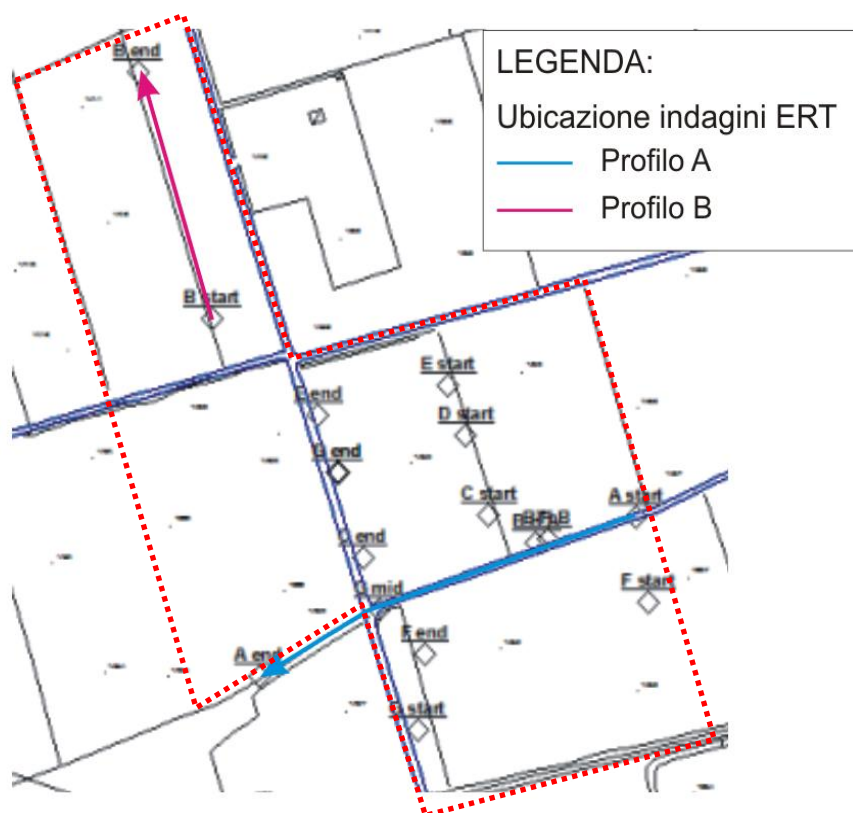


Figura 3.8 - Ubicazione degli stendimenti A e B per le acquisizioni ERT e IP (l'area di studio è tratteggiata in rosso).

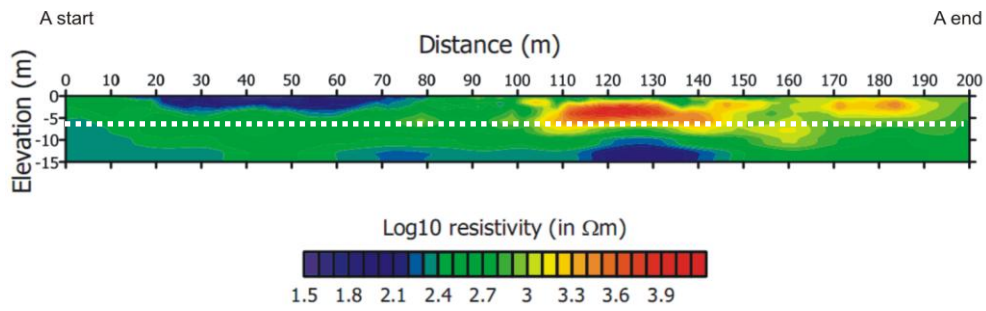


Figura 3.9 - Sezione ERT lungo il profilo A nella zona contaminata (tratteggio in bianco tavola d'acqua).

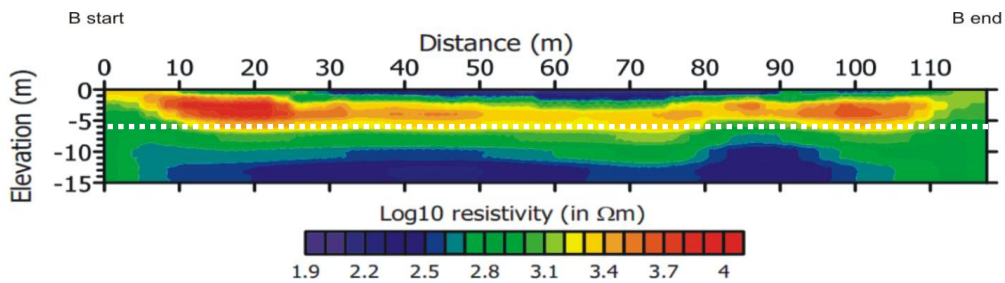


Figura 3.10 - Sezione ERT lungo il profilo B nella zona non contaminata (tratteggio in bianco tavola d'acqua).

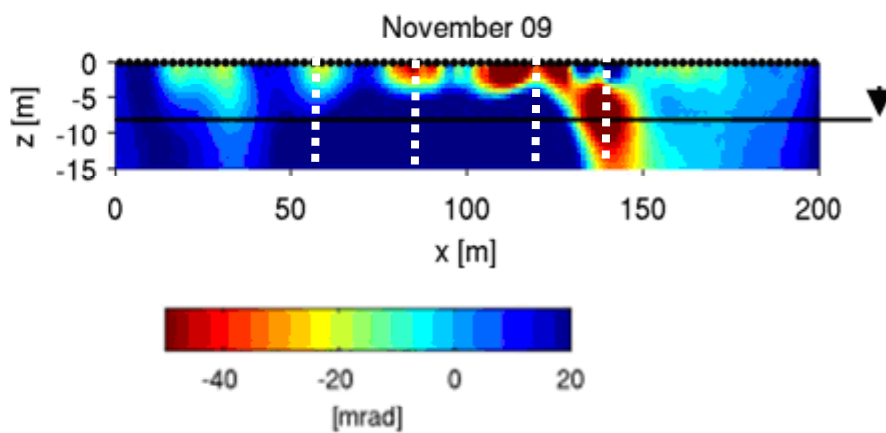


Figura 3.11 - Sezione IP (misura della fase) lungo il profilo A nella zona contaminata (in nero è indicata la tavola d'acqua).

Dall'analisi delle sezioni ERT ed IP (solo sezione A), risulta confermata la presenza di un'anomalia conduttiva (progressiva 20 m – 80 m) pienamente correlabile con quanto evidenziato precedentemente con l'indagine GPR e con la mappatura EM in corrispondenza dell'area ad EST maggiormente contaminata. Altrettanto sembra essere confermata una uniformità del segnale e l'assenza di anomalie significative nella tomografia ERT relativa alla zona B.

3.4 Misure di potenziale spontaneo (SP)

In un'area sovrapposta e più ampia rispetto a quella sinora descritta per le misure geofisiche, sono state realizzate anche delle acquisizioni di potenziale spontaneo (SP), eseguite prima ad Ottobre 2009 e poi ripetute a Marzo 2010 (Figure 3.14- 3.15) dall'unità di ricerca del CNR di Potenza.

Il metodo dei Potenziali Spontanei si basa sull'assunzione che il terreno è sede di correnti elettriche naturali che danno origine ad una distribuzione non uniforme di potenziali elettrici. In esso infatti si svolgono fenomeni elettrochimici di diversa origine, legati principalmente alla presenza o al movimento di acqua e, subordinatamente, all'esistenza di masse di solfuri metallici. Variazioni del tenore di alcuni minerali nella roccia in vicinanza di discontinuità geologiche, attività batterica e di biodegradazione (bioelettrica) di materiale organico, fenomeni di corrosione, gradienti di temperatura e pressione nei fluidi sotterranei ed altri fenomeni simili possono provocare potenziali elettrici rilevanti. La misura dei Potenziali Spontanei è molto semplice, in quanto consiste solo in due elettrodi ed un millivoltmetro. Gli elettrodi impiegati devono però essere di tipo particolare, in quanto, se si usassero comuni elettrodi metallici si avrebbero reazioni elettrochimiche al contatto terreno-elettrodi, che causerebbero potenziali anomali, molto variabili da punto a punto e quindi non eliminabili a priori.

Gli elettrodi devono pertanto essere del tipo “impolarizzabile”. Meno semplice risulta l’interpretazione del segnale registrato, dal momento che, numerose possono essere le cause che concorrono anche congiuntamente alla produzione di un segnale significativo. Nel caso del sito di Trecate questa misura si è rivelata particolarmente interessante per monitorare e interpretare la dinamica e l’effetto di alcuni processi fisico-chimici.

La prima misura è stata infatti realizzata ad Ottobre del 2009 (Figura 3.12), nel momento in cui le risaie presenti nella zona erano completamente sommerse e la tavola d’acqua aveva subito un notevole incremento legato alla forte componente di infiltrazione della stessa acqua delle risaie.

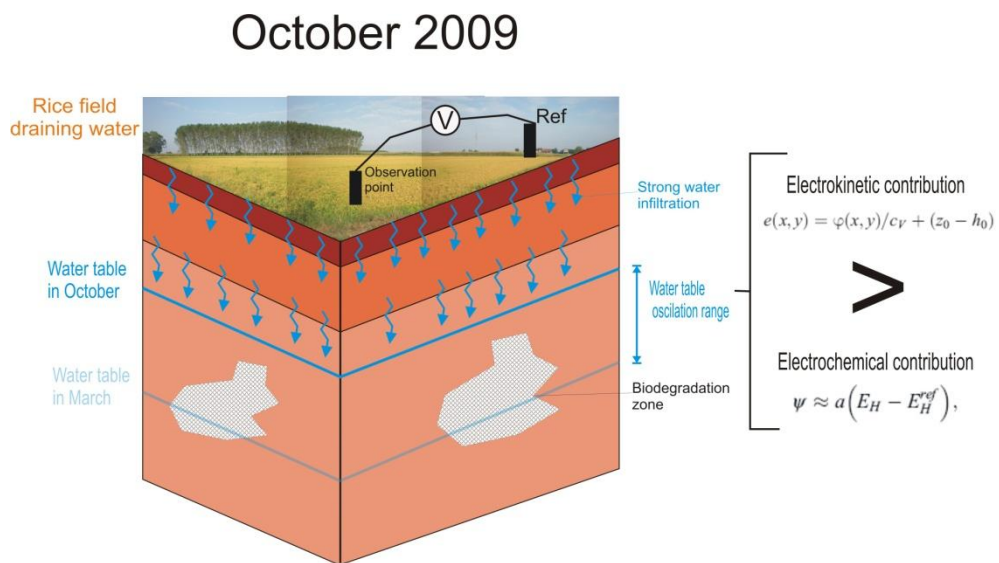


Figura 3.12 - Schema della situazione idrogeologica dell’area investigata ad Ottobre 2009.

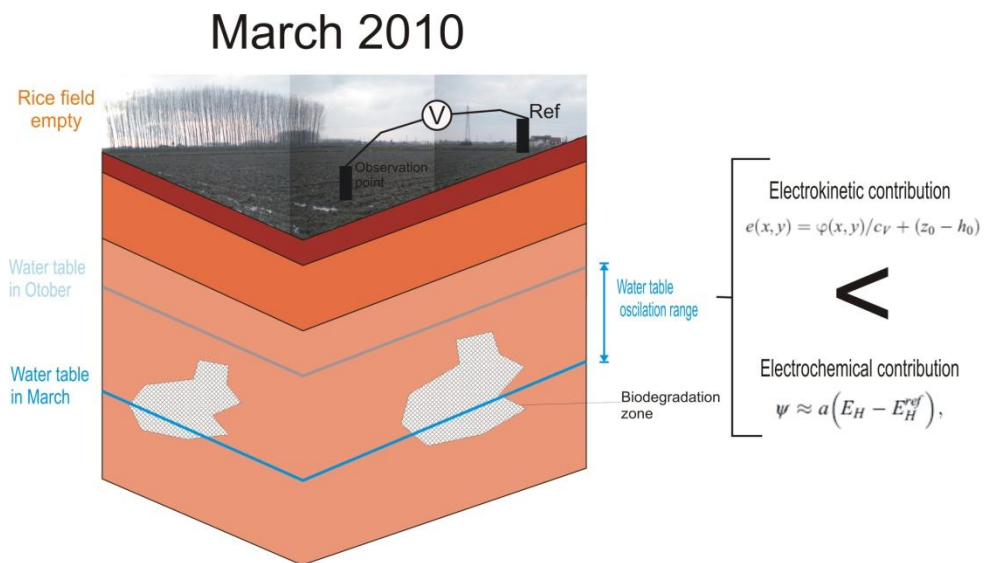


Figura 3.13 - Schema della situazione idrogeologica dell'area investigata in Marzo 2010.

Il segnale registrato e la mappa riportata in Figura 3.14 evidenziano una netta componente elettrocinetica associata al fenomeno di infiltrazione e corrispondente ad una prevalenza di potenziale spontaneo negativo.

Nelle misure effettuate a Marzo 2010 (Figura 3.15), nella stessa area si registra invece un segnale prevalentemente positivo. Questa evidenza è legata alla completa variazione delle condizioni del sistema (Figura 3.13): le risaie sono asciutte, la tavola d'acqua si è abbassata e prevale l'attività batterica ed elettrochimica.

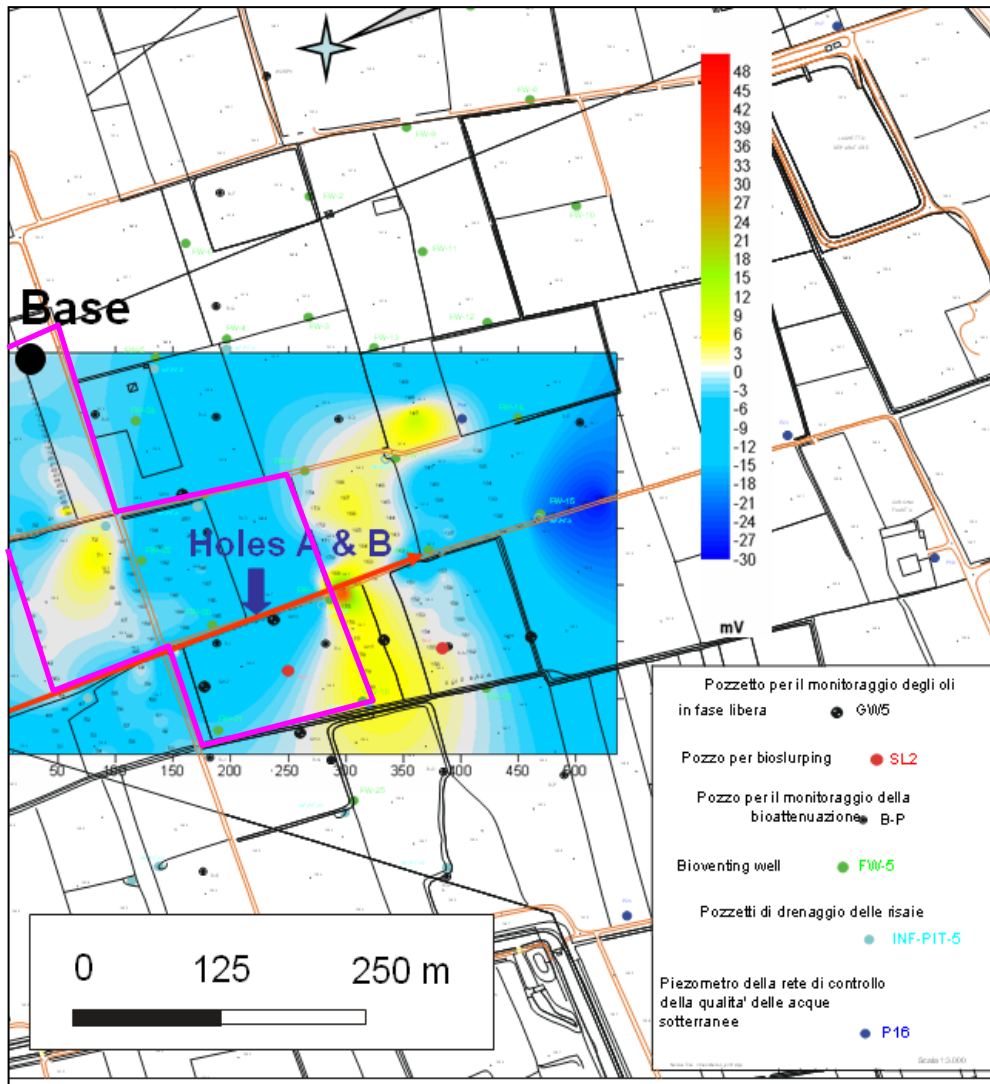


Figura 3.14 - Mappa SP realizzata ad Ottobre 2009 (in fucsia la zona di studio del Novembre 2009).

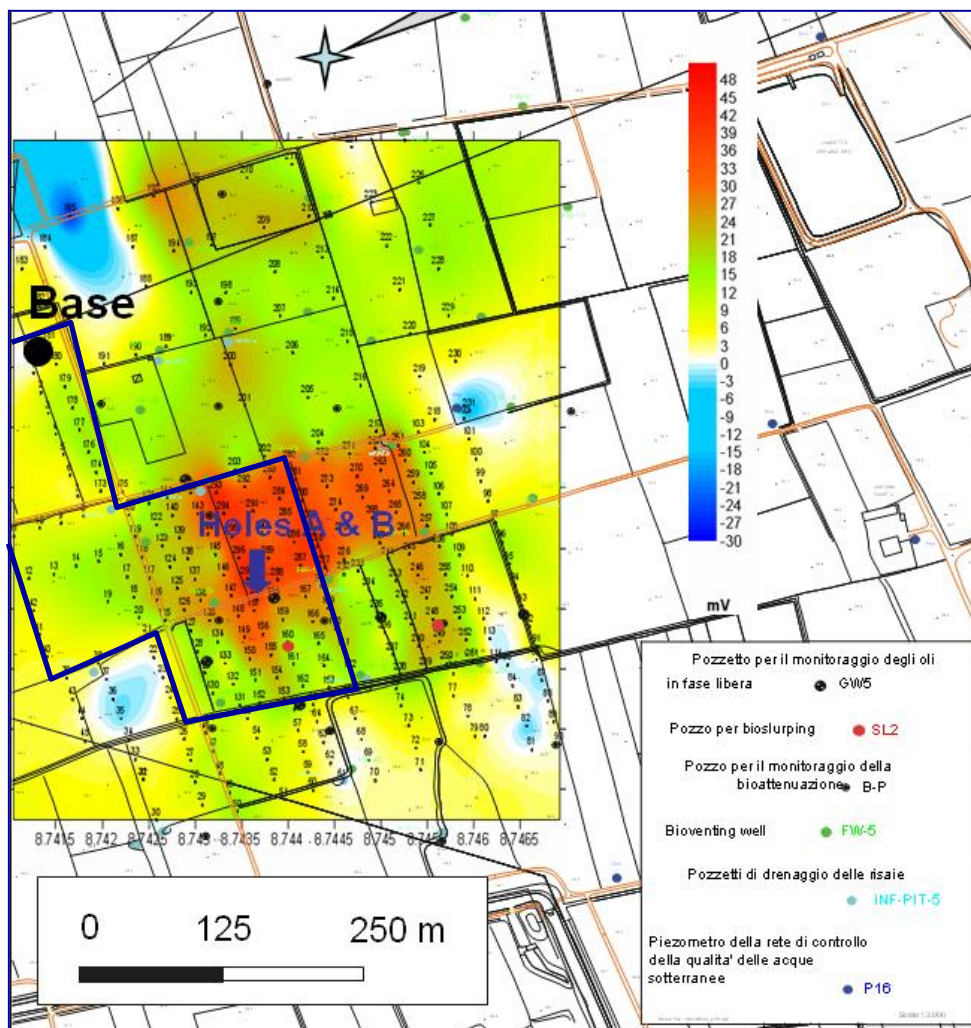


Figura 3.15 - Mappa SP realizzata a Marzo 2010 (in blu la zona di studio del Novembre 2009).

3.2 I campioni di suolo per le misure SIP in laboratorio

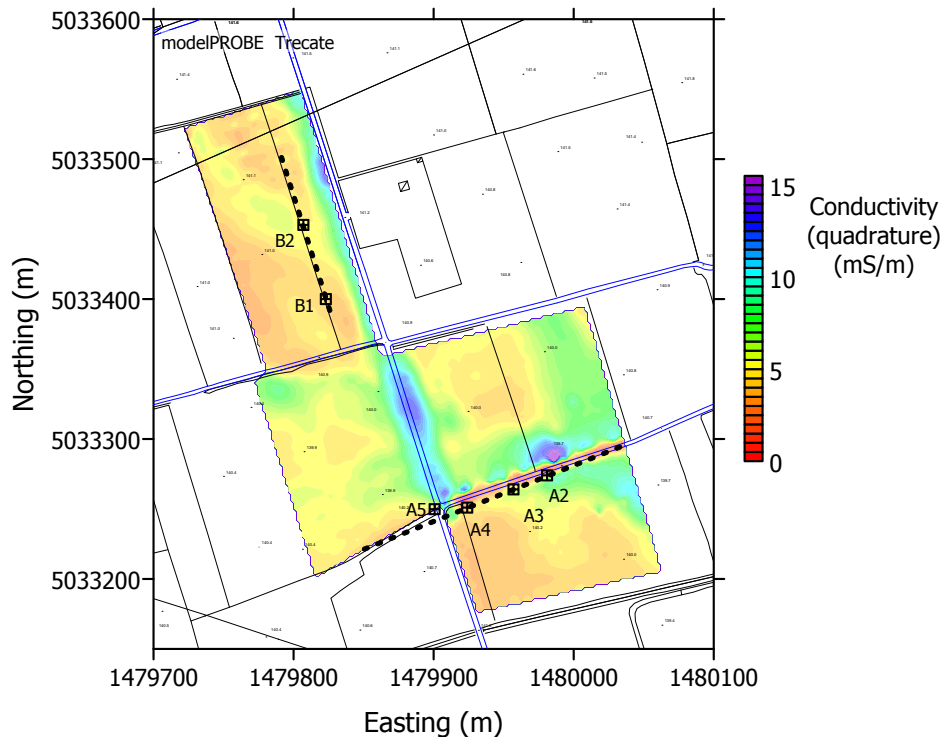


Figura 3.16 - Ubicazione dei sondaggi realizzati nell'area contaminata (A) e in quella non contaminata (B) sovrapposti alla mappa delle conducibilità.

Sulla base delle considerazioni emerse dall'analisi comparativa dei risultati delle indagini geofisiche alla scala di campo su descritte, si è deciso di effettuare dei sondaggi che interessassero la zona contaminata (A) e quella non contaminata (B) per poter eseguire misure SIP alla scala di laboratorio e confrontare i risultati con quelli ottenuti alla scala di campo. L'ubicazione dei sondaggi, insistenti sui profili utilizzati per le misure ERT, IP, GPR è riportata sulla mappa EM di Figura 3.16.

Sul profilo A insistono i sondaggi A2, A3, A4, A5, mentre sulla linea B sono stati effettuati i sondaggi B1 e B2 (Figure da 3.17 a 3.21).

Da ciascun sondaggio sono stati quindi prelevati determinati campioni, a profondità nota, per le analisi SIP in laboratorio, i cui dettagli saranno meglio descritti in un capitolo a parte.

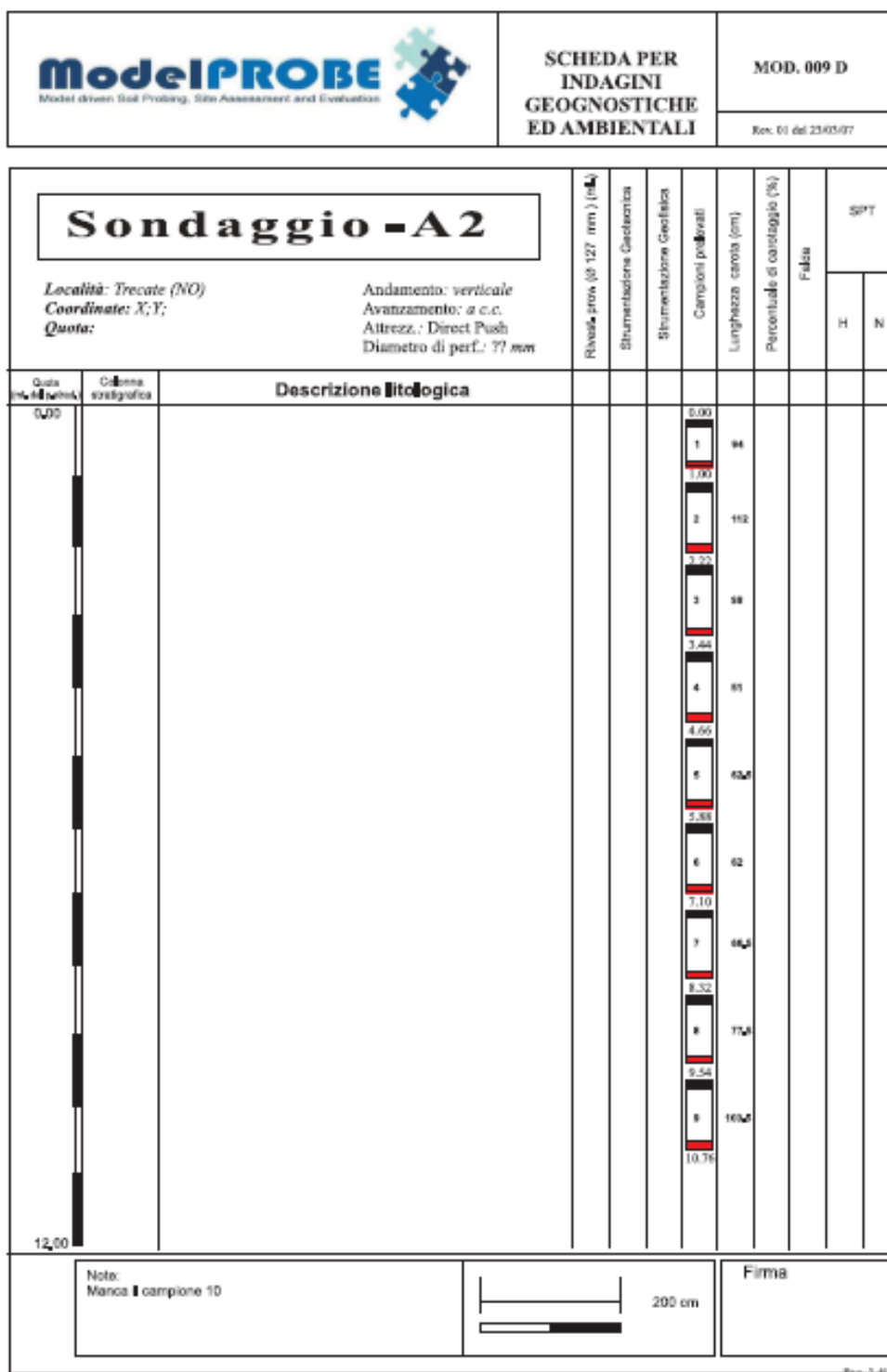


Figura 3.17 Sondaggio A2 realizzato nell'area contaminata (A).

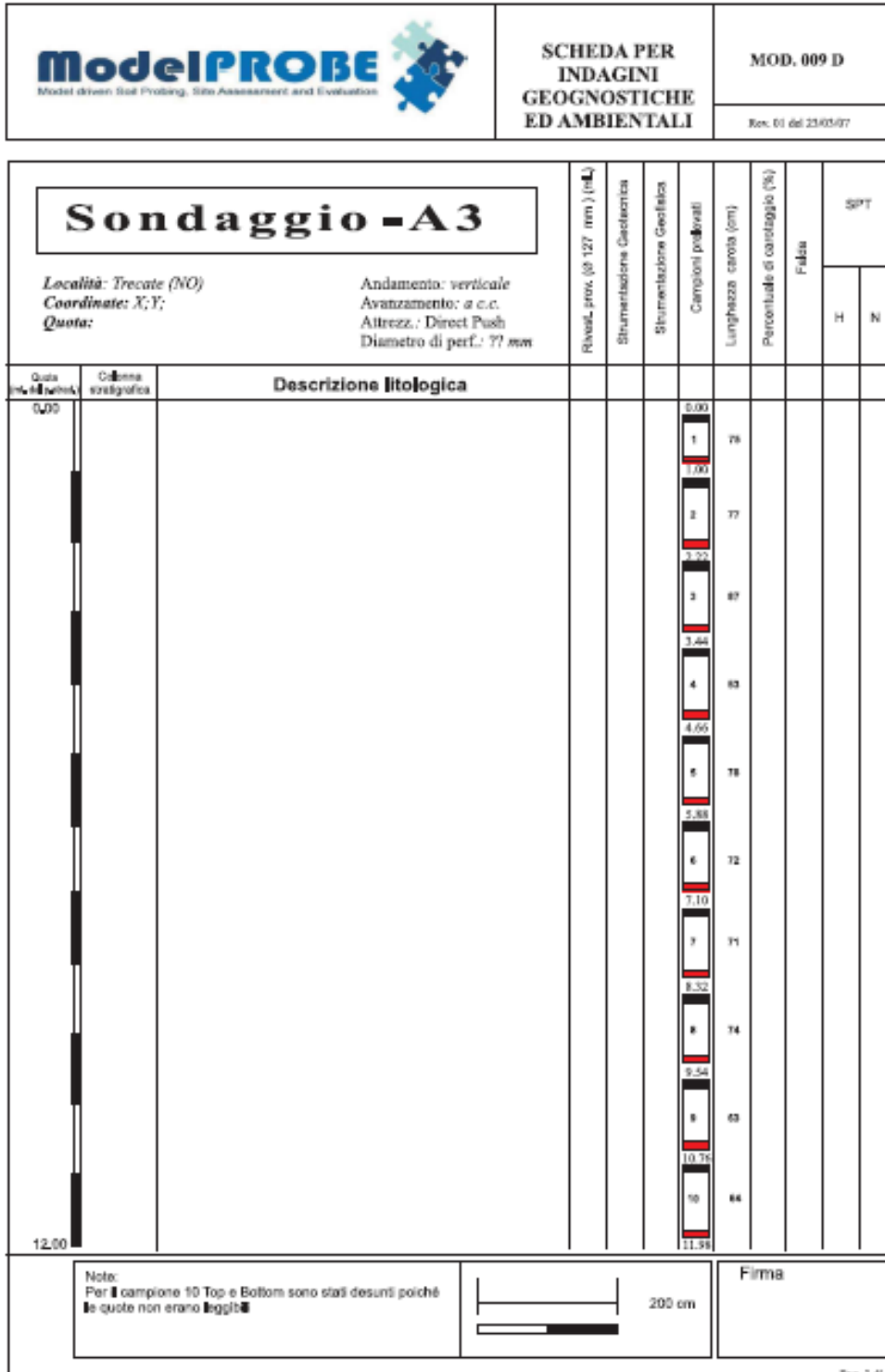


Fig. 3.18

Figura 3.18 Sondaggio A3 realizzato nell'area contaminata (A).

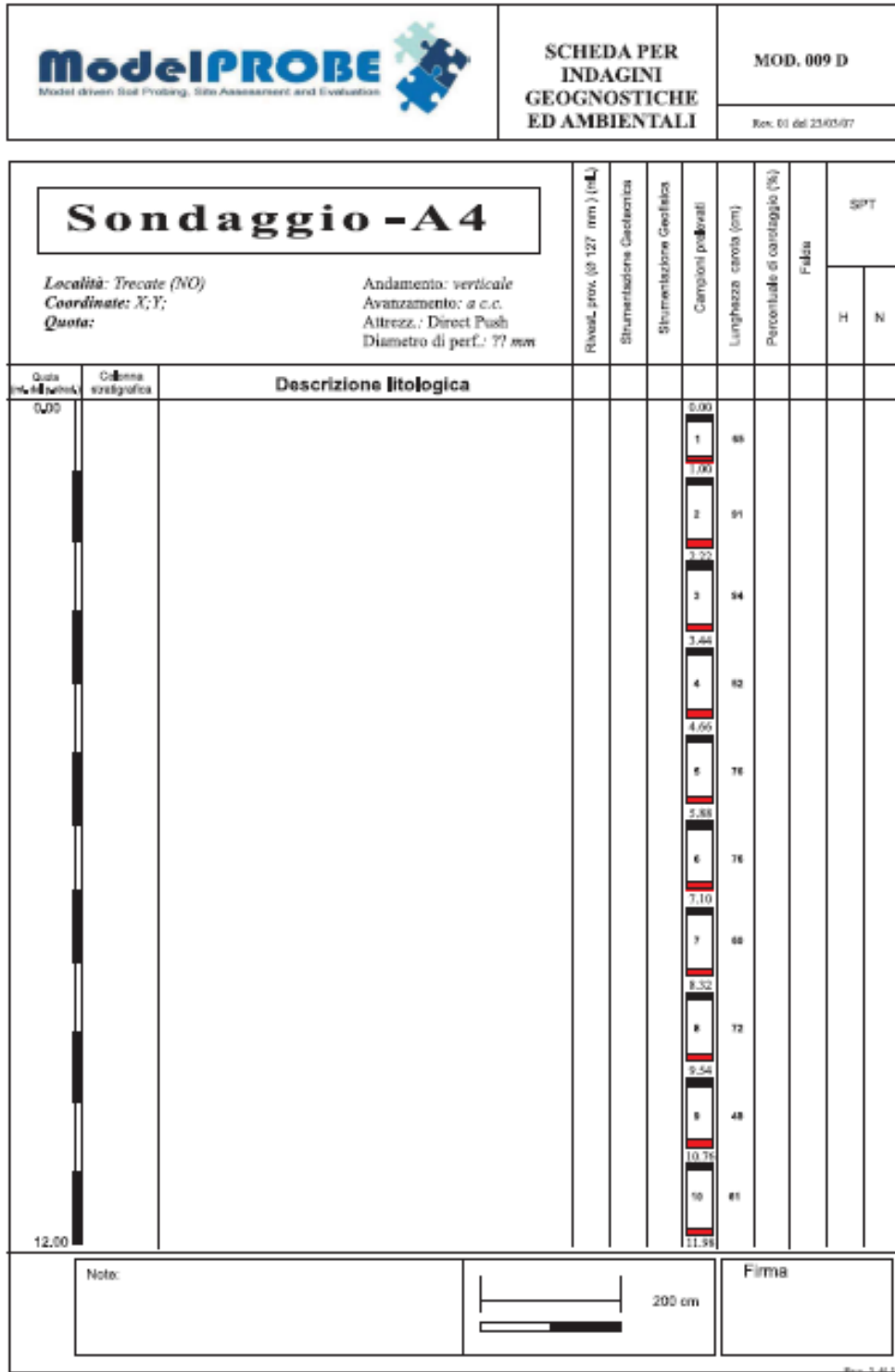


Fig. 3.19

Figura 3.19 Sondaggio A4 realizzato nell'area contaminata (A).



		SCHEDA PER INDAGINI GEOGNOSTICHE ED AMBIENTALI		MOD. 009 D Rev. 01 del 23/03/07	
<h2 style="text-align: center;">Sondaggio - A5</h2>			Rivasst. prox. (Ø 127 mm) (mL) Sperimentazione Casistica Sperimentazione Geotecnica	Campioni prelevati Lunghezza carota (cm) Percentuale di carotaggio (%)	Falda SPT H N
<i>Località:</i> Treate (NO) <i>Coordinate:</i> X,Y; <i>Quota:</i>		Andamento: verticale Avanzamento: a c.c. Altez.: Direct Push Diametro di perf.: 77 mm			
Quota (m)	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica			
0,00				0,00	
				1 98	
				1,00	
				2 47	
				3,22	
				3 114	
				3,64	
				4 82	
				4,66	
				5 73	
				5,88	
				6 84	
				7,10	
				7 18	
				8,32	
				8 61	
				9,54	
				9 47	
				10,76	
				10 81	
12,00				11,98	
Note:				Firma	

Figura 3.19 Sondaggio A5 realizzato nell'area contaminata (A).

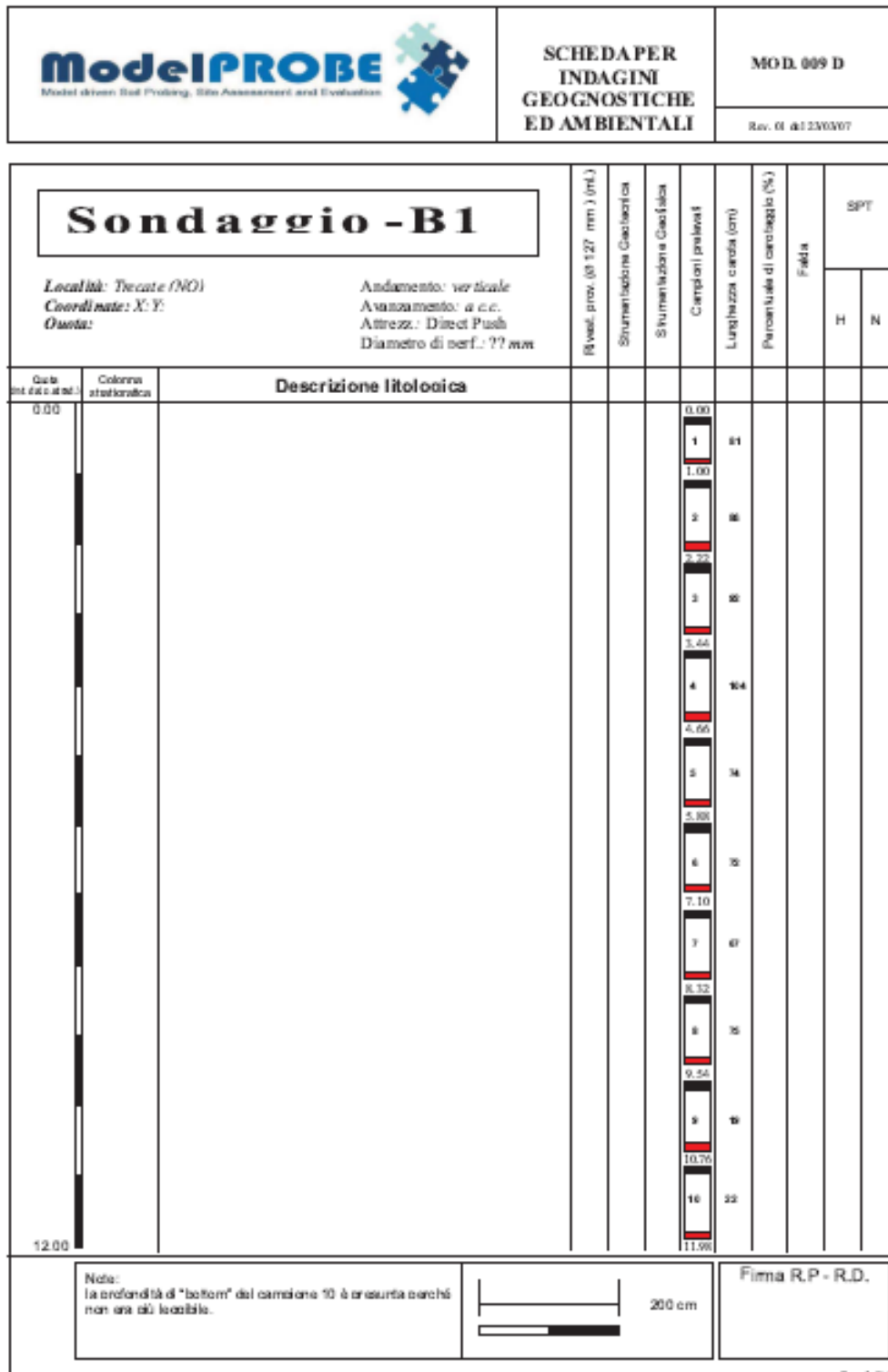


Figura 3.20 Sondaggio B1 realizzato nell'area non contaminata (B).

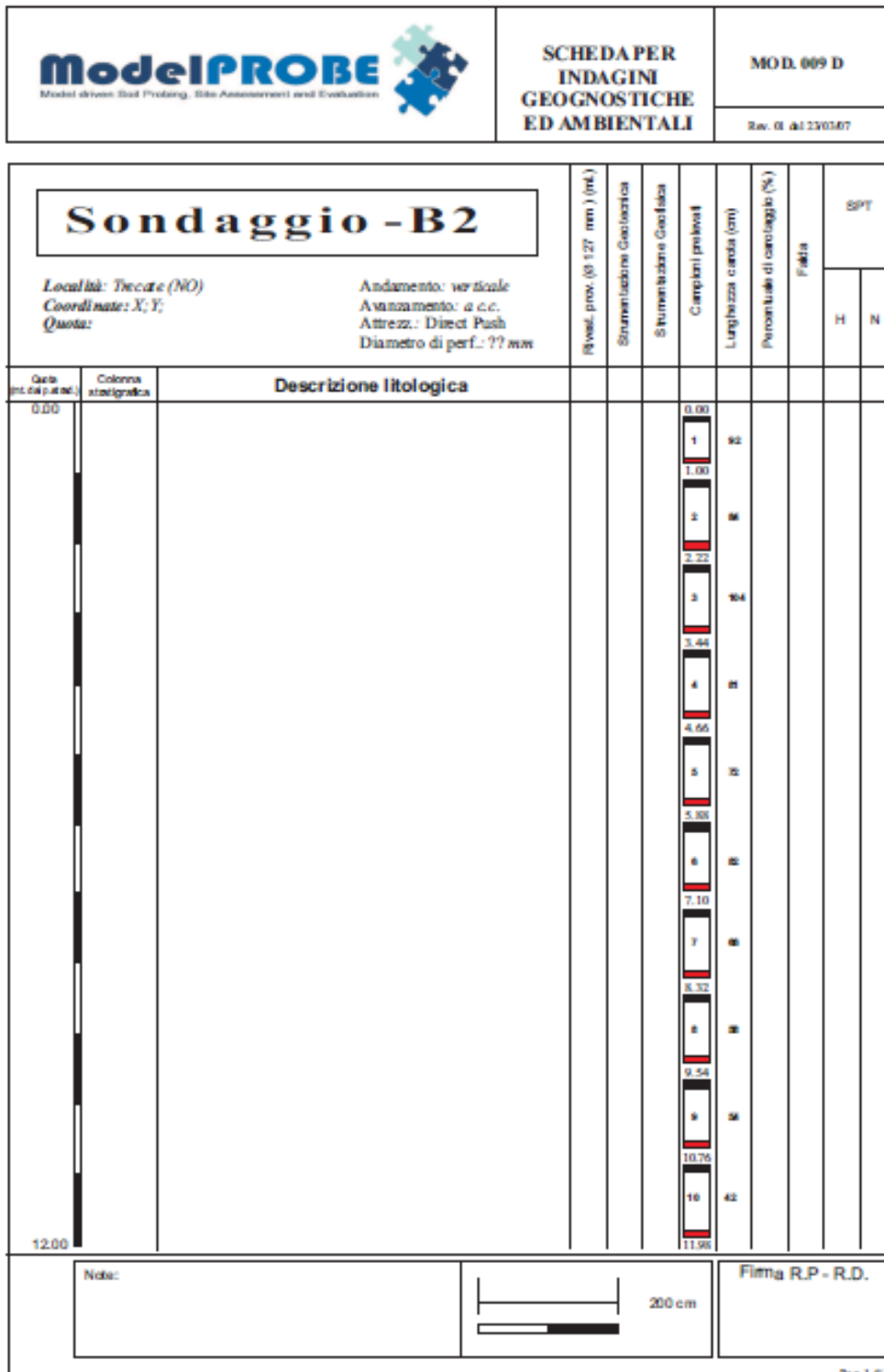


Figura 3.21 Sondaggio B2 realizzato nell'area non contaminata (B).

Tutti i sondaggi sono stati svolti nel marzo 2010 con l'utilizzo di attrezzatura Geoprobe a secco, cioè senza l'ausilio di fluidi di perforazione, questo per evitare, per quanto possibile, l'alterazione dei valori di contaminazione di fluidi di perforazione. Di seguito si riporta una tabella relativa ai campioni prelevati da ciascun sondaggio e utilizzati per le prove SIP in laboratorio.

SONDAGGIO- N° CAMPIONE	PROFONDITA' (m)
A2-4	3.44 / 4.66
A2-9	9.54 / 10.76
A3-2	1.00 / 2.22
A3-3	2.22 / 3.44
A3-7	7.10 / 8.32
A3-9	9.54 / 10.76
A4-5	4.66 / 5.88
A4-9	9.54 / 10.76
A5-6	5.88 / 7.10
B1-4	3.44 / 4.66
B1-10	10.76 / 11.98
B2-4	3.44 / 4.66

Il livello piezometrico registrato al momento del prelievo si aggira attorno ai 9-10 m di profondità dal piano campagna, con variazioni stagionali e dovute alla presenza delle risaie.

Dalle analisi sulle concentrazioni dei contaminanti si è visto che esse aumentano proporzionalmente alla profondità, situazione probabilmente imputabile principalmente a due fattori: i procedimenti di disinquinamento che hanno interessato soprattutto le parti più superficiali e la permeazione del contaminante in profondità agevolato dai pozzetti di drenaggio.

I carotaggi sono stati eseguiti nel Marzo 2010 con l'utilizzo di attrezzatura Geoprobe a secco, cioè senza l'ausilio di fluidi di perforazione, questo per evitare, per quanto possibile, l'alterazione dei valori di contaminazione da parte dei fluidi di perforazione.

4. Le misure SIP di laboratorio sui campioni di Trecate

4.1 Le celle

Le celle utilizzate per effettuare le misure sono composte da tre elementi (vedi Fig.4.1):

- un coperchio inferiore in Teflon, con un diametro interno di 55 mm, un diametro esterno di 85 mm e un'altezza di 35 mm. È stato progettato per ospitare una pietra di ceramica porosa e il corpo centrale. Il contatto elettrico tra l'elettrodo inferiore e lo spettrometro è fornito da un asticella metallica;
- una calotta superiore in Teflon, con diametro interno di 55 mm, un diametro esterno di 85 mm e un'altezza di 20 mm. Questo tappo ha un alloggiamento che serve per l'inserimento di una vite del diametro di 1,5 mm, che consente il contatto elettrico con lo spettrometro;
- un corpo centrale cilindrico in plexiglass, con un diametro interno di 44 mm, un diametro esterno di 54 mm e una lunghezza totale di 151 mm. Sul tubo cilindrico sono inserite tre coppie di viti, che fungono da elettrodi di potenziale.

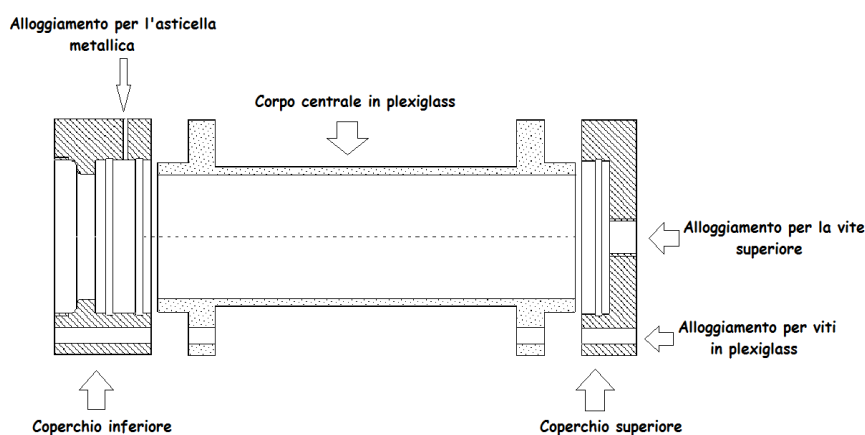


Figura 4.2 - Schema della cella SIP.

La scelta del Teflon per i coperchi è legata alla capacità di questo materiale di non reagire con gli inquinanti. Il corpo centrale è stato realizzato in plexiglass, materiale che garantisce la trasparenza necessaria per controllare visivamente il campione all'interno della cella, le viti per la chiusura dei tappi sono anch'esse in plexiglass per non interferire con gli elettrodi.

Ogni coperchio viene infatti fissato al corpo centrale per mezzo di tre viti in plexiglass. La cella è stata studiata per funzionare in posizione orizzontale, in modo che la gravità non causi differenze di saturazione in corrispondenza degli elettrodi di potenziale.

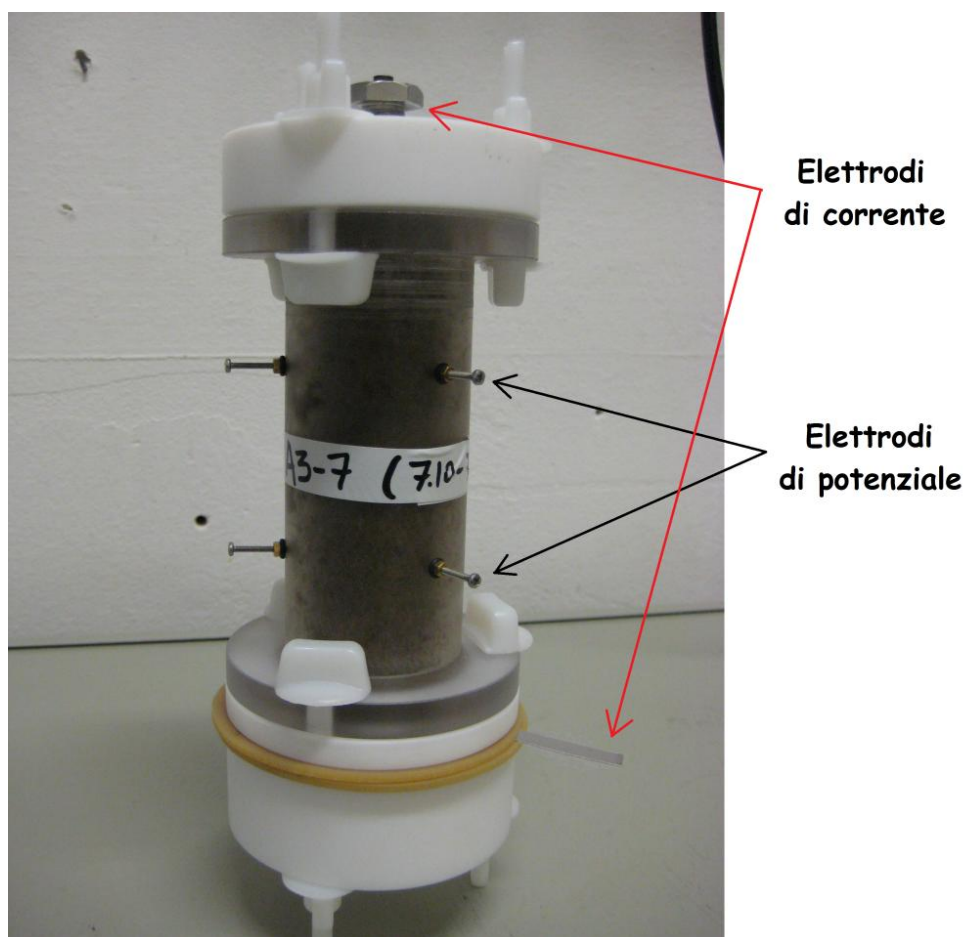


Figura 4.3 - Foto di una delle celle sulle quali sono state effettuate le misure SIP.

4.2 La strumentazione

Per effettuare le misure sulle celle è stato utilizzato lo strumento ZEL-SIP04-V02, ideato da E. Zimmermann, J. Berwix, W. Glaas, H. Meier, H.-M. Münch e A. Kemna del Centro di ricerca di Juelich (Germania). Il sistema di misura è impostato su quattro punti per ridurre l'influenza dell'impedenza elettrica. Gli elettrodi alle estremità immettono la corrente all'interno della cella, questo genera una differenza di potenziale tra gli elettrodi centrali. La corrente viene misurata in corrispondenza dello shunt resistor e l'impedenza è calcolata a partire dalla differenza di potenziale, prendendo in considerazione il valore dello shunt resistor.

Il sistema di misura consiste in (Figura 4.3):

- un generatore a controllo remoto;
- una scatola contenente 4 amplificatori e lo shunt resistor;
- una scheda ad alta precisione per la misura di fase ed ampiezza, inserita all'interno del computer dal quale parte il controllo remoto.

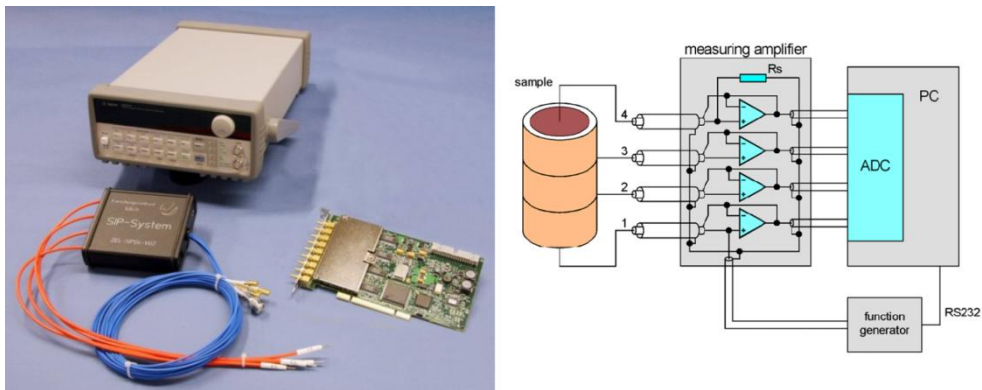


Figura 4.4 – Immagine dei componenti della strumentazione e schema di funzionamento.

Il generatore crea un segnale (di tipo sinusoidale) con determinata ampiezza e frequenza; l'intervallo di potenziale è di $\pm 10V$ e la resistenza di output corrisponde a 50Ω .

Per mantenere i campioni alla temperatura costante di 15 °C (temperatura circa corrispondente alle condizioni del suolo in campo) durante le misurazioni è stato usato un incubatore da laboratorio.

4.3 Tecniche di laboratorio e misure sui campioni

4.3.1 Preparazione delle celle e misura SIP

Da ciascun sondaggio, estratto sul sito di Trecate e suddiviso in parti secondo lo schema riportato nel Capitolo 3 della presente Tesi, sono stati prelevati dei campioni per le misure SIP con altezza pari a circa 15-18 cm. I campioni, come descritto nel Capitolo 3 sono stati individuati sulla base delle considerazioni emerse dalle misure geofisiche realizzate in campo, in modo da poter realizzare misure in laboratorio che consentissero un confronto con le misure a media scala in situ. Si è pertanto campionato nel modo più indisturbato possibile le carote inserendo il terreno all'interno di ogni cella, che in seguito è stata chiusa con i coperchi e le relative guarnizioni che garantiscono la perfetta aderenza tra i vari componenti. In seguito sono state applicate le viti laterali e quella superiore, completando l'assemblaggio delle celle nel modo più rigoroso possibile. Tutte le misure sono state realizzate nel laboratorio presente nel Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, appositamente allestito per questo genere di misure previste per il progetto EU Model Probe. Di volta in volta ciascuna cella è stata poi posizionata nell'incubatore e collegata mediante gli appositi cavi agli amplificatori (Figura 4.3). L'incubatore è stato appositamente modificato per consentire l'ingresso laterale dei cavi dell'amplificatore dall'esterno all'interno verso la cella, mediante un foro protetto da una guarnizione che non causi alterazioni alla temperatura.

4.3.2 Saturazione dei campioni

Laddove i campioni da analizzare fossero relativi ad una profondità corrispondente alla zona satura, in campo, si è proceduto alla saturazione degli stessi in laboratorio. Il sistema per la saturazione dei campioni è

costituito da un circuito composto da una campana nella quale l'acqua (con conducibilità nota) viene deareata mediante un sistema controllato da un motore esterno che genera il vuoto nella campana.

Con l'acqua così trattata i campioni vengono immersi in un contenitore e sono collegati ad un tubo per l'aspirazione dell'aria interstiziale; questa operazione consente l'aspirazione dell'acqua deareata all'interno del campione. Per evitare la perdita di materiale fine e sostanza contaminante, (presente in diversi campioni analizzati nel presente lavoro), nella parte superiore della cella è stato aggiunto un particolare tipo di carta che funge da filtro.

Prima e dopo l'operazione di saturazione, il campione viene pesato, in modo da calcolare quale possa essere la percentuale di vuoti riempiti effettivamente dall'acqua durante la saturazione. Non ultimo, è importante sempre conoscere la conducibilità dell'acqua, che nel nostro caso mostra valori entro un *range* di 540-566 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5. Analisi delle curve e discussione dei risultati

Come descritto nei Capitoli 3 e 4 della presente Tesi si riportano di seguito le analisi dei risultati delle misure SIP effettuate sui campioni di Trecate alla scala di laboratorio e il confronto dei suddetti risultati con le evidenze emerse dalle misure geofisiche alla scala di campo.

5.1 Campioni relativi al sondaggio A2

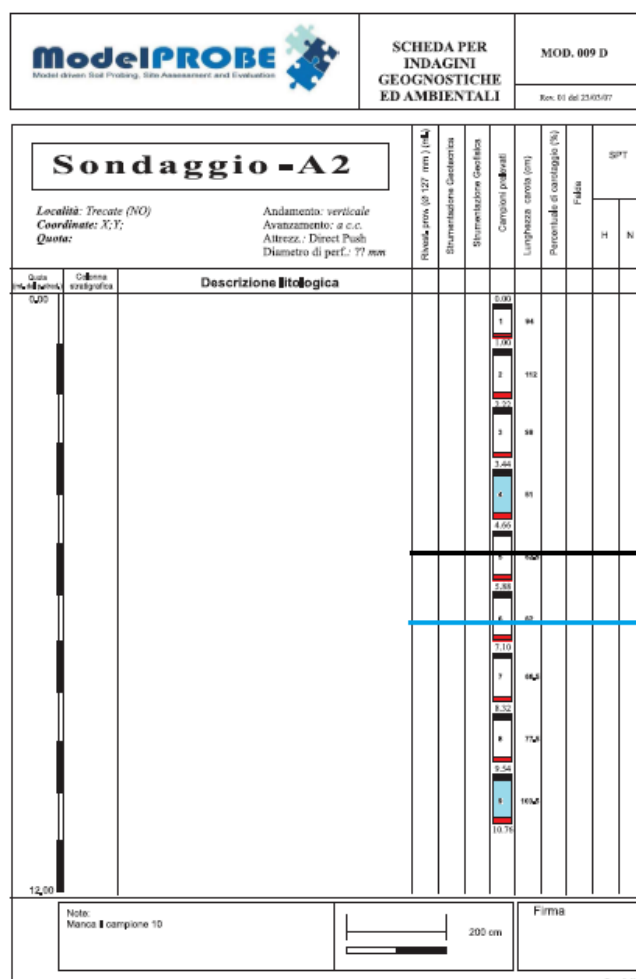


Figura 5.1 - Colonna relativa al sondaggio A2 (zona contaminata), la linea blu identifica il livello della tavola d'acqua, la linea nera la profondità alla quale si inizia a trovare la contaminazione nello specifico punto in esame (da dati Eni Fig.5.2).

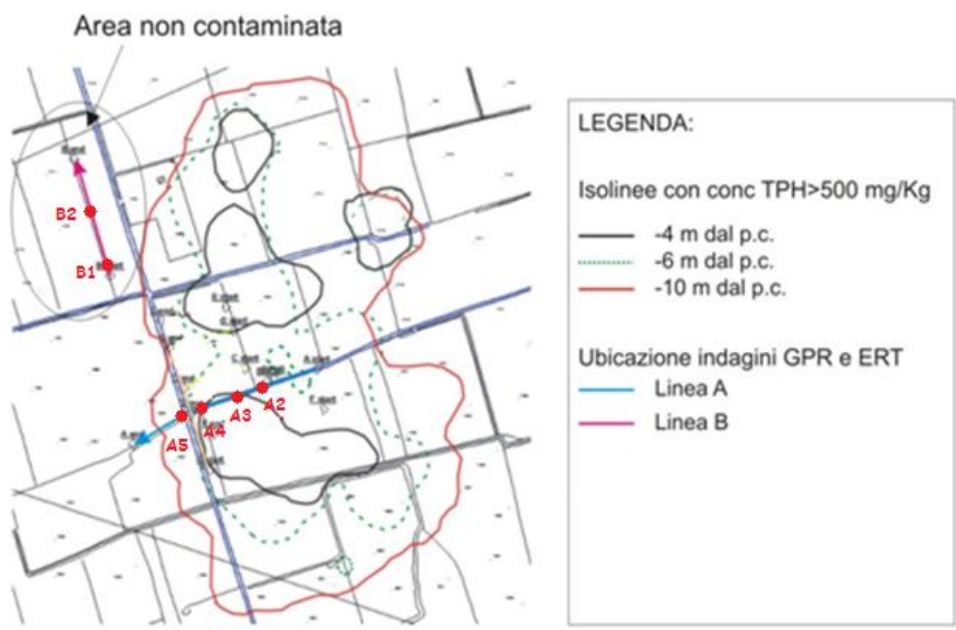


Figura 5.2 - Mappa della contaminazione (dati Eni), con posizionamento dei sondaggi sui profili A e B.

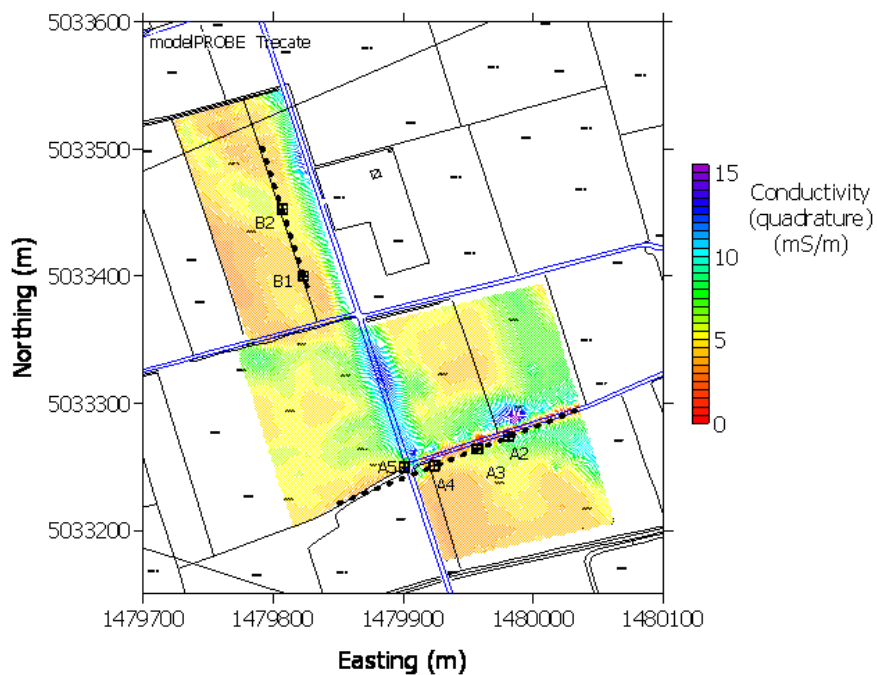


Figura 5.3 – Posizionamento dei sondaggi sulla mappa risultante dalle indagini EM (profondità circa 6 m rispetto al piano campagna).

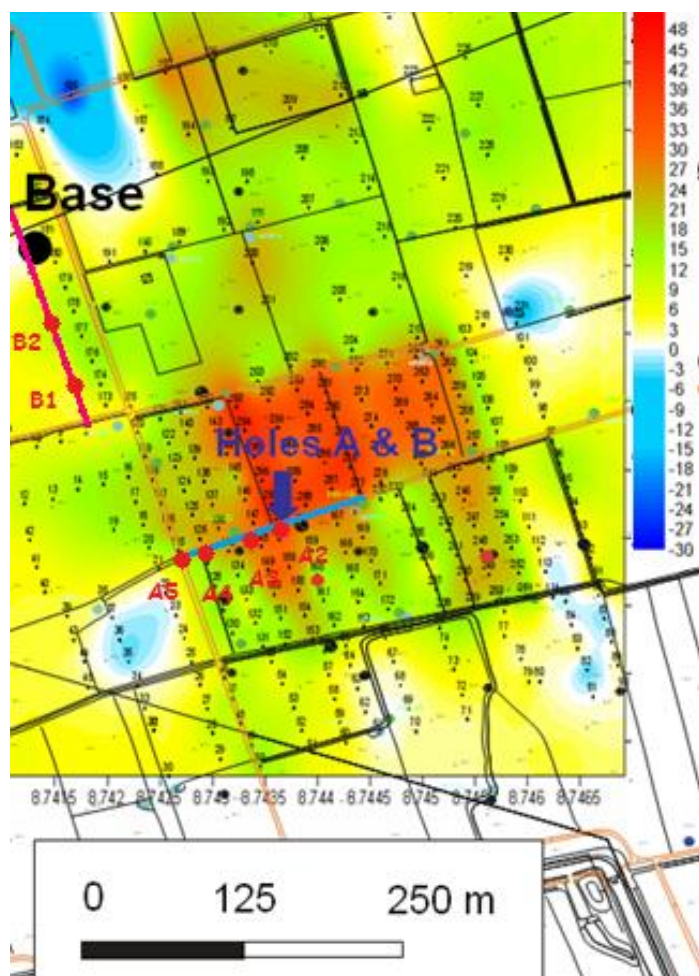


Figura 5.4 - Mappa dei risultati delle indagini SP eseguite a Marzo 2010 con posizionamento dei sondaggi sui profili A e B.

In laboratorio sono state eseguite misure SIP sui campioni A2-4 e A2-9, rispettivamente prelevati ad una profondità di 4 m e 10 m dal sondaggio A2 secondo quanto evidenziato (in celeste) in Figura 5.1. Lungo il sondaggio A2 la contaminazione (dai dati Eni) viene riscontrata a circa 4 m di profondità (Fig. 5.1), evidenza riscontrata anche macroscopicamente, in quanto il campione A2-4 non è contaminato, mentre il campione A2-9 risulta fortemente contaminato. Il primo campione è relativo alla zona non satura, il secondo è corrispondente alla zona satura. Dalle misure EM ed SP (rispettivamente Fig. 5.3 e 5.4), misure qualitative svolte alla scala di campo, si può notare che questo sondaggio ricade in una zona più conduttiva rispetto al segnale mediamente presente nell'area investigata e

con segnale di potenziale spontaneo positivo elevato sulla base dei valori misurati in campo.

Si noti che il livello piezometrico è a circa 6,5 m di profondità dal piano di campagna.

Facendo riferimento alle misure SIP eseguite alla scala di laboratorio, prima di qualsiasi confronto con le corrispondenti misure effettuate alla scala di campo, bisogna evidenziare che la formula che lega le resistenze, ottenute in laboratorio, alla resistività del materiale è: $\rho = (3R \times A)/L$, dove ρ è la resistività, R la resistenza, A ed L rispettivamente l'area della sezione e l'altezza della cella di misura. È quindi possibile ottenere i valori di resistività per i campioni di terreno e confrontarli con i valori riscontrati, nelle posizioni ed alle corrispondenti profondità dei sondaggi in esame sulle sezioni ERT e IP acquisite in campo (Fig. 5.5). Per confronto si riporta anche la sezione GPR (Fig. 5.6) acquisita sullo stesso profilo.

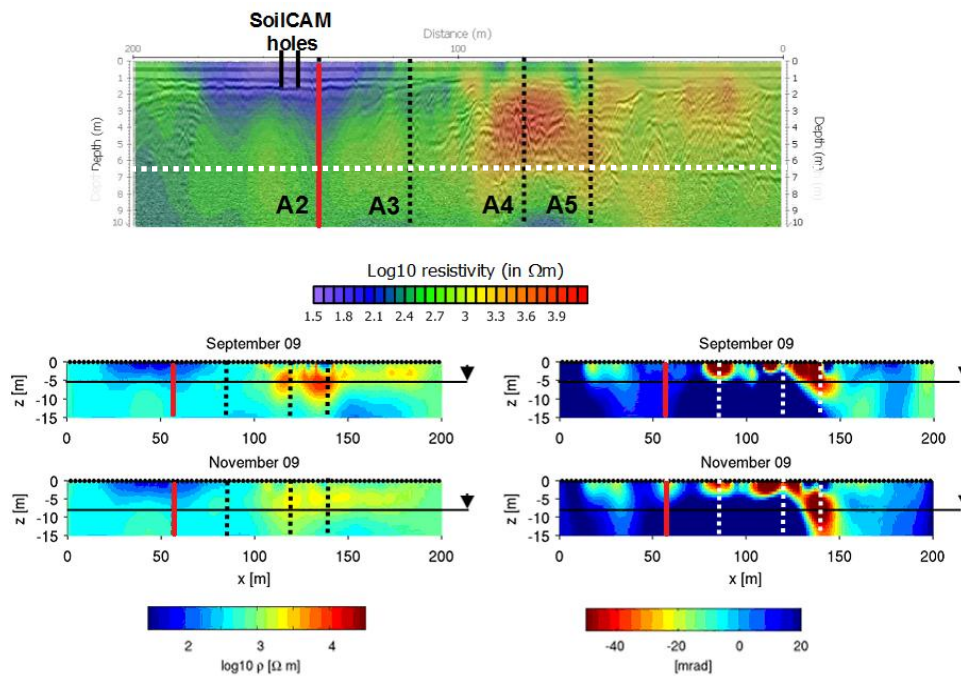


Figura 5.5 - Sezioni ERT lungo la linea A (zona contaminata) in alto e in basso a sinistra, in basso a destra misura della fase IP. In rosso è evidenziato il sondaggio A2.

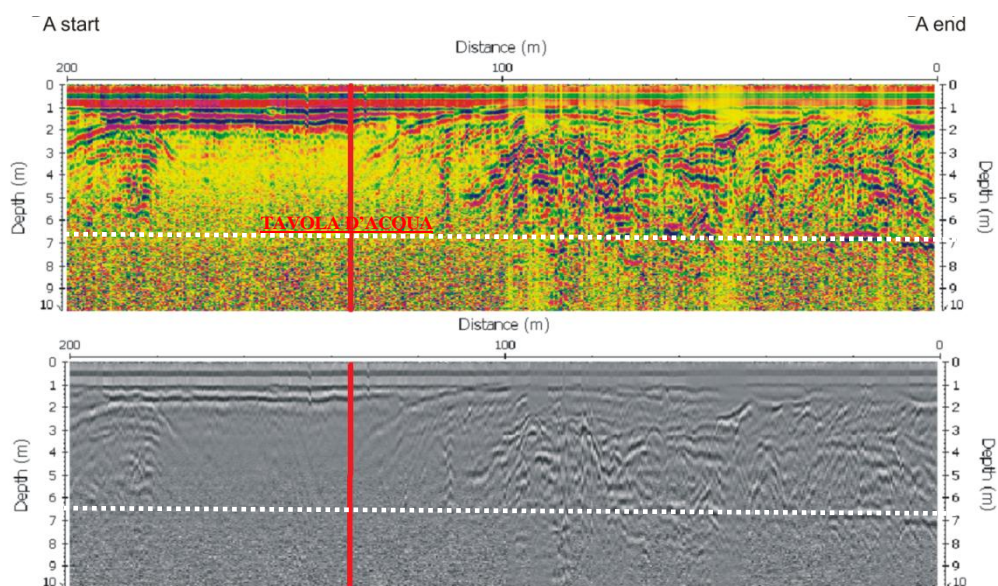


Figura 5.6 - Sezione GPR acquisita con antenna da 100 MHz (differente scala cromatica) relativa alla zona contaminata A, evidenziata in rosso la posizione del sondaggio A2.

Confronto sezioni ERT- dati di ampiezza SIP:

Nome campione	Resistenza da SIP (Ohm)	Resistività da SIP (Ohm*m)	Log della resistività da SIP (log10 Ohm*m)
A2-4	43928,3413	1159,7082	3,06434873
A2-9	25776,2045	680,4918	2,8328229

Dalle sezioni ERT e IP (Fig. 5.5 in alto e in basso a sinistra) acquisite in campo si può estrapolare che il campione A2-4, prelevato dalla zona non satura, si trova in una zona con bassa resistività con valori compresi tra log10 di Rho pari a 1.5- 2.4. Dalle misure SIP di laboratorio otteniamo un valore di log10 di Rho pari a 3, leggermente più alto di quello misurato in campo. Tenuto conto delle diverse condizioni di misura (campione sicuramente disturbato e con condizioni differenti rispetto a quelle naturali in situ) e della differente risoluzione delle misure di campo rispetto a quelle di laboratorio, si può dire che esiste una buona rispondenza tra i valori

misurati alle due scale. La presenza di un'area con bassa resistività piuttosto superficiale in corrispondenza della zona attorno alla colonna d'interesse è inoltre confermata anche dalla sezione ottenuta con il metodo GPR (Fig. 5.6) dove, in corrispondenza della suddetta zona, si registra un netto assorbimento del segnale.

Per quanto riguarda il campione A2-9, prelevato dalla zona satura, analizzando le sezioni ERT e IP di Figura 5.5 risultano valori di log10 di Rho attorno a 2.5 - 3, per le profondità riferibili a quelle del campione in esame. Dalle misure SIP in laboratorio abbiamo ottenuto valori log10 di Rho pari a 2,8, in condizioni non sature, pertanto si può affermare che il valore misurato è assolutamente coerente con quelli misurati in campo.

Confronto sezioni IP- dati di fase SIP:

Nome campione	Valore fase (rad) da SIP	Valore (mrad) da SIP
A2-4	-0.005224	-5,224
A2-9	-0.000800	-0,800

Dai valori misurati in laboratorio si vede come il valore di fase per il campione a profondità maggiore (A2-9) sia praticamente nullo e come quello del campione più superficiale (A2-4) si attesti attorno ai -5 mrad; entrambi i dati sono pienamente rispondenti ai valori di campo come riportato nelle immagini di Figura 5.5 in basso a sinistra (Novembre 2009).

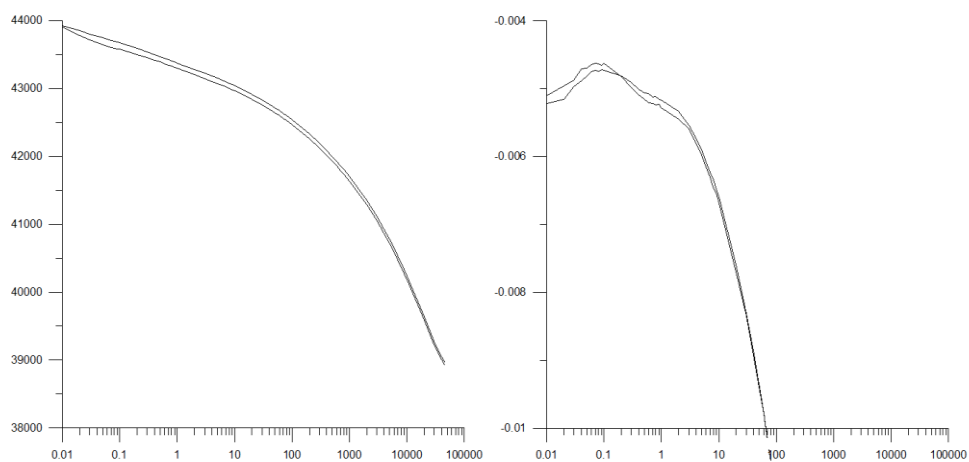


Figura 5.7 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) relativi al campione A2-4.

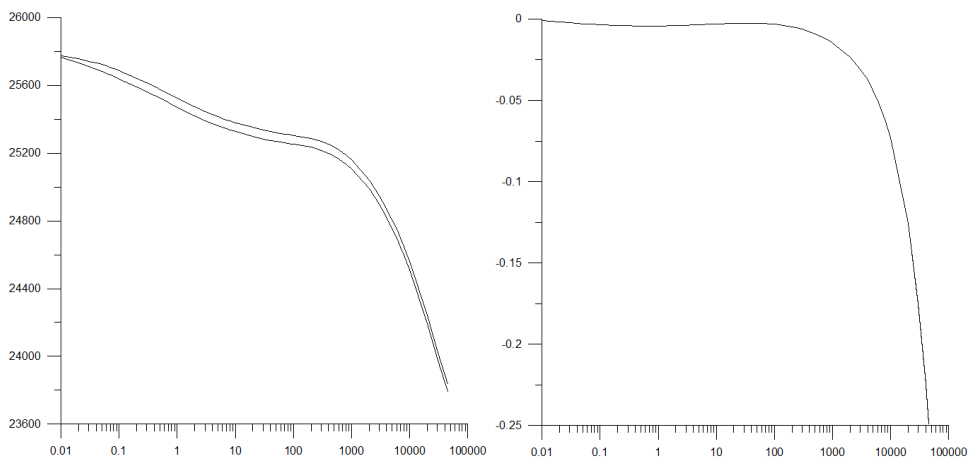


Figura 5.8 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A2-9.

5.2 Campioni relativi al sondaggio A3

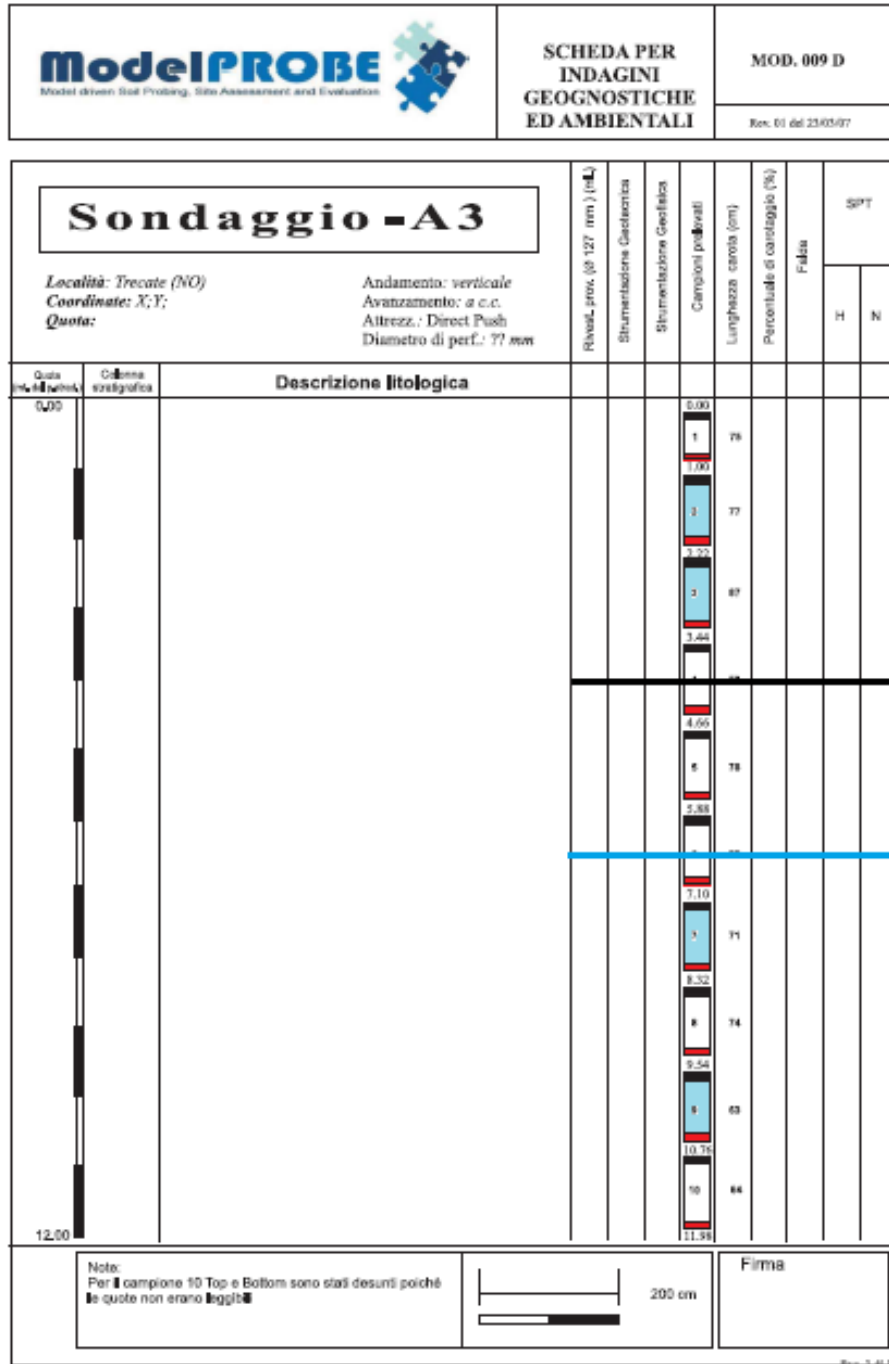


Figura 5.9 - Colonna relativa al sondaggio A3 (zona contaminata), la linea blu identifica il livello della tavola d'acqua, la linea nera la profondità alla quale si inizia a trovare la contaminazione nello specifico punto in esame (da dati Eni Fig.5.2).

Relativamente al sondaggio A3 sono state effettuate misure SIP in laboratorio sui campioni A3-2, A3-3, A3-7 e A3-9, rispettivamente corrispondenti alle profondità di campo di: 1,6 m, 3 m, 7,5 m, 10 m (Figura 5.9). Dall'analisi della mappa dei dati di contaminazione (Fig. 5.2) lungo il sondaggio A3 non viene riscontrata contaminazione fino ai 4 m di profondità, pertanto possiamo dire che i primi due campioni (A3-2 e A3-3) risultano non contaminati, mentre lo sono i restanti campioni (A3-7 e A3-9), evidenza riscontrata anche visivamente. È da notare che i campioni contaminati si trovavano nella zona satura, a differenza degli altri due più superficiali che si trovano nel non saturo. Dalle mappe delle misure EM e SP (rispettivamente Fig. 5.3 - 5.4) si nota come questo sondaggio sia stato effettuato in una zona con conducibilità media e valori di potenziale spontaneo alti.

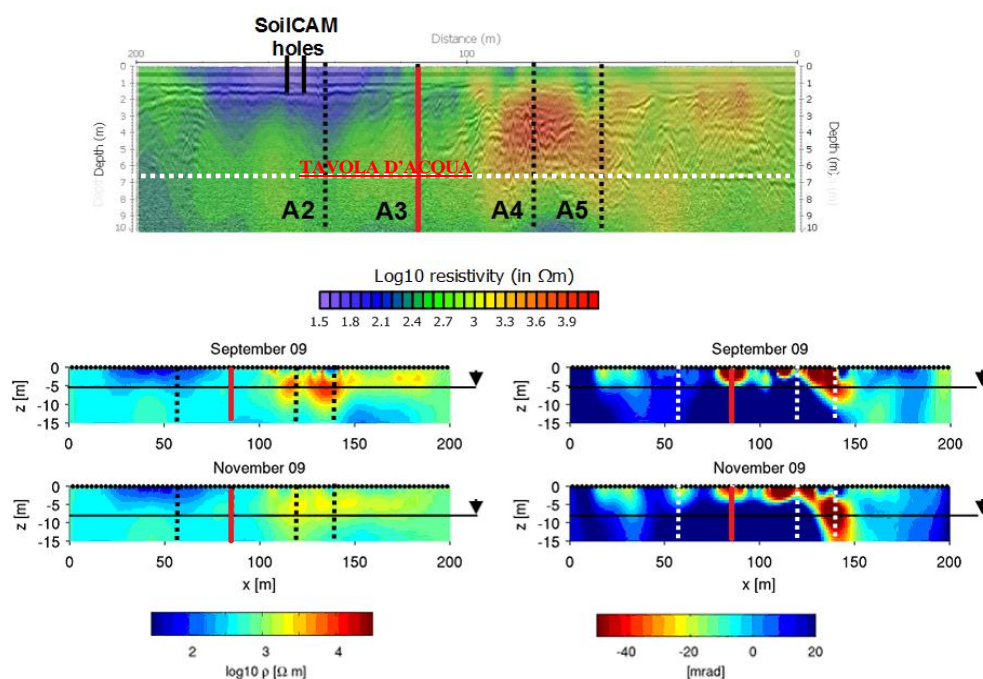


Figura 5.10 - Sezioni ERT lungo la linea A (zona contaminata) in alto e in basso a sinistra, in basso a destra misura della fase IP. In rosso è evidenziato il sondaggio A3.

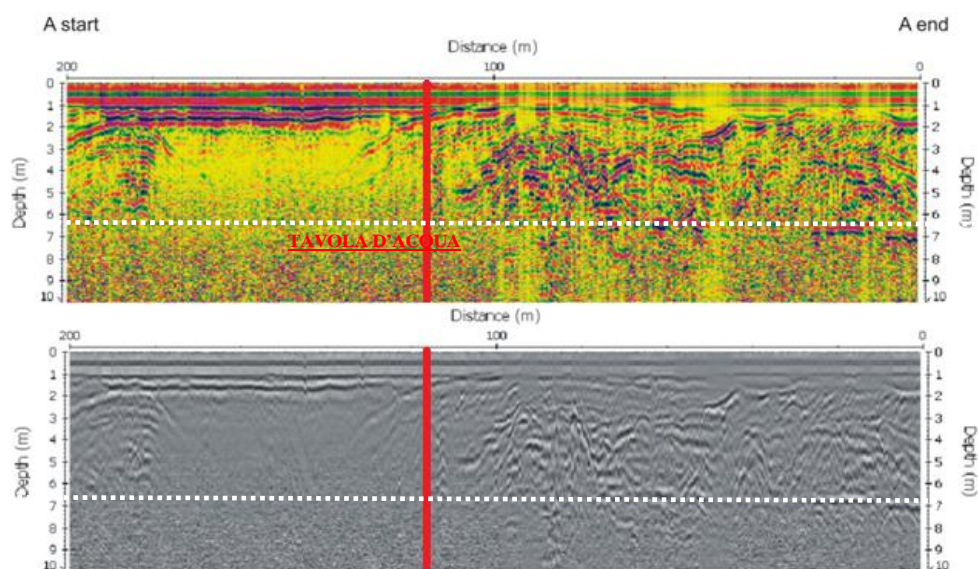


Figura 5.11 - Sezione GPR acquisita con antenna da 100 MHz (differente scala cromatica) relativa alla zona contaminata A, evidenziata in rosso la posizione del sondaggio.

Confronto dati ampiezza SIP - sezioni ERT:

Nome campione	Resistenza SIP (Ohm)	Resistività SIP (Ohm*m)	Log della resistività SIP (log10 Ohm*m)
A3-2	50864,7124	1342,8284	3,12802052
A3-3	18368,3967	484,9257	2,68567518
A3-7	38486,1557	1016,0345	3,00690846
A3-9	9315,6542	245,9333	2,39081729

Per tutti i campioni del sondaggio A3 esaminati si hanno valori del logaritmo di resistività in base 10 compresi tra 2.4 e 3.2, dato che viene confermato dai valori leggibili in corrispondenza del sondaggio A3 sulle sezioni ERT (Fig. 5.10). Analizzando più in dettaglio i singoli campioni si nota che l'andamento delle curve di ampiezza e fase per i campioni A3-2 e A3-3, entrambi estratti dal livello insaturo (riportate rispettivamente in Figura 5.12 e 5.13), sembra essere del tutto paragonabile. Analogamente per i campioni A3-7 e A3-9 (entrambi estratti sotto falda).

Confronto dati fase SIP - sezioni IP:

Nome campione	Valore fase (rad) SIP	Valore fase (mrad) SIP
A3-2	-0.001214	-1.214
A3-3	-0.002899	-2.899
A3-7	-0.007475	-7.475
A3-9	-0.005757	-5.757

Dall'analisi dei dati emerge indubbiamente un aumento dei valori negativi della fase man mano che si sale verso la superficie.

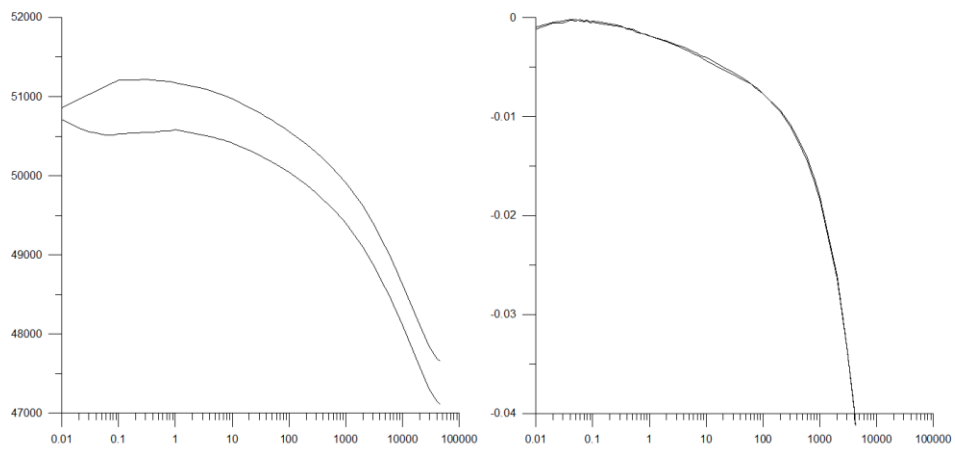


Figura 5.12 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A3-2.

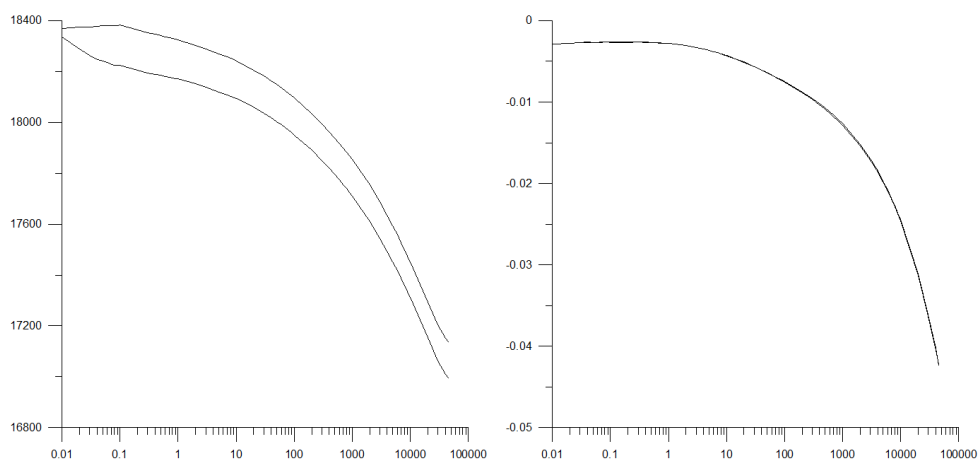


Figura 5.13 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A3-3.

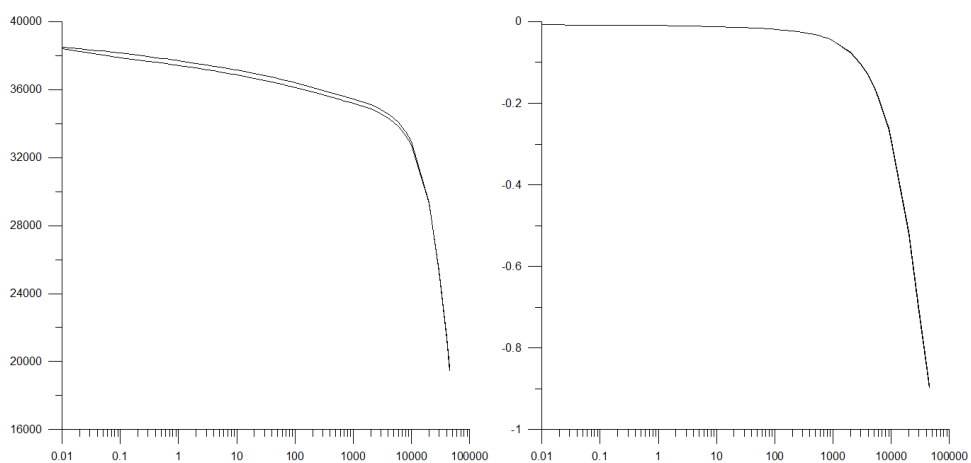


Figura 5.14 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A3-7.

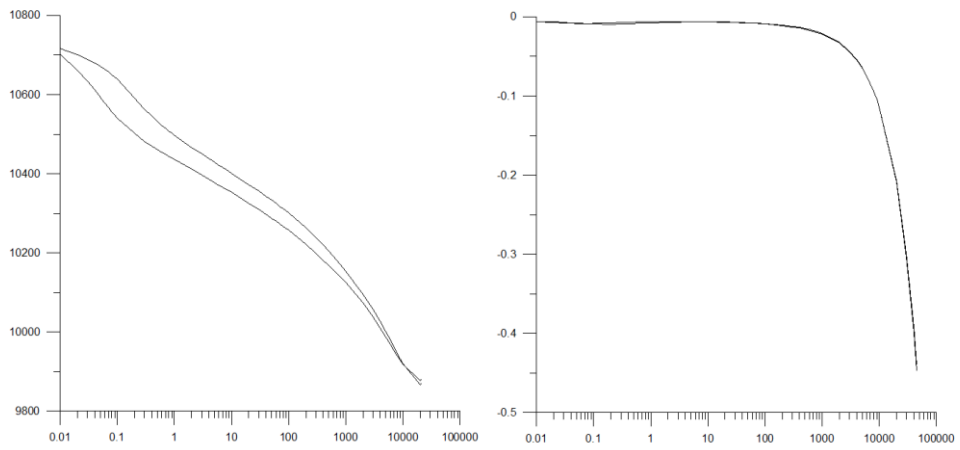


Figura 5.15 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A3-9.

5.3 Campioni relativi al sondaggio A4

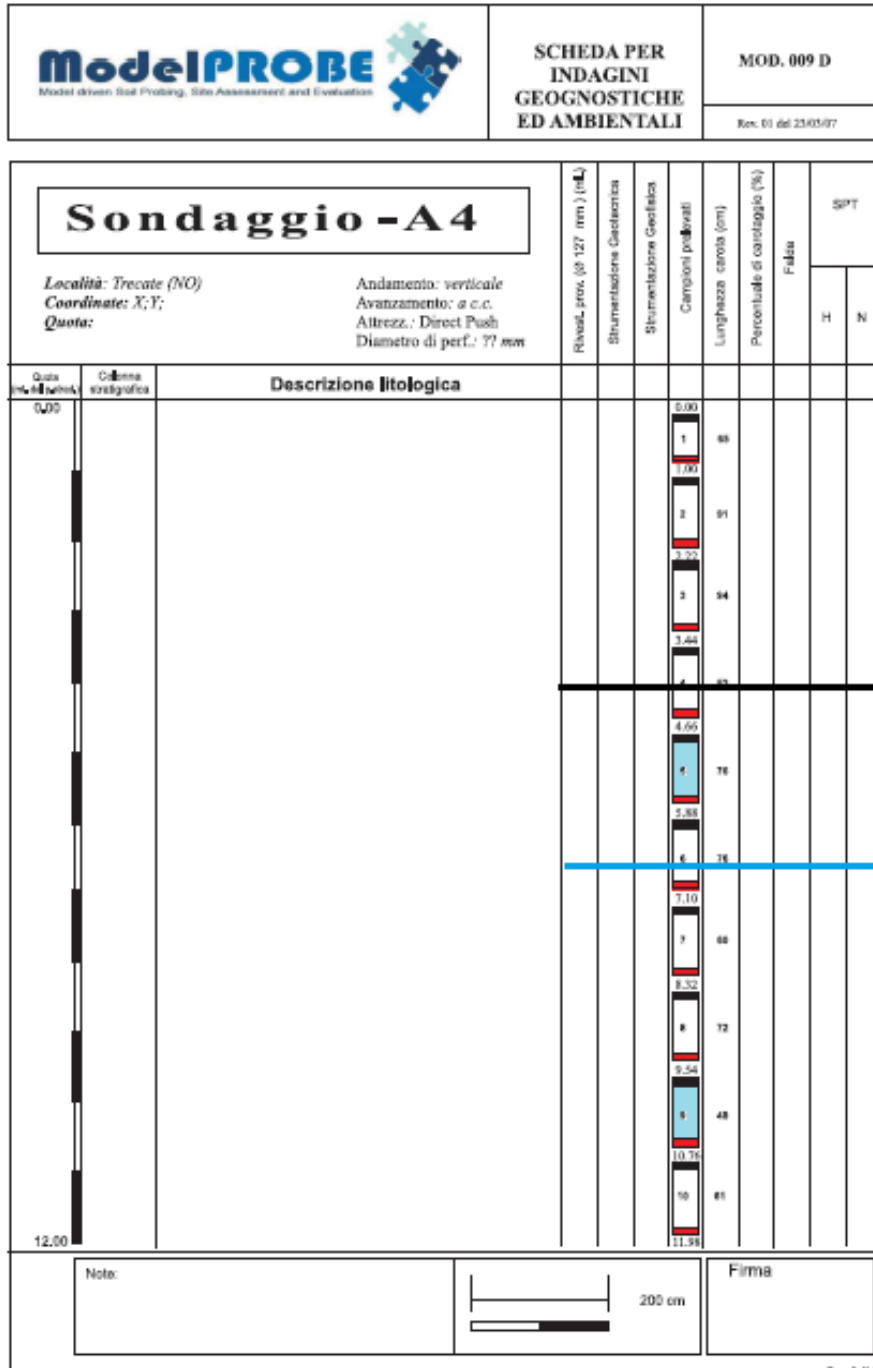


Figura 5.16 - Colonna relativa al sondaggio A4 (zona contaminata), la linea blu identifica il livello della tavola d'acqua, la linea nera la profondità alla quale si inizia a trovare la contaminazione nello specifico punto in esame (da dati Eni Fig.5.2).

Per quanto riguarda il sondaggio A4 sono state eseguite misure SIP in laboratorio sui campioni A4-5 e A4-9, prelevati rispettivamente a profondità di 5 m e 10 m. La contaminazione in questa colonna inizia ad una profondità di 4 m, per cui possiamo dire che entrambi i campioni risultano contaminati. Il primo campione è relativo alla zona insatura, mentre il secondo alla zona satura. Dalle misure EM e SP (Fig. 5.3 e 5.4) si può notare come questo sondaggio ricada in una zona meno conduttiva e con valori di potenziale spontaneo più bassi rispetto a quelli rilevati sui sondaggi precedentemente descritti.

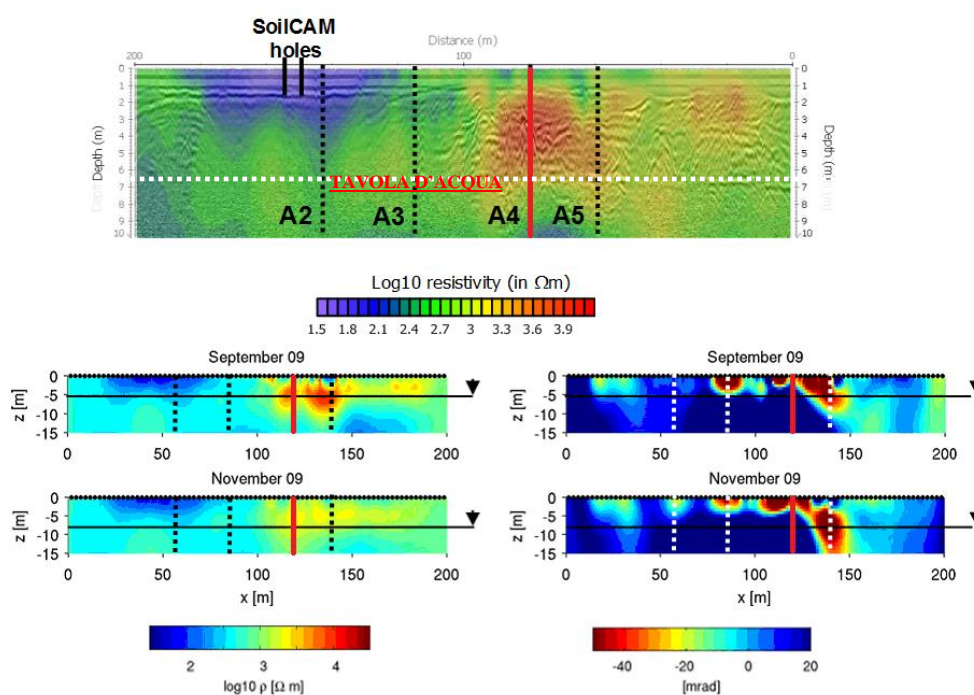


Figura 5.17 - Sezioni ERT lungo la linea A (zona contaminata) in alto e in basso a sinistra, in basso a destra misura della fase IP. In rosso è evidenziato il sondaggio A4.

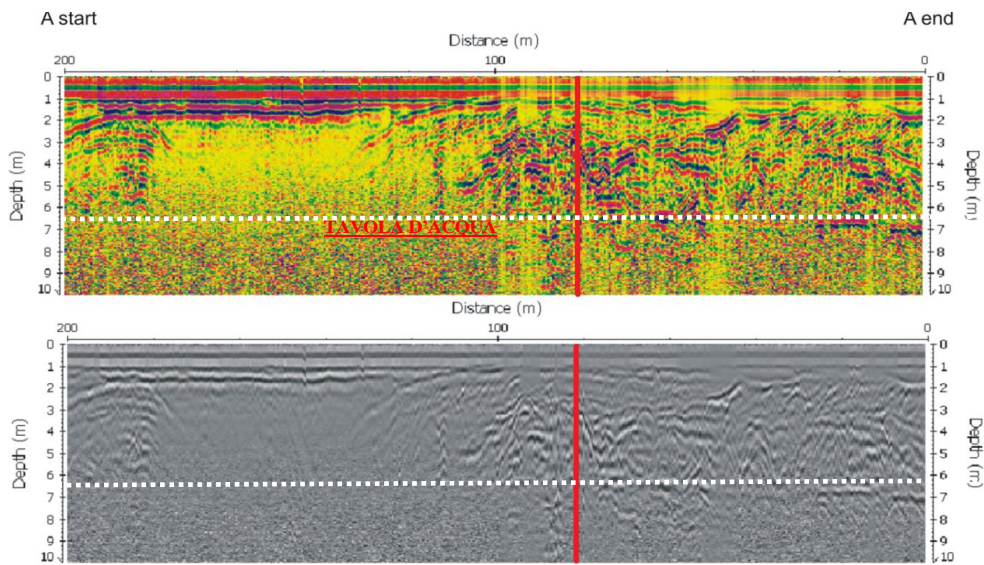


Figura 5.18 - Sezione GPR acquisita con antenna da 100 MHz (differente scala cromatica) relativa alla zona contaminata A, evidenziata in rosso la posizione del sondaggio.

Confronto sezioni ERT- dati di ampiezza SIP:

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
A4-5	106996,3178	2824,7028	3,45097276
A4-9	8460,0372	223,3450	2,3489762

Dalle sezioni di resistività (Fig. 5.17) si vede come il campione A4-5 dia una risposta molto resistiva rispetto ai campioni sinora descritti, cosa confermata dai dati di laboratorio riportati nella tabella sopra. Anche per quanto riguarda il campione A4-9 i dati di laboratorio avvalorano le misure di campagna. Il secondo campione presenta una risposta più conduttiva rispetto al primo, in quanto relativo alla zona satura.

Confronto sezioni IP- dati di fase SIP:

Nome campione	Valore fase (rad)	Valore (mrad)
A4-5	-0.007184	-7.184
A4-9	-0.001695	-1.695

Le sezioni IP riportano dei valori nulli per entrambi i campioni, tuttavia si vede che dal settembre al novembre 2009 le zone con valori più negativi si sono estese e approfondite per cui è probabile che arrivati a marzo 2010 (momento in cui sono stati fatti i sondaggi) i valori di fase siano diminuiti.

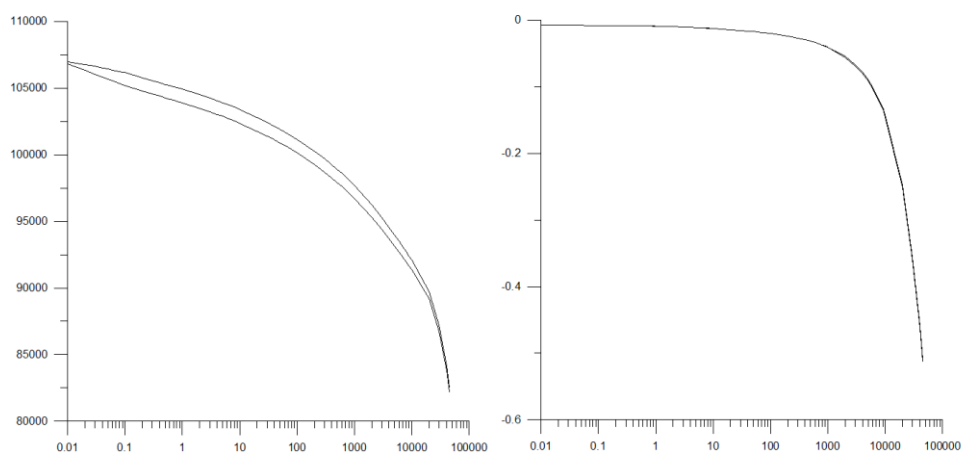


Figura 5.19 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A4-5.

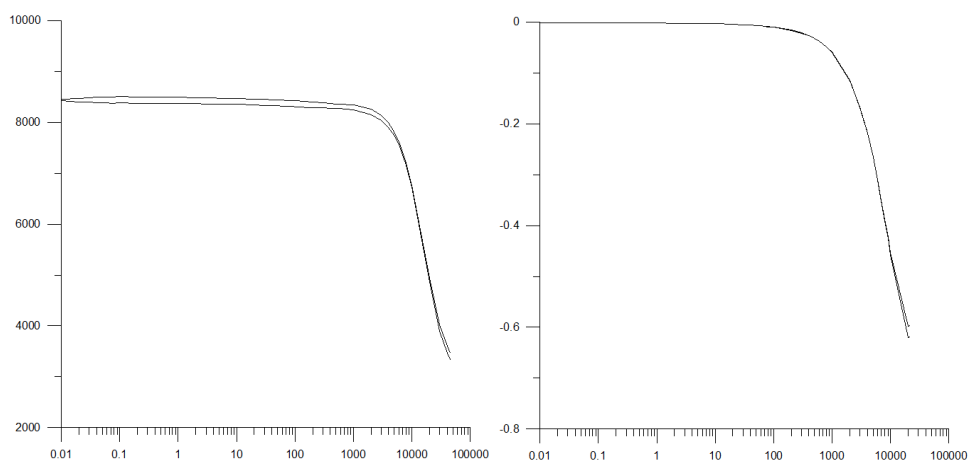


Figura 5.20 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A4-9.

5.4 Campioni relativi al sondaggio A5

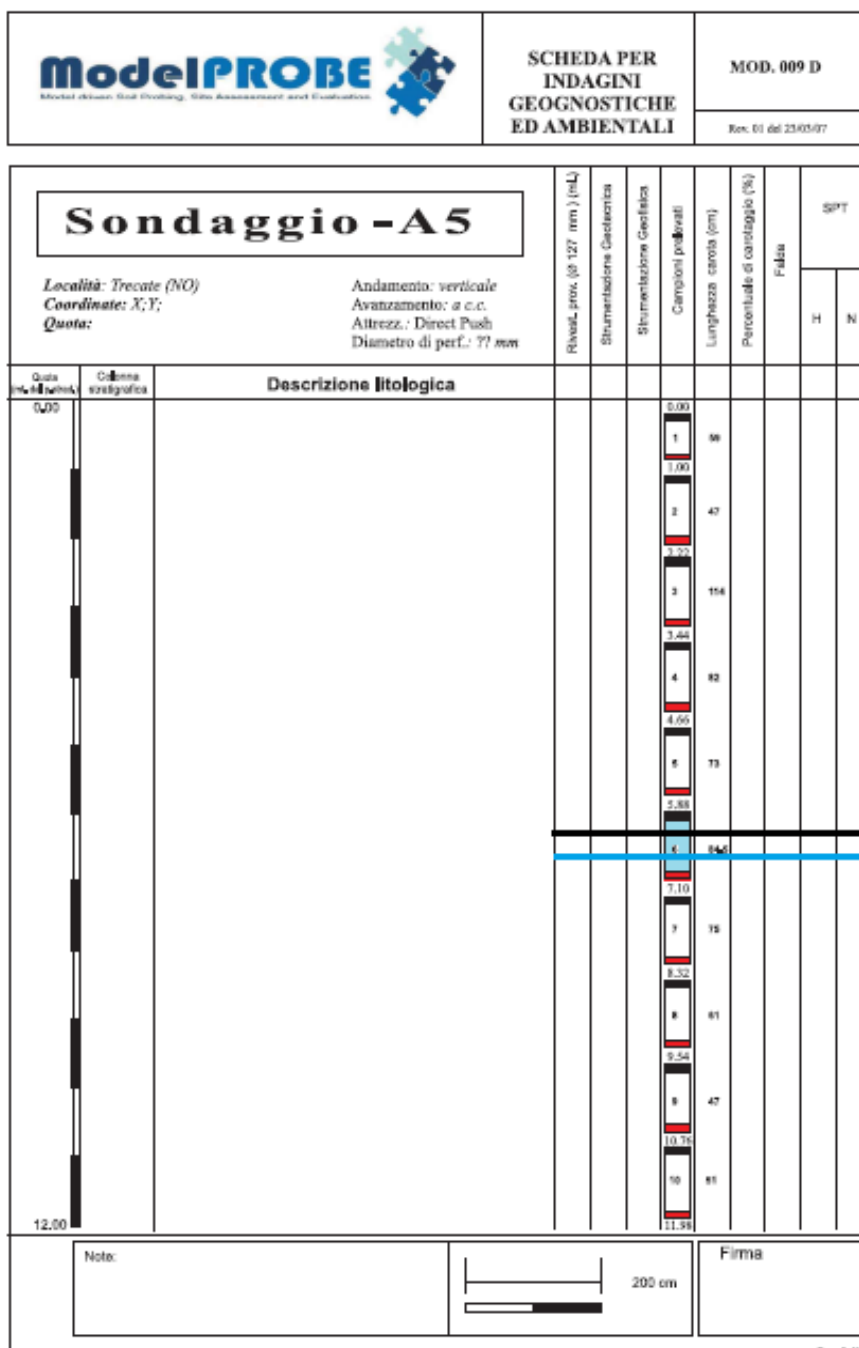


Figura 5.21 - Colonna relativa al sondaggio A5 (zona contaminata), la linea blu identifica il livello della tavola d'acqua, la linea nera la profondità alla quale si inizia a trovare la contaminazione nello specifico punto in esame (da dati Eni Fig.5.2)

In laboratorio sono state fatte misure SIP sul campione A5-6 che in campo si trovava a circa 6,5 m di profondità, quindi in zona contaminata (la contaminazione in questa colonna inizia circa 6 m di profondità dal piano di campagna) e in parte in falda. Dalle misure EM e SP (Fig. 5.3 - 5.4) si può notare come la conducibilità sia diminuita rispetto ai sondaggi precedentemente descritti e i valori di potenziale spontaneo siano quasi nulli.

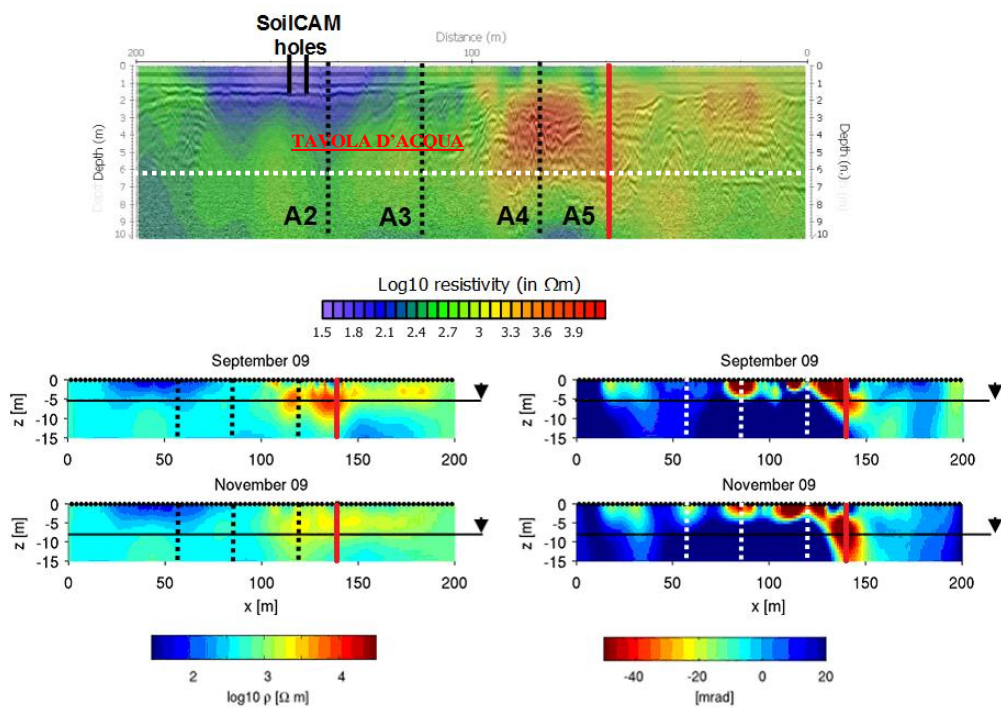


Figura 5.22 - Sezioni ERT lungo la linea A (zona contaminata) in alto e in basso a sinistra, in basso a destra misura della fase IP. In rosso è evidenziato il sondaggio A5

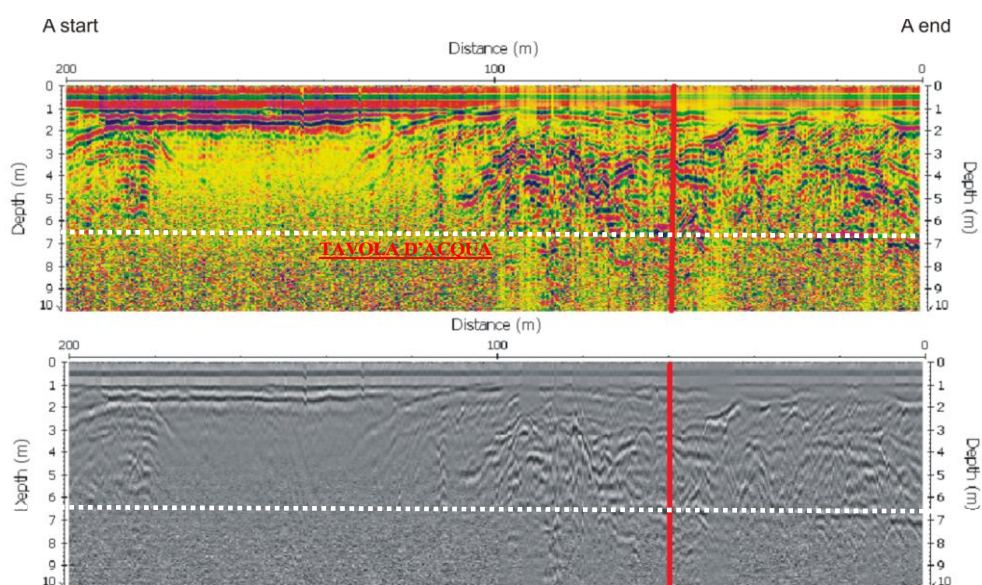


Figura 5.23 - Sezione GPR acquisita con antenna da 100 MHz (differente scala cromatica) relativa alla zona contaminata A, evidenziata in rosso la posizione del sondaggio.

Confronto sezioni ERT- dati di ampiezza SIP:

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
A5-6	202929,1029	5357,3283	3,72894826

Dalla sezione di Figura 5.22 i dati di campo confermano le prove di laboratorio.

Confronto sezioni IP- dati di fase SIP:

Nome campione	Valore fase (rad)	Valore (mrad)
A5-6	-0.001124	-1.124

Dalle sezioni IP (Fig. 5.22) i valori della fase ricadrebbero in un campo di valori molto più basso rispetto a quello riscontrato in laboratorio.

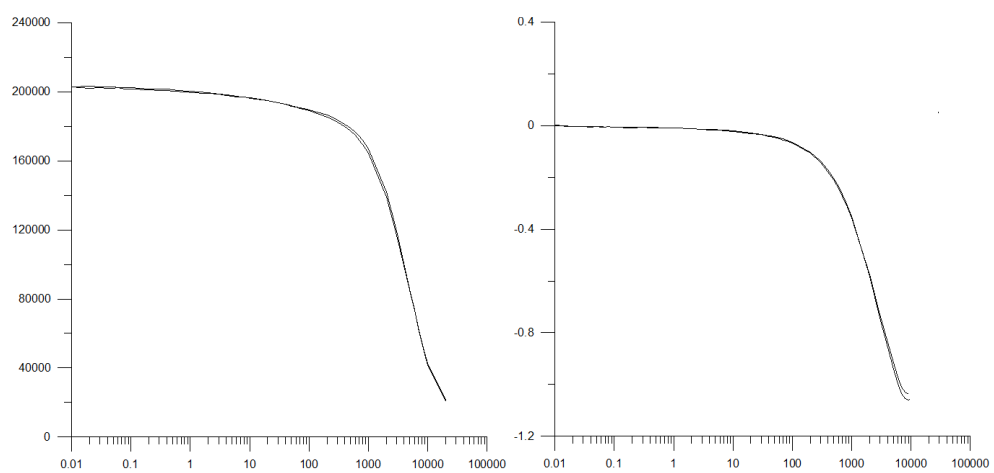


Figura 5.23 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione A5-6.

5.5 Campioni relativi al sondaggio B1

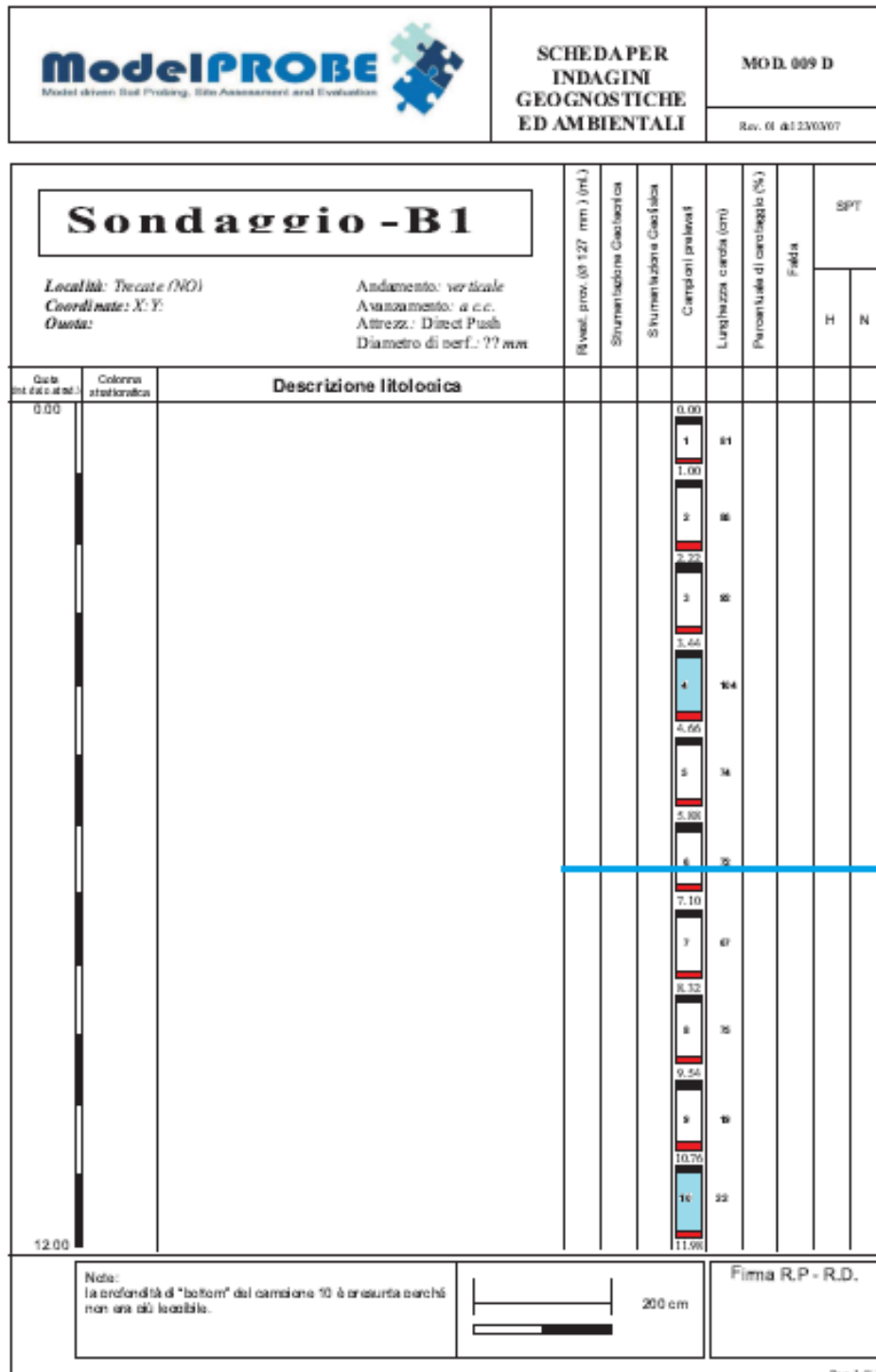


Figura 5.24 - Colonna relativa al sondaggio B1 (zona non contaminata), la linea blu identifica il livello della tavola d'acqua.

In laboratorio sono state effettuate le misure sui campioni B1-4 e B1-10, relativi rispettivamente a 4 m e 11 m di profondità, uno in zona satura e uno in quella non satura, l'intero sondaggio proviene dalla zona non soggetta a contaminazione (Fig. 5.2). Dalle misure EM e SP (Fig. 5.3 – 5.4) si può vedere come questo sondaggio ricada in una zona con conducibilità bassa, e con valori molto bassi di potenziale spontaneo.

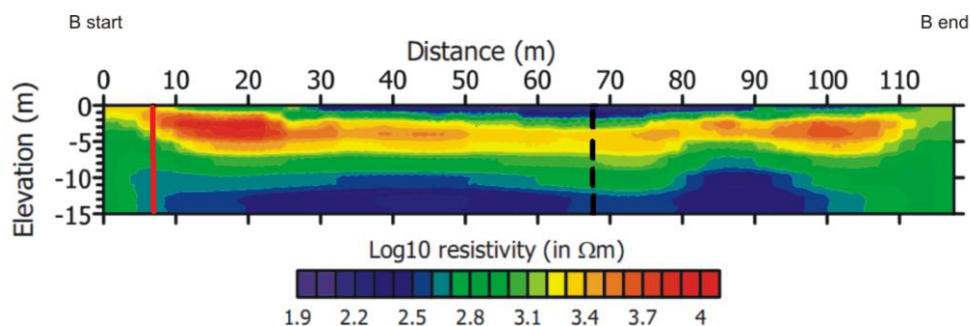


Figura 5.25 - Sezione ERT lungo la linea B (zona non contaminata). In rosso è evidenziato il sondaggio B1.

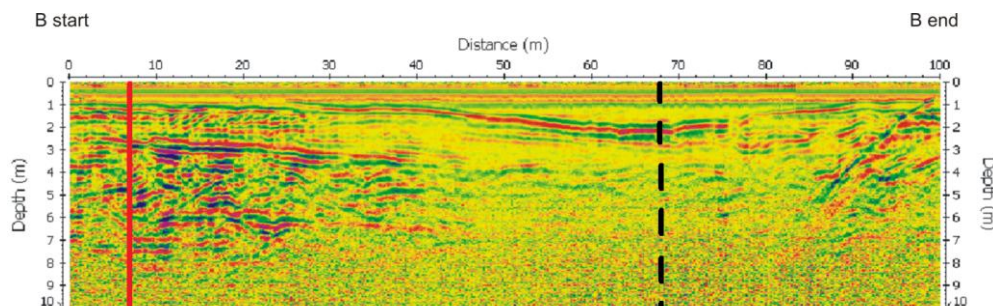


Figura 5.26 - Sezione GPR acquisita con antenna da 100 MHz relativa alla zona non contaminata B, evidenziata in rosso la posizione del sondaggio.

Confronto sezioni ERT- dati di ampiezza SIP:

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
B1-4	395135,1555	10431,5681	4,0183496
B1-10	30585,0755	807,4460	2,90711348

Dalla sezione di resistività si nota che i valori di campo per il campione B1-4 sono più bassi di quelli ottenuti in laboratorio, mentre per il campione B1-10 la resistività leggermente più alta.

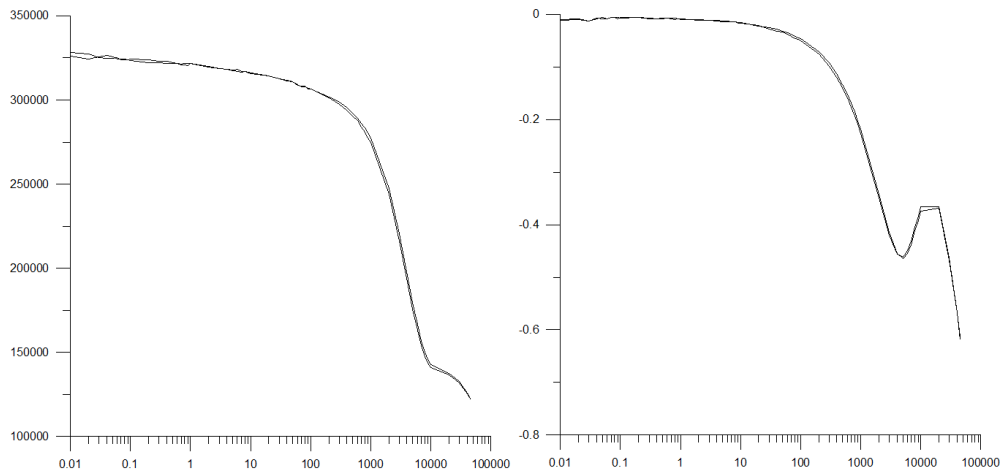


Figura 5.27 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione B1-4.

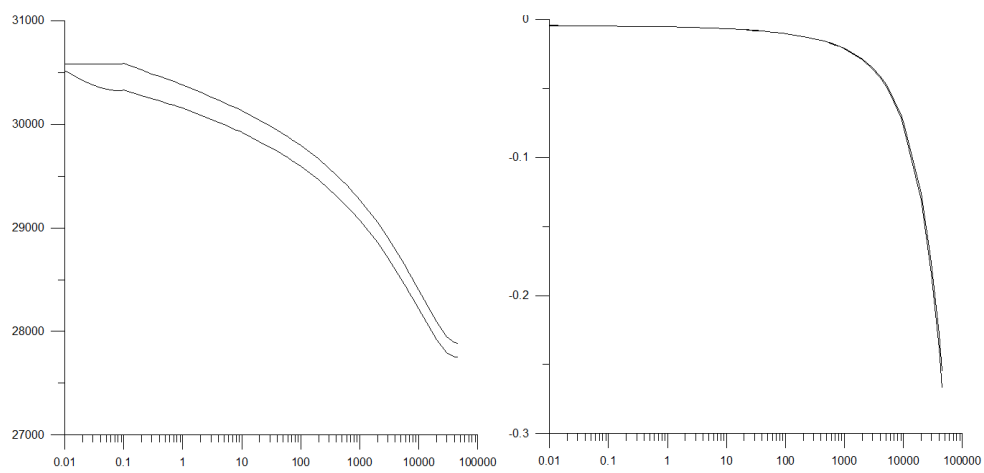


Figura 5.28 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione B1-10.

5.6 Campioni relativi al sondaggio B2

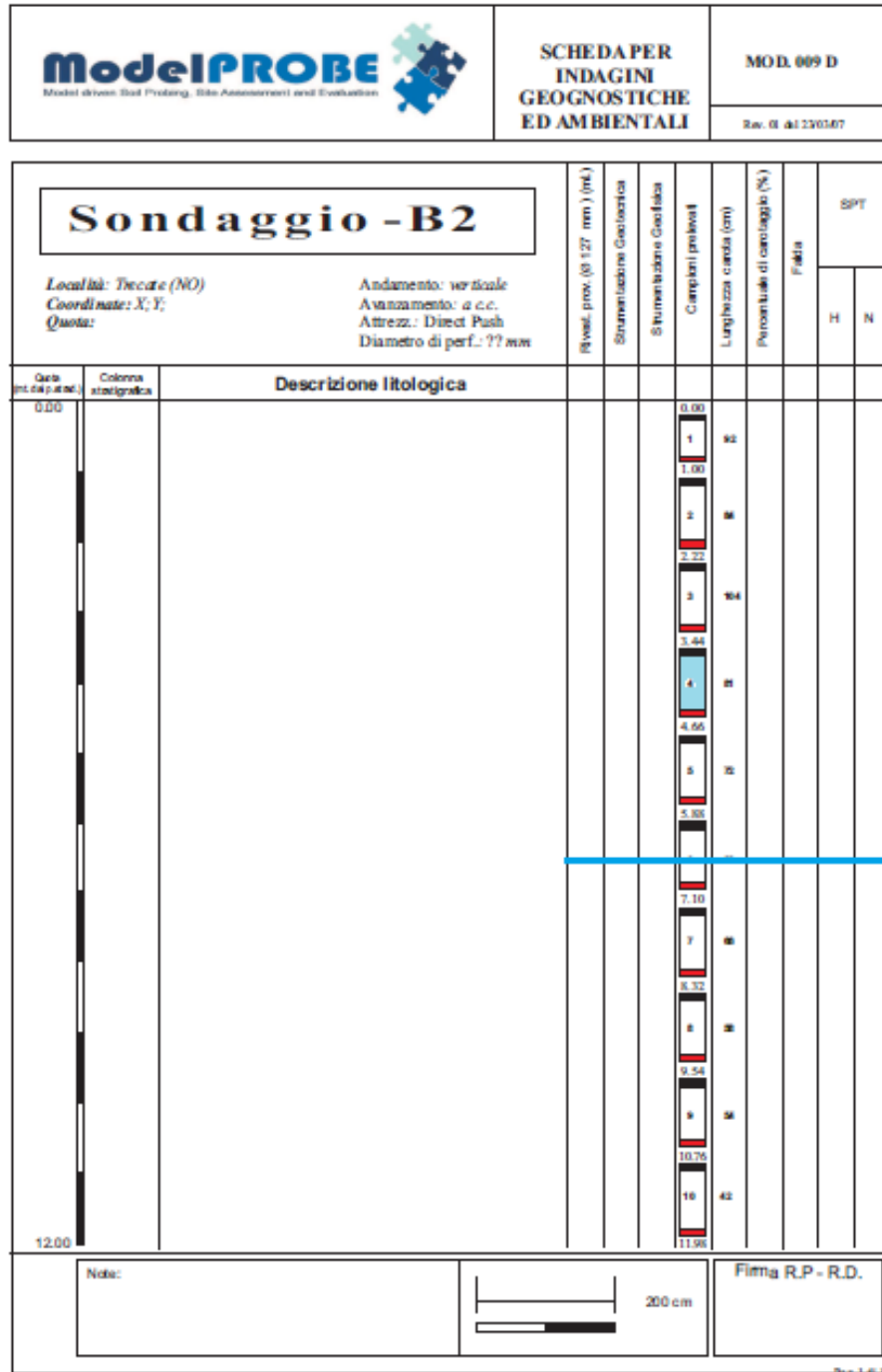


Figura 5.29 - Colonna relativa al sondaggio B2 (zona non contaminata), la linea blu identifica il livello della tavola d'acqua.

In laboratorio sono state effettuate le misure sul campione B2-4 che, in sito, era posto a 4 m di profondità, in zona non contaminata e sopra il livello piezometrico. Dalle misure EM e SP (Fig. 5.3- 5.4) si può vedere come questo sondaggio sia stato effettuato in una zona con conducibilità medio-bassa e con valori di potenziale spontaneo bassi.

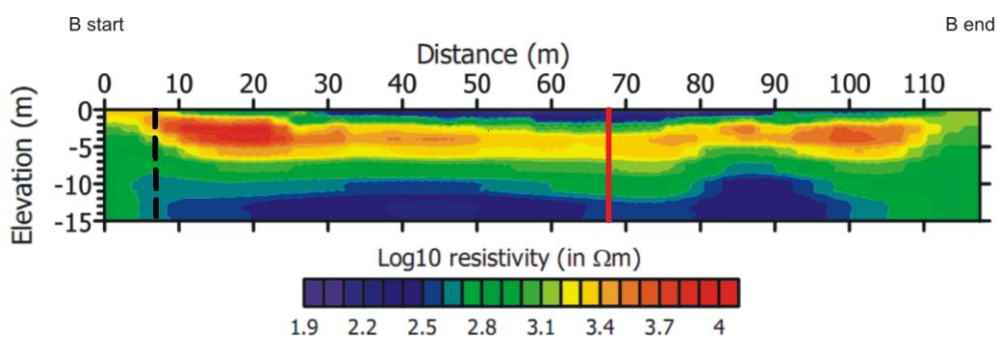


Figura 5.30 - Sezione ERT lungo la linea B (zona non contaminata). In rosso è evidenziato il sondaggio B2.

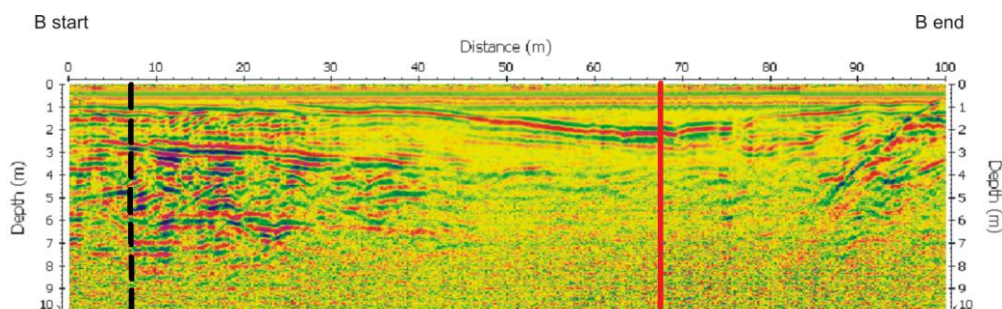


Figura 5.31 - Sezione GPR acquisita con antenna da 100 MHz relativa alla zona non contaminata B, evidenziata in rosso la posizione del sondaggio.

Confronto sezioni ERT- dati di ampiezza SIP:

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
B2-4	29719,9114	784,6057	2,89465144

I valori di campo sono assolutamente molto prossimi a quelli riscontrati in campo.

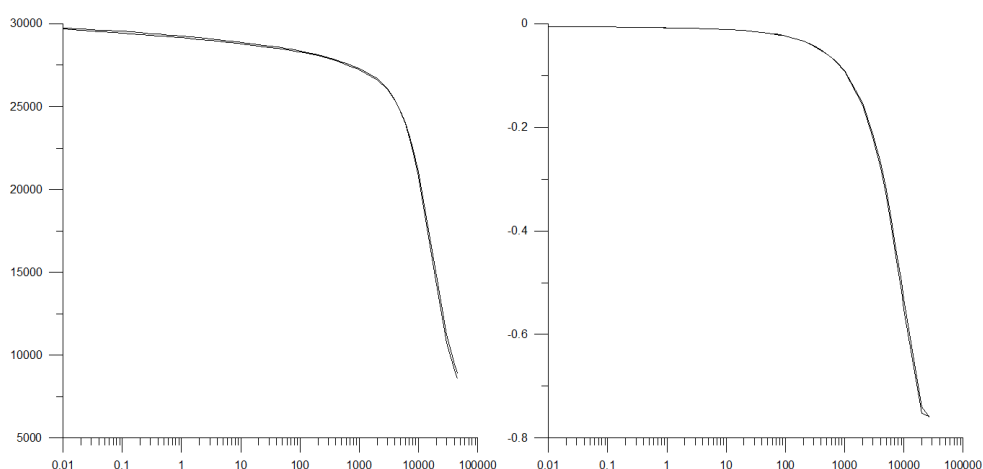


Figura 5.32 - Grafici di ampiezza (sinistra) e fase (destra) per il campione B2-4.

5.7 Misure svolte su campioni saturati

Le celle dei campioni che in sito si trovavano al di sotto della superficie piezometrica sono state successivamente saturate, ripetendo poi le misure SIP nella nuova condizione più realistica rispetto alle condizioni in campo. Vengono qui di seguito riportati i valori di resistività così ottenuti e i grafici di ampiezza e fase per i campioni: A2-9, A3-7, A3-9, A4-9 e B1-10.

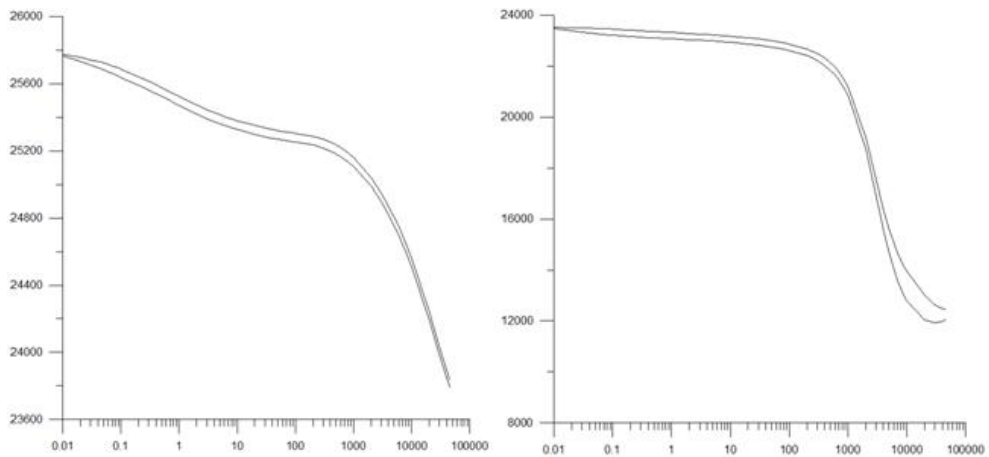


Figura 5.32 – Confronto tra i grafici di ampiezza del campione A2-9 rispettivamente prima e dopo la saturazione.

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
A2-9	25776,2045	680,4918	2,8328229
A2-9 saturo	23535,87	621,3469	2,79333416

Dalla tabella riportata sopra notiamo che il campione non varia di molto la sua resistività.

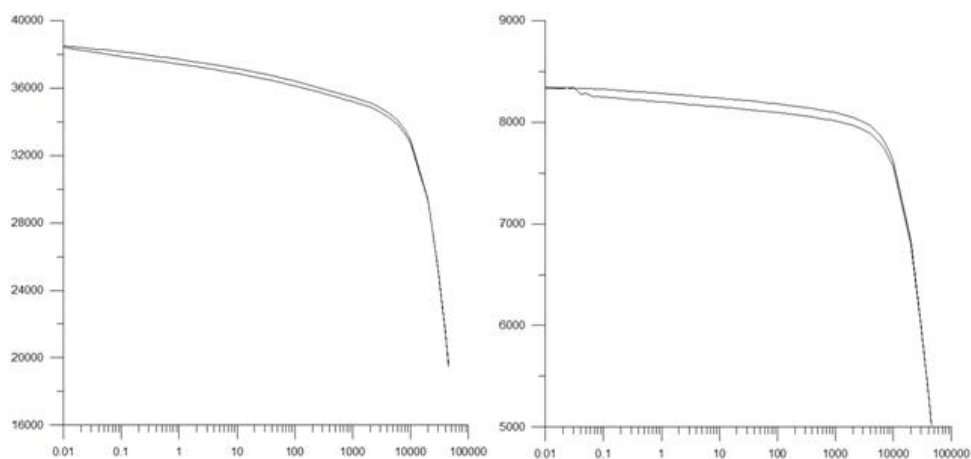


Figura 5.33 – Confronto tra i grafici di ampiezza del campione A3-7 rispettivamente prima e dopo la saturazione.

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
A3-7	38486,1557	1016,0345	3,00690846
A3-7 saturo	8343,29	220,2628	2,34294113

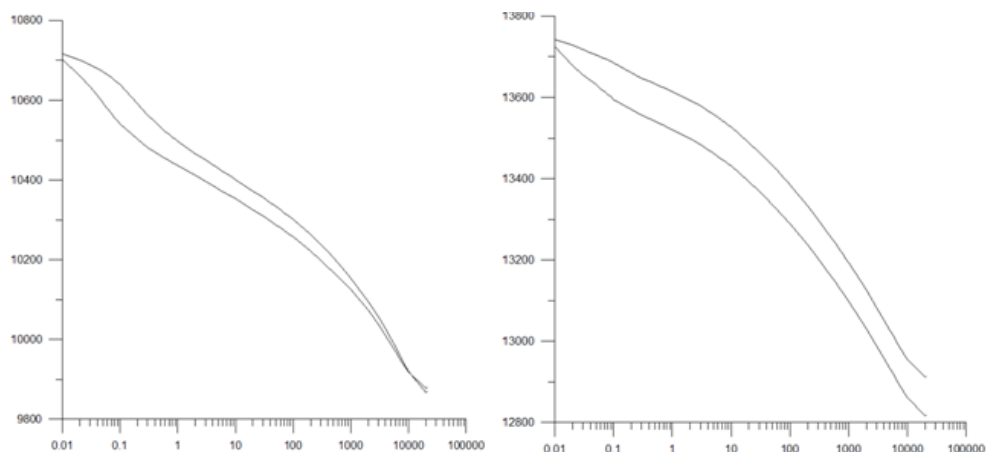


Figura 5.34 – Confronto tra i grafici di ampiezza del campione A3-9 rispettivamente prima e dopo la saturazione.

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
A3-9	9315,6542	245,9333	2,39081729
A3-9 saturo	13742,62	362,8053	2,55967362

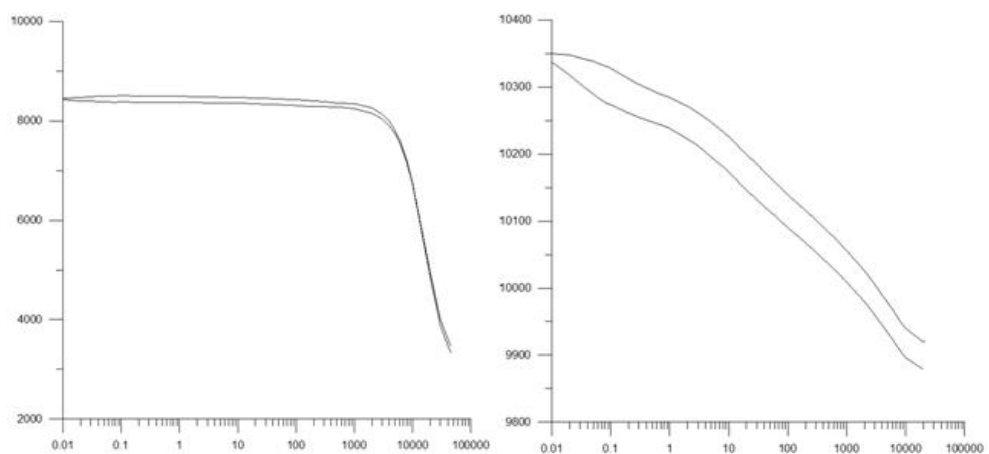


Figura 5.35 – Confronto tra i grafici di ampiezza del campione A4-9 rispettivamente prima e dopo la saturazione.

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
A4-9	8460,0372	223,3450	2,3489762
A4-9 saturo	10349,70	273,2321	2,43653178

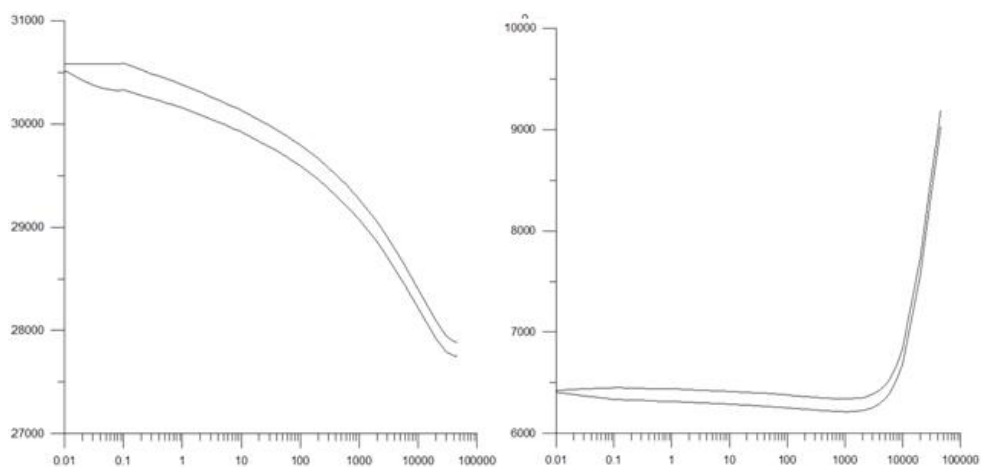


Figura 5.36 – Confronto tra i grafici di ampiezza del campione B1-10 rispettivamente prima e dopo la saturazione.

Nome campione	Resistenza (Ohm)	Resistività (Ohm*m)	Logaritmo della resistività Log10 (Ohm*m)
B1-10	30585,0755	807,4460	2,90711348
B1-10 saturo	6423,55	169,58	2,22937872

6. Conclusioni

I risultati del monitoraggio geofisico condotto sul sito contaminato di Trecate confermano che la geofisica può avere un ruolo importante nella caratterizzazione di siti contaminati.

In particolare è totalmente assodato che la geofisica abbia la capacità di definire la struttura geologica dei siti, anche ad una scala sufficientemente piccola da offrire spiegazioni relativamente alla distribuzione della contaminazione, così come è condizionata dalla distribuzione delle caratteristiche idrauliche dei mezzi porosi. In questa tesi è descritto come l'uso congiunto di metodi speditivi superficiali, come le misure FDEM, e di metodi capaci di maggiore penetrazione come GPR ed ERT, consente di ottenere un'immagine coerente ed informativa della struttura del sito di Trecate. La distribuzione della contaminazione nel sito sembra fortemente controllata dalla presenza di strutture superficiali costituite da sedimenti fini, e quindi meno idraulicamente conduttive.

Questo studio ha anche approfondito tramite misure in sito ed in laboratorio la possibile correlazione tra segnale geofisico e contaminazione. In particolare sono stati considerati due metodi geofisici che hanno manifestato, secondo diversi studi presenti nella letteratura scientifica, la capacità di identificare la presenza di contaminazione: il potenziale spontaneo (SP) e la polarizzazione indotta (IP), anche spettrale (SIP).

Il potenziale spontaneo, di cui sono state condotte due indagini sul sito di Trecate, ha mostrato una notevole correlazione con la distribuzione di contaminazione soprattutto nella zona non satura. Tale correlazione sembra dovuta agli effetti elettrici causati dalla biodegradazione aerobica degli idrocarburi nella zona vadosa.

La polarizzazione indotta, invece, pur manifestando segnali non trascurabili sia in campo che in laboratorio, non appare invece pienamente correlabile

con la distribuzione della contaminazione sul sito di Trecate. Le ragioni per questa complessa risposta SIP stanno probabilmente nella compresenza, sul sito stesso, di altri meccanismi che, insieme alla contaminazione, danno luogo a risposte SIP. Tra questi possiamo elencare sicuramente (a) la biodegradazione, sia aerobica che anaerobica; (b) la distribuzione della saturazione d'acqua nella zona non satura e la distribuzione piuttosto eterogenea di porosità e permeabilità nella zona satura; (c) la presenza di disturbi antropici, tra cui alcuni sottoservizi in corrispondenza della zona contaminata. Questi fattori non sono, del resto, specifici del solo sito di Trecate, dove anzi alcuni fattori sono poco importanti (i sottoservizi).

In generale si può quindi concludere che:

- (1) i metodi geofisici possono dare un sostanziale contributo per la caratterizzazione strutturale dei siti contaminati, e quindi per la loro caratterizzazione idrologica;
- (2) alcuni metodi geofisici, come SP e SIP, sono sensibili alla contaminazione dovuta a idrocarburi ed ai fenomeni di biodegradazione associati alla contaminazione, ma la loro interpretazione richiede un'approfondita comprensione di tutti i fenomeni che possono dar luogo a segnali SP e SIP, e che possono sovrapporsi ai segnali di contaminazione.

Bibliografia

- Ciarmiello A. e Del Piero G., 1999, Studio di carattere geologico del territorio del Parco del Ticino con particolari riferimenti alla geologia, idrogeologia e paleogeografia della valle, Ente di gestione del parco naturale della valle del Ticino, http://www.parcodelticino.pmn.it/pubblicazioni/documenti_argomentivari/geologia_e_idrogeologia/Geologia_e_Idrogeologia.pdf;
- La Spina S., 2010, Tecniche per il controllo e la bonifica dei siti contaminati, Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Padova;
- Agnoli S., (2010) L'eruzione di greggio in un pozzo italiano, da http://www.corriere.it/cronache/10_maggio_12/pozzo-italiano-crollo_55648588-5df4-11df-8e28-00144f02aabe.shtml, 12 maggio 2010;
- Sartoriello M., (1994) Scoppia un pozzo e piove petrolio, La Repubblica, 1 marzo 1994, p.21;
- Ghorbani A., (2007) Contribution au développement de la résistivité complexe et à ses applications en environnement, These de doctorat de l'universite Pierre et Marie Curie ;

- Kimberu J., (2002) Induced polarization and Resistivity measurements on a suite of near surface soil samples and their empirical relationship to selected measured engineering parameters, Thesis submitted to the International Institute for Geo-information Science and Earth Observation in partial fulfilment of the requirements for the degree in Master of Science in Applied Geophysics;
- Sumner, J. S., (1976) Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier, Amsterdam. 277 pp.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R. and Nelson, P. H., (1978) Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP, *Geophysics*, 43(3), 588-609;
- Luo, Y., and Zhang, G., (1998) Theory and Application of Spectral Induced Polarization, *Geophysical Monograph Series*;
- Seigel, H. O., Vanhala, H., and Sheard, S. N., (1997) Some case histories of source discrimination using time-domain spectral IP, *Geophysics*, 62(5), 1394-1408;
- Binley A., L. Slater, M. Fukes and G. Cassiani, (2005) The relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone, *Water Resources Research* , 41(12), W12417, doi: 10.1029/2005WR004202;

- Olhoeft, G.R., (1979) Electrical properties, in Initial Reports on the Petrophysics Laboratory, U.S. GeolSurv. Circ., 789, 1-25;
- Vanhala, H., Soininen, H. and Kukkonen, I., (1992) Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced-polarization method in glacial till environment, *Geophysics*, 57, 1014-1017;
- *Reynolds J.M., (2007) Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, edited by Wiley and Sons, New York, 1997;
- Ferrè, T. P. A., Binley A., Geller J., Hill E., and Illangasekare T. (2005), Hydrogeophysical methods at the laboratory scale, in *Hydrogeophysics*, edited by Y. Rubin and S. S. Hubbard, Springer, New York

Ringraziamenti

Innanzitutto desidero ringraziare la Dott.ssa Rita Deiana per il costante aiuto e l'attenzione che mi ha dedicato, nonostante stesse seguendo molti altri progetti;

la Dott.ssa Maria Teresa Perri ed il Dott. Vittorio Bruno per il supporto nelle misure di laboratorio e nell'interpretazione dei dati, nonché per la loro disponibilità;

il Dott. Enzo Rizzo del IMAA-CNR di Potenza per il contributo e la possibilità di utilizzare i risultati delle indagini SP sul sito di Trecate;

il Prof. Giorgio Cassiani per aver coordinato le 'operazioni', sebbene fosse molto impegnato;

Un enorme abbraccio va alla mia famiglia, agli amici e ai compagni di facoltà con cui, in questi anni, ho condiviso in bene e in male l'esperienza universitaria. È doveroso un grazie per il sostegno e l'incoraggiamento che ho ricevuto quando ero scoraggiata e per aver condiviso la mia felicità quando passavo l'ennesimo esame (che magari era quello 'terribile', lo scoglio che sembrava insormontabile). Beh, che dire ancora, spero con tutto il cuore di tenervi vicino anche nei giorni a venire, per vivere ancora tante esperienze insieme!