



Piano Nazionale Lauree Scientifiche 2014-2016 (DM 976/2014, art. 3 comma 4 e 5 ed art. 4)
Progetto Nazionale Geologia
PLS-L34 – UniPV, Università di Pavia

LABORATORIO PLS PER LE SCUOLE SECONDARIE DI SECONDO GRADO
“ESPLORANDO IL SOTTOSUOLO”

Anno Scolastico 2016-2017
Attività sperimentali svolte nel periodo 14-16 giugno 2017
presso il DSTA dell'Università di Pavia, Via Ferrata 1, Pavia

RELAZIONE SUL LABORATORIO SVOLTO

Responsabile del laboratorio PLS per l'Università di Pavia
Prof. **Patrizio Torrese**

Responsabile del laboratorio PLS per l'Istituto d'Istruzione Superiore
“A. Omodeo” di Mortara (PV)
Prof. **Flavio Polledri**

Responsabile del laboratorio PLS per l'Istituto d'Istruzione Superiore
“A. Maserati” di Voghera (PV)
Prof.ssa **Marialuisa Castoldi**

Responsabile PLS-L34 – UniPV
Prof. **Patrizio Torrese**

Studente
Siria Polenghi

GIUGNO 2017

Indice

1	PREMESSA	3
1.1	PIANO NAZIONALE LAUREE SCIENTIFICHE	3
1.2	OBIETTIVI DEL PIANO NAZIONALE LAUREE SCIENTIFICHE	4
1.3	LABORATORIO PLS	5
2	INTRODUZIONE	5
3	MATERIALI E METODI	7
3.1	LA RESISTIVITÀ ELETTRICA	7
3.2	FATTORI CHE INFLUENZANO LA RESISTIVITÀ ELETTRICA DELLE ROCCE E DEI SUOLI	9
3.3	METODI DI MISURA DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA SU CAMPIONI	12
3.3.1	IL DAS®	14
3.3.2	MISURE SPERIMENTALI IN LABORATORIO	15
3.3.2.1	STRUMENTAZIONE	15
3.3.2.2	PREPARAZIONE DEL CAMPIONE	17
3.3.2.3	ACQUISIZIONE DEI DATI	18
3.3.2.4	RESTITUZIONE DEI DATI	22
3.4	METODI DI MISURA DELLA RESISTIVITÀ SUL TERRENO	26
3.4.1	LA TOMOGRAFIA ELETTRICA	29
3.4.2	IL SITO SPERIMENTALE DEL POLO CRAVINO	30
3.4.3	LE MISURE SPERIMENTALI SUL TERRENO	36
3.4.3.1	STRUMENTAZIONE	36
3.4.3.2	ACQUISIZIONE DEI DATI	39
3.4.3.2	ELABORAZIONE E RESTITUZIONE DEI DATI	41
4	RISULTATI	42
4.1	MISURE SPERIMENTALI SU CAMPIONI DI DAS®	42
4.2	MISURE SPERIMENTALI SUL TERRENO	51
5	DISCUSSIONE DEI RISULTATI	51
6	CONCLUSIONI	55
	BIBLIOGRAFIA	42
	ALLEGATI	56
	Ringraziamenti	72

1 PREMESSA

1.1 PIANO NAZIONALE LAUREE SCIENTIFICHE

Il Piano Lauree Scientifiche (PLS), già Progetto Lauree Scientifiche, istituito a partire dal 2004 su iniziativa del MIUR, della Conferenza dei Presidi di Scienze e Tecnologie e di Confindustria, rappresenta una iniziativa consolidata volta a favorire l'acquisizione di competenze scientifiche meglio rispondenti alle sfide della società contemporanea ed alle attese del mondo del lavoro da parte degli studenti e a rafforzare l'impatto della formazione sulla società.

Il Ministero, nell'ambito del **Decreto Ministeriale 976/2014** (noto come “**Fondo Giovani**”), ha confermato e consolidato il proprio investimento nel PLS con riferimento al periodo **2014-2016** secondo le seguenti linee di azione:

- l'estensione del numero di classi di laurea coinvolte dal Piano1;
- il rafforzamento del ruolo delle Università nella realizzazione dei progetti, anche al fine di permettere una maggiore interdisciplinarietà tra le diverse aree coinvolte;
- la creazione di progetti più strutturati, in termini di risorse disponibili e di durata;
- l'inserimento di una quarta azione di intervento, mirata a ridurre il tasso di abbandono tra il primo e il secondo anno e, più in generale, al miglioramento della didattica universitaria del I ciclo nei Corsi di Laurea delle discipline scientifiche;
- la creazione di “Progetti Nazionali” per un miglior coordinamento tra le sedi e per una più efficace attività di monitoraggio e valutazione.

Tra le azioni, così come riportato nel DM 976/2014, sono incluse quelle finalizzate a:

- a) mettere a sistema la pratica del "laboratorio" per l'insegnamento delle scienze di base, in particolare al fine dell'orientamento formativo degli studenti dell'ultimo triennio della Scuola secondaria di II grado;
- b) aprire una nuova sperimentazione nelle Scuole e negli Atenei di attività didattiche di autovalutazione e recupero, finalizzate al miglioramento della preparazione degli studenti relativamente alle conoscenze richieste all'ingresso dei corsi di laurea scientifici, in collegamento con le verifiche e gli obblighi formativi aggiuntivi previsti dai corsi di laurea ai sensi dell'articolo 6, comma 1, del DM 270/04;

c) consolidare, sviluppare e mettere a sistema le opportunità di crescita professionale dei docenti di materie scientifiche in servizio nella Scuola secondaria di secondo grado, in relazione ai temi sopra indicati, che già si sono cominciate a realizzare attraverso le azioni del Piano Lauree Scientifiche;

d) ridurre il tasso d'abbandono tra il primo e il secondo anno nel corso degli studi universitari attraverso l'innovazione di strumenti e metodologie didattiche.

1.2 OBIETTIVI DEL PIANO NAZIONALE LAUREE SCIENTIFICHE

Il Piano Nazionale Lauree Scientifiche prevede i seguenti obiettivi:

- offrire agli studenti degli ultimi anni delle scuole superiori opportunità di conoscere temi, problemi e procedimenti caratteristici dei saperi (scientifici), anche in relazione ai settori del lavoro e delle professioni, al fine di individuare interessi e disposizioni specifiche e fare scelte consapevoli in relazione a un proprio progetto personale.

- mettere in grado gli studenti dell'ultimo triennio della Scuola secondaria di II grado di autovalutarsi, verificare e consolidare le proprie conoscenze in relazione alla preparazione richiesta per i diversi corsi di laurea (scientifici), come indicato nell'art.6 del D.M. n. 270/2004 e nell'art.2 del D.Lgs. n. 21/2008.

Tali azioni sono compito primario degli istituti scolastici e dei loro insegnanti, con la collaborazione delle università, e occorre quindi mantenere la finalità di formazione degli insegnanti:

- perfezionare le conoscenze disciplinari e interdisciplinari degli insegnanti e la loro capacità di interessare e motivare gli allievi nell'apprendimento delle materie scientifiche, nonché di sostenerli nel processo di orientamento pre-universitario.

É indispensabile che le finalità sopra indicate siano consapevolmente inserite e si estendano nella direzione più generale dell'innovazione curriculare:

- rivedere i contenuti e le metodologie dell'insegnamento-apprendimento delle discipline scientifiche.

Per raggiungere le finalità indicate, il Piano Lauree Scientifiche mantiene le idee portanti che si sono mostrate efficaci nella sperimentazione:

- concepire l'orientamento non come una cosa che viene fatta agli studenti, ma come un'azione che è lo studente a fare, a partire da attività significative che gli consentono di confrontarsi con i temi, i problemi e le idee delle discipline scientifiche;
- concepire la formazione degli insegnanti in servizio non come una cosa che viene fatta agli insegnanti, ma come un'attività propria degli insegnanti stessi, che parte dai problemi concreti, si sviluppa attraverso la progettazione e la realizzazione di attività didattiche e attraverso il confronto con colleghi ed esperti, e si completa con specifici moduli di lezioni teoriche e con l'elaborazione critica individuale;
- conseguire allo stesso tempo l'orientamento degli studenti e la formazione degli insegnanti attraverso la progettazione e la realizzazione congiunta da parte di docenti della scuola e dell'università di laboratori per gli studenti, sviluppando in tal modo anche le relazioni fra il sistema scolastico e quello universitario.

1.3 LABORATORIO PLS

Il laboratorio PLS è un'attività costante, non episodica, che richiede una serie di incontri, eventualmente (in parte) concentrati in un periodo intensivo e prevede una serie di attività svolte dagli studenti con la presenza e l'intervento dei docenti. Il laboratorio PLS può essere curriculare, ossia svolto nell'ambito del curriculum e dell'orario scolastico, oppure extra-curriculare, oppure un misto di entrambi. Un laboratorio PLS si realizza per gruppi di studenti di numerosità adeguata. Gli studenti non possono essere troppi, altrimenti sarebbe difficile seguirli e mancherebbero gli spazi e gli strumenti necessari. D'altra parte non possono essere troppo pochi, perché la discussione e l'interazione sarebbero carenti e perché l'attività potrebbe risultare troppo costosa in termini di risorse umane e finanziarie. I laboratori PLS si possono tenere in luoghi diversi: istituti scolastici, università, centri di ricerca a seconda delle situazioni, delle esigenze di strutture e attrezzature specifiche e delle disponibilità. È certamente utile che gli studenti e gli insegnanti si trovino a operare in diversi ambienti e strutture del mondo del lavoro, dell'università e della ricerca e ne conoscano le caratteristiche.

2. INTRODUZIONE

Il laboratorio PLS “**Esplorando il sottosuolo**” è stato progettato nell'ambito del PLS-L34 – UniPV. Il laboratorio PLS ha previsto lo svolgimento di attività sperimentali presso il Dipartimento di Scienze della Terra e dell'ambiente (DSTA) dell'Università di Pavia, Via Ferrata 1, dal 14 giugno

2017 al 16 giugno 2017. L'attività ha coinvolto gli studenti provenienti dagli Istituti d'Istruzione Superiore "A. Omodeo" di Mortara (PV) e "A. Maserati" di Voghera (PV) ed è stato finalizzato all'approfondimento di alcuni temi di **geofisica applicata** per quanto riguarda sia la **teoria di base**, **sia le applicazioni sperimentali**. La Geofisica è l'applicazione di misure e metodi fisici volte allo studio delle proprietà fisiche del nostro pianeta. L'applicazione di metodi geofisici è finalizzata non solo allo **studio del pianeta**, ma anche allo studio delle sue **risorse** e dei suoi **rischi**, i.e., risorse idriche, giacimenti di idrocarburi, giacimenti minerari, risorse energetiche rinnovabili e non convenzionali, rischio sismico, idraulico, idrogeologico, rischio vulcanico. Inoltre, l'applicazione di tecniche geofisiche è anche finalizzata alla **progettazione di opere di ingegneria civile**, compresa la **progettazione antisismica**. Le prospezioni geofisiche (prospezioni sismiche, elettriche, elettromagnetiche, magnetiche, gravimetriche e radiometriche) rappresentano alcuni metodi fisici utilizzati nel campo dell'**esplorazione geologica**. Le indagini geofisiche si differenziano in due grandi categorie: indagini **passive** e indagini **attive**: le prime si effettuano prevalentemente in magnetometria e in gravimetria, dove tramite delle apposite strumentazioni si rilevano eventuali anomalie (magnetiche o gravimetriche) di un **campo naturale**; le seconde si riferiscono prevalentemente ai rilievi di tipo geoelettrico e sismico che prevedono l'applicazione di un **campo artificiale** (e.g. campo elettrico, campo elastico).

Il laboratorio PLS, coordinato dal Prof. *Patrizio Torrese* dell'università di Pavia in collaborazione con il prof. *Flavio Polledri* dell'Istituto "A. Omodeo" di Mortara (PV) e la Prof.ssa *Marialuisa Castoldi* dell'Istituto "A. Maserati" di Voghera (PV) è finalizzato a fornire al tirocinante conoscenze teoriche-pratiche-applicative relative ai metodi e alle tecnologie utilizzate nel campo dell'esplorazione geofisica/geologica del sottosuolo, anche in relazione ai settori del **lavoro** e della **professione**. Il laboratorio PLS è composto da lezioni frontali, laboratori in aula e sul terreno, test di valutazione e gradimento da svolgere presso l'università e studio/preparazione di elaborati (materiale didattico, rapporto tecnico, presentazione Power Point) da svolgere sia presso l'università, sia presso la scuola/casa. Il tirocinante è coinvolto nella realizzazione di **misure sperimentali** sia su **campioni** nei **laboratori universitari**, sia direttamente sul **terreno** presso il **sito sperimentale** del polo universitario "Cravino", utilizzando **campi elettrici artificiali**, ricavando le proprietà elettriche delle rocce e ricostruendo il **modello tridimensionale geofisico/geologico** del sottosuolo. Il modello geofisico/geologico è quindi **tarato** mediante **carotaggi di perforazione**: le caratteristiche del sottosuolo, come le **rocce** e la **falda acquifera**, previste dal modello geofisico/geologico così ricostruito sono, quindi, osservate direttamente sulle carote di perforazione.

3. MATERIALI E METODI

3.1 LA RESISTIVITÀ ELETTRICA

La **resistività elettrica** è l'attitudine di un **materiale** ad opporsi al passaggio della corrente elettrica. Nel sistema internazionale la resistività elettrica viene misurata in ohm per metro ($\Omega \cdot m$). Questa grandezza dipende solo dal materiale ed è una proprietà intrinseca di ogni materiale.

Nella seguente tabella sono riportate le resistività caratteristiche di alcuni materiali a condizioni normali (temperatura di 20 °C).

Tabella 1: resistività caratteristica di alcuni materiali.

Materiale	Resistività ($\Omega \cdot m$)
Acqua di mare	<3
Acqua pura (distillata)	$10^2 \div 3 \times 10^3$
Acqua potabile	$2 \times 10 \div 2.00 \times 10^3$
Carta	10^{11}
Calcestruzzo	$50 \div 8 \times 10^3$
Grafene trasparente	$1,00 \times 10^{-8}$
Argento	$1,62 \times 10^{-8}$
Rame	$1,68 \times 10^{-8}$
Oro	$2,35 \times 10^{-8}$
Alluminio	$2,75 \times 10^{-8}$
Tungsteno	$5,25 \times 10^{-8}$
Ferro	$9,68 \times 10^{-8}$
Platino	$10,6 \times 10^{-8}$
Silicio puro	$2,5 \times 10^3$
Vetro	$10^{10} \div 10^{14}$
Aria	$1.30 \times 10^{16} \div 3.30 \times 10^{16}$
Quarzo fuso	circa 10^{16}

La **resistenza elettrica** è invece l'attitudine di un **corpo** ad opporsi al passaggio della corrente elettrica, quando sottoposto ad una tensione elettrica. Questa opposizione dipende dal materiale con

cui è realizzato, dalle sue dimensioni, dalla sua geometria e dalla sua temperatura, e viene misurata in ohm (Ω).

La resistenza elettrica può essere descritta come rapporto tra la differenza di potenziale elettrico applicato ai capi di un conduttore e l'intensità della corrente elettrica che lo attraversa. In fisica questa legge viene definita come **prima legge di Ohm**:

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Dove R è la **resistenza elettrica**, ΔV è la **differenza di potenziale elettrico**, I è la **corrente elettrica**. R una costante **tipica del circuito e indipendente dall'intensità della corrente**.

Esiste poi una **seconda legge di Ohm** che mette invece in relazione la resistenza elettrica con le **caratteristiche geometriche e fisiche del conduttore**, ovvero la resistività ρ , la lunghezza L e la sezione S . L'esempio più semplice è quello in cui il conduttore è composto da un solo materiale, a sezione uniforme e il cui flusso di corrente al suo interno è anch'esso uniforme. In questo caso, la resistività ρ è legata alla resistenza R dalla relazione:

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

Dalla prima e dalla seconda legge di Ohm è possibile ricavare la **resistività di un materiale** (fig.1), espressa come:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{S}{L}$$

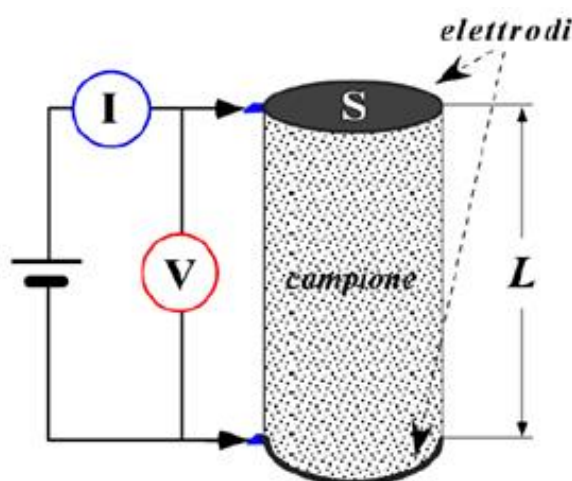


Figura 1: schema delle misure fisiche svolte sul campione.

La **conducibilità elettrica** σ è l'opposto della resistività elettrica ed è definita come il coefficiente di proporzionalità tra la densità di corrente elettrica e l'intensità di un campo elettrico. La conduttività

rappresenta l'**attitudine di un corpo a lasciarsi attraversare da una corrente elettrica** quando è immerso in un campo elettrico, ed è definito dalla seguente formula:

$$\sigma = \frac{JL}{\Delta V} = \frac{IL}{S\Delta V}$$

dove:

- I è la corrente elettrica che passa nell'elemento
- $J = I/S$ è la densità di corrente elettrica passa nell'elemento
- L è la lunghezza dell'elemento
- S è l'area della sezione trasversale dell'elemento
- ΔV è la differenza di potenziale misurata alle estremità dell'elemento

3.2 FATTORI CHE INFLUENZANO LA RESISTIVITÀ ELETTRICA DELLE ROCCE E DEI SUOLI

Come è possibile notare dalle seguenti tabelle, differenti tipi di rocce presentano differenti valori di resistività.

Tabella 2: range di resistività di alcuni tipi di rocce.

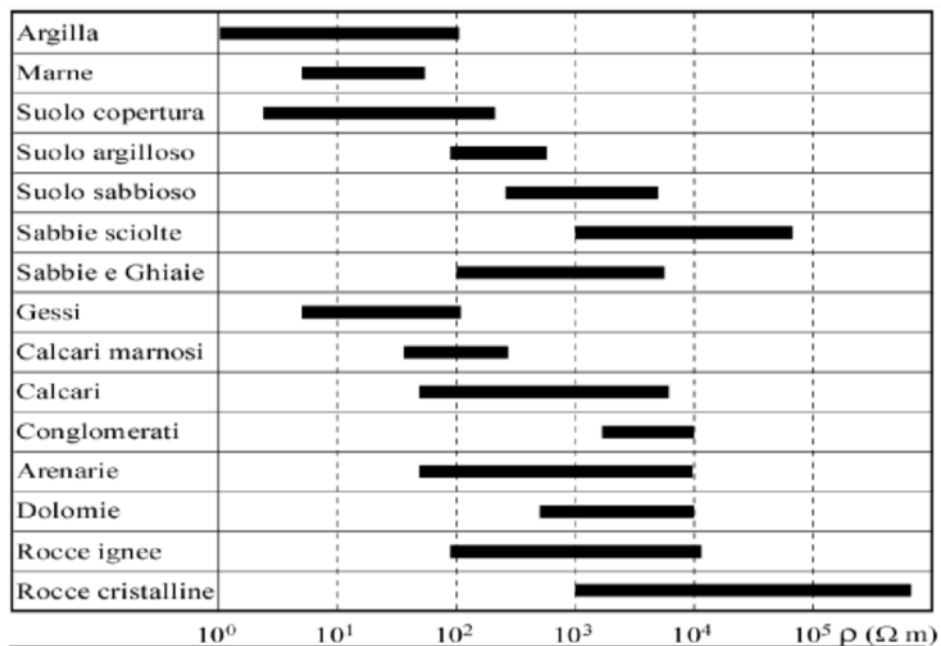


Tabella 3: range di resistività di alcuni tipi di rocce.

Materiale	Resistività ($\Omega \cdot m$)
Quarziti	$2 \cdot 10^4$
Pirite	$10^{-4} \div 10$
Galena	$10^{-2} \div 300$
Grafite	$10^{-3} \div 1$
Bauxite	$200 \div 6000$
Graniti	$300 \div 10^4$
Basalti	$10 \div 10^5$
Lave attuali fuori falda	>20000
Rocce ignee lapidee non alterate	>1000
Tufi piroclastici in falda non alterati	>500
Rocce ignee completamente argillificate	>5
Calcari e dolomie	$100 \div 5000$
Arenarie	$60 \div 10^4$
Calcari marnosi	$100 \div 300$
Marne calcaree	$50 \div 100$
Marne	$20 \div 40$
Scisti e rocce metamorfiche non argillose	>500
Argilloscisti o scisti filladici alterati	$20 \div 50$
Sabbie e ghiaie asciutte non argillose	>1000
Sabbie e ghiaie non argillose in falda	$100 \div 500$
Sabbie e ghiaie non argillose in acqua salata	$0.5 \div 5$
Limi sabbiosi in falda	$30 \div 100$
Limi argillosi	$20 \div 50$
Argille (acqua dolce)	$10 \div 120$
Argille (acqua salata)	$1 \div 10$

I fattori che influenzano la conducibilità elettrica di una formazione rocciosa sono:

- il **contenuto di acqua** presente nei pori della roccia;
- il **contenuto ionico** presente nell'acqua contenuta all'interno dei pori della roccia;
- il **contenuto di minerali argillosi**.

Questi fattori infatti influenzano il passaggio delle cariche elettriche attraverso gli ioni presenti in soluzioni acquose.

La formula empirica che mette in relazione la resistività di una formazione rocciosa non argillosa ed il suo contenuto d'acqua, valida in condizioni di completa saturazione, è espressa mediante l'equazione

$$\rho = a\Phi^{-m}\rho_w$$

dove ρ è la resistività complessiva della roccia, ρ_w è la resistività dell'acqua che la imbibisce espressa in $\Omega\cdot m$, Φ è la porosità totale (ovvero il rapporto percentuale tra il volume dei vuoti presenti all'interno della roccia e il volume totale), espressa in percentuale, a ed m sono dei parametri adimensionali sperimentalmente determinati.

Tale equazione esprime una correlazione inversa tra la resistività di una roccia non argillosa satura e la sua porosità: **resistività e porosità sono inversamente proporzionali**. La resistività ρ_w della soluzione acquosa, ad una data temperatura, è funzione inversa della salinità, ossia della concentrazione in essa di ioni, che ne aumenta la conducibilità; inoltre, per una data salinità, essa è anche funzione inversa della temperatura, che, facendo diminuire la viscosità del fluido, incrementa la mobilità degli ioni (fig. 2).

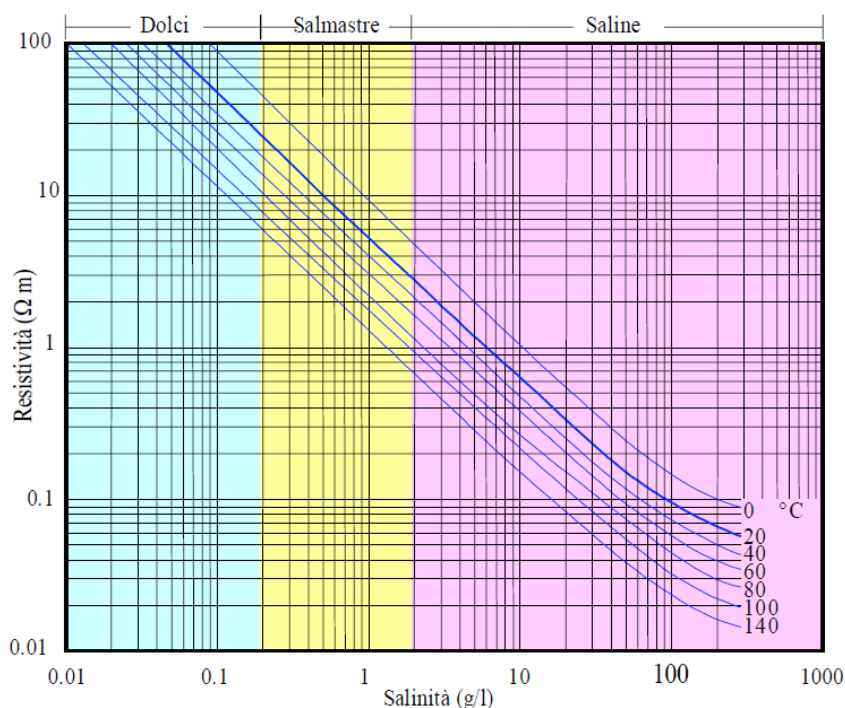


Figura 2: schema che mette in relazione la resistività con la salinità dei fluidi.

La validità delle relazioni finora citate assumono che all'interno della formazione rocciosa non siano presenti minerali argillosi. In tali condizioni il rapporto ρ/ρ_w è costante e indicato con F (“fattore di formazione”), per cui l'equazione prima citata diventa:

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} = a\Phi^{-m}$$

dove a dipende dal tipo di porosità, ovvero dalla tortuosità delle vie d'interconnessione tra i pori ed è variabile nel *range* $0.5 \leq a \leq 2.5$ ed m dipende dal grado di cementazione e è variabile nel *range* $1.3 \leq m \leq 2.5$. Se nella roccia sono presenti minerali argillosi, sia in forma di granuli dispersi, sia in forma di sottili intercalazioni, essi partecipano al processo di conduzione delle cariche elettriche; per questo alla conducibilità dovuta alla presenza d'acqua va aggiunta anche quella dovuta alla presenza di argilla. L'equazione precedente deve essere dunque modificata introducendo un termine aggiuntivo che tiene conto **dell'eccesso di conducibilità dovuto ai minerali argillosi**. In tali condizioni la resistività misurata della formazione rocciosa è inferiore a quella che si avrebbe in assenza di minerali argillosi, di conseguenza il fattore di formazione non è più costante. In questo caso, al variare della resistività dell'elettrolita ρ_w che occupa i pori della roccia, e quindi al variare della resistività complessiva ρ , il rapporto ρ/ρ_w definisce un “fattore di formazione apparente” (F_a), che è tanto minore di F quanto maggiori sono gli effetti prodotti dai minerali argillosi.

3.3 METODI DI MISURA DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA SU CAMPIONI

La misura della resistività viene eseguita su campioni di forma regolare e può essere effettuata sia in **corrente continua** che **alternata** a bassa frequenza, per evitare l'attenuazione del segnale elettrico che, per una data resistività del mezzo attraversato, è tanto maggiore quanto più elevata è la frequenza.

Tra i metodi che utilizzano corrente continua e più comunemente usati ci sono i metodi a due e quattro elettrodi (Scotellaro, 2006).

La strumentazione digitale da banco usata per la misura di resistività è composta essenzialmente da un **voltmetro** (misura la tensione della corrente) e da un **amperometro** (misura l'intensità della corrente) ad elevata sensibilità, con risoluzione rispettivamente di $1\mu\text{V}$ e $1\mu\text{A}$.

Nei dispositivi a due e quattro elettrodi si calcola la resistività (ρ) nel modo seguente (fig. 3):

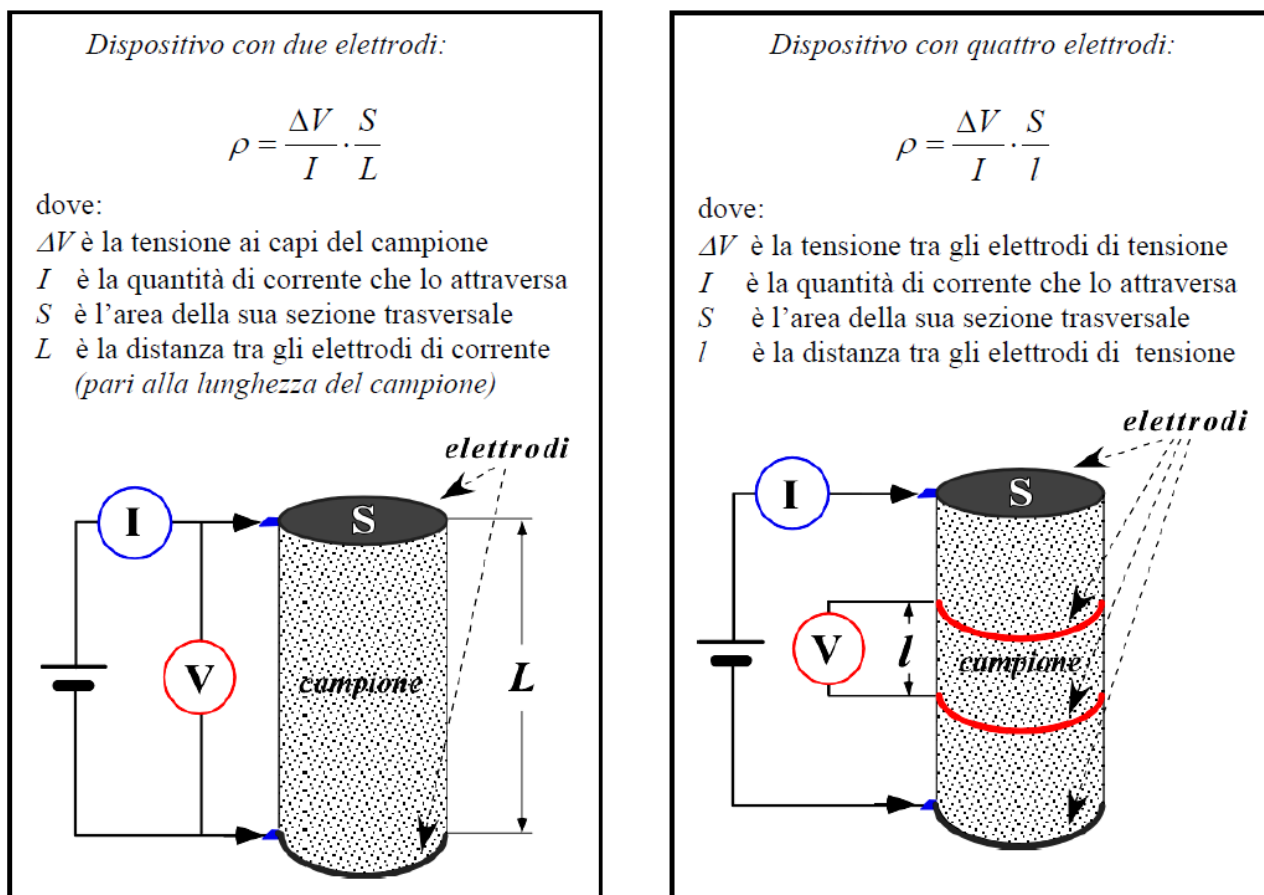


Figura 3: metodi di misura della resistività elettrica a due e quattro elettrodi.

Il metodo utilizzato durante il laboratorio PLS per le **misure sui campioni** è il **metodo a due elettrodi**: consente di misurare l'intensità di corrente (I) che fluisce attraverso il campione applicando agli estremi di esso una differenza di potenziale (ΔV) costante. La resistività (ρ) è calcolata a partire dalla resistenza applicando la legge di Ohm, considerando la lunghezza (L) e la sezione (S) del campione. Per questo motivo è necessario preparare opportuni campioni e annotare le relative dimensioni in aggiunta alle misure elettriche svolte, in modo da poter poi calcolare la resistività (ρ).

Per eseguire le misure di resistività su campioni in condizioni ottimali, è necessario che i campioni abbiano una **forma regolare** (cilindro, cubo o parallelepipedo) ed una lunghezza almeno **tre volte maggiore** della dimensione dei granuli o di eventuali inclusioni; per lunghezze inferiori le proprietà del campione risultano fortemente influenzate dalle caratteristiche dei singoli granuli, o degli inclusi, pertanto il valore misurato di resistività può non essere **rappresentativo** della roccia nel suo insieme. La qualità delle misure eseguite è fortemente influenzata dalla resistenza che si sviluppa al **contatto elettrodo-campione**, pertanto è necessario generalmente migliorare il contatto interponendo una

sostanza conduttiva tra i due elementi ed applicando agli elettrodi una **pressione** (per i campioni di roccia di 10 N/cm^2). Per evitare fenomeni di **polarizzazione** si inverte la **polarità della corrente** e si effettua una **media aritmetica** dei valori misurati.

Il materiale utilizzato per la realizzazione dei campioni è il DAS® (fig. 4).

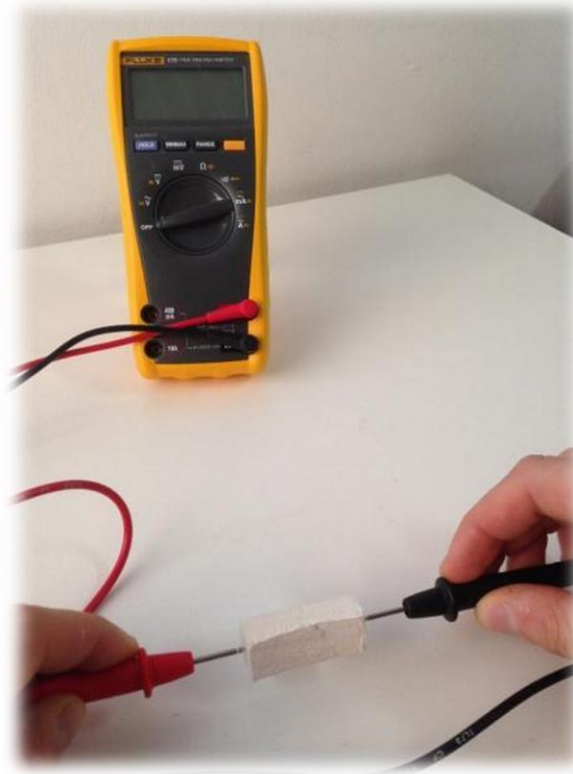


Figura 4: misura della resistività su un campione di DAS®.

Il metodo utilizzato durante il laboratorio PLS per le **misure sul terreno** è, invece, il **metodo a quattro elettrodi** che sarà illustrato successivamente.

3.3.1 IL DAS®

Il **DAS®** è il nome commerciale di una pasta sintetica a base minerale per modellare, molto simile nelle sue proprietà alla creta, ma che, a differenza di questa, non ha bisogno di essere scaldata in forno per essiccarsi e indurirsi, in quanto la diminuzione del contenuto in acqua presente nelle molecole del materiale, e di conseguenza il suo indurimento, avviene attraverso reazioni chimiche a temperatura ambiente. Il marchio DAS® è un acronimo del nome del suo inventore, Dario Sala, che brevettò il materiale nel 1962. La composizione chimica del DAS® è e protetta da brevetto.

Diversa dal DAS® è la **plastilina** (o plastichina o plastirina), un materiale plastico per la modellazione, la cui composizione è basata su **olio**, **argilla** e **cera** (senza coloranti ha un aspetto

bruno). La caratteristica fondamentale della plastilina, a differenza di **pongo**, **play-doh** o **DAS®** è che nel tempo conserva una buona plasticità senza indurirsi. Queste differenze sono dovute al diverso contenuto degli elementi maggiori: se prevale la cera è il pongo; se prevale l'argilla è il DAS® (che lasciato a contatto con l'aria poi si essicca e si può dipingere).

In questo laboratorio è stato utilizzato il DAS® per simulare il comportamento del materiale naturale argilla in quanto i due materiali hanno un comportamento fisico-reologico approssimativamente simile. Inoltre, con un campione di DAS® essiccato è possibile simulare anche il comportamento di una roccia. In tal senso, durante l'indurimento del campione di DAS®, è possibile monitorare l'aumento della resistività elettrica al diminuire del contenuto d'acqua, così come avviene in natura per molte rocce sedimentarie, i.e., rocce formate dall'accumulo di sedimenti di varia origine, derivanti in gran parte dall'erosione di rocce preesistenti.

Un materiale caratterizzato da un comportamento fisico-reologico simile al DAS® indurito è il mattone, il più comune laterizio utilizzato in edilizia. Il mattone è ottenuto partendo da una miscela a base di argilla, che viene dapprima modellata (la "consistenza" è plastica ed è molto malleabile) e successivamente viene cotta in forno a temperatura controllata, per permettere l'evaporazione delle molecole di acqua presenti all'interno della struttura chimica, in modo da rendere il campione solido, ed ottenere così il mattone.

3.3.2 MISURE SPERIMENTALI IN LABORATORIO

3.3.2.1 STRUMENTAZIONE

Le misure di resistenza elettrica in laboratorio sui campioni di DAS® sono state effettuate utilizzando la seguente strumentazione:

- Multimetro Digitale Fluke 175 (fig. 5) a True RMS
- Puntali Fluke TL175 TwistGuard™ (fig. 6)

Il **multimetro** utilizzato è di tipo **True RMS (Root Mean Square)**, in grado di misurare il **valore quadratico medio** di una funzione sinusoidale. Il valore efficace di una funzione periodica è il valore equivalente (efficace) che avrebbe un segnale costante di pari potenza media. Il valore efficace è dunque il valore di un circuito a corrente alternata equivalente al valore di un circuito a corrente continua. Molti strumenti di misura, tra cui i multimetri più economici, sono costruiti per calcolare il valore efficace di una tensione sinusoidale raddrizzata misurandone il valore medio o il valore massimo: l'indicazione è però corretta solo se il segnale ha forma d'onda perfettamente

sinusoidale, mentre è errata quanto più il segnale è distorto, cioè ricco di armoniche. Gli strumenti che misurano il vero valore efficace sono contraddistinti dalla sigla “true RMS” e campionano il segnale e calcolano la "radice quadrata della media dei quadrati" (Root Mean Square) detta anche valore quadratico medio, che è in grado di misurare valori efficaci anche se l'onda sinusoidale presenta delle distorsioni considerevoli.



Figura 5: multimetro digitale a True RMS Fluke 175.



Figura 6: Puntali Fluke TL175 TwistGuard.

Le specifiche tecniche dello strumento sono riportate nella seguente tabella:

Tensione DC	Precisione	$\pm (0,15\%+2)$
	Risoluzione massima	0,1 mV
	Massimo	1000 V
Tensione AC	Precisione	$\pm (1,0\%+3)$
	Risoluzione massima	0,1 mV
	Massimo	1000 V
Corrente DC	Precisione	$\pm (1,0\%+3)$
	Risoluzione massima	0,01 mA
	Massimo	10 A
Corrente AC	Precisione	$\pm (1,5\%+3)$
	Risoluzione massima	0,01 mA
	Massimo	10 A
Resistenza	Precisione	$\pm (0,9\%+1)$
	Risoluzione massima	0,1 Ω
	Massimo	50 M Ω
Capacità	Precisione	$\pm (1,2\%+2)$
	Risoluzione massima	1 nF
	Massimo	10.000 μ F
Frequenza	Precisione	$\pm (0,1\%+1)$
	Risoluzione massima	0,01 Hz
	Massimo	100 kHz

3.3.2.2 PREPARAZIONE DEL CAMPIONE

Le misure di resistività sono state svolte su campioni di DAS® appositamente preparati tagliando la forma di DAS® confezionata in modo da creare dei campioni con lunghezza di 5 cm e larghezza 1,5 cm (fig. 7, 8 e 9).

Figura 7: taglio del campione di DAS®.





Figura 8: campione di DAS®.

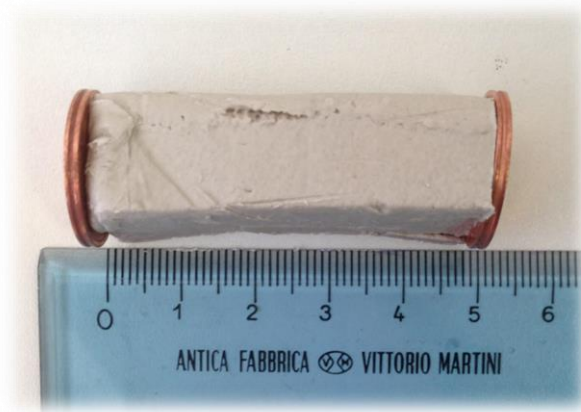


Figura 9: campione di DAS® con monete in rame applicate sulle superfici di misura.

3.3.2.3 ACQUISIZIONE DEI DATI

Le misure di resistenza sono state eseguite sulle due superfici minori del campione, in modo che il flusso di corrente fosse parallelo al lato maggiore del campione. L'obiettivo è quello di monitorare la resistenza nel tempo, al variare del contenuto in acqua del materiale, in modo da calcolare la resistività secondo i parametri geometrici del campione.

Per scegliere il metodo migliore con cui effettuare le misure di resistenza sono stati svolti quattro test con diverse modalità di contatto elettrodo-campione, in modo da valutare la variazione della misura al variare della tipologia di contatto. Vengono di seguito riportate le diverse prove svolte:

1. Misura puntuale in differenti posizioni sulle due superfici di misura: le misure di resistenza sono state svolte applicando le punte degli elettrodi rispettivamente sulle due superfici minori del campione, e per ogni misura è stata utilizzata una differente posizione (fig. 10).

2. Misura puntuale nella medesima posizione su entrambe le superfici di misura: le misure di resistenza sono state svolte applicando le punte degli elettrodi rispettivamente sulle due superfici minori del campione, e per ogni misura è stata utilizzata sempre la medesima posizione (fig. 10).

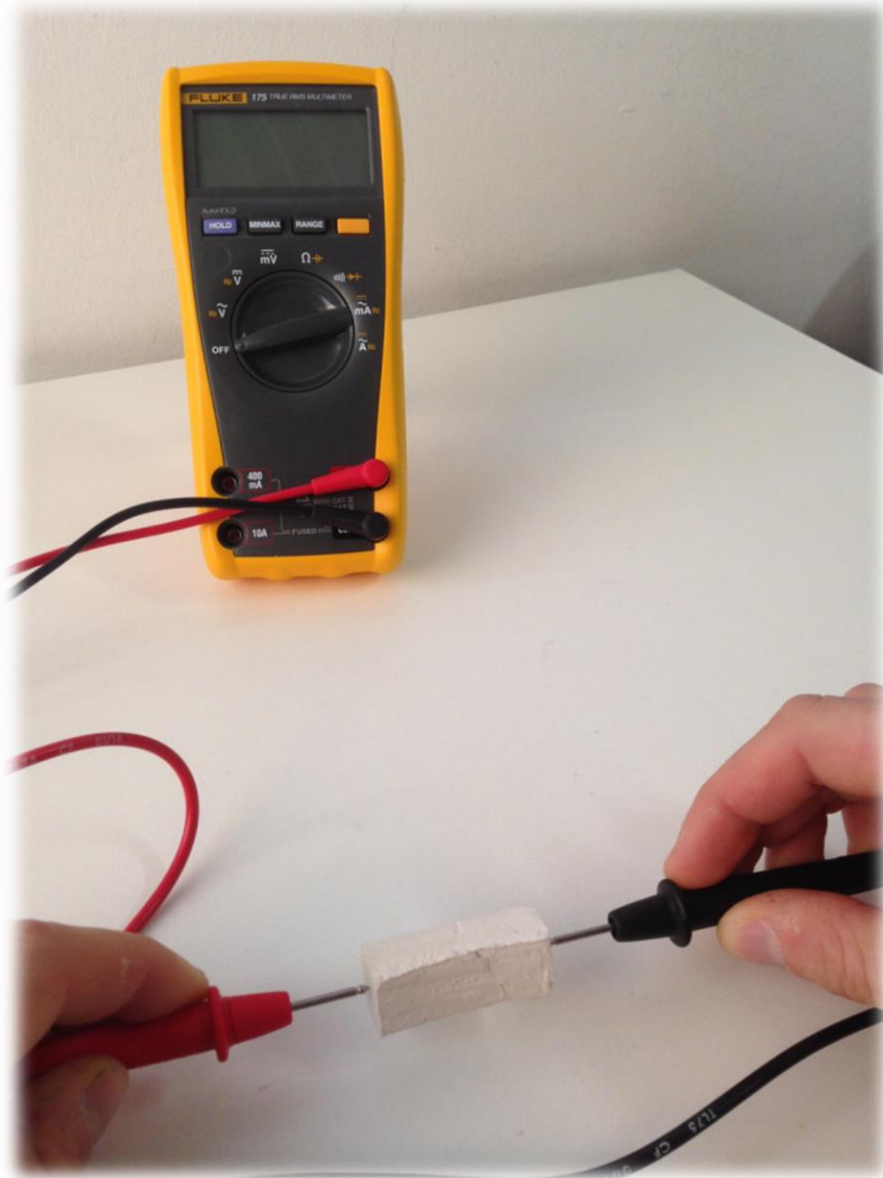


Figura 10: misura puntuale della resistenza.

3. Misura areale mediante monete in rame ossidate sulle due superfici di misura (fig. 11): le misure di resistenza sono state svolte applicando sulle due superfici di misura delle monete in rame da 2 centesimi (fig. 12); in questo modo è stato possibile misurare la resistenza sfruttando l'intera superficie sui due lati del campione, al fine di migliorare il contatto

elettrodo - campione. Le monete presentano, tuttavia, una superficie ossidata, che riduce leggermente la conducibilità delle stesse.

4. Misura areale mediante monete in rame sulle due superfici (fig. 11): le misure di resistenza sono state svolte applicando sulle due superfici di misura delle monete in rame da 2 centesimi (fig. 12); in questo modo è stato possibile misurare la resistenza sfruttando l'intera superficie sui due lati del campione, migliorando il contatto elettrodo - campione. Le monete sono state preventivamente ripulite mediante una soluzione acida costituita da succo di limone e sale, in modo da migliorare la conducibilità.



Figura 11: campione di DAS® con monete in rame applicate sulle superfici di misura.

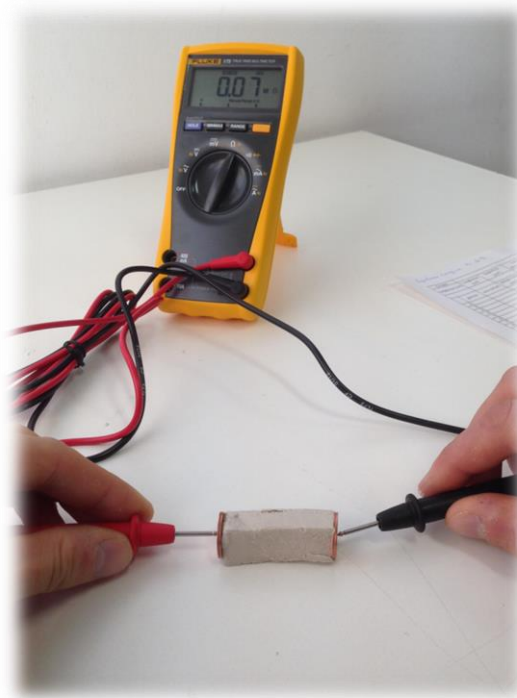


Figura 12: misura areale della resistenza mediante l'utilizzo di monete in rame.

Per ogni prova sono state annotate tutte le misure sul foglio d'acquisizione seguente.

Tabella 4: foglio di acquisizione.

Larghezza [cm]		Lunghezza [cm]	Superficie [cm ²]	Fattore geometrico [cm]	Orario apertura DAS®	Durata singola misura
						20 s
numero misura	giorno	ora minuti	tempo totale [minuti]	tempo parziale [minuti]	resistenza [M Ω]	resistività [M Ω * cm]
1						
2						
3						
4						
5						

.....

Per ogni prova sono state annotate:

- La larghezza del campione (in centimetri)
- La lunghezza del campione (in centimetri)
- L'orario di apertura del DAS®
- Il giorno, l'ora e i minuti in cui è stata effettuata la misura di resistenza
- Il tempo parziale trascorso tra ogni misura di resistenza (in minuti)
- La misura di resistenza (in mega ohm)

La misura di resistività è stata svolta per differenti intervalli di tempo dall'apertura della confezione di DAS®, utilizzando un intervallo di misura molto breve durante la prima ora, perché teoricamente i valori di resistenza sono più variabili, ed aumentando l'intervallo di misura nelle misure successive alla prima ora. Per migliorare il contatto tra il **puntale (elettrodo)** e la superficie del campione è stata esercitata una discreta pressione tra essi. Inoltre, per evitare fenomeni di **polarizzazione**, le misure di resistività elettrica sono state ripetute più volte invertendo la **polarità della corrente elettrica** ed eseguendo una **media** dei valori misurati, calcolata in automatico dal tester. Per questo motivo ogni singola misura è stata svolta applicando i puntali sul campione per un tempo pari a 20 secondi.

3.3.2.4 RESTITUZIONE DEL DATO

I dati annotati sul foglio d'acquisizione sono poi digitalizzati, trascrivendoli all'interno di un foglio Excel. All'interno del foglio sono compilate varie formule, che in automatico calcolano le seguenti grandezze:

- la superficie minore del campione sulla quale è stata svolta la misura (essendo di forma quadrata la superficie è ricavata dal quadrato del lato).
- il fattore geometrico g , definito come rapporto tra la superficie minore del campione sulla quale è stata svolta la misura (S) e la lunghezza (L) del campione.
- la resistività elettrica, ricavata come prodotto tra la resistenza e il fattore geometrico.

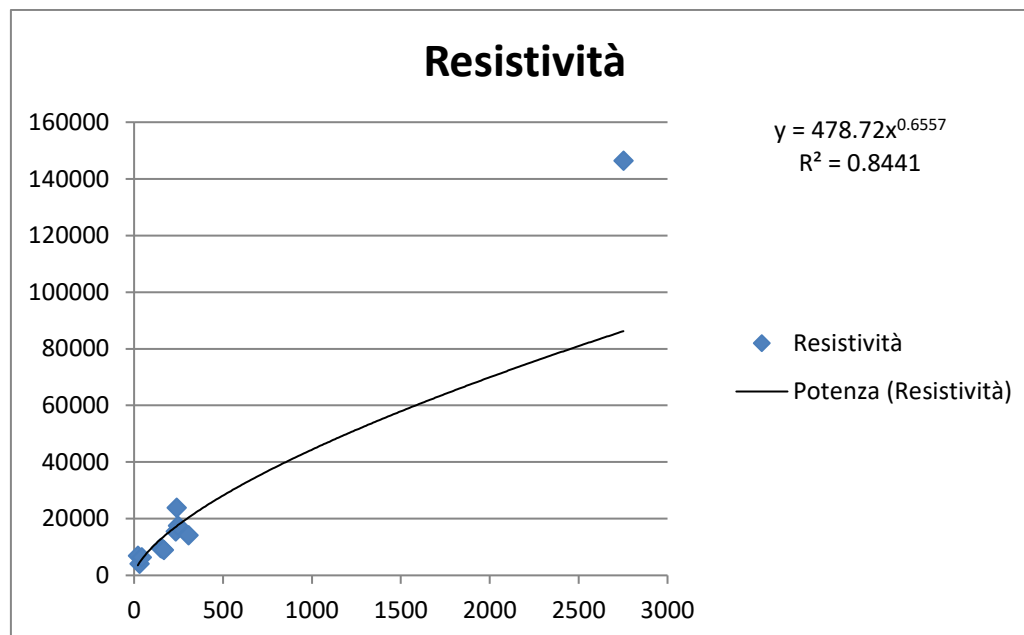
Il **fattore geometrico** g è un valore caratteristico per ogni campione, in quanto dipende dal rapporto tra la superficie minore del campione sulla quale è stata svolta la misura (S) e la lunghezza (L) del campione, secondo la seguente formula:

$$g = \frac{S}{L}$$

La **resistività** (ρ) è stata dunque calcolata in mega ohm per centimetro, applicando la **legge di Ohm** e utilizzando il rispettivo fattore geometrico g :

$$\rho = R g$$

Larghezza [cm]	Lunghezza L [cm]	Superficie S [cm ²]	Fattore geometrico g [cm]	Orario apertura Das	Durata misura
1,5	5	2,25	0,45	09:05	20 s
numero misura	tempo totale [minuti]	tempo parziale [minuti]	resistenza R [M Ω]	resistività ρ [Ω * m]	
1	21	21	1.54	6930	
2	31	10	0.91	4095	
3	43	12	1.41	6345	
4	150	107	2.15	9675	
5	159	9	2.09	9405	
6	168	9	1.98	8910	
7	234	66	3.46	15570	
8	240	6	5.30	23850	
9	247	7	3.91	17595	
10	306	59	3.14	14130	
11	2752	2446	32.54	146430	



Prima di realizzare le prove in cui sono state utilizzate le monete in rame, è stata svolta una prova su queste ultime, misurandone la resistenza (fig. 13). Le monete ossidate hanno mostrato valori di resistività differenti, a seconda che la misura venga effettuata tra i bordi opposti della moneta (con gli elettrodi lontani) o al centro (con gli elettrodi vicini). Le monete ripulite dall'ossidazione hanno invece mostrato valori di resistenza molto bassa anche all'aumentare della distanza degli elettrodi, senza osservare apprezzabili variazioni (fig. 14 e 15). Le monete essendo realizzate in rame, hanno una resistività talmente bassa che non influenza la misura di resistenza del DAS®.

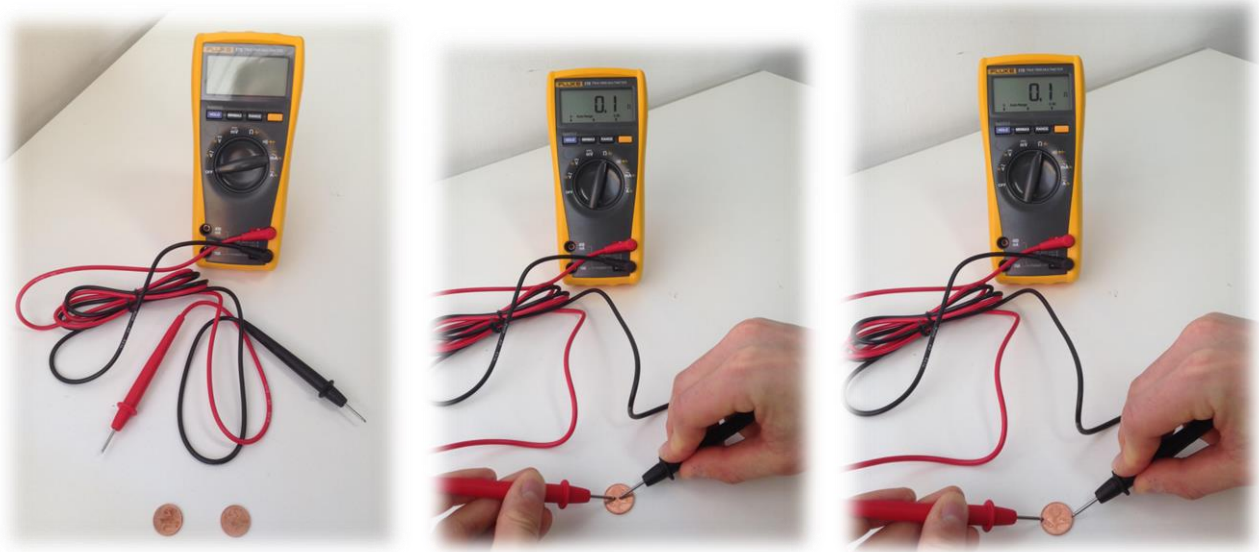


Figura 13: misura della resistenza delle monete in rame.

Figura 14: misura della resistenza delle monete in rame con gli elettrodi posti il più vicino possibile.

Figura 15: misura della resistenza delle monete in rame con gli elettrodi posti il più lontano possibile.

Una volta conclusa l'acquisizione delle misure, che si è protratta per più giorni, sono stati svolti due test, immergendo il campione in due differenti soluzioni acquose: una soluzione acquosa di acqua "dolce" e potabile e una soluzione di acqua satura in cloruro di sodio (ovvero una soluzione in cui il soluto, il comune sale da cucina, non è più in grado di sciogliersi nel solvente, l'acqua). Il campione è stato immerso per 10 minuti.



Figura 16: misura della resistività della soluzione acquosa satura in cloruro di sodio.

Dopo 10 minuti i campioni immersi sono stati recuperati, ed è stata misurata la resistenza in modo puntuale. Il campione immerso in soluzione con cloruro di sodio ha mostrato valori di resistenza inferiori, pari a 0,28 mega ohm, a causa della maggiore conducibilità prodotta dagli ioni disciolti in soluzione (fig. 17). Il campione immerso in soluzione di acqua dolce ha invece mostrato valori di resistenza superiori, pari a 2,19 mega ohm (fig. 18).



Figura 17: misura della resistenza del campione immerso nella soluzione acquosa con cloruro di sodio.



Figura 18: misura della resistenza del campione immerso in acqua “dolce”.

Tabella 5: foglio di acquisizione.

Campione di DAS®				
Lunghezza campione				
Larghezza campione				
Altezza campione				
Superficie				
Data				
Ora (prima misura da inizio essiccamento del campione		Resistenza	Fattore geometrico	Resistività

3.4 METODI DI MISURA DELLA RESISTIVITÀ SUL TERRENO

La **geoelettrica di resistività** è un metodo geofisico che si basa sull'applicazione di correnti elettriche nel sottosuolo mediante due elettrodi (Fig. 20a) detti "**elettrodi di corrente**" e sulla misura della tensione (differenza di potenziale) indotta, mediante altri due elettrodi, detti "**elettrodi di potenziale**". Gli elettrodi, infissi nel terreno, sono collegati mediante un cavo (Fig. 20b, 20c) multipolare (i.e., in grado di collegare simultaneamente molte coppie di elettrodi) a uno strumento detto "georesistivimetro" (Fig. 20d, 20e) che controlla l'erogazione della corrente elettrica e permette di eseguire misure elettriche.

Figura 19: elettrodi di corrente (a), cavo di collegamento tra gli elettrodi (b, c), georesistivimetro (d, e).



La distanza tra gli “elettrodi di corrente” influenza la **profondità d’indagine**, mentre la distanza tra gli “elettrodi di potenziale” influenza la **risoluzione laterale** dell’indagine.

Il parametro che viene misurato è la resistività elettrica delle rocce che dipende dal tipo di roccia, dalla sua porosità, dalla presenza di fluidi (e.g., acqua di falda), dal contenuto ionico di questi. La ricostruzione di **modelli di resistività** permette di caratterizzare le rocce del sottosuolo, individuare **falde acquifere, siti inquinati, strutture sepolte, cavità, faglie**.

I metodi geoelettrici di resistività consistono nella determinazione sperimentale dei valori di resistività elettrica che caratterizzano il sottosuolo. Mediante l’utilizzo di strumentazione appropriata, si effettuano misure con una serie di elettrodi opportunamente posizionati e infissi nel terreno, immettendo corrente elettrica nel terreno (applicando una differenza di potenziale elettrico). La strumentazione per la misura della resistività è formata da:

- un **generatore di corrente elettrica** (i.e., batteria) per l’immissione di corrente nel terreno;
- una serie di **elettrodi** (minimo quattro: A e B elettrodi di corrente, M e N elettrodi di potenziale) (fig. 20a);
- **strumenti per la misura** dell’intensità di corrente (amperometro) immessa nel terreno mediante gli elettrodi A e B e della differenza di potenziale (voltmetro) tra i due elettrodi M e N.

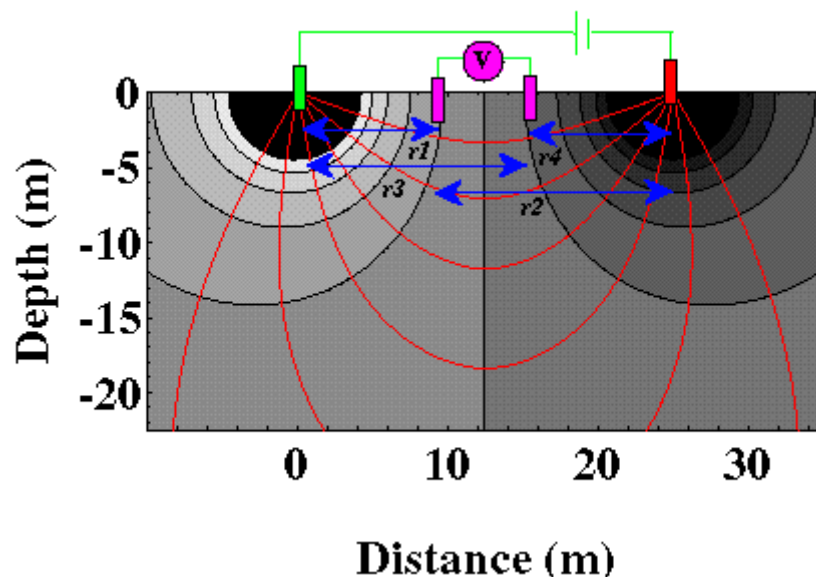


Figura 20: linee di corrente e superfici equipotenziali in un semispazio omogeneo: elettrodi di corrente in verde e rosso, elettrodi di misura in viola.

Per la maggior parte delle applicazioni è utilizzata **corrente continua**. Per evitare fenomeni di **polarizzazione** si **inverte la polarità** della corrente e si effettua una media dei valori misurati. È anche necessario annullare i **potenziali spontanei** naturali e antropici. Può essere utilizzata anche **corrente alternata a bassa frequenza** (60-120 Hz).

Gli elettrodi sono usualmente dei picchetti di **acciaio inox**, **bronzo** o **rame** con lunghezza tipica di 40 cm. Gli elettrodi sono inseriti nel terreno in modo da produrre un **buon contatto**. In caso di **suoli asciutti** o a **granulometria grossolana**, è possibile migliorare il contatto con l'uso di **soluzioni saline** o semplicemente di acqua attorno agli elettrodi. Nel caso di pavimentazioni stradali si possono utilizzare speciali elettrodi costituiti da piastre in acciaio inox poggiate sul pavimento; il contatto elettrodo-pavimentazione è assicurato dall'utilizzo di soluzioni saline.

I dati acquisiti sono valori di **resistività apparente**, diversi dai valori di **resistività reale**: la resistività apparente è definita come la resistività di un semispazio elettricamente **omogeneo ed isotropo** che presenti gli stessi rapporti misurati tra la corrente applicata e la differenza di potenziale per una data disposizione e spaziatura degli elettrodi. L'equazione che esprime la resistività apparente in funzione dell'intensità di corrente, del potenziale e della disposizione degli elettrodi può essere sviluppata attraverso l'esame della distribuzione di potenziale dovuta ad un singolo elettrodo di corrente; da questa, per sovrapposizione, può essere ricostruito l'effetto di una coppia di elettrodi o di ogni altra combinazione. Si consideri un elettrodo puntiforme in un mezzo semi-infinito elettricamente omogeneo, che rappresenta un ipotetico terreno omogeneo: se questo eroga corrente, il potenziale in ogni punto del mezzo o sulla superficie limite del semispazio è dato da:

$$U = \rho \frac{I}{2\pi r}$$

In cui:

U = potenziale in Volt;

ρ = resistività del mezzo in Ohm·m;

r = distanza dall'elettrodo in m;

I = intensità di corrente in Ampere.

Per una coppia di elettrodi, con corrente I nell'elettrodo A e corrente $-I$ nell'elettrodo B, il potenziale in un punto è dato dalla somma algebrica dei singoli contributi:

$$U = \rho \frac{I}{2\pi r_A} - \rho \frac{I}{2\pi r_B} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right]$$

Dove r_A e r_B sono le distanze del punto dagli elettrodi A e B. Tra gli elettrodi M e N viene misurata la differenza di potenziale V . In base all'equazione precedente, la differenza di potenziale risulta così definita:

$$V = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} \right]$$

In cui U_M e U_N sono i potenziali in M e N; AM , BM , BN e AN sono le distanze tra gli elettrodi. La quantità tra parentesi quadra, funzione della spaziatura tra gli elettrodi, può essere indicata con la notazione $1/K$, che permette di riscrivere l'equazione come:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{K}$$

e risolvendo per la resistività:

$$\rho = 2\pi K \frac{V}{I}$$

La resistività del mezzo può quindi essere ricavata dai valori misurati di V , I e dal fattore geometrico K , funzione unicamente della disposizione elettrodica. Nelle misure reali sul terreno, la notazione ρ relativa ad un mezzo fittizio è sostituita da ρ_a o resistività apparente. Il rilievo geoelettrico consiste nell'uso dei valori di resistività apparente derivati da misure di terreno in vari punti e con diverse configurazioni per stimare la resistività reale dei diversi strati e ricostruire spazialmente i loro limiti al di sotto della superficie topografica. Una configurazione di elettrodi con spaziatura costante viene utilizzata per riconoscere variazioni laterali di resistività apparente che possono riflettere variazioni litologiche. Per indagare sui cambiamenti in profondità, si aumenta la spaziatura degli elettrodi.

3.4.1 LA TOMOGRAFIA ELETTRICA

Tra le indagini geoelettriche di resistività, la **tomografia elettrica** (Torrese, 2016; Torrese e Pilla 2015, 2016) permette di ottenere una ricostruzione dettagliata delle variazioni di resistività del sottosuolo. Questo metodo prevede l'acquisizione di un numero elevatissimo di misure elettriche (fig. 21f). I dati acquisiti vengono elaborati mediante un **processo di inversione** che permette di ricostruire modelli **bidimensionali** (sezioni), **tridimensionali** (fig. 21g, 21h) ed effettuare monitoraggi nel tempo (**indagine time-lapse**) utili, ad esempio, per ricostruire la migrazione di un

inquinante nel sottosuolo (fig. 21h, plume di acqua salata di origine naturale che contamina una falda acquifera dell’Oltrepò Pavese) (Bersan et al., 2010; Pilla et al., 2010, 2015; Torrese et al., 2009). In tali modelli, ogni colore è associato a un valore di resistività elettrica del sottosuolo.

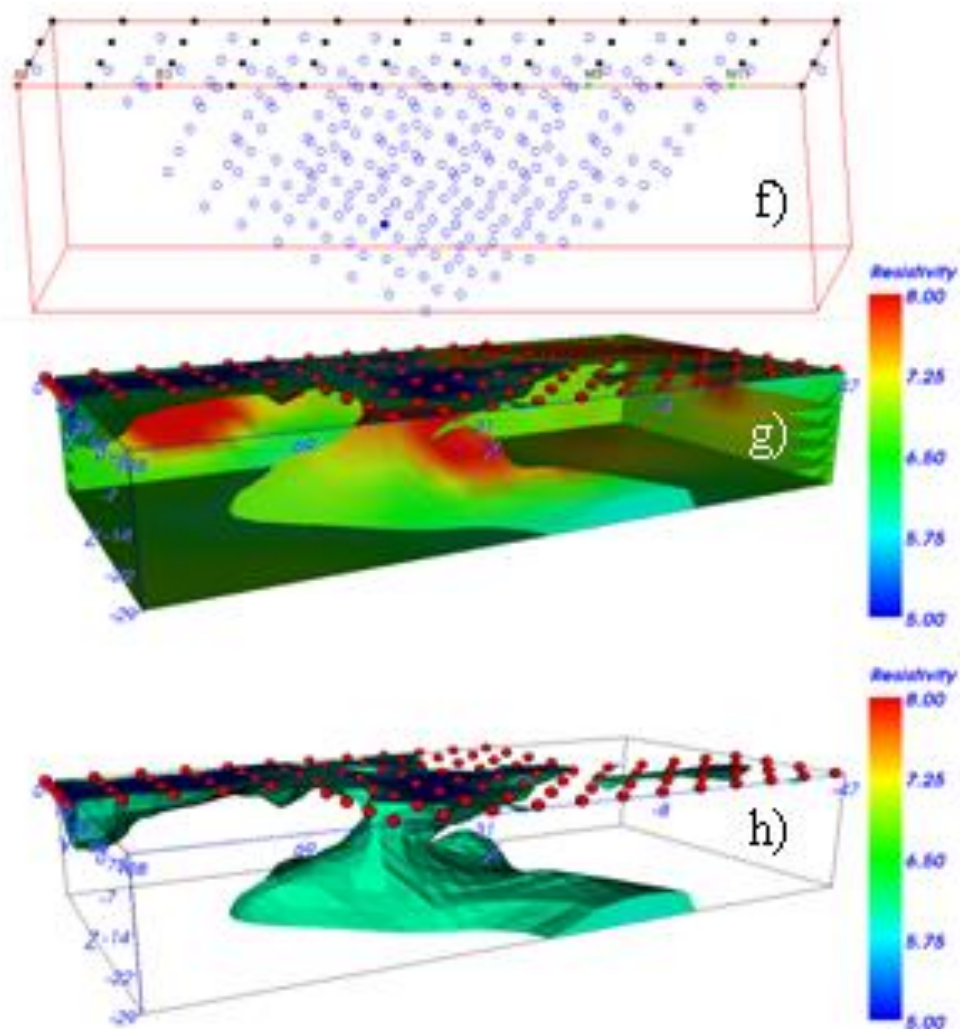


Figura 21: misure elettriche nel sottosuolo (f), ricostruzione del modello 3D del plume di acqua salata in falda (g, h).

3.4.2 IL SITO SPERIMENTALE DEL POLO CRAVINO

Presso il polo universitario “Cravino” è presente un **sondaggio** (fig. 22), ovvero una **perforazione** nel terreno, realizzata nel 2006 dalla ditta di perforazioni SIN G.E.A nell’ambito del corso di aggiornamento professionale (Ordine dei Geologi della Lombardia) “Microzonazione sismica”.

Questo sondaggio è stato realizzato fino alla profondità di 30 m dal piano di campagna e a “**carotaggio continuo**”, ovvero perforando il terreno con un particolare utensile, definito appunto **carotiere**, che permette di realizzare il foro, ma al contempo, campionare e preservare il terreno estratto senza alterarne le proprietà. Con questo metodo è possibile ricostruire la **stratigrafia** del sottosuolo, ovvero realizzare un profilo del sottosuolo che mostri le **proprietà geologiche del terreno** (i.e., litologia, granulometria, tessitura, contenuto in acqua) con la profondità. Inoltre è possibile effettuare delle **prove geotecniche** sulla carota di perforazione, ricavando così le proprietà meccaniche del terreno (i.e., capacità portante, deformazione).

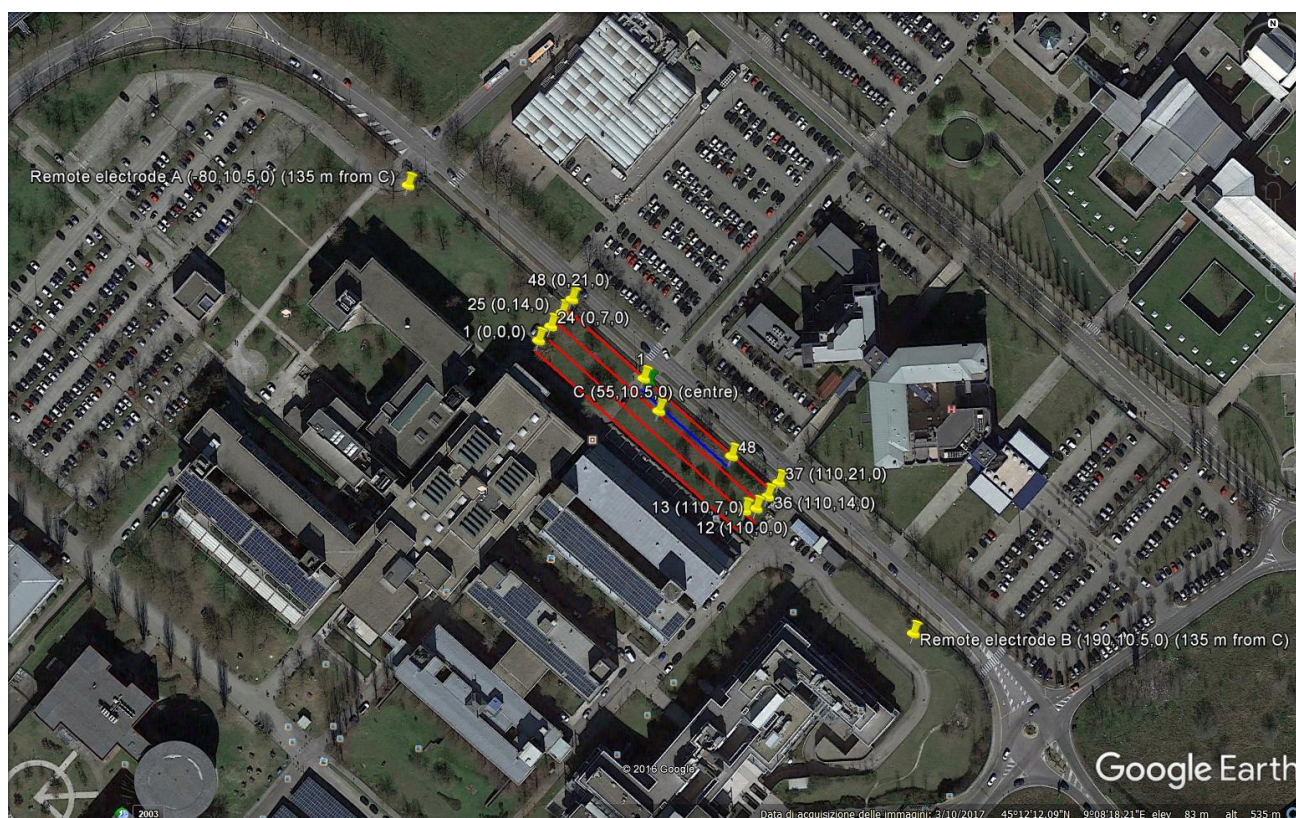


Figura 22: mappa delle indagini presso il sito sperimentale universitario “Cravino”: in blu lo stendimento elettrodo dell’indagine 2-D, in rosso lo stendimento elettrodo dell’indagine 3-D, in giallo gli elettrodi 1, 12, 13, 24, 25, 36, 37, 48 e gli elettrodi remoti; in verde il sondaggio geognostico.

Il foro è stato poi **incamiciato** (i.e., rivestito) con un **tubo in pvc**, per evitarne il crollo. Nonostante la presenza di questo rivestimento è possibile svolgere all’interno del foro indagini geofisiche di tipo sismico, ricavando i tempi di arrivo delle onde sismiche “artificiali” prodotte in superficie o direttamente nel foro, in modo da ricostruire la struttura del sottosuolo sulla base della velocità delle onde sismiche.

Il **modello geofisico/geologico** ottenuto mediante le indagini di tomografia elettrica è **tarato** mediante la stratigrafia del sondaggio: in particolare, le carote di perforazione permettono di meglio **interpretare** (validare) le caratteristiche del sottosuolo, come le rocce e la falda acquifera, previste dal modello geofisico/geologico ottenuto mediante tomografia elettrica.

I risultati della perforazione hanno permesso di ricostruire la stratigrafia del sondaggio nei primi 30 m e di individuare la falda acquifera ad una profondità di 5 m dal piano di campagna come mostrato in figura 23. Le carote campionate nei primi 15 m sono rappresentate in figura 24 (dati tratti dalla tesi di laurea di Boscari, 2005-2006).

Il sondaggio in esame mostra che la litologia prevalente è costituita da sabbie grossolane con ghiaia medio-grossa. Dall'analisi della stratigrafia si nota che sono presenti 3 principali contatti litologici rispettivamente presenti a 1, 3.7 e 9.70 m di profondità dal piano campagna. Il primo contatto è relativo alla presenza di blocchi di cemento a contatto con il materiale di riporto sabbioso ghiaioso sovrastante. Il secondo contatto è relativo alla profondità di 3.7 m che segna il tetto dell'acquifero. Si tratta di un acquifero spesso 6 m e costituito da sabbia media ghiaiosa. A maggiori profondità (9.70 m dal piano campagna) vi è il contatto tra le sabbie che costituiscono l'acquifero e i limi sabbiosi e le sabbie limose sottostanti.

Committente Dipartimento di Scienze della Terra di Pavia	Profondità raggiunta - 30 m.	Quota Ass. P.C. 70 m.	Certificato n°	Pagina 2
Operatore Ditta di perforazioni SIN G.E.A.	Indagine	Note 1	Inizio/Fine Esecuzione 15/05/06_16/05/06	
Responsabile	Sondaggio S62	Tipo Carotaggio a rotazione con carotiere semplice	Tipo Sonda	Coordinate XY

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	Pocket Test kg/cm²	Campioni	Metodo Stabilizzaz	Cass Catalog	Falda	Piezzometro (P) o Inclino metro (I)
-11		Limo sabbioso verde scuro poco consistente	-10.80		1.41 3.46					
-12		Sabbia medio-fine verdescuro-blu poco addensata con tracce di limo	-13.00							
-13		Sabbia medio grigia poco addensata con intercalazioni di lenti di limo centimetriche. Dal campione si nota la presenza di mica bianca. A 14.00m. viene utilizzato il cestello	-15.40							
-14		Sabbia media grigio-chiaro poco addensata con tracce di limo	-17.50							
-15		Sabbia fine limosa giallo ocra	-18.00							
-16		Sabbia grossa debolmente limosa marrone con lenti di sabbia grossa più pulita giallo ocra.	-20.00							
-17										
-18										
-19										
-20										

Committente Dipartimento di Scienze della Terra di Pavia	Profondità raggiunta - 30 m.	Quota Ass. P.C. 70 m.	Certificato n°	Pagina 3
Operatore Ditta di perforazioni SIN G.E.A.	Indagine	Note 1	Inizio/Fine Esecuzione 15/05/06_16/05/06	
Responsabile	Sondaggio S62	Tipo Carotaggio a rotazione con carotiere semplice	Tipo Sonda	Coordinate XY

Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R. Q.D.	Pocket Test kg/cmq	Campioni	Metodo Stabilizzaz	Cass. Catalog	Falda	Piezzometro (P) o Inclinometro (I)
-21		Sabbia fine debolmente limosa giallo-ocra con livelli ondulati mm. tendenti al rosso a circa 20.20m. (ossidi di ferro) Sul campione sono visibili punti più scuri mm. (torba)	-21.00							
-22										
-23		Sabbia media-grossa con tracce di limo giallo ocra con intercalazioni tendenti più al rosso								
-24			-24.00							
-25		Sabbia grossolana pulita giallo ocra con alcuni livelli cm.,mm., di sabbia più fine con tracce di limo giallo-grigio	-24.80							
-26										
-27		Sabbia media grossolana debolmente ghiaiosa giallo ocra con alcuni livelli cm. di sabbia limosa più fine. I grani della ghiaia sono di pezzatura eterogenea, da pochi mm. a cm., fortemente arrotondati e di media sfericità. Sono presenti anche rari livelli di sabbia grossolana tendente al rosso (ossidi di ferro)insieme a locali aggregazioni mm. di materiale tendente al nero (torba)								
-28			-28.00							
-29		Sabbia grossolana pulita con alcuni livelli mm. di sabbia più fine con tracce di limo giallo-grigio. A circa 29.30m. sono presenti alcune lenti mm. di materiale tendente al nero (torba)								
-30										

Figura 23: Stratigrafia del sondaggio



Figura 24: Foto delle cassette catalogatrici del sondaggio.

3.4.3 LE MISURE SPERIMENTALI SUL TERRENO

3.4.3.1 STRUMENTAZIONE

La strumentazione utilizzata per effettuare le misure sperimentali sul terreno presso il sito sperimentale universitario “Cravino” è costituita da:

- georesistivimetro Syscal Junior Switch 48 (fig.23) con ha le seguenti caratteristiche:
 - Corrente di output:
 - Intensità massima fino a 1200 mA
 - Voltaggio fino a 400 V
 - Potenza fino a 100 W
 - Precisione della misura di corrente: 0,5 %
 - Voltaggio di input:
 - Impedenza: 10 Mohm
 - Precisione della misura di voltaggio: 0,5 %
 - Accuratezza della resistività: 0,5 %



Figura 25: Georesistivimetro Syscal Junior Switch 48.

- N.2 cavi di alimentazione per il georesistivimetro (fig. 26)

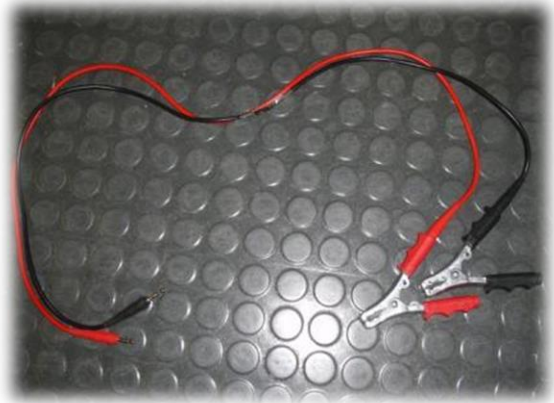


Figura 26: cavi di alimentazione per georesistivimetro.

- N. 4 cavi multipolari (fig. 27)



Figura 27: cavo multipolare.

- N. 2 cavi unipolari per configurazione con elettrodo remoto (fig. 28)



Figura 28: cavo unipolare.

- N. 48 cavi cavetti di connessione (+2 per elettrodi remoti) elettrodo-cavo multipolare con pinze “alligator” e “mueller clip” e (fig. 29)



Figura 29: cavetti di connessione elettrodo-cavo multipolare con pinze “alligator” e “mueller clip”.

- N. 2 scatole di commutazione per giunzione spezzoni di cavo multipolare (fig. 30)



Figura 30: scatole di commutazione.

- N. 48 elettrodi (+2 elettrodi remoti) (fig. 31)



Figura 31: elettrodi.

3.4.3.2 ACQUISIZIONE DEI DATI

L'indagine geoelettrica ha previsto una **acquisizione 2-D multi elettrodo (profilo)** in configurazione elettrodica Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo per un totale di 1009 misure. Il layout sperimentale è costituito da 48 elettrodi disposti lungo un profilo con spaziatura di 1 m per un totale di 47 m lineari di stendimento multi elettrodico. La lunghezza di tale stendimento è sufficiente per raggiungere una **profondità d'investigazione** di almeno 7 m.

La fase di acquisizione è preceduta dalla **verifica delle di resistenze di contatto**, ovvero quel valore di resistenza non del mezzo da investigare ma del contatto elettrodo-terreno. Dopo aver verificato il buon contatto elettrico tra gli elettrodi e il mezzo da investigare si procede alla fase di acquisizione. Il georesistivimetro è dotato di un sistema di **gestione automatica degli elettrodi**, in grado cioè di commutare gli elettrodi in elettrodi di immissione di corrente (punti di energizzazione del terreno) e in elettrodi di misura del potenziale elettrico con tutte le possibili **combinazioni quadripolari**.

Nel sito sperimentale è stata acquisita anche un'indagine **3-D multi elettrodo** in configurazione elettrodica Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Polo-Polo per un totale di 1441 misure. Il layout sperimentale è costituito da 48 elettrodi disposti secondo una geometria tipo "snake" con spaziatura di 10 m per un totale di 470 m lineari di stendimento multi elettrodico. La lunghezza di tale stendimento è sufficiente per raggiungere una **profondità d'investigazione** di 19 m.







3.4.3.2 ELABORAZIONE E RESTITUZIONE DEI DATI

I dati ottenuti in fase di acquisizione consentono la costruzione di una matrice di valori di resistività la cui inversione, mediante complessi **algoritmi matematici**, restituisce il **modello 3-D di distribuzione di resistività elettrica** del mezzo investigato. Le misure di resistività acquisite sono elaborate tramite codice di calcolo ERTLlab (Multi-Phase Technologies LLC, Geostudi Astier srl) basato su una modellazione agli elementi finiti tetraedici (FEM).



4 RISULTATI

4.1 MISURE SPERIMENTALI SU CAMPIONI DI DAS®

Le misure di resistenza sono state riportate in un foglio Excel, all'interno del quale sono state elaborate, ricavando oltre al valore di resistività anche un **grafico a dispersione** dei valori di resistività al variare del tempo. Per ogni grafico è stata inserita una **funzione di tendenza** di “best fitting” con il rispettivo R^2 . In statistica l' R^2 , detto anche **coefficiente di determinazione**, è una proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato: questo varia tra 0 ed 1: quando assume il valore 0, il modello utilizzato (ovvero la funzione di tendenza) non “spiega” per nulla i dati (e quindi non li “fitta”); quando assume il valore 1 il modello spiega perfettamente i dati. Una funzione di potenza interpola al meglio i dataset ottenuti da tutti test svolti. Vengono di seguito riportati i dati per ogni test svolto.

Tabella 6: Test 1- Misura puntuale in differenti posizioni sulle due superfici di misura.

Larghezza [cm]		Lunghezza L [cm]	Superficie S [cm ²]	Fattore geometrico g [cm]	Orario apertura DAS®	Durata misura
1,5		5	2,25	0,45	09:45	20 s
numero misura	tempo totale [minuti]	tempo parziale [minuti]	resistenza R [M Ω]	resistività ρ [Ω * m]	$g = \frac{S}{L}$ $\rho = R g$	
1	9	9	1,75	7875		
2	11	2	1,57	7065		
3	14	3	1,6	7200		
4	16	2	2,05	9225		
5	18	2	1,97	8865		
6	21	3	1,86	8370		
7	24	3	2,16	9720		
8	26	2	1,92	8640		
9	28	2	2,37	10665		
10	30	2	1,99	8955		
11	32	2	2,08	9360		
12	34	2	1,96	8820		
13	36	2	2,07	9315		
14	38	2	2,38	10710		
15	40	2	2,02	9090		
16	42	2	2,35	10575		
17	44	2	2,6	11700		
18	46	2	2,42	10890		
19	48	2	2,24	10080		
20	50	2	2,15	9675		
21	52	2	2,5	11250		

22	54	2	2,59	11655
23	56	2	2,45	11025
24	58	2	2,36	10620
25	60	2	2,39	10755
26	62	2	2,37	10665
27	64	2	2,7	12150
28	66	2	2,6	11700
29	68	2	2,08	9360
30	70	2	2,02	9090
31	80	10	2,9	13050
32	90	10	2,18	9810
33	100	10	2,68	12060
34	110	10	2,77	12465
35	120	10	2,26	10170
36	130	10	2,62	11790
37	140	10	2,34	10530
38	150	10	2,22	9990
39	160	10	2,73	12285
40	170	10	3,27	14715
41	180	10	2,93	13185
42	190	10	2,6	11700
43	250	60	2,32	10440
44	260	10	2,48	11160
45	270	10	2,81	12645
46	280	10	2,15	9675
47	290	10	2,3	10350
48	300	10	2,18	9810
49	310	10	2,16	9720
50	320	10	2,14	9630
51	330	10	2,18	9810
52	340	10	2,67	12015
53	350	10	2,56	11520
54	380	30	2,75	12375
55	390	10	2,7	12150
56	400	10	2,75	12375
57	410	10	2,7	12150
58	420	10	2,51	11295
59	430	10	2,42	10890
60	440	10	2,7	12150
61	450	10	2,5	11250
62	460	10	2,43	10935
63	470	10	2,35	10575
64	1085	615	10,89	49005
65	1095	10	24,09	108405
66	1105	10	45,47	204615

67	1205	100	44,1	198450
68	1225	20	51,47	231615
69	1245	20	45,35	204075
70	1265	20	47,08	211860
71	1285	20	43,94	197730
72	1305	20	44,62	200790
73	1325	20	46,8	210600
74	1345	20	40,86	183870
75	1395	50	38,39	172755
76	1405	10	43,06	193770
77	1525	120	34,51	155295
78	1555	30	27,16	122220
79	1575	20	39,75	178875
80	1595	20	40,12	180540

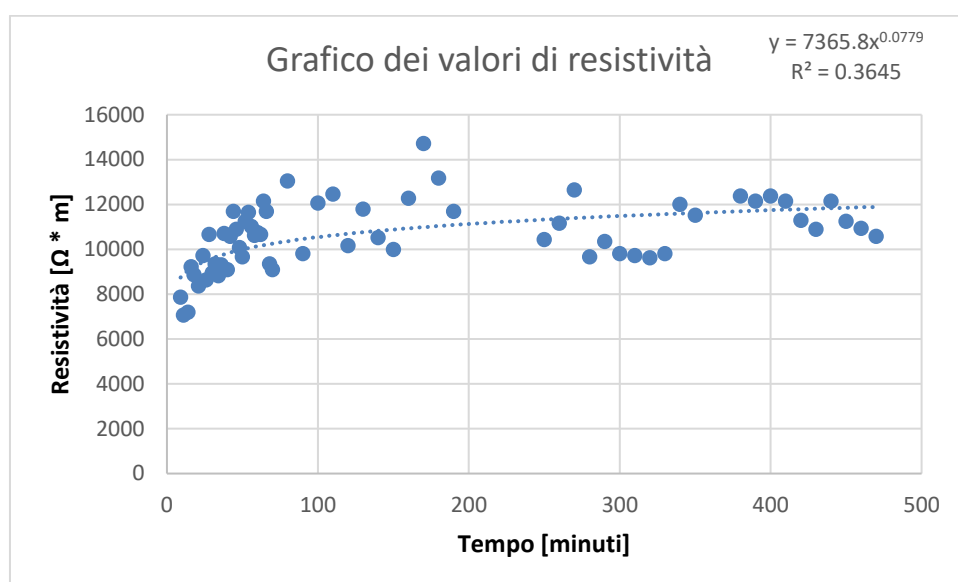


Figura 32: variazione della resistività del DAS® nel tempo con funzione interpolatrice di tendenza.

Il plot dei dati ha interessato una parte del dataset, più facilmente interpretabile, caratterizzato da valori massimi di tempo pari a 470 minuti. Per la funzione di tendenza di tipo potenziale è stato ottenuto un valore di R^2 pari a 0,364.

Tabella 7: Test 2- Misura puntuale nella medesima posizione su entrambe le superfici di misura.

Larghezza [cm]	Lunghezza L [cm]	Superficie S [cm ²]	Fattore geometrico g [cm]	Orario apertura Das	Durata misura
1,5	5	2,25	0,45	09:05	20 s
numero misura	tempo totale [minuti]	tempo parziale [minuti]	resistenza R [M Ω]	resistività ρ [Ω * m]	
1	5	5	1,85	8325	
2	10	5	2,04	9180	
3	15	5	2,38	10710	

$$g = \frac{S}{L}$$

$$\rho = R g$$

4	20	5	2,51	11295
5	25	5	2,38	10710
6	30	5	2,28	10260
7	35	5	2,09	9405
8	40	5	2,03	9135
9	45	5	1,96	8820
10	50	5	2,28	10260
11	55	5	1,66	7470
12	60	5	2,04	9180
13	65	5	2,19	9855
14	75	10	1,9	8550
15	85	10	1,41	6345
16	95	10	1,39	6255
17	105	10	2,06	9270
18	115	10	1,33	5985
19	125	10	1,68	7560
20	135	10	1,36	6120
21	155	20	1,47	6615
22	165	10	1,6	7200
23	215	50	1,54	6930
24	225	10	1,83	8235
25	245	20	1,49	6705
26	275	30	1,36	6120
27	295	20	1,9	8550
28	315	20	1,69	7605
29	345	30	2,24	10080
30	365	20	2,42	10890
31	385	20	2,03	9135
32	405	20	2,3	10350
33	425	20	2,01	9045
34	445	20	2,16	9720
35	1375	930	2,44	10980
36	1425	50	2,68	12060
37	1465	40	2,23	10035
38	1485	20	2,84	12780
39	1505	20	2,65	11925
40	1535	30	2,94	13230
41	1555	20	2,37	10665
42	1575	20	2,39	10755
43	1595	20	2,56	11520
44	1615	20	2,88	12960
45	1635	20	2,92	13140
46	1655	20	2,18	9810
47	1675	20	2,85	12825
48	1695	20	2,3	10350

49	1715	20	2,24	10080
50	1735	20	2,92	13140
51	1755	20	2,92	13140
52	1775	20	2,53	11385
53	1795	20	2,71	12195
54	1815	20	2,86	12870
55	1835	20	2,8	12600
56	1855	20	2,79	12555

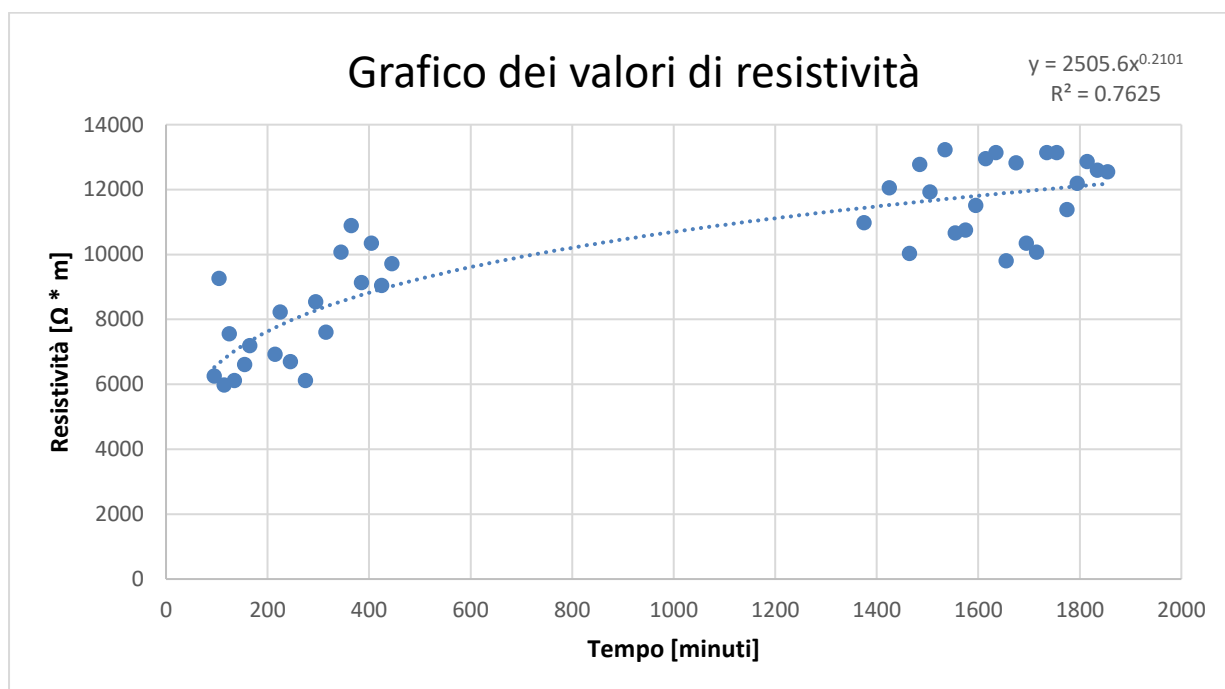


Figura 33: variazione della resistività del DAS® nel tempo con funzione interpolatrice di tendenza.

Il plot dei dati ha interessato una parte del dataset, più facilmente interpretabile, caratterizzato da valori minimi di tempo pari a 95 minuti. Per la funzione di tendenza di tipo potenziale è stato ottenuto un valore di R^2 pari a 0.762.

Tabella 8: Test 3- Misura areale mediante monete in rame ossidate sulle due superfici di misura.

Larghezza [cm]		Lunghezza L [cm]	Superficie S [cm ²]	Fattore geometrico g [cm]	Orario apertura Das	Durata misura
1,5		5	2,25	0,45	09:05	20 s
numero misura	tempo totale [minuti]	tempo parziale [minuti]	resistenza R [M Ω]	resistività ρ [Ω * m]	$g = \frac{S}{L}$ $\rho = R g$	
1	5	5	0,95	4275		
2	10	5	0,42	1890		
3	15	5	0,24	1080		
4	20	5	0,28	1260		
5	25	5	0,62	2790		

6	30	5	0,49	2205
7	35	5	0,45	2025
8	40	5	0,48	2160
9	45	5	0,47	2115
10	50	5	0,46	2070
11	55	5	0,51	2295
12	60	5	0,48	2160
13	65	5	0,12	540
14	75	10	0,42	1890
15	85	10	0,45	2025
16	95	10	0,35	1575
17	105	10	0,56	2520
18	115	10	0,44	1980
19	125	10	0,62	2790
20	135	10	0,52	2340
21	155	20	0,63	2835
22	165	10	0,75	3375
23	215	50	0,83	3735
24	225	10	1,06	4770
25	245	20	1,26	5670
26	275	30	0,69	3105
27	295	20	1,25	5625
28	315	20	0,81	3645
29	345	30	1,01	4545
30	365	20	1,59	7155
31	385	20	1,05	4725
32	405	20	1,52	6840
33	425	20	1,18	5310
34	445	20	0,93	4185
35	1375	930	1,35	6075
36	1425	50	2,33	10485
37	1465	40	1,42	6390
38	1485	20	2,47	11115
39	1505	20	1,94	8730
40	1535	30	2,14	9630
41	1555	20	2,1	9450
42	1575	20	2,2	9900
43	1595	20	2,02	9090
44	1615	20	2,65	11925
45	1635	20	2,92	13140
46	1655	20	2,57	11565
47	1675	20	2,64	11880
48	1695	20	8,57	38565
49	1715	20	3,66	16470

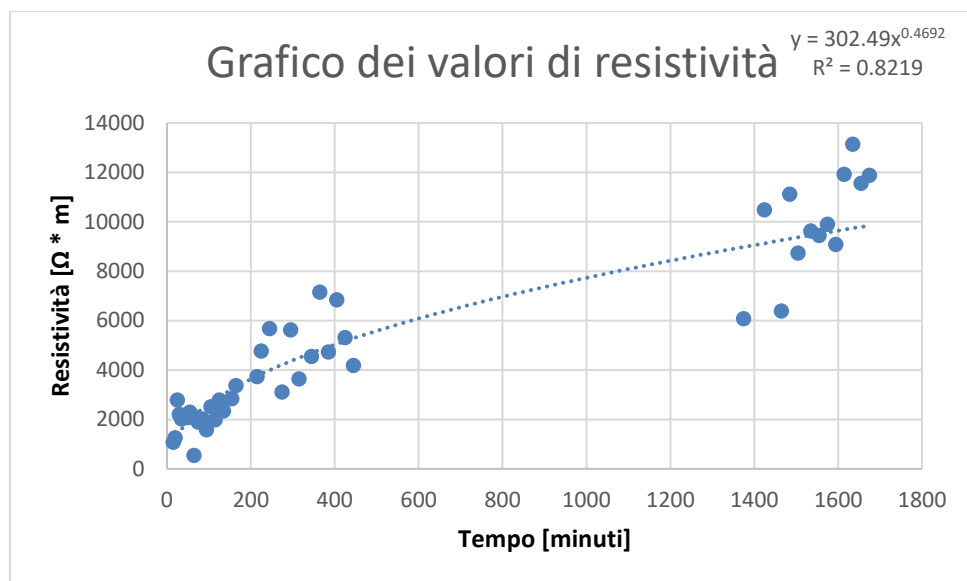


Figura 34: variazione della resistività del DAS® nel tempo con funzione interpolatrice di tendenza.

Il plot dei dati ha interessato una parte del dataset, più facilmente interpretabile, caratterizzato da valori di tempo compreso tra 15 minuti e 1675 minuti. Per la funzione di tendenza di tipo potenziale è stato ottenuto un valore di R^2 pari a 0,821.

Tabella 9: Test 4- Misura areale mediante monete in rame sulle due superfici di misura.

Larghezza [cm]		Lunghezza L [cm]	Superficie S [cm ²]	Fattore geometrico g [cm]	Orario apertura Das	Durata misura
1,5		5	2,25	0,45	09:45	20 s
numero misura	tempo totale [minuti]	tempo parziale [minuti]	resistenza R [M Ω]	resistività ρ [Ω * m]	$g = \frac{S}{L}$ $\rho = R g$	
1	8	8	0,1	450		
2	10	2	0,12	540		
3	12	2	0,12	540		
4	14	2	0,15	675		
5	16	2	0,14	630		
6	18	2	0,14	630		
7	20	2	0,07	315		
8	22	2	0,14	630		
9	24	2	0,1	450		
10	26	2	0,16	720		
11	28	2	0,11	495		
12	30	2	0,07	315		
13	32	2	0,23	1035		
14	34	2	0,23	1035		
15	36	2	0,24	1080		
16	38	2	0,2	900		
17	40	2	0,23	1035		

18	42	2	0,19	855
19	44	2	0,2	900
20	46	2	0,24	1080
21	48	2	0,17	765
22	50	2	0,22	990
23	52	2	0,17	765
24	54	2	0,14	630
25	56	2	0,1	450
26	58	2	0,11	495
27	60	2	0,15	675
28	62	2	0,14	630
29	64	2	0,15	675
30	66	2	0,11	495
31	68	2	0,16	720
32	79	11	0,12	540
33	119	40	0,3	1350
34	139	20	0,13	585
35	149	10	0,16	720
36	159	10	0,18	810
37	179	10	0,19	855
38	229	10	0,11	495
39	239	50	0,11	495
40	249	10	0,06	270
41	259	10	0,04	180
42	289	10	0,03	135
43	299	30	0,16	720
44	309	10	0,09	405
45	319	10	0,09	405
46	329	10	0,24	1080
47	339	10	0,2	900
48	349	10	0,12	540
49	359	10	0,11	495
50	369	10	0,11	495
51	379	10	0,09	405
52	389	10	0,18	810
53	399	10	0,17	765
54	409	10	0,1	450
55	419	10	0,11	495
56	429	10	0,12	540
57	439	10	0,11	495
58	449	10	0,12	540
59	459	10	0,14	630
60	469	10	0,12	540
61	479	10	0,09	405
62	489	10	0,08	360

63	499	10	0,11	495
64	509	10	0,14	630
65	519	10	0,07	315
66	1099	10	0,09	405
67	1119	580	0,09	405
68	1139	20	0,14	630
69	1159	20	0,13	585
70	1179	20	0,16	720
71	1199	20	0,2	900
72	1219	20	0,18	810
73	1239	20	0,31	1395
74	1259	20	0,19	855
75	1279	20	0,83	3735
76	1299	20	0,7	3150
77	1319	20	0,78	3510
78	1399	20	0,55	2475
79	1419	80	0,89	4005
80	1439	20	0,89	4005
81	1459	20	0,74	3330
82	1479	20	0,32	1440
83	1499	20	0,24	1080
84	1519	20	0,23	1035
85	1539	20	0,32	1440
86	1559	20	0,58	2610
87	1579	20	0,57	2565
88	1599	20	0,56	2520
89	1619	20	0,52	2340
90	1679	20	0,48	2160
91	1679	60	0,45	2025

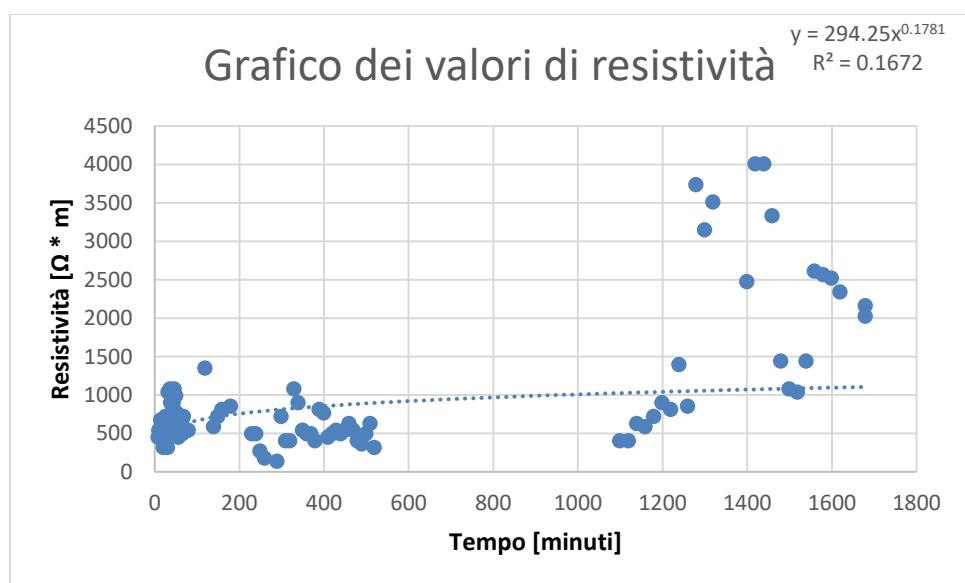


Figura 35: variazione della resistività del DAS® nel tempo con funzione interpolatrice di tendenza.

Il plot dei dati ha interessato l'intero dataset. Per la funzione di tendenza di tipo potenziale è stato ottenuto un valore di R^2 pari a 0,167.

4.2 MISURE SPERIMENTALI SUL TERRENO

Le misure di resistività effettuate sul terreno hanno permesso la ricostruzione dei principali corpi geologici presenti nei primi 19 metri di sottosuolo nel sito sperimentale universitario del polo Cravino:

- uno strato di terreno coltivo e deposito di riporto non saturo dal piano campagna ad 1 metro di profondità con resistività compresa tra $100\text{-}680\ \Omega\times\text{m}$;
- uno strato di deposito di riporto sabbioso ghiaioso parzialmente saturo d'acqua da 1 m a 3.70 m dal piano campagna con resistività compresa tra $80\text{-}100\ \Omega\times\text{m}$;
- uno strato di sabbie ghiaiose sature da 3.70 a 9.70 m di profondità dal piano campagna con resistività compresa tra $45\text{-}60\ \Omega\times\text{m}$;
- depositi limoso-sabbiosi e sabbioso-limosi saturi d'acqua da 9.70 a 20 m di profondità dal piano campagna con resistività compresa tra $12\text{-}45\ \Omega\times\text{m}$.

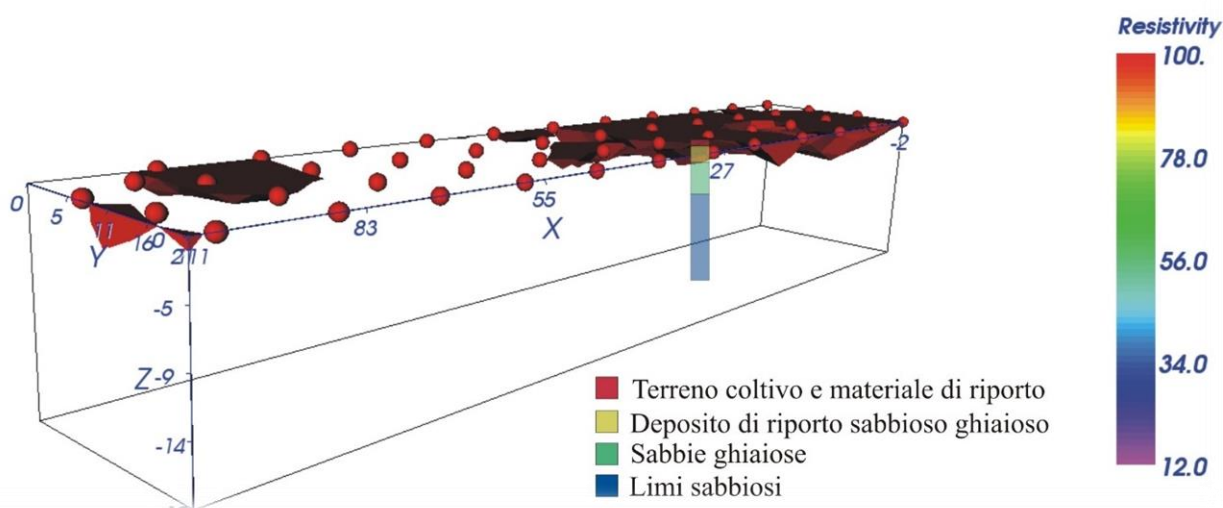


Figura 306: modello inverso di resistività, range $100\text{-}680\ \Omega\times\text{m}$, depositi di riporto non saturi d'acqua.

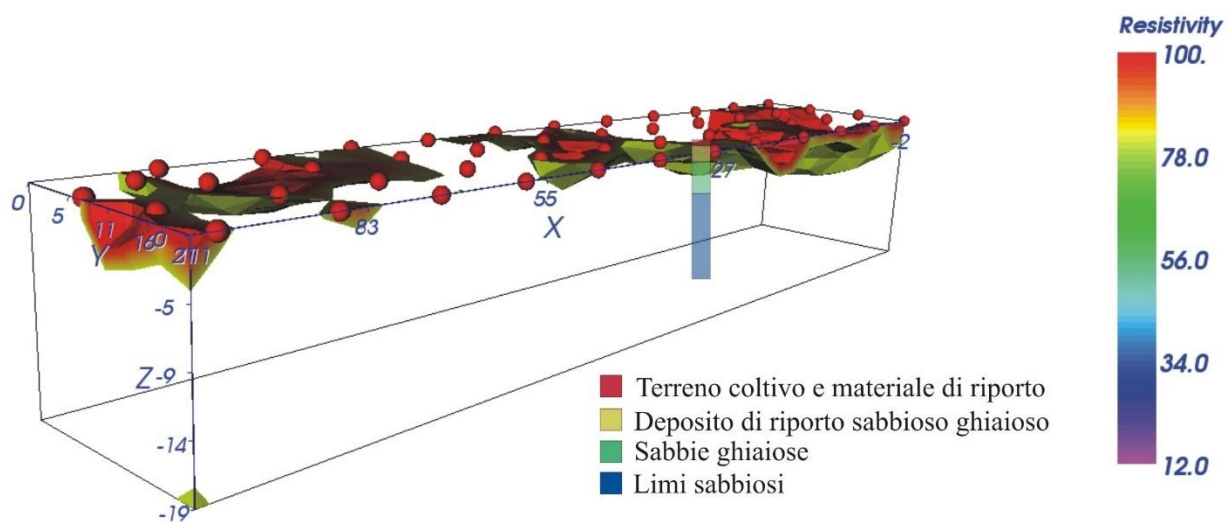


Figura 317: modello inverso di resistività, range 80-100 $\Omega \times m$, depositi di riporto parzialmente saturi d'acqua.

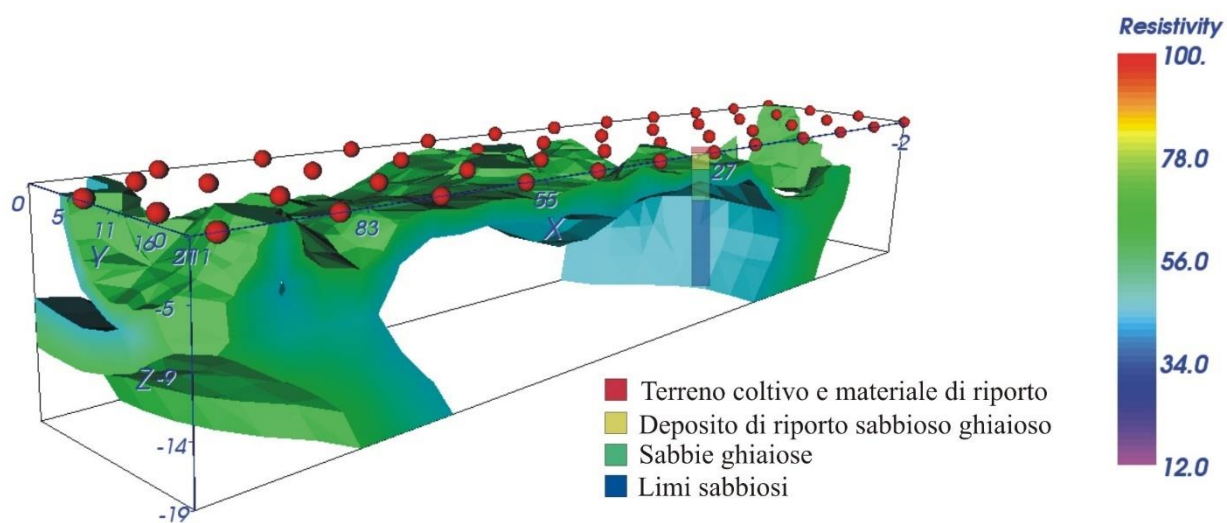


Figura 328: modello inverso di resistività, range 45-60 $\Omega \times m$, sabbia con ghiaia satura d'acqua.

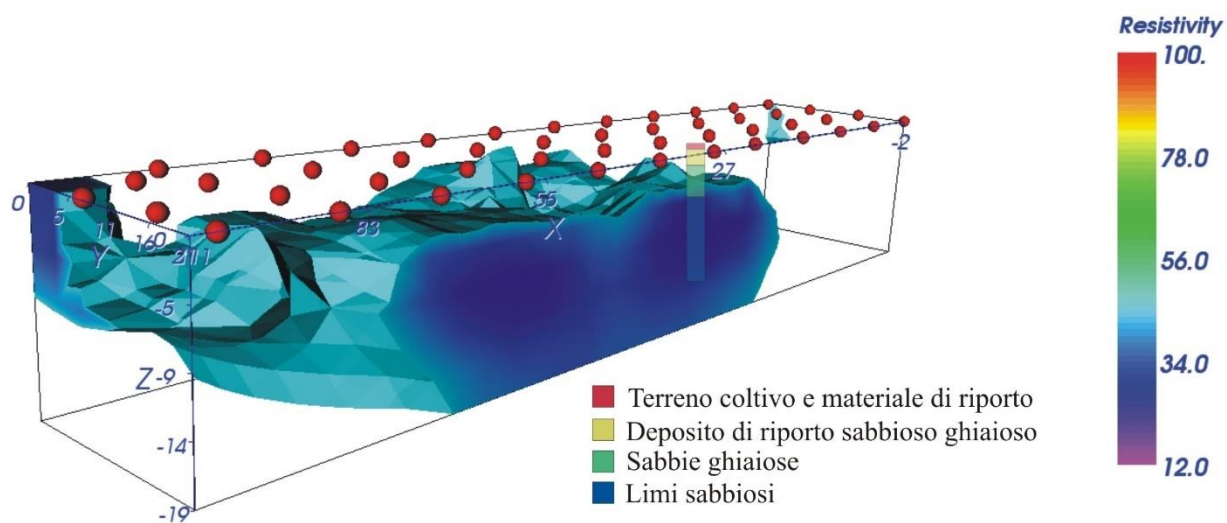


Figura 339: modello inverso di resistività, range 12-45 $\Omega \times m$, depositi limoso-sabbiosi e sabbioso-limosi saturi d'acqua.

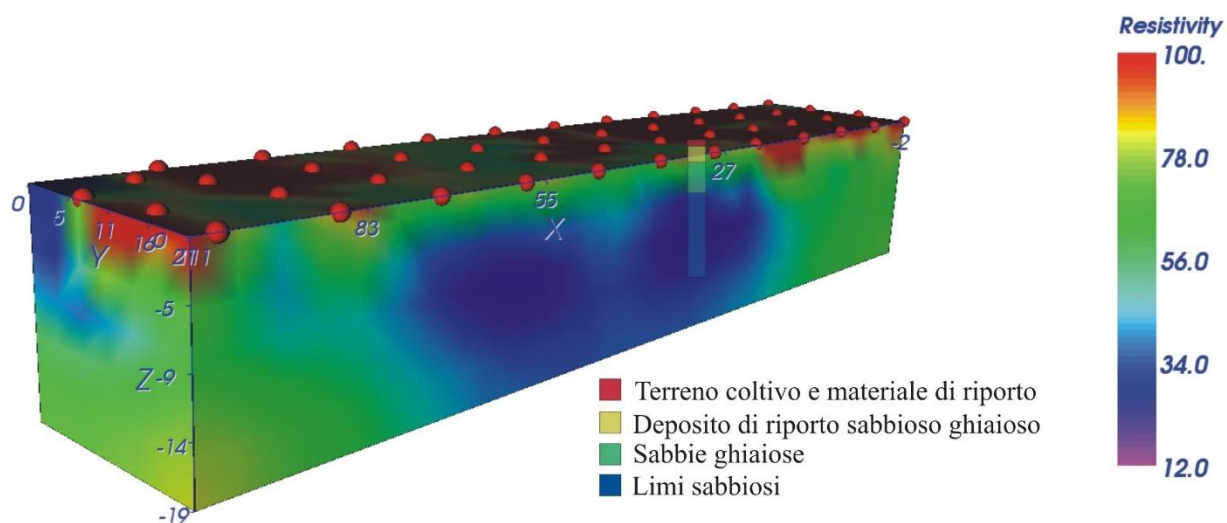


Figura 4034: modello inverso di resistività, range 100-680 $\Omega \times m$, tutti i depositi.

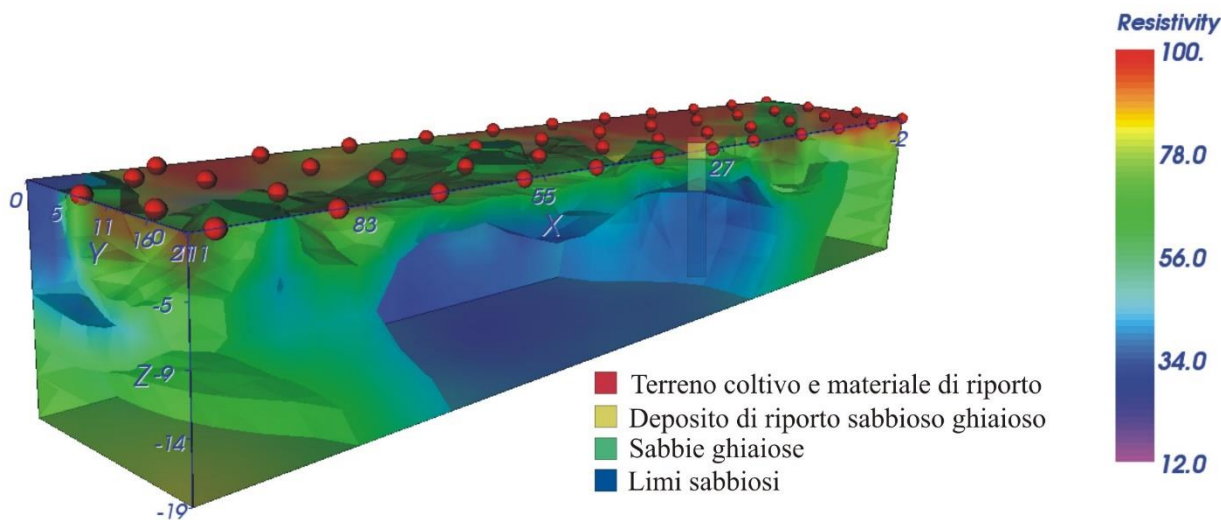


Figura 4135: modello inverso di resistività, range 45-60 $\Omega \times m$ (sabbia con ghiaia satura d'acqua) in evidenza sul range 100-680 $\Omega \times m$ (tutti i depositi).

5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Per quanto riguarda le misure di resistività effettuate in laboratorio su campioni, è possibile dedurre le seguenti osservazioni:

- difficoltà nel condurre misure di resistività dovuta al contatto variabile durante l'essiccamento del campione di DAS®.

- la misura è sensibile al tempo di contatto tra gli elettrodi e le superfici del campione: infatti, all'aumentare del tempo di contatto, il valore di resistività tende a diminuire a causa della migrazione dei fluidi interni al campione indotta dalla pressione degli elettrodi.

- se il campione è totalmente essiccato la saturazione in acqua provoca una drastica diminuzione di resistività del DAS® che assume il valore di resistività del liquido (sia acqua dolce, sia acqua salata); questo fenomeno è dovuto alla porosità del materiale e all'interconnessione dei pori in esso contenuti.

- Dal terzo giorno di monitoraggio non è stato più possibile effettuare la lettura di resistenza sul campione a causa del raggiungimento (per essiccamento) di valori di resistenza troppo elevati per la strumentazione utilizzata. Al fine di misurare valori così elevati di resistenza potrebbe essere utilizzata strumentazione da banco appropriata costituita da generatore di corrente, amperometro e voltmetro.

- La funzione di tendenza che interpola al meglio i dataset ottenuti da tutti test svolti è la funzione di potenza.

Per quanto riguarda le misure di resistività effettuate sul terreno particolare cura deve essere prevista per assicurare un buon contatto elettrico tra elettrodo e terreno, soprattutto in presenza di mezzi grossolani e asciutti. La resistenza di contatto può essere diminuita utilizzando delle soluzioni acquose saline. I risultati delle misure di resistività effettuate sul terreno mostrano congruità con la stratigrafia del sondaggio geognostico a carotaggio continuo effettuato nel sito sperimentale universitario del polo Cravino, per quanto concerne sia la presenza di differenti unità litologiche sia la presenza di falda acquifera.

6 CONCLUSIONI

Il laboratorio PLS ha permesso di comprendere i metodi utilizzati per la misura della resistività elettrica dei materiali sia in laboratorio che sul terreno.

Le misure sperimentali su campioni hanno permesso di osservare l'aumento di resistività elettrica che si verifica durante l'essiccamento di un mezzo poroso e il conseguente indurimento.

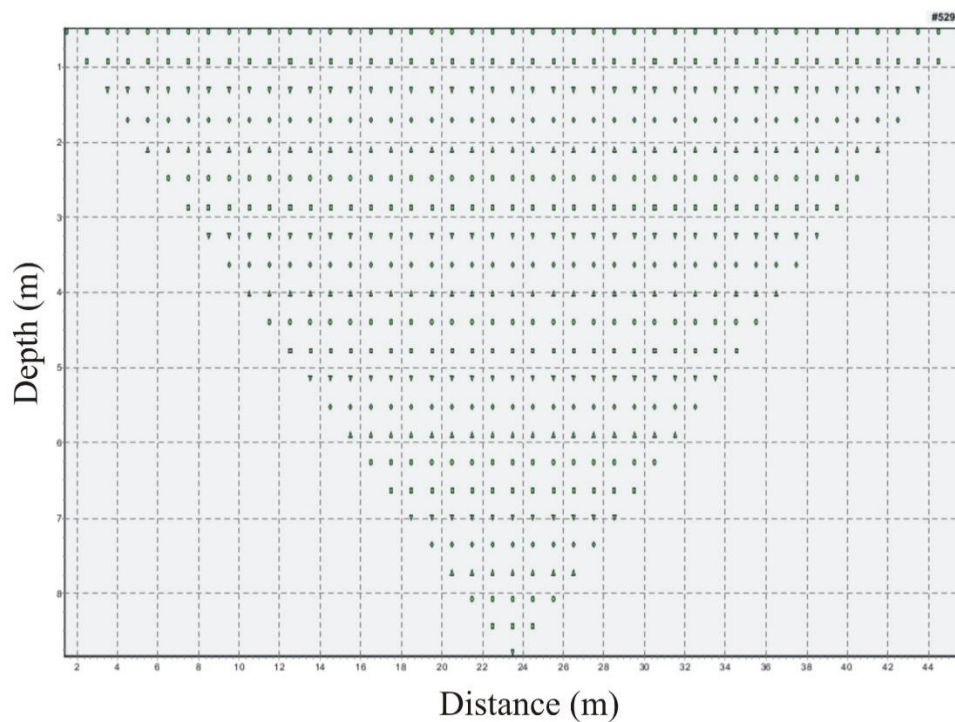
Le misure sperimentali effettuate sul terreno prevedono una maggiore complessità sia metodologica che interpretativa. È stato ricostruito il modello 3-D geofisico-geologico di sottosuolo del sito sperimentale universitario "Cravino": sono state riconosciute differenti unità litologiche e la presenza di falda acquifera. I risultati delle misure geofisiche mostrano congruità con la stratigrafia del sondaggio geognostico a carotaggio continuo effettuato presso lo stesso sito.

BIBLIOGRAFIA

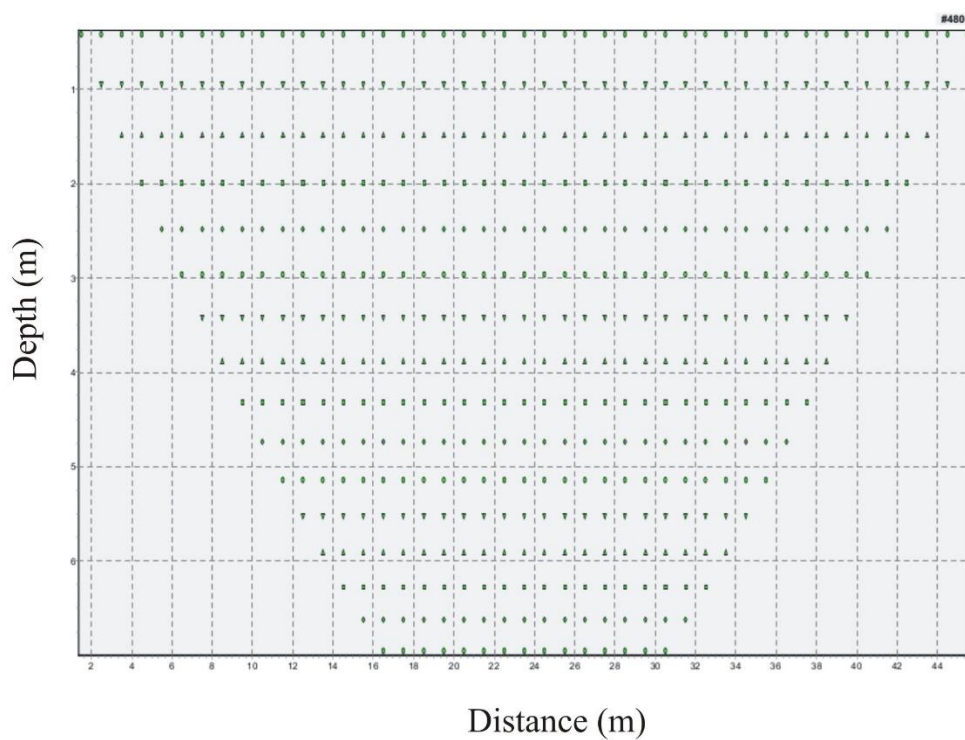
- Bersan M., Pilla G., Dolza G., Torrese P. & Ciancetti G., 2010. The uprising of deep saline waters into the Oltrepò Pavese (Northern Italy) aquifer: early results. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1, 7-22.
- Boscari Maurizio – "Caratterizzazione geologico-tecnica del sottosuolo dell'area di Via Ferrata (PV)". Tesi di laurea di 1° livello in Geologia e Risorse Naturali, A.A. 2005-2006 Relatore: C. Meisina.
- Pilla G., Torrese P. & Bersan M., 2010. Application of hydrochemical and preliminary geophysical surveys within the study of the saltwater uprising occurring in the Oltrepò Pavese plain aquifer. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, 51, 4, 301-323.
- Pilla G., Torrese P., Bersan M., 2015. The Uprising of Deep Saline Paleo-Waters into the Oltrepò Pavese Aquifer (Northern Italy): Application of Hydro-Chemical and Shallow Geophysical Surveys. *Engineering Geology for Society and Territory*, Volume 3, 393-397.
- Scotellaro C., 2006. Influenza delle argille sulle proprietà elastiche ed elettriche di mezzi eterogenei e porosi ed applicazione del Modello Elettrosismico, Tesi di dottorato in Scienze della Terra, presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Torrese P., 2016. Resistivity imaging of salt paleo-water contaminations: comparing 1D, different array 2D and 3D methods at the San Re test site (Northern Italy). *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Volume 2016, pp. 626-634.
- Torrese P., Pilla G., 2015. Comparison between VLF-EM and resistivity anomalies associated with salt paleo-waters contamination in an alluvial aquifer: the San Re test site (Northern Italy). *28th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2015, SAGEEP 2015*, pp. 664-672.
- Torrese P., Pilla G., 2016. Time-lapse 3D ERT imaging of a brackish paleo-water contamination at the alluvial aquifer of the San Re test site (Northern Italy). *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Volume 2016, pp. 635-643.
- Torrese P., Pilla G., Bersan M., Rainone M.L., Ciancetti G., 2009. Mapping the uprising of highly mineralized waters occurring along a fault zone in the "Oltrepò Pavese" plain upper aquifer (Northern Italy) using VLF-EM survey. *Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2009, SAGEEP 2009*, 749-760, Fort Worth, TX-USA, 29 March-2 April 2009.

ALLEGATI

Sequenza elettroica dell'**acquisizione 2-D multi elettrodo** in configurazione Wenner-Schlumberger.

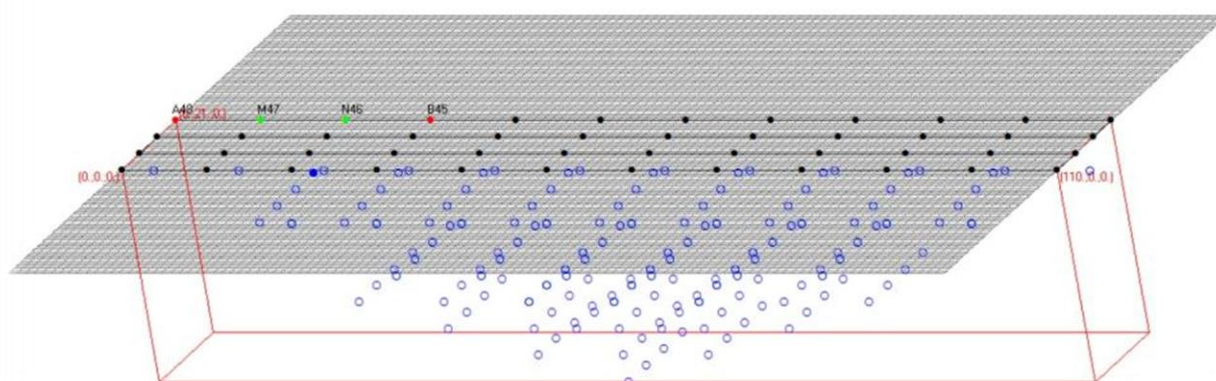


Sequenza elettroica dell'**acquisizione 2-D multi elettrodo** in configurazione Dipolo-Dipolo.

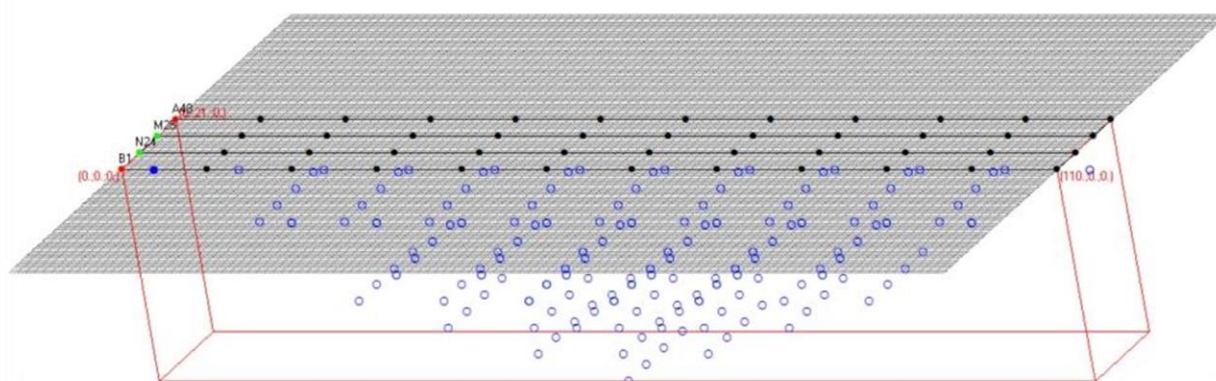


Sequenza elettroica dell'acquisizione 3-D multielettrodo in configurazione Wenner-Schlumberger.

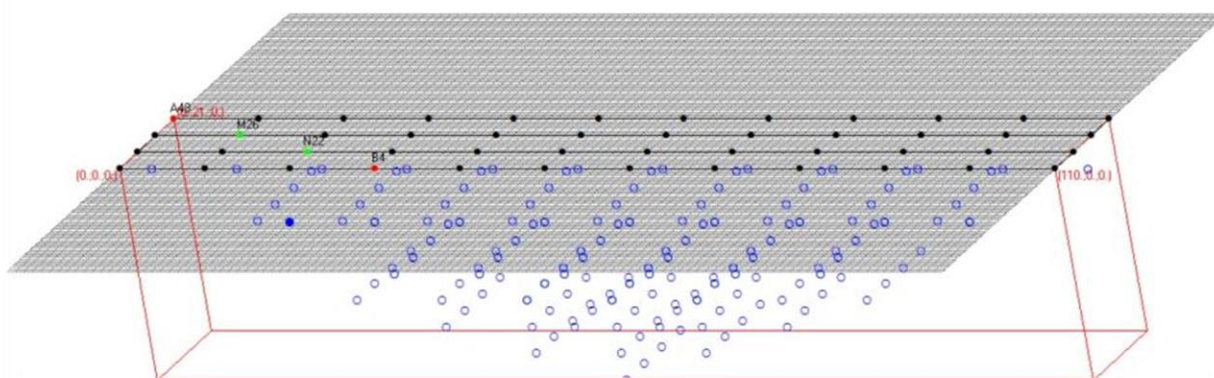
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



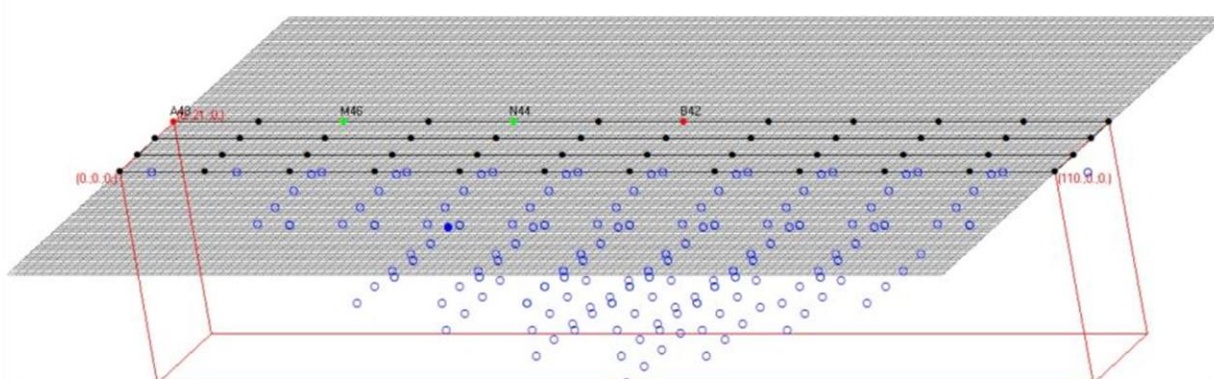
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



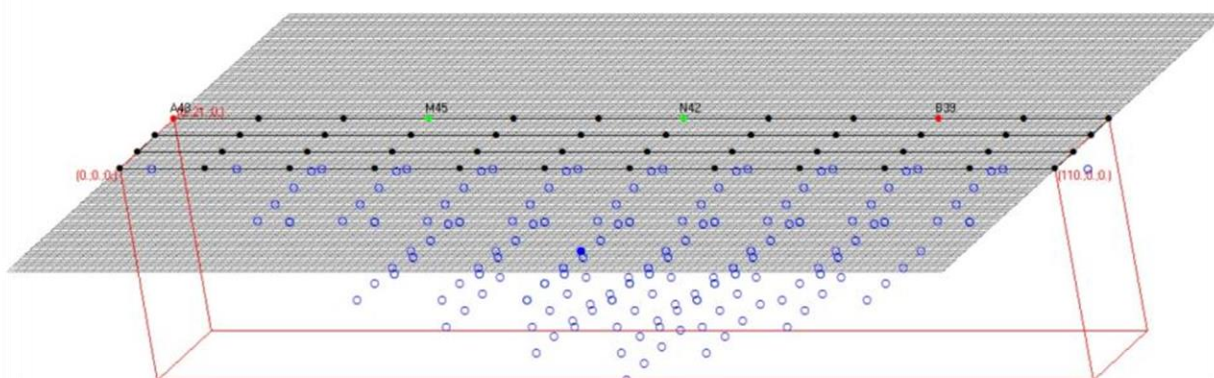
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



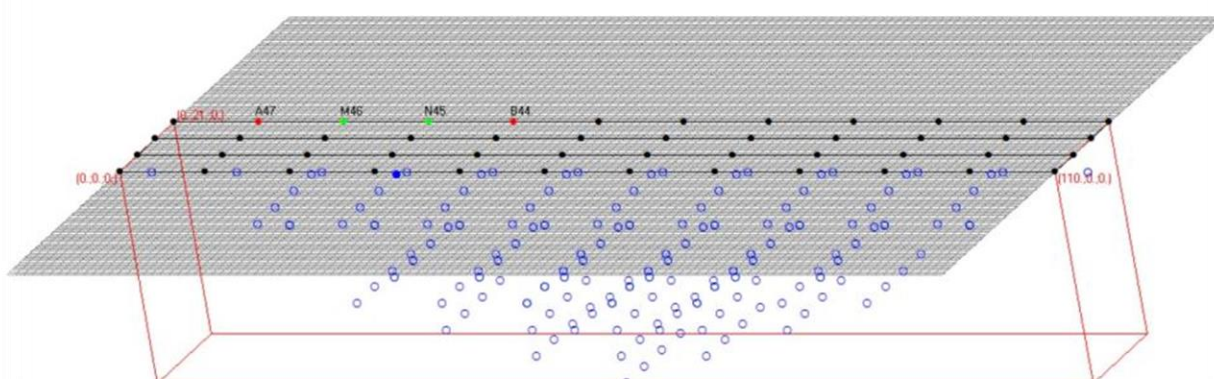
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



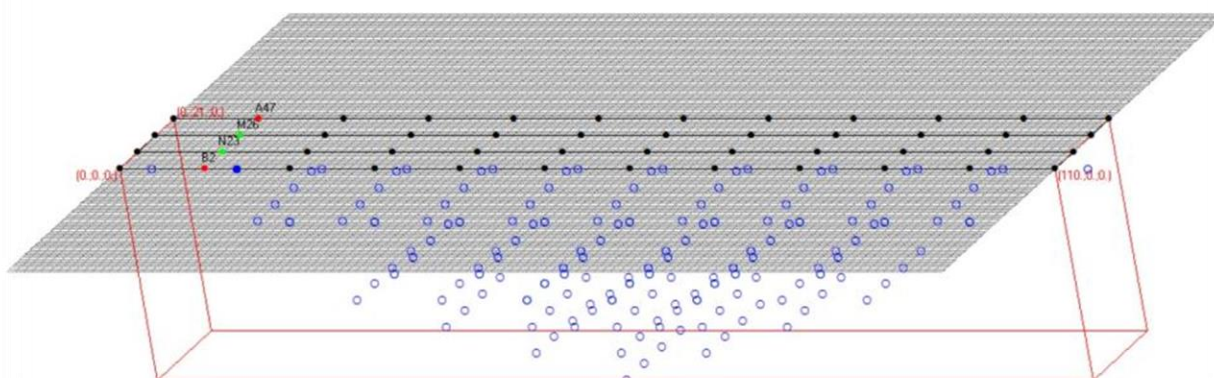
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



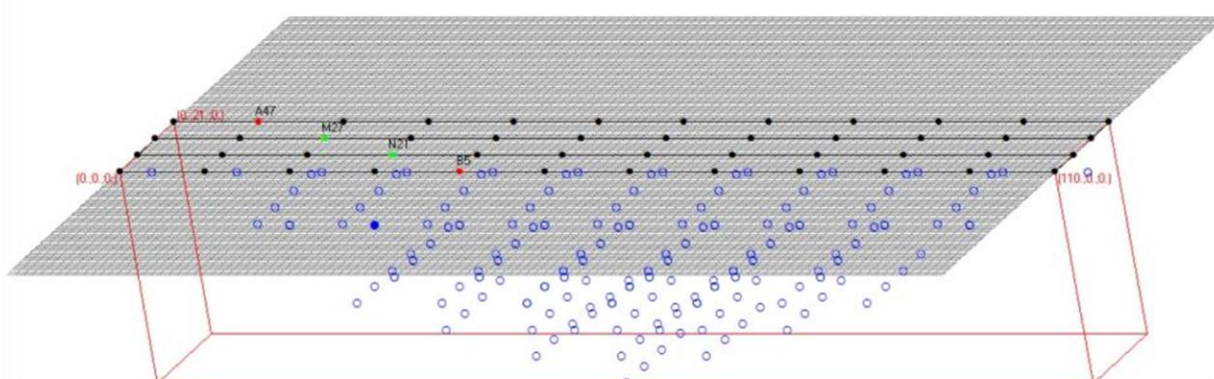
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



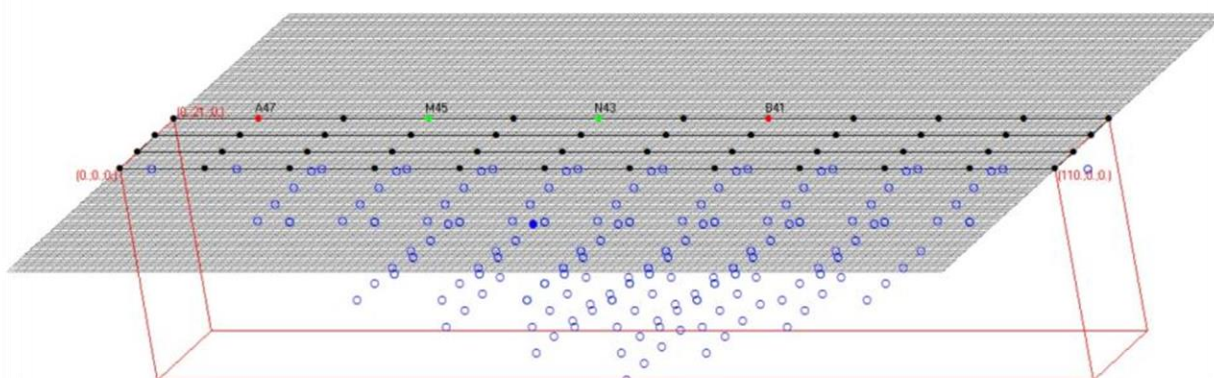
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



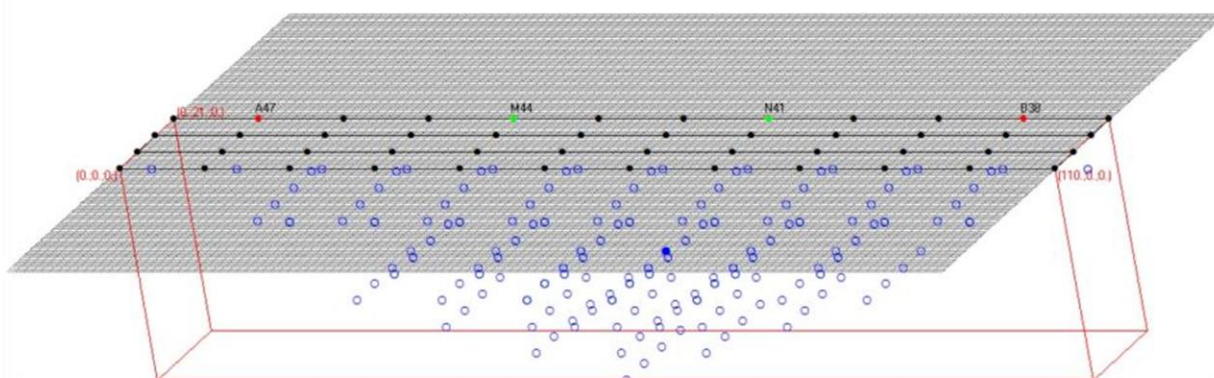
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



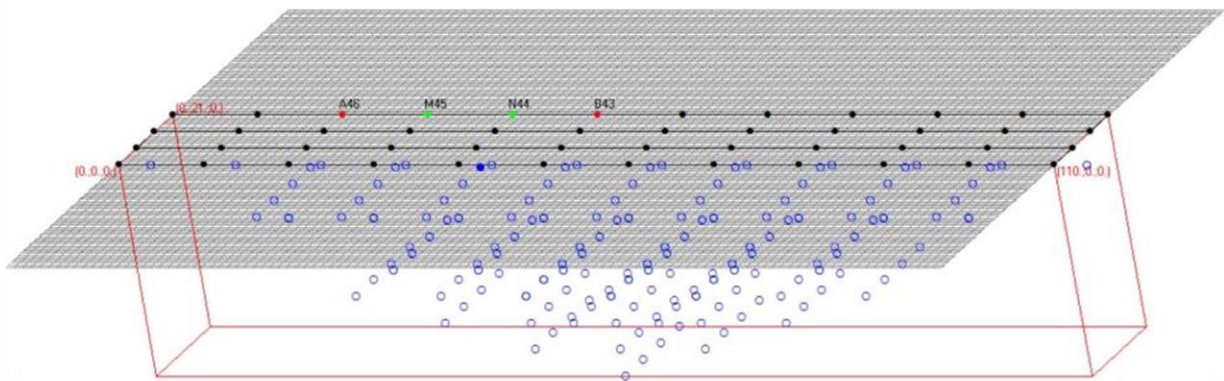
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



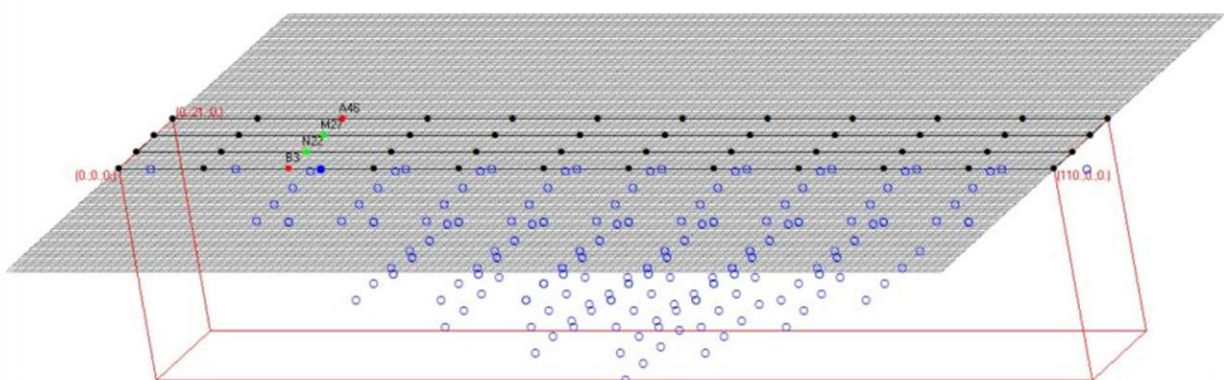
N.	A	B	M	N	K
1	48	45	47	46	62.8
2	48	1	25	24	44.0
3	48	4	26	22	76.7
4	48	42	46	44	125.7
5	48	39	45	42	188.5
6	47	44	46	45	62.8
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5



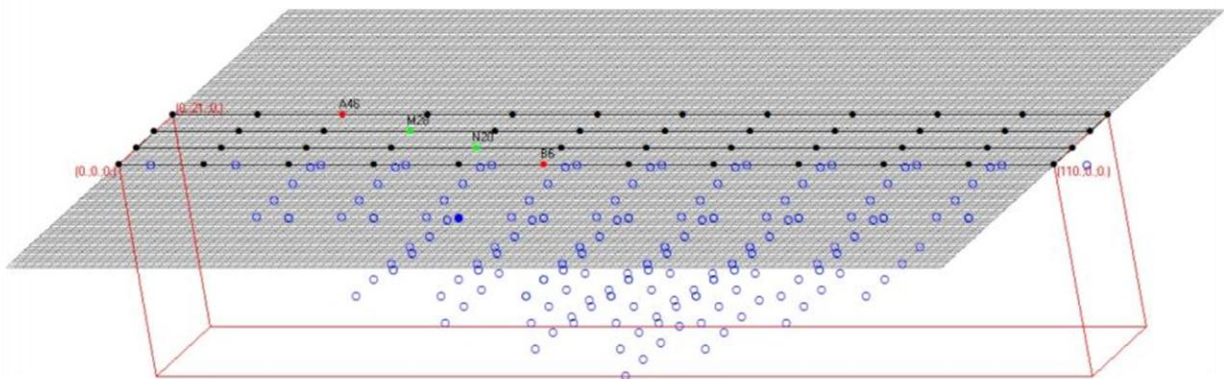
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5
11	46	43	45	44	62.8
12	46	3	27	22	44.0
13	46	6	28	20	76.7
14	46	40	44	42	125.7
15	46	37	43	40	188.5
16	45	42	44	43	62.8
17	45	4	28	21	44.0



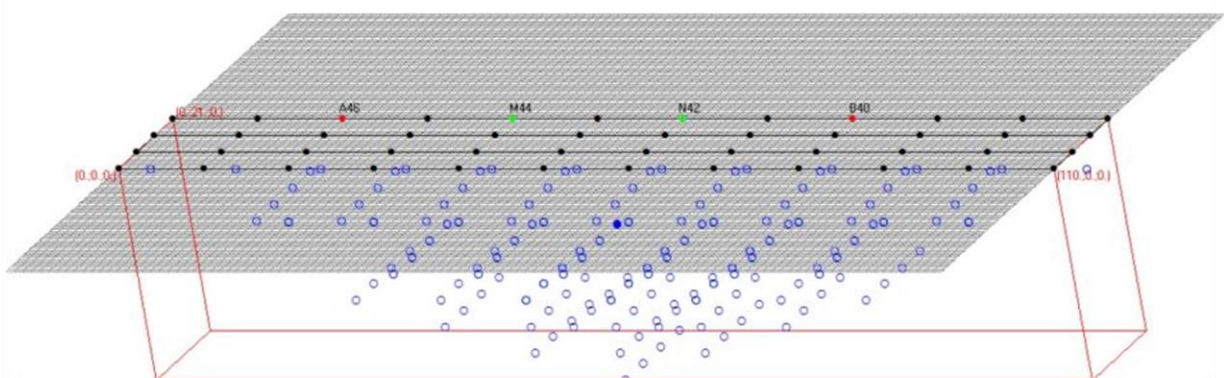
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5
11	46	43	45	44	62.8
12	46	3	27	22	44.0
13	46	6	28	20	76.7
14	46	40	44	42	125.7
15	46	37	43	40	188.5
16	45	42	44	43	62.8
17	45	4	28	21	44.0



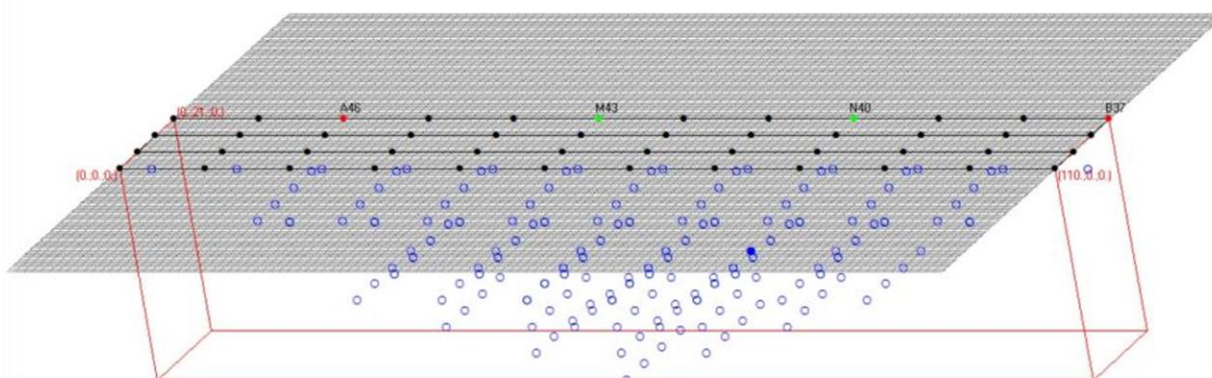
7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5
11	46	43	45	44	62.8
12	46	3	27	22	44.0
13	46	6	28	20	76.7
14	46	40	44	42	125.7
15	46	37	43	40	188.5
16	45	42	44	43	62.8
17	45	4	28	21	44.0



7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5
11	46	43	45	44	62.8
12	46	3	27	22	44.0
13	46	6	28	20	76.7
14	46	40	44	42	125.7
15	46	37	43	40	188.5
16	45	42	44	43	62.8
17	45	4	28	21	44.0

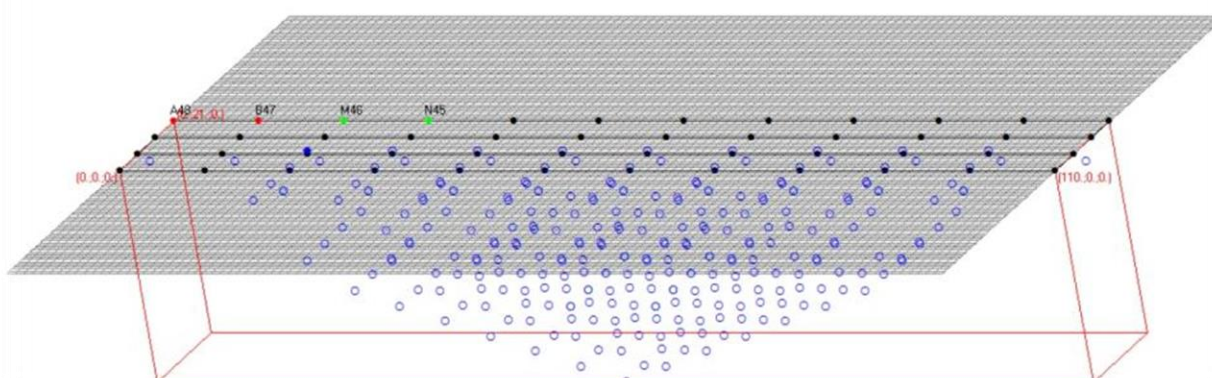


7	47	2	26	23	44.0
8	47	5	27	21	76.7
9	47	41	45	43	125.7
10	47	38	44	41	188.5
11	46	43	45	44	62.8
12	46	3	27	22	44.0
13	46	6	28	20	76.7
14	46	40	44	42	125.7
15	46	37	43	40	188.5
16	45	42	44	43	62.8
17	45	4	28	21	44.0

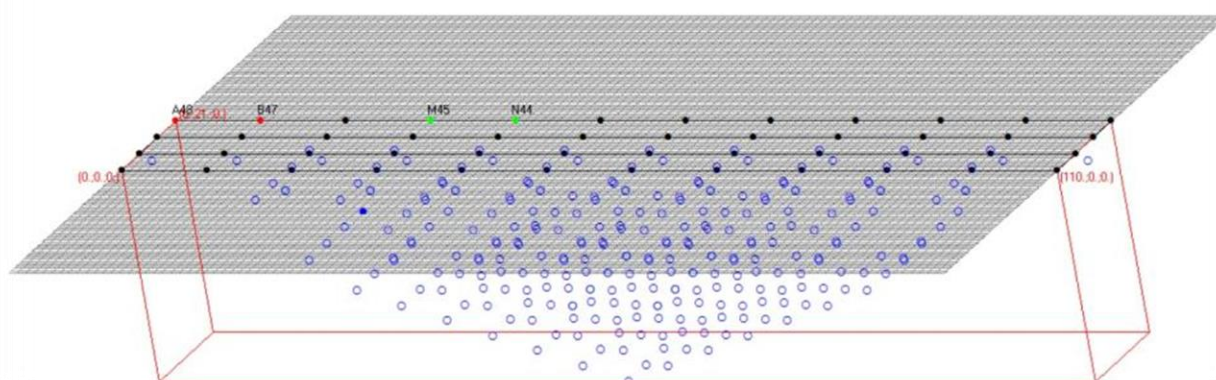


Sequenza elettroica dell'**acquisizione 3-Dmultielettrodo** in configurazione Dipolo-Dipolo.

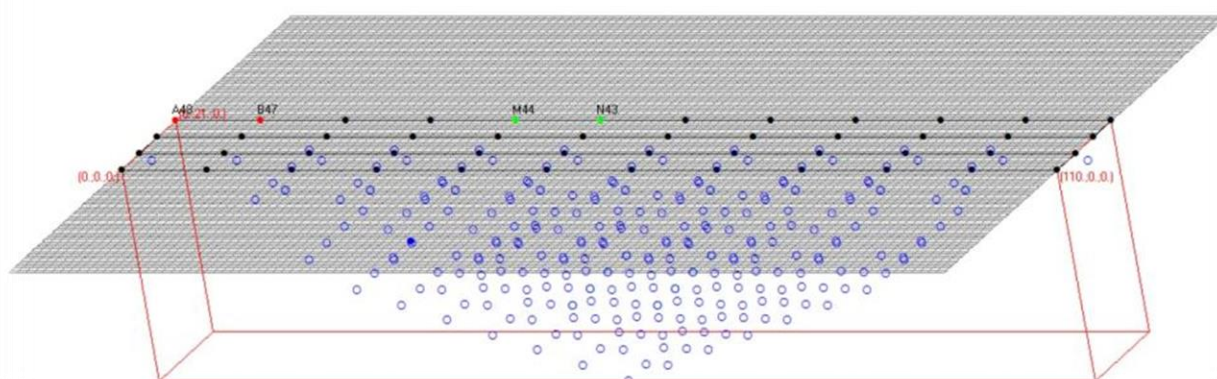
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



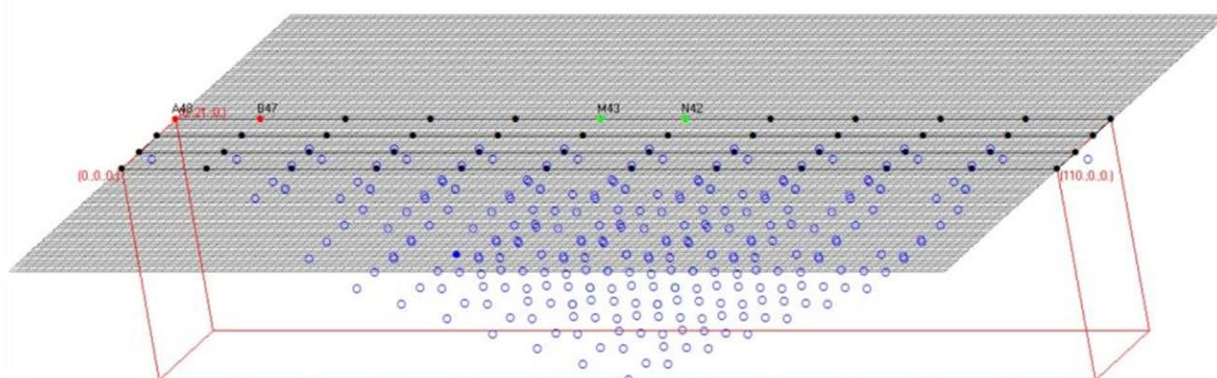
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



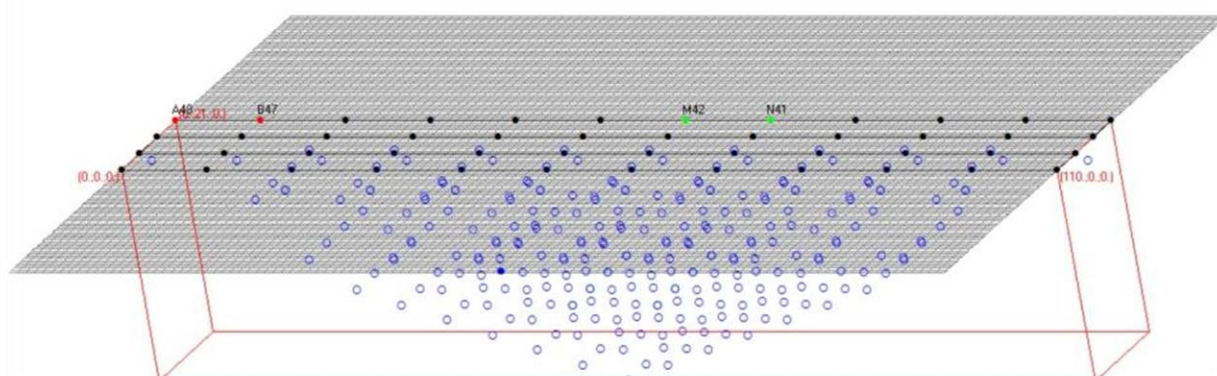
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



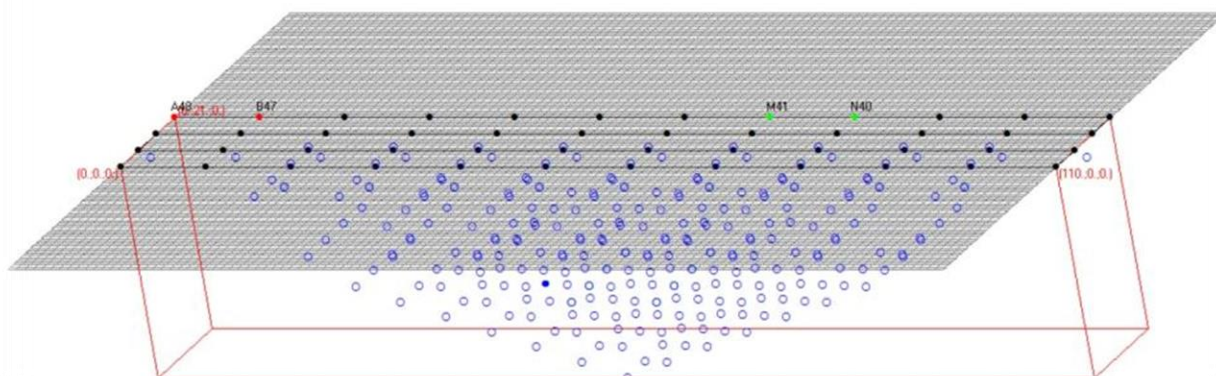
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



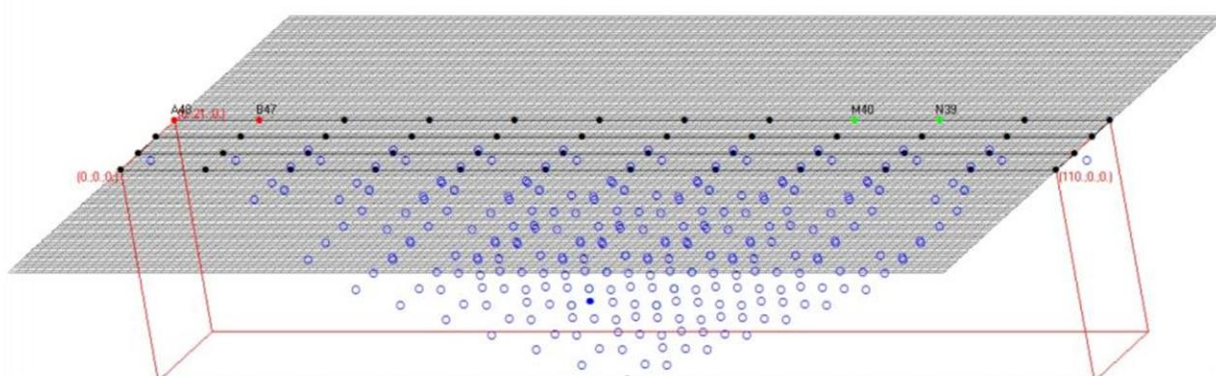
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



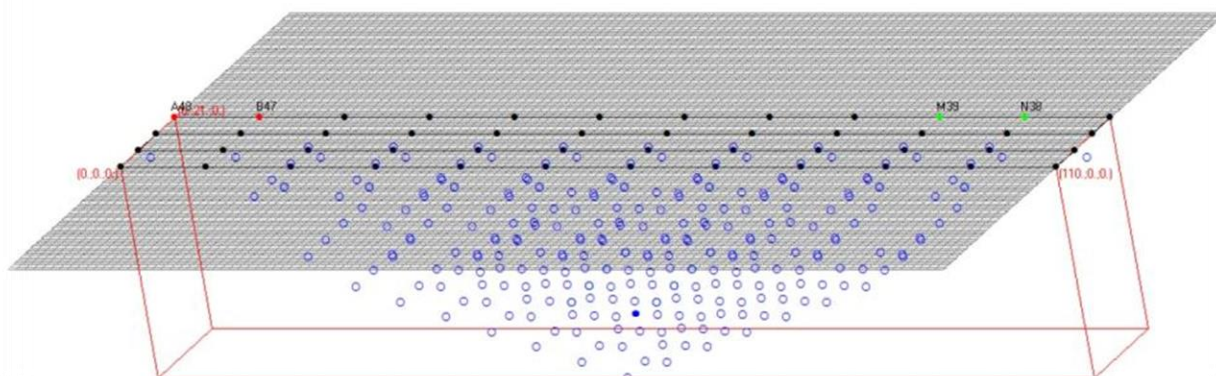
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



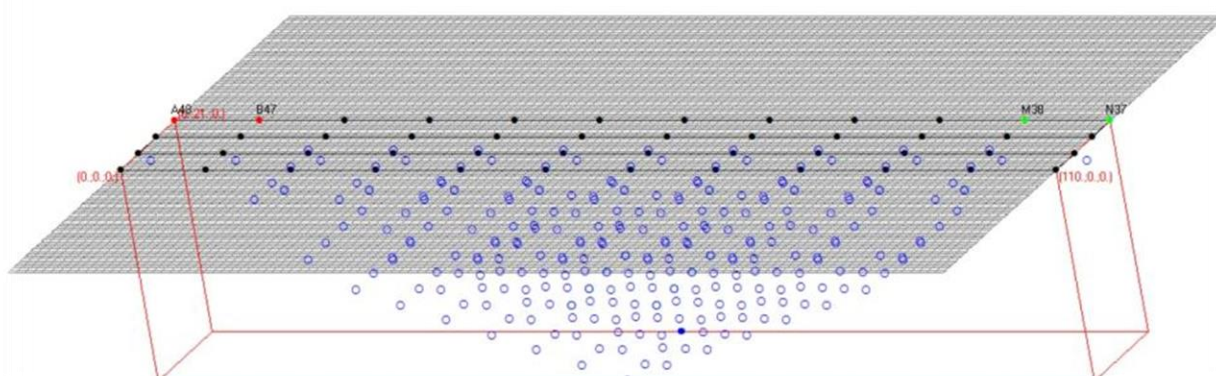
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



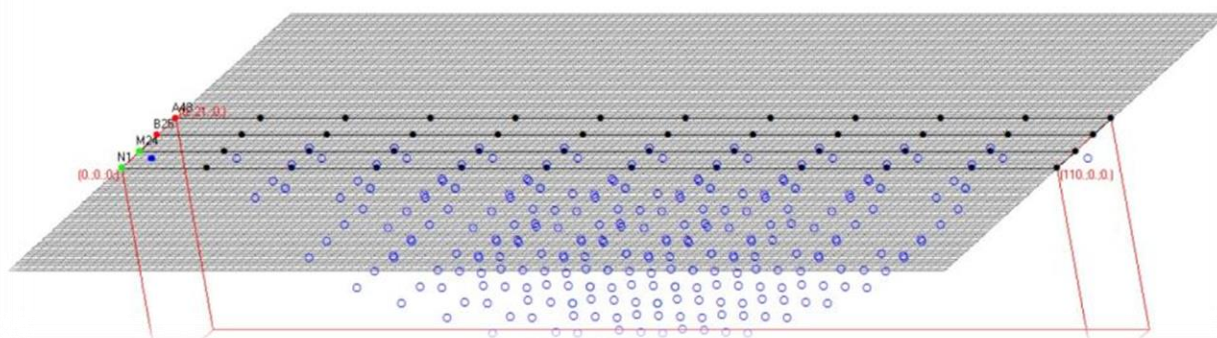
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



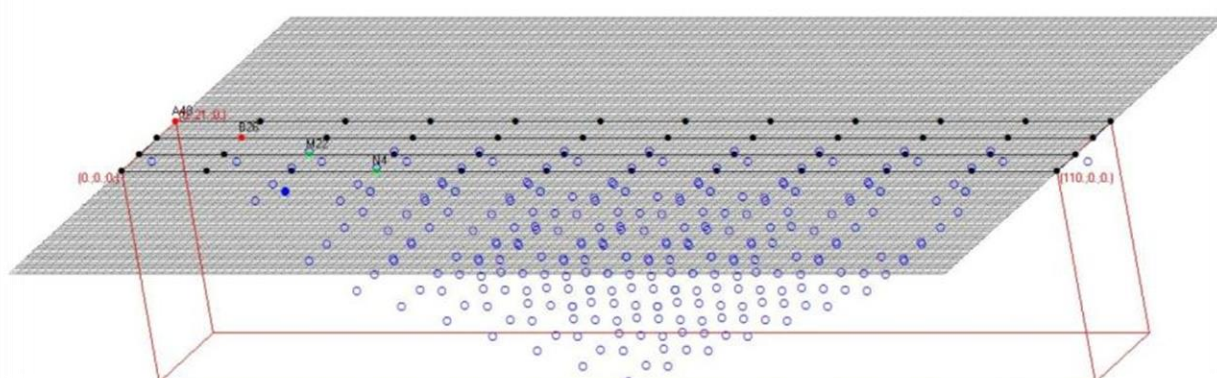
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



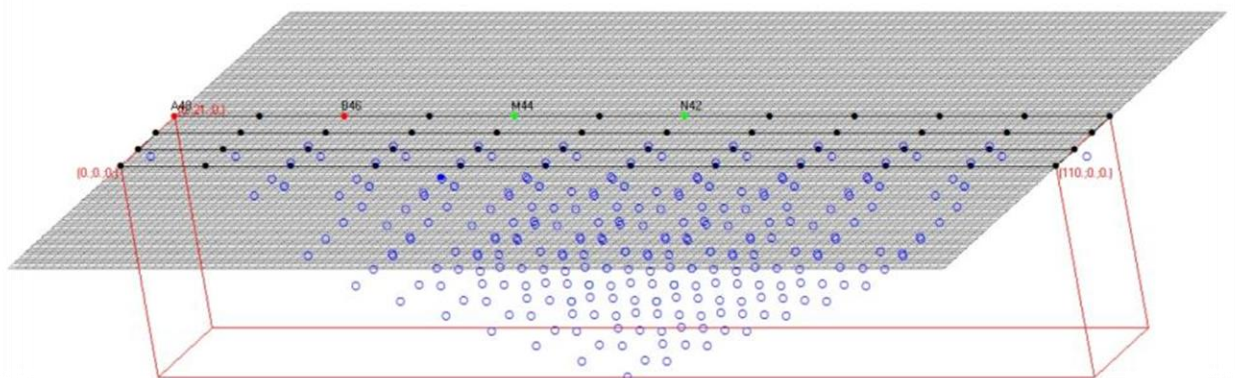
N.	A	B	M	N	K
1	48	47	46	45	-188.5
2	48	47	45	44	-754.0
3	48	47	44	43	-1885.0
4	48	47	43	42	-3769.9
5	48	47	42	41	-6597.3
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9



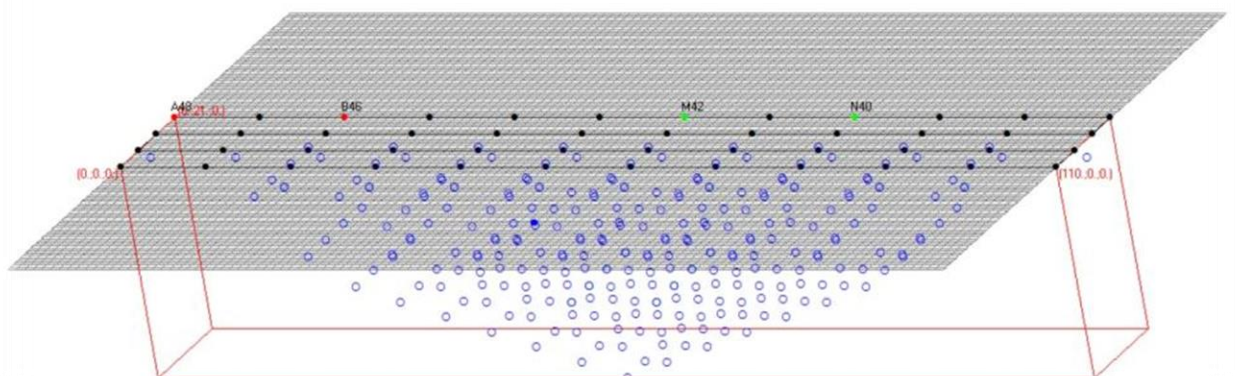
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9
11	48	26	22	4	-230.1
12	48	46	44	42	-377.0
13	48	46	42	40	-1508.0
14	48	46	40	38	-3769.9
15	48	45	42	39	-565.5
16	47	46	45	44	-188.5



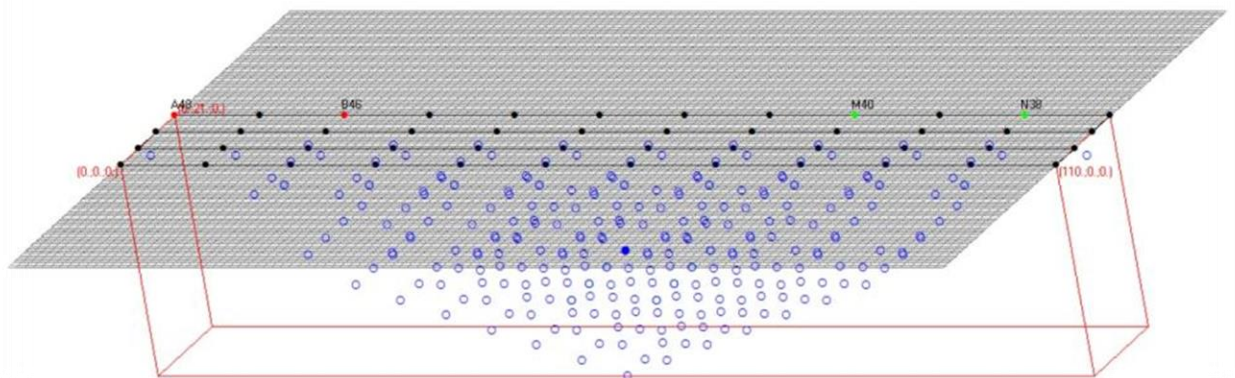
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9
11	48	26	22	4	-230.1
12	48	46	44	42	-377.0
13	48	46	42	40	-1508.0
14	48	46	40	38	-3769.9
15	48	45	42	39	-565.5
16	47	46	45	44	-188.5



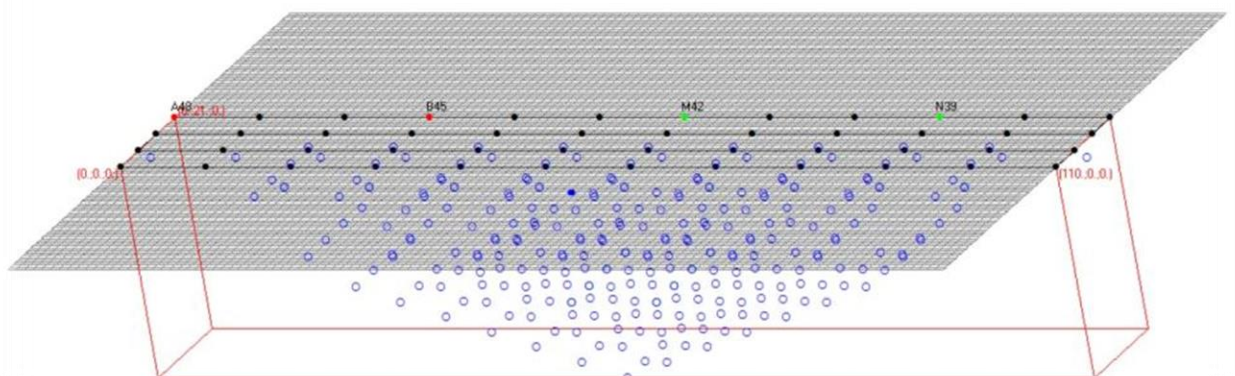
6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9
11	48	26	22	4	-230.1
12	48	46	44	42	-377.0
13	48	46	42	40	-1508.0
14	48	46	40	38	-3769.9
15	48	45	42	39	-565.5
16	47	46	45	44	-188.5



6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9
11	48	26	22	4	-230.1
12	48	46	44	42	-377.0
13	48	46	42	40	-1508.0
14	48	46	40	38	-3769.9
15	48	45	42	39	-565.5
16	47	46	45	44	-188.5



6	48	47	41	40	-10555.8
7	48	47	40	39	-15833.6
8	48	47	39	38	-22619.5
9	48	47	38	37	-31101.7
10	48	25	24	1	-131.9
11	48	26	22	4	-230.1
12	48	46	44	42	-377.0
13	48	46	42	40	-1508.0
14	48	46	40	38	-3769.9
15	48	45	42	39	-565.5
16	47	46	45	44	-188.5



RINGRAZIAMENTI

Al progetto hanno collaborato:

Dott.ssa *Roberta Boni*, dottoressa di ricerca e assegnista di ricerca presso il DSTA, che ha offerto il proprio supporto in fase organizzativa, durante la preparazione del materiale didattico e durante le misure sperimentali sia su campioni che sul terreno.

Dott. *Aldo Bertone*, dottorando presso il DSTA, che ha offerto il proprio supporto in fase di preparazione del materiale didattico e durante le misure sperimentali su campioni.

Sig.na *Francesca Boi*, studentessa presso l'Università di Pavia, che ha offerto il proprio supporto durante gli adempimenti burocratici-amministrativi.

Dott.ssa *Michela Comensoli*, amministrativa presso il DSTA, che ha offerto il proprio supporto in fase organizzativa e durante i procedimenti burocratici-amministrativi.

Prof.ssa *Claudia Meisina* e Prof. *Silvio Seno* che hanno fornito la stratigrafia del sondaggio geognostico presso il sito sperimentale universitario Cravino.