

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dip. Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse Naturali e Ambiente

Dip. di Geoscienze

Corso di laurea magistrale in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente
e il Territorio

L'impiego di nuove tipologie di elettrodi per
tomografie elettriche di resistività in ambienti
complessi

Relatore

Prof. Jacopo Boaga

Correlatore

Dott. Mirko Pavoni

Laureando

Gianello Riccardo

Matricola n.

2092112

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

Indice

Riassunto	5
Abstract	7
Introduzione	9
1. Tomografia elettrica di resistività (ERT)	14
1.1 Principi base	15
1.2 Resistività apparente	18
1.3 Legge di Archie	19
1.4 Tipologie di Array	20
2 Data Processing	23
2.1 Quality Check	23
2.2 Inversione	23
2.3 Modello diretto	24
2.4 Modello inverso	25
3. Inquadramento area di studio	28
3.1 Marocche di Drò	28
4. Materiali e metodi	30
4.1 Nuovi elettrodi per tomografia elettrica di resistività	30
4.1.1 Elettrodo tessile	30
4.1.2 Elettrodo in rete metallica	31
4.2 Installazione delle linee di indagine nel sito Marocche di Drò	32
4.2.1 Elettrodo in acciaio inox in condizioni asciutte e bagnate	32
4.2.2 Elettrodo in acciaio inox bagnato ed elettrodo tessile bagnato	33
4.2.3 Picchetto bagnato ed elettrodo in rete-metallica bagnato	34
4.3 Elaborazione dati	35
5. Risultati	38
5.1 Elettrodo in acciaio inox in condizioni asciutte e bagnate	38
5.2 Elettrodo in acciaio inox bagnato ed Elettrodo tessile bagnato	40
5.3 Elettrodo in acciaio inox bagnato ed Elettrodo in rete metallica bagnato	44
6. Conclusioni	48
7. Bibliografia	51

Riassunto

Questo elaborato di tesi si propone di testare nuove tipologie di elettrodi per la tomografia elettrica di resistività, conosciuta come ERT.

La ERT è una tecnica poco invasiva che sfrutta l'iniezione di corrente continua nel terreno per ottenere un'immagine più rappresentativa possibile del sottosuolo. È utilizzata in campo geologico, archeologico ma anche per indagini ambientali, ad esempio, per la mappatura del percolato di discarica o per la ricerca di corpi inquinanti sepolti.

In questo caso l'utilizzo della ERT è sia per scopi geologici che ambientali in quanto è applicata essenzialmente a rock glaciers e depositi di frana. Sono ambienti caratterizzati da una elevata presenza di detrito e di blocchi di roccia di grandi dimensioni.

Proprio in questo contesto si è pensato di migliorare la classica ERT che utilizza degli elettrodi in acciaio da inserire nel terreno, normalmente chiamati picchetti, con degli elettrodi alternativi, che consentono una maggiore facilità nell'esecuzione dell'indagine. I due nuovi elettrodi testati si basano sullo stesso concetto, infatti sono simili tra loro, ma sono costituiti da materiali differenti.

Il primo è un elettrodo tessile o sacchetto tessile in tessuto conduttivo, riempito di sabbia umida, mentre il secondo è un sacchetto in rete metallica, con all'interno una spugna imbevuta di acqua salata. I vantaggi di questi nuovi elettrodi rispetto ai tradizionali sono la facilità e velocità con la quale si posizionano nel sito di indagine, garantendo la possibilità di eseguire più stendimenti, e la capacità di aumentare il contatto galvanico con il terreno.

Per questo lavoro sono state condotte delle tomografie elettriche di resistività nello stesso sito, rappresentativo di un versante a blocchi rocciosi, testando e confrontando l'elettrodo tradizionale con i due nuovi elettrodi.

Nell'analisi finale, oltre che la qualità dei dati ottenuti è stato considerato anche l'impatto dei nuovi elettrodi sulla logistica e il trasporto nei luoghi d'indagine e il costo dei materiali di cui sono costituiti.

Abstract

This thesis aims to test new types of electrodes for electrical tomography of resistivity, known as ERT.

ERT is a minimally invasive technique that uses direct current injection into the ground to obtain the most representative image possible of the subsoil. It is used in the geological field, archaeological but also for environmental investigations, for example, for the mapping of landfill leachate or for the search for buried polluting bodies.

In this case the use of ERT is both for geological and environmental purposes as it is applied essentially to landslide deposits. They are environments characterized by a high presence of debris and large blocks of rock.

Precisely in this context it was decided to improve the classic ERT which uses steel electrodes to be inserted into the ground, normally called stakes, with alternative electrodes, which allow greater ease in carrying out the investigation. The two new electrodes tested are based on the same concept, in fact they are similar to each other, but are made of different materials.

The first is a textile electrode or textile bag made of conductive fabric, filled with damp sand, while the second is a metal mesh bag with a sponge inside, soaked in salty water. The advantages of these new electrodes compared to traditional ones are the ease and speed with the which are positioned in the investigation site, guaranteeing the possibility of carrying out multiple deployments, and the ability to increase galvanic contact with the ground.

For this work, electrical resistivity tomographies were conducted on the same site, representative of a rocky block slope, testing and comparing the traditional electrode with the two new electrodes.

In the final analysis, in addition to the quality of the data obtained, the impact of the new electrodes on logistics and transport to the investigation sites and the cost of the materials they are made of were also considered

Introduzione

La geofisica applicata studia la parte solida del pianeta terra per diversi scopi, con diverse tecnologie e a differenti scale. Infatti, può essere utilizzata su larga scala per indagini di pendii o acquiferi, oppure su piccola scala, ad esempio per lo studio dell'apparato radicale delle piante.

In linea generale si possono individuare tre metodi geofisici delle esplorazioni:

- Metodi elettrici
- Metodi elettromagnetici
- Metodi sismici

Ogni metodo ha le sue caratteristiche e punti di forza, ad esempio, alcuni sono in grado di fornire solo un'informazione strutturale del suolo, mentre altri indagano anche la dinamica, ovvero cosa accade a quel corpo nel tempo, a livello di cambiamento di stato.

In questo caso ci si concentrerà sui metodi elettrici e più precisamente su una tecnica geofisica molto utilizzata: la tomografia elettrica di resistività, conosciuta come ERT.

La ERT è una tecnica poco invasiva che sfrutta l'iniezione di corrente continua nel terreno, tramite degli elettrodi, per determinarne la resistività, o il suo inverso, la conducibilità, e ottenere un'immagine più rappresentativa possibile del sottosuolo. È utilizzata in campo geologico per monitorare l'acqua sotterranea e studiare le faglie. In archeologia, per analizzare strutture antropiche sepolte e cavità. Inoltre, trova applicazione nelle analisi ambientali, per la mappatura del percolato di discarica e la ricerca di corpi inquinanti sepolti.

Lo strumento fondamentale per creare il contatto galvanico con il suolo è l'elettrodo. Nella presente tesi ne saranno testate due nuove tipologie che possono consentire una maggiore facilità di applicazione della ERT, soprattutto in ambienti complessi, come possono essere i rock glaciers o i depositi di frana.

Per quanto riguarda i rock glaciers, il loro studio è recente; infatti, viene considerato un nuovo tipo di instabilità, causata dai cambiamenti climatici. Per questa ragione si rivela molto interessante il loro monitoraggio, utile sia dal punto di vista strettamente geologico ma anche per determinare i fattori di rischio associati a queste particolari morfologie. Essi possono essere definiti come un deposito di detriti scarsamente selezionati, angolari o blocchi tabulari, tenuti insieme da ghiaccio massiccio o da una matrice di materiali clastici fini cementati dal ghiaccio (Giardino e Vitek, 1988).

Sono separati dal terreno circostante da ripidi pendii frontali e laterali e presentano un'espressione superficiale di creste e solchi generalmente perpendicolari alla direzione del flusso (Giardino et al., 1987).

Queste particolari morfologie sono generalmente classificate in tre categorie:

- Attive: caratterizzate dalla presenza di ghiaccio, movimento di pochi centimetri all'anno e sono prive di vegetazione.
- Inattive: presentano un'assenza di movimento benché contengano ancora ghiaccio, e sono colonizzabili dalla vegetazione.
- Fossili o relitte: sono prive di ghiaccio e colonizzati dalla vegetazione.

La caratteristica principale dei rock glaciers, quindi, è la presenza di permafrost, la parte di terreno che rimane costantemente al di sotto di 0°C per due o più anni, e lo strato attivo è la porzione di terreno sopra di esso, che si scioglie e gela stagionalmente (Osterkamp & Burn, 2003). Il permafrost però, oltre ad avere importanza dal punto di vista strutturale, è una grande riserva idrica. Per questo motivo, Giardino et al. (1992), definiscono un rock glacier come una falda acquifera dotata di caratteristiche idrogeologiche proprie, e di un proprio sistema. Ne deriva che le zone montane sono dipendenti da questa riserva idrica che tuttavia si sta gradualmente perdendo.

Infatti, come accennato in precedenza, vista la composizione dei rock glaciers, si può intuire quanto il cambiamento climatico possa alterare la loro struttura e quindi la loro stabilità, scatenando una serie di conseguenze negative.

Ciò è stato dimostrato da diversi studi, dove si è rilevato che la riduzione del contenuto di ghiaccio provoca un aumento di frequenza e di intensità delle cadute di massi e delle colate detritiche, nonché dell'attività delle frane (Chiarle et al., 2021; Deline et al., 2015; Frauenfelder et al., 2018; Haeberli et al., 2017; Patton et al., 2019). Inoltre, aumenta il rischio di possibili inondazioni. (Arenson e Jakob, 2014; Kenner et al., 2017; Luethi et al., 2017; Marcer et al., 2020; Kofler et al., 2021).

Di conseguenza, la probabilità che si creino delle situazioni di pericolo che minacciano le infrastrutture, gli abitanti, i turisti e le attività sportive, nelle regioni di alta montagna, è maggiore. (Duvillard et al., 2019; Keuschnig et al., 2017; Mourey et al., 2022).

La caratterizzazione e lo studio delle frane o dei depositi di frana è altrettanto importante. Come definito da Hungr et al., (2013), una frana è il movimento di una massa di roccia, detriti o terra lungo un pendio, sotto l'influenza della forza di gravità. La stabilità dei pendii può essere influenzata da diversi fattori come precipitazioni, scioglimento della neve, cambiamenti di temperatura, terremoti, attività vulcanica o azioni umane. (Dhakal e Sidle, 2004; Sidle e Ochiai, 2006; Crozier, 2010).

Anche in questo caso non si può escludere l'azione dei cambiamenti climatici, infatti, Sidle e Ochiai (2006), hanno concluso che l'aumento della temperatura media dell'aria e i cambiamenti nelle precipitazioni regionali annuali e stagionali sono le variazioni più significative che possono influenzare le frane.

Quindi, il continuo studio di questi fenomeni è fondamentale, soprattutto in un'ottica di prevenzione. Monitorare i pendii e i depositi di frana consente di prevedere possibili movimenti futuri e di comprendere le modalità in cui potrebbero verificarsi. Di conseguenza, si ha la possibilità di mettere in atto tempestivamente delle azioni di contenimento o di messa in sicurezza delle zone a rischio.

In questi contesti dove si necessita di monitoraggio interviene la tomografia elettrica di resistività. Questa tecnica consente di ottenere buoni risultati in zone pianeggianti dove la composizione del suolo consente un miglior contatto galvanico, e dove in linea generale, si hanno delle condizioni di applicabilità migliori. Nel caso in cui si debba eseguire un'indagine in zone montane, in cui il sito oggetto di studio è costituito da detrito e blocchi di grandi dimensioni, come nel nostro caso, la ERT risente di alcune problematiche di natura tecnica e logistica.

Innanzitutto, per raggiungere le zone in cui eseguire l'analisi non è sempre possibile utilizzare auto o furgoni, pertanto, a volte si è obbligati a raggiungere il sito a piedi trasportando l'attrezzatura: georesistivimetro, cavi per collegare gli elettrodi, batterie o un generatore, acqua se necessaria e gli elettrodi. Questo comporta un notevole dispendio di tempo, energie e soldi.

Gli elettrodi in acciaio inox sono fondamentali per la ERT in quanto consentono l'iniezione di corrente nel sottosuolo. Nell'utilizzo in zone montane però dimostrano alcuni lati negativi.

Primo fra tutti l'eccessivo peso da trasportare, visto che solitamente per l'indagine ne servono dai 48 ai 96, raggiungendo un peso di 20/30 kilogrammi. Inoltre, devono essere piantati nel suolo e questo richiede attrezzatura ulteriore come delle mazze, e svariato tempo, che preclude la possibilità di eseguire un maggior numero di stendimenti.

Inoltre, un problema che si riscontra in questi ambienti è l'alta resistenza al contatto del terreno in quanto questo molte volte è costituito essenzialmente da rocce. (Hauck et al., 2008) propongono di inserire gli elettrodi nei detriti tra i massi o dove non fosse possibile, perforare il masso per inserirvi l'elettrodo. Nel caso non fosse sufficiente suggerisce di collegare elettrodi aggiuntivi in parallelo a quelli principali. È possibile però che questo non basti per cui potrebbe essere necessario aggiungere acqua salata vicino agli elettrodi come proposto da (Binley, 2015). Ovviamente questo comporta un ulteriore problema di logistica, infatti, se l'acqua non è presente in loco deve essere trasportata a piedi fino al luogo d'indagine.

Recentemente, Buckel et al. (2023) hanno proposto l'applicazione di bustine tessili conduttive come elettrodi per misurazioni ERT eseguite in ambienti di ghiacciai rocciosi. Questo approccio è una soluzione interessante per ridurre il tempo richiesto per acquisire rilievi ERT in ambienti con detriti e superfici a blocchi grossolani, poiché gli elettrodi tessili possono essere facilmente spinti tra i massi e bagnati con una minore quantità di acqua salata (Pavoni et al., 2022).

I nuovi elettrodi concepiti hanno un costo unitario di circa 15,00 € dovuto principalmente al tessuto di cui sono costituiti. (Pavoni et. al., 2024). Un aspetto negativo però, è che l'uso frequente e intensivo di borse tessili porta alla loro alterazione per ossidazione e, di conseguenza, alla diminuzione delle prestazioni nell'acquisizione dei dataset ERT. Per preservare il più a lungo possibile le proprietà elettriche delle buste è fondamentale asciugare il più velocemente possibile il tessuto al termine di ogni campagna di acquisizione, per rallentare l'ossidazione (Pavoni et al., 2022).

Questi elettrodi potrebbero ridurre i problemi di contatto galvanico assicurando dei risultati comparabili se non migliori a quelli ottenibili con il metodo classico. Consentono anche di effettuare un maggior numero di stendimenti poiché non serve perforare il terreno. D'altro canto, sono costosi, a causa del tipo di tessuto utilizzato, e non risolvono del tutto il problema della pesantezza in quanto ognuno di essi contiene 200/300 grammi di sabbia umida. Inoltre, richiedono alcuni minuti per la preparazione e una maggiore manutenzione rispetto ai picchetti in acciaio inox, essendo il tessuto in rame e nichel.

Per ovviare a questi problemi è stata sviluppata un'altra tipologia di elettrodo. Consiste in un sacchetto di rete metallica contenente una spugna imbevuta d'acqua salata, che sarà appoggiato al terreno e a cui sarà fornita corrente elettrica. Con questa nuova idea si cerca di ridurre il costo, che secondo le stime è circa dieci volte inferiore rispetto agli elettrodi tessili, circa 2,00 € a sacchetto, e il peso. (Pavoni et. al 2024). Infatti, essendo la rete molto sottile e leggera è più facilmente trasportabile.

Come per gli elettrodi tessili, anche questi in rete metallica possono essere utilizzati in zone dove non è possibile perforare il terreno, come luoghi di interesse storico oppure in zone inquinate, consentendo comunque l'esecuzione dell'analisi e l'acquisizione di un buon dataset.

1. Tomografia elettrica di resistività (ERT)

La tomografia elettrica di resistività è una tecnica geofisica utile ad indagare la struttura del sottosuolo ma anche per monitorare le modifiche che esso subisce nel tempo, tramite degli elettrodi piantati nel terreno che ricevono corrente elettrica.

L'indagine può essere svolta per ottenere immagini 2D ma anche 3D. Per quest'ultima opzione bisogna mantenere nella stessa posizione A e B e spostare in ogni altro punto M e N.

La strumentazione per eseguire la ERT è ampia e complessa.

Il georesistivimetro è uno strumento fondamentale perché è costituito da voltmetri e amperometri, oltre che da una serie di commutatori che spostano il quadripolo lungo la linea in base a come viene programmato per l'indagine. È alimentato da una batteria o da un generatore di corrente continua. Prima dell'utilizzo bisogna impostare il numero di elettrodi, la sequenza di acquisizione, l'onda quadra che deve fornire, il minimo voltaggio da considerare e la corrente massima da iniettare.

Tramite dei cavi e pinze esso è in grado di trasmettere la corrente dagli amperometri agli elettrodi. Per ovviare alla problematica di interferenze di segnale dovute ad altre fonti di differenza di potenziale, come la polarizzazione degli elettrodi, viene iniettata una corrente I invertendo il verso dopo un certo periodo di commutazione e lasciando periodi intermedi in cui non viene iniettata alcuna corrente. In questo modo si ottiene un'onda quadra.

Si può così individuare ed eliminare facilmente il potenziale generato nei periodi di off. Per far sì che la prova sia effettuata sempre in corrente continua i periodi di iniezione di corrente e quindi con corrente costante, sono più lunghi di quelli rispetto ai tempi di off del sistema. (Boriello A. 2016/2017, Appunti di lezione Boaga J, A.A 2022/2023)

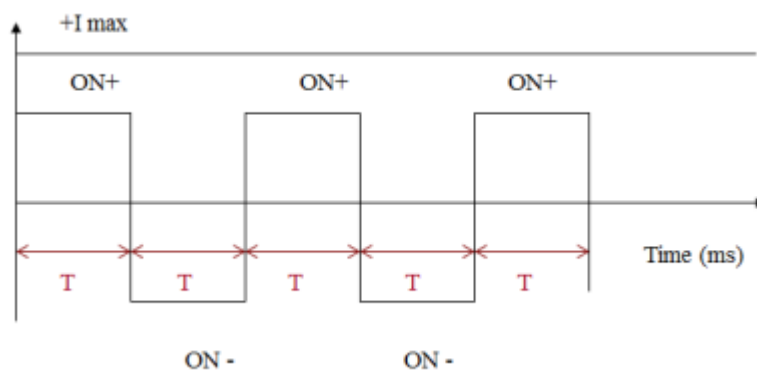


Figura.1 Rappresentazione di un'onda quadra. Immagine tratta da Boriello A. 2016/2017

Il georesistivimetro poi invia i dati ottenuti al computer a cui è collegato che calcolerà i valori di resistività apparente che poi saranno plottati in una pseudo-sezione.

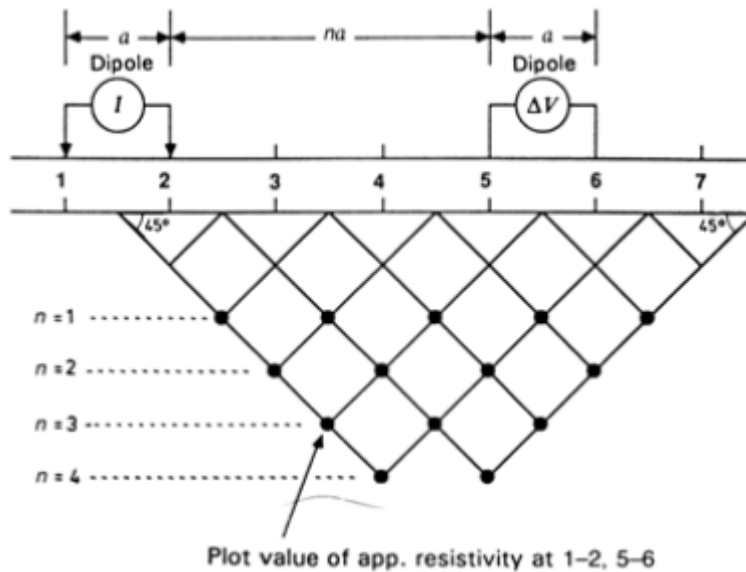


Figura 2. Pseudo-sezione di resistività apparente. Immagine tratta da Boriello A. 2016/2017

Quest'ultima è solamente una rappresentazione ipotetica e approssimativa della resistività reale. Tramite un processo chiamato inversione si ottiene l'immagine della sezione di terreno con la resistività reale dopo aver opportunamente filtrato i dati.

1.1 Principi base

Dal punto di vista concettuale l'ERT si basa sulla Legge di Ohm:

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

Dove ΔV è la differenza di potenziale misurata in Volt [V], I è l'intensità di corrente espressa in Ampere [A] e R è la resistenza in [Ω].

Da questa relazione si evince che quanto più è alta la resistenza del conduttore, tanto più difficile sarà per la corrente attraversarlo.

Considerando proprio quest'ultimo, la legge di Ohm andrebbe scritta come segue:

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

Dove l , è la lunghezza del conduttore in metri [m], s , è la sezione del conduttore espressa in [m^2] e ρ è la resistività, una proprietà specifica del mezzo in questione, ed è espressa in [Ωm].

Da questa equazione possiamo capire che la resistenza è direttamente proporzionale alla lunghezza del conduttore e inversamente proporzionale alla sezione.

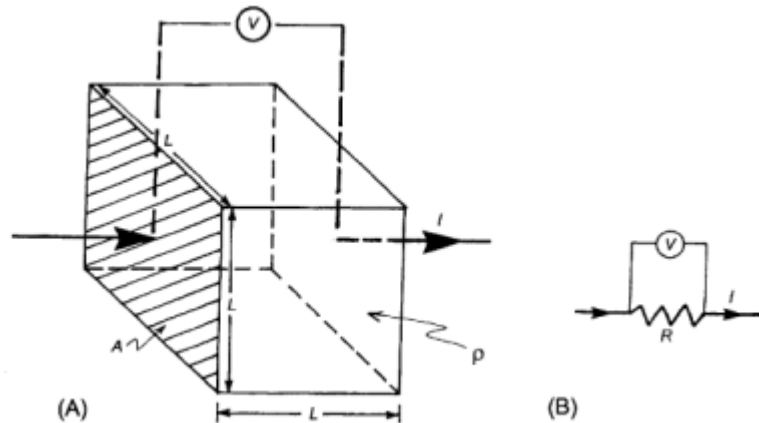


Figura 3. Rappresentazione del concetto di resistività. Immagine tratta da Boriello A. 2016/2017

Dal punto di vista pratico, la legge di ohm espressa in termini realistici, può essere anche scritta come:

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

Si nota che in questo caso la legge è scritta in funzione dell'intensità del campo elettrico, \bar{E} , espresso in $[V/m]$ e del vettore densità di corrente J in $[A/m^2]$.

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

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

Il flusso di corrente continua, in un mezzo conduttore, è descritto nella forma di un'equazione alle derivate parziali che coinvolge le variabili spaziali (x, y, z) e temporale (t) . (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

Come modello di riferimento per spiegare quanto detto in precedenza si utilizza un REV (Representative elementary volume) che si considera omogeneo isotropo, cioè non cambia nella direzione e nello spazio.

Qui il flusso di corrente elettrica in entrata deve essere pari al flusso di corrente elettrica in uscita, non deve quindi esserci accumulo di cariche nel sistema trattandosi di corrente continua. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

L'equazione che descrive questo concetto è:

$$\left(\frac{\delta}{\delta x}Jx + \frac{\delta}{\delta y}Jy + \frac{\delta}{\delta z}Jz\right) dx dy dz = 0 \quad (1.5)$$

Che può essere anche scritta come:

$$\nabla \cdot \bar{J} = 0 \quad (1.6)$$

Dove ∇ è definito divergenza.

Considerando che il flusso di carica è generato da una variazione di potenziale possiamo ricavare l'equazione differenziale che descrive il flusso di corrente continua in un mezzo 3D non omogeneo e anisotropo:

$$\left(\frac{\delta}{\delta x}\left(\sigma_x \frac{\delta V}{\delta x}\right) + \left(\sigma_y \frac{\delta V}{\delta y}\right) + \left(\sigma_z \frac{\delta V}{\delta z}\right)\right) = 0 \quad (1.7)$$

In un mezzo isotropo invece, se consideriamo $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, l'equazione si semplifica:

$$\left(\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2}\right) = 0 \quad (1.8)$$

L'espressione può essere ulteriormente sostituita dall'equazione di Laplace che è alla base per il calcolo delle soluzioni analitiche per le equazioni di corrente continua:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1.9)$$

Considerando l'immissione di corrente in un singolo punto, questa si diffonde in tutte le direzioni quindi la geometria del sistema è sferica. Di conseguenza il campo elettrico che si genera può essere calcolato come:

$$E = \frac{I\rho r}{4\pi r^2} \quad (1.10)$$

Il voltaggio, ovvero il lavoro fatto dalle cariche elettriche del campo elettrico per muovere le cariche dall'infinito al punto P, quindi, è:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (1.11)$$

Siccome noi immettiamo corrente solo in una semisfera:

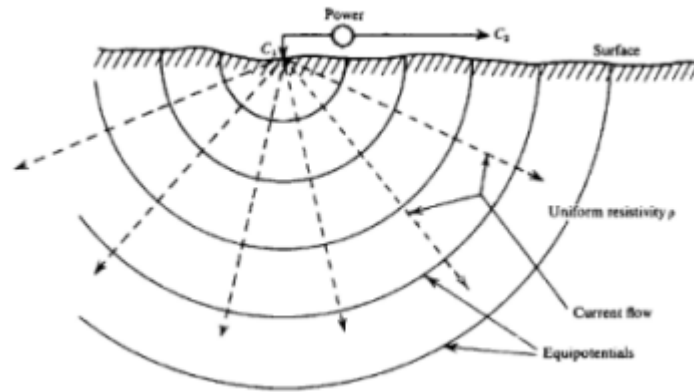


Figura 4. Diffusione della corrente nel suolo. Immagine tratta da Telford W.M. et al., 2010.

L'equazione diventa:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1.12)$$

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

1.2 Resistività apparente

Come detto precedentemente, la ERT è una tecnica che consente di iniettare corrente nel terreno e misurare la differenza di potenziale tra gli elettrodi.

Questo viene fatto solitamente con un quadripolo, due elettrodi di corrente A e B e due elettrodi di potenziale M e N.

Di conseguenza il potenziale misurato in ciascun elettrodo è:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right) \quad (1.13)$$

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

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

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right) - \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (1.14)$$

Da questa equazione possiamo ricavare la resistività apparente espressa in $[\Omega m]$ che non è una proprietà fisica del sottosuolo ma dipende da come la sto misurando:

$$\rho_a = \frac{k\Delta V}{I} \quad (1.15)$$

K è il fattore geometrico che dipende dal tipo di stendimento di elettrodi o array che si utilizza:

$$K = \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right) - \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (1.16)$$

La resistività apparente è utilizzata perché si vuole conoscere il valore di resistività reale del sottosuolo ma a causa di diversi fattori non è possibile. La legge di Archie, sviluppata nel 1942, spiega la relazione tra resistività e caratteristiche del terreno.

1.3 Legge di Archie

La legge di Archie prende il nome da Gus Archie (1907–1978) che ha sviluppato questa relazione empirica che lega la resistività del suolo alla sua porosità, all'acqua presente e alla salinità di quest'ultima. Al giorno d'oggi è molto utilizzata nel logging dei pozzi petroliferi, con l'interpretazione delle misure della conduttività elettrica per calcolare la saturazione di idrocarburi. La legge di Archie può essere scritta come segue:

$$\rho = F \cdot \rho_w \quad (1.17)$$

Dove ρ è la resistività del terreno e ρ_w la resistività elettrica in acqua. Il rapporto ρ/ρ_w è conosciuto come fattore di formazione (F).

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot S_w^{-n} \cdot \phi^{-m} \quad (1.18)$$

Dove ρ_w è la resistività dell'acqua nei pori del terreno, S_w è la saturazione d'acqua, ϕ è la porosità del terreno mentre a, n ed m sono le costanti di Archie che indicano rispettivamente:

- il fattore di tortuosità con valori \approx da 0.5 a 1.5
- il grado di cementazione della roccia \approx da 1.2 a 2.3
- l'esponente di saturazione \approx 2

Per quanto riguarda il flusso di cariche, si può notare come più il mezzo è poroso più le cariche si spostano facilmente nel terreno, quindi, vi è una relazione di proporzionalità inversa tra resistività e porosità. La stessa relazione vale per la saturazione del suolo mentre vi è una proporzionalità diretta rispetto alla resistività elettrica in acqua.

1.4 Tipologie di Array

Nel paragrafo 1.2 si evidenzia che in base alla tipologia di array i valori di resistività apparente misurati variano.

Prima di scegliere lo stendimento migliore per l'analisi che dobbiamo eseguire è fondamentale analizzare il sito d'indagine e valutare il target da investigare.

È importante, infatti, definire la risoluzione necessaria per lo scopo prefissato e la capacità di esplorazione che vogliamo ottenere. La risoluzione è funzione della spaziatura tra gli elettrodi, quindi minore è la spaziatura maggiore è la risoluzione.

La capacità di esplorazione o profondità di esplorazione dipende dalla lunghezza dello stendimento, e corrisponde circa ad $1/5$ della lunghezza totale.

Per migliorare l'investigazione della profondità si possono costruire dei pozzi all'interno dei quali si inseriscono degli elettrodi. È una tecnica molto utile ma più costosa e non sempre eseguibile.

Di solito si sceglie un compromesso tra risoluzione e profondità di investigazione.

Un altro parametro fondamentale per la scelta dell'array è la sensibilità che ogni tipologia di stendimento ha rispetto ai contributi del sottosuolo.

Le principali tipologie di array sono:

- Array Wenner: qui i picchetti (elettrodi) sono equi spazati. È una configurazione che ha una buona profondità di investigazione e una buona risoluzione verticale ma scarsa laterale. Gli elettrodi di potenziale M e N sono interni rispetto a quelli di corrente A e B.

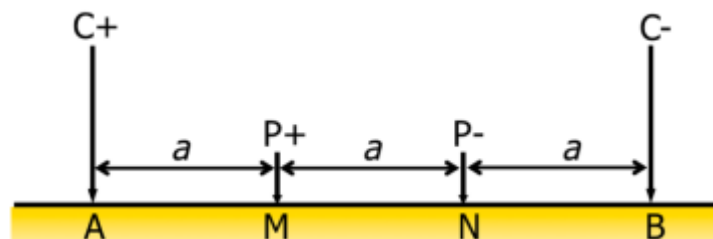


Figura 5. Configurazione Wenner. Elettrodi equi distanziati. Immagine tratta da: Binly and Kemna (2005).

- Array dipolo-dipolo: Qui i picchetti A - B e M - N sono distanziati in coppia. Questa configurazione ha una migliore sensitività laterale ma scarsa profondità di investigazione e bassa risoluzione verticale.

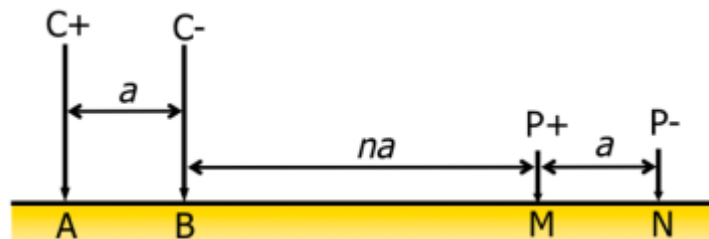


Figura 6. Configurazione Dipolo-Dipolo. Immagine tratta da: Binly and Kemna (2005).

- Array Schlumberger: È una configurazione che ha caratteristiche intermedie alle altre due. Qui si usa una spaziatura a , per gli elettrodi M e N, mentre un multiplo di a per A e B. Spesso Wenner e Schlumberger si fanno assieme in quanto è sufficiente allargare gli elettrodi esterni dopo aver fatto la Wenner.

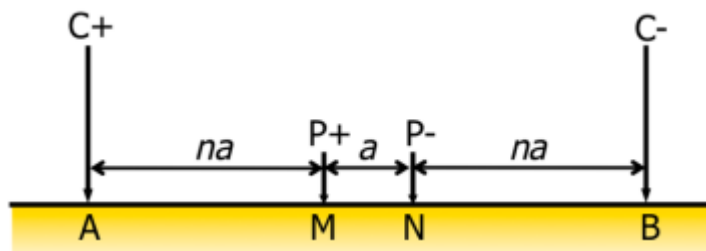


Figura 7. Configurazione Schlumberger. Elettrodi M e N distanziati di una lunghezza a , mentre A e B di un suo multiplo indicato come na . Immagine tratta da: Binly and Kemna (2005).

2 Data Processing

2.1 Quality Check

La fase di controllo e filtraggio dei dati serve a capire qual è l'errore che è stato commesso nelle N misure eseguite. Difatti, nella ERT, si esegue più volte (3 o 6) la stessa misura quindi la ρ_a che ottengo è la media delle misure che ho fatto. Questo procedimento è chiamato "stack".

Ovviamente per ogni misura ho l'errore commesso che deve essere valutato prima di effettuare l'inversione per capire quali valori sono attendibili e quali no.

In base alla mia discrezionalità posso fissare una soglia di errore espressa in percentuale, di solito il 5 %.

I dati che superano questo valore soglia vengono immediatamente eliminati. Gli errori saranno elevati nel caso in cui il terreno dimostri un'elevata resistenza, al contrario gli errori saranno minori; quindi, potremmo conservare un maggior numero di misure.

Nel caso in cui l'indagine sia stata eseguita con una configurazione Dipolo-Dipolo posso effettuare il controllo dei diretti e dei reciproci.

Questo avviene invertendo gli elettrodi di potenziale M e N con gli elettrodi di corrente A e B ottenendo le misure dirette e reciproche per ogni quadripolo.

Per ogni controllo il valore di resistenza misurato tramite misure dirette deve corrispondere alle reciproche altrimenti la misura è affetta da errore. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

2.2 Inversione

L'inversione è un processo matematicamente mal posto o instabile (Boaga J. 2016), infatti, per tutti i dati ammissibili esiste solo un'unica soluzione. Al contrario, se fosse ben posto dovrebbe rispettare anche i criteri di unicità e stabilità come definito da Hadamard (1923).

Non rispettare l'unicità significa rendere la soluzione del problema non univoca. Quindi, si ammette che ad un segnale acquisito G , corrispondano diverse distribuzioni di parametri P (Tarantola, 2005; Foti et al., 2015).

L'instabilità invece, viene corretta tramite la regolarizzazione ovvero un insieme di tecniche matematiche che approssimo il problema mal posto in problemi ben posti che dipendono da determinati parametri (Tychonov & Arsenin, 1977). In sostanza consiste nel trovare il modello più semplice adatto a risolvere i dati ottenuti dall'indagine.

Le tecniche di regolarizzazione più usate in geofisica hanno come scopo la minimizzazione di appropriate funzioni obiettivo, atte a risolvere condizioni lineari o non lineari (Boaga J. 2016).

Partendo dalla pseudo-sezione di resistività apparente è possibile ottenere il modello di sottosuolo finale, tramite il modello diretto o inverso.

2.3 Modello diretto

Il modello diretto è un modello predittivo, difatti esso è in grado di calcolare le resistenze che sarebbero teoricamente misurate per una certa distribuzione di resistività. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

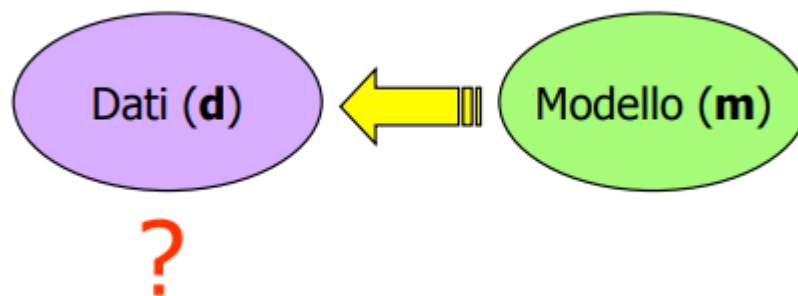


Figura 8. Principio teorico del Modello Diretto. Se conosco la fisica posso conoscere D tramite $d = F(m)$.
(Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

Quindi, per una certa distribuzione di conduttività elettrica possiamo determinare i potenziali elettrici risolvendo delle equazioni differenziali con le opportune condizioni al contorno.

Il modello diretto però prevede la “discretizzazione” e l’utilizzo del metodo delle differenze finite o degli elementi finiti.

Il metodo delle differenze finite consente di risolvere numericamente equazioni differenziali tramite l’approssimazione delle derivate con equazioni alle differenze finite.

Concretamente, la regione d’indagine è discretizzata in celle (elementi) con nodi che ne definiscono gli angoli. Un diverso valore di conduttività può essere assegnato ad ogni cella e il potenziale è calcolato ai nodi dove sono posizionati gli elettrodi. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

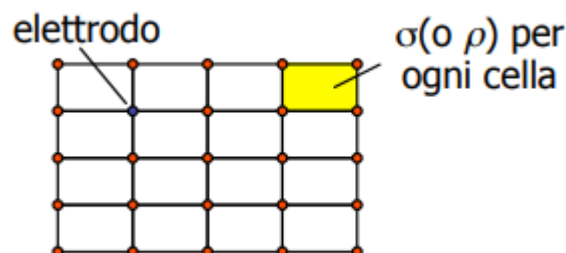


Figura 9. Discretizzazione in celle dell’area d’indagine (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

Il metodo degli elementi finiti è una tecnica numerica utile per trovare soluzioni ai problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche. La regione, oggetto di studio, viene discretizzata in un numero di elementi finiti non uniformemente distribuiti nello spazio. Per questo si tratta di una tecnica che si presta bene ad essere utilizzata quando non è richiesta una soluzione omogenea su tutto il dominio. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

2.4 Modello inverso

Il modello inverso consiste nel calcolo della distribuzione di resistività che è “coerente” con i dati acquisiti. Si può affermare che utilizza n volte modelli diretti. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

Per risolvere il problema inverso la regione deve essere discretizzata da alcuni parametri, di solito il logaritmo della resistività ($m = \rho_i$). I parametri possono corrispondere a singole celle o di solito a gruppi di celle. In questo caso molte celle vengono coinvolte solo marginalmente dalle misure, quindi, serve ricorrere alla regolarizzazione.

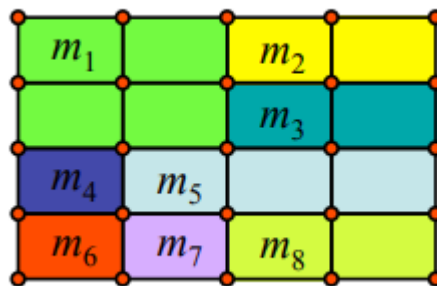


Figura 10. Schema che mostra la resistività in ogni cella e la necessità di ricorrere alla regolarizzazione

Per risolvere il problema dell’inversione bisogna minimizzare la funzione, come detto nel paragrafo 2.2.

$$\psi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_i(m) - d_i}{\varepsilon_i} \right)^2 = \|W_d F(m) - d_i\|^2 \quad (2.1)$$

Dove:

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

d_i è la i -esima resistenza misurata

W_d è la matrice degli errori ε

N è il numero di misure

La ricerca del minimo della funzione obiettivo può portare a determinare il miglior set di parametri m . In questo caso deve essere fatto in modo iterativo tramite l'inversione di Occam. In sostanza, si esegue una stima iniziale della resistività in tutte le celle e si calcola la variazione di resistività necessaria in ogni cella. Dopodiché si modifica la resistività in ogni cella fino ad ottenere un misfit accettabile. Se non lo è, bisogna ricalcolare la variazione di resistività per ogni cella.

Questo processo è eseguito per determinare il miglior set di resistività tale da onorare i dati e avere una struttura spaziale omogenea.

Basarsi soltanto sul misfit dei dati però, conduce ad un problema ovvero allo stesso tempo abbiamo un sistema sovra-determinato e sotto-determinato. Questo comporta che gli errori dei dati influiscono molto sulla soluzione finale dando distribuzioni di resistività irrealistiche.

Solitamente, alla funzione obiettivo è necessario porre un vincolo, introducendo una funzione di penalità (ψ_m) in modo tale da imporre alle celle vicine di non poter assumere valori di resistività molto diversi tra loro. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

$$\psi(m) = \psi_d(m) + \varphi\psi_m(m) \quad (2.2)$$

Così facendo si ottiene un modello finale liscio/smussato dove le resistività varieranno gradualmente anche se la differenza di resistività tra due celle vicine è elevata. (Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022/2023)

3. Inquadramento area di studio

3.1 Marocche di Drò

Le Marocche di Drò sono state studiate fin dall'Ottocento e la loro conoscenza si è ampliata durante la costruzione di gallerie per l'energia idroelettrica negli anni '20 (Trener, 1924). Il termine “marocche” deriva dal trentino “maròc” che significa blocco di roccia.

Questo deposito di frana è situato nella Provincia autonoma di Trento, nel Nord-Est d'Italia, nella bassa valle del fiume Sarca, caratterizzata da numerosi eventi gravitazionali post-glaciali, probabilmente correlati alla tettonica neo-alpina (Ivy-Ochs et al., 2017).

L'indagine ERT è stata effettuata nel giacimento di Kas, a sud del Lago di Cavedine. L'evento della frana di Kas ebbe luogo 1080 ± 160 anni fa, probabilmente innescato dal terremoto di Verona del 1117 (Guidoboni et al., 2005). Questo causò il seppellimento del corpo di frana più antico del deposito delle Marocche di Drò (Pavoni et al., 2022).

L'area dei detriti di Kas copre circa $3,5 \text{ Km}^2$, con una lunghezza di circa 3 km e una larghezza variabile da 0,5 km a 1,5 km. È composto da detriti sterili e caotici, quasi privi di vegetazione, con uno spessore massimo di 80 m (Ivy-Ochs et al., 2017).

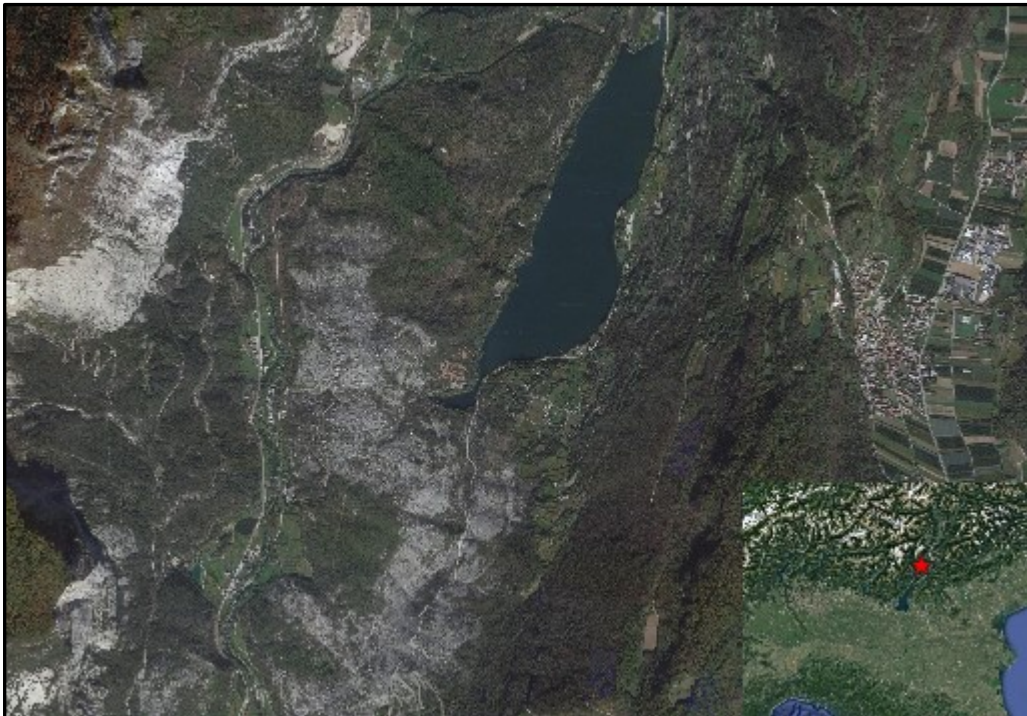


Fig.11 Vista dall'alto del sito “Marocche di Drò” ed inquadramento geografico.

4. Materiali e metodi

4.1 Nuovi elettrodi per tomografia elettrica di resistività

La presente tesi si prefigge di testare nuove tipologie di elettrodi, confrontandoli con il tradizionale picchetto d'acciaio, per verificare quali siano quelli che consentono un miglior contatto galvanico con il suolo in ambienti complessi, e che hanno un buon rapporto praticità-qualità e costo. Si vuole valutare, quindi, l'impatto del materiale di cui è costituito l'elettrodo sul prezzo finale e sulla logistica, la facilità e velocità con cui l'elettrodo viene posizionato al suolo e la risposta che questo fornisce. Per ogni tipologia di confronto, prima dell'indagine vera e propria sono state misurate le resistenze di contatto registrate tramite geo-resistivimetro Syscal Pro (Iris Instruments) per valutare e confrontare i valori ottenuti con le diverse modalità di acquisizione (Pavoni et al., 2022). Inoltre, a tutti i set di dati è stato applicato il test dei diretti e reciproci. (Cassiani et al., 2006)

Per fare ciò sono stati predisposti dei test comparativi nel sito "Marocche di Drò".

4.1.1 Elettrodo tessile

Ideato da Buckel et al (2023), l'elettrodo tessile venne pensato per sostituire l'elettrodo tradizionale in acciaio inox perché quest'ultimo, pur essendo efficiente dal punto di vista della creazione di un buon contatto galvanico con il terreno, aveva molti lati negativi. Infatti, serve molto tempo per installarlo, soprattutto se l'indagine ERT è svolta in ambienti complessi come quelli montani. Inoltre, il numero totale di elettrodi da utilizzare è elevato, ciò comporta un grande peso da trasportare fino al luogo di indagine.

L'elettrodo tessile invece consente un più veloce posizionamento della linea d'indagine, senza dover forare il terreno o la roccia con appositi strumenti, in quanto basta appoggiarlo al suolo.

Come si può vedere dalla figura 12, all'interno del sacchetto tessile è presente della sabbia, di solito 200/300 grammi, che sarà bagnata con acqua salata per aumentare il contatto galvanico con il suolo. Se da un lato questo nuovo elettrodo è migliore di quello tradizionale, dall'altro non risolve il problema del peso da trasportare che è circa lo stesso. Inoltre, si pone il problema dei costi e della manutenzione. Infatti, quest'ultimo elettrodo a causa del prezzo del tessuto conduttivo viene a costare circa 15,00 € ed è necessario prendere delle precauzioni affinché non si degradi troppo velocemente. Di solito, ogni qual volta si finisce una misura è opportuno asciugare il prima possibile il tessuto conduttivo per evitare che si ossidi, anche se dopo un po' di tempo è necessario comunque cambiarlo. (Pavoni et. al, 2023).



Figura 12. A: materiali costituenti il sacchetto tessile e il sacchetto tessile finito (A). B: Sacchetto tessile a fine vita
Immagine tratta da Pavoni et al.,2023.

4.1.2 Elettrodo in rete metallica

L'evoluzione del sacchetto tessile conduttivo è il sacchetto in rete metallica. Esso ha le stesse dimensioni dell'elettrodo tessile, 10 x 15 cm, ma pesa molto meno, circa 50 grammi in totale, ed ha un costo nettamente inferiore, basti pensare che per 48 elettrodi bastano circa 100,00 € quando per la stessa quantità di elettrodi tessili ne servivano circa 800,00 €. (Pavoni et. al 2024).

Tutto questo è possibile perché la rete metallica costa molto poco rispetto al tessuto conduttivo, circa 15 €/m², e all'interno dell'elettrodo è presente solo una spugna imbevuta con acqua salata. Oltre ad economicità e praticità questo nuovo elettrodo, presenta un'elevata facilità di posizionamento sul terreno o tra i massi, e consente di eseguire un numero maggiore di stendimenti in minor tempo. Un ulteriore aspetto positivo è il fatto che non serve manutenzione perché la rete non si ossida come invece succede per l'elettrodo tessile.



Figura 13. Elettrodo in rete metallica

4.2 Installazione delle linee di indagine nel sito Marocche di Drò

Nei prossimi paragrafi verrà descritta l'installazione delle varie tipologie di elettrodi, la configurazione e la strumentazione utilizzata nelle tre indagini effettuate nel sito Marocche di Drò, in Trentino, per confrontare i nuovi elettrodi con quello tradizionale.

4.2.1 Elettrodo in acciaio inox in condizioni asciutte e bagnate

Sono stati martellati fra i massi 24 elettrodi, con una configurazione Dipolo-Dipolo skip-0, per una lunghezza totale dello stendimento di 23 metri. Lo skip indica il numero di elettrodi saltati per creare un dipolo, in questo caso nessun elettrodo è stato saltato. Il primo set di misure è stato rilevato in condizioni asciutte. Dopodiché è stata effettuata la prova bagnando gli elettrodi con acqua salata, nello specifico una miscela di 350 g di NaCl in 15 litri di H₂O. (Pavoni et al.,2022).

Per effettuare le misure di resistività è stato utilizzato un Geo-resistivimetro (Syscal Pro Iris Instrumets con un tempo di iniezione di 250 ms, limite di risoluzione di 0.001 V e V_{max} di 800 V), a cui erano collegati tutti gli elettrodi dell'array tramite un cavo per prospezione geoelettrica e delle pinze di connessione per elettrodo.



Figura 14. Picchetto inserito nel terreno. Immagine tratta da Pavoni et. al 2022.

4.2.2 Elettrodo in acciaio inox bagnato ed elettrodo tessile bagnato

L'indagine ERT è stata eseguita dapprima su una linea costituita da elettrodi in acciaio inox martellati fra i massi e bagnati con acqua salata tramite una spugna, e poi utilizzando i sacchetti tessili conduttivi, spinti tra i massi. La linea di indagine era lunga 40 metri con gli elettrodi distanti 3 metri l'uno dall'altro. La configurazione dell'array è dipolo-dipolo con multi-skip. In questo caso gli elettrodi saltati per creare il dipolo sono: 2,4,6 e 8. (Pavoni et al.,2023). Come nel test precedente, per provare la qualità dei dati acquisiti, è stata eseguita la prova dei diretti e reciproci con uno stacking compreso tra 3 e 6 e una soglia di errore del 5%.

Per la preparazione degli elettrodi tessili è stato necessario l'acquisto di un tessuto commerciale resistente e flessibile (Holland Shielding Systems BV) in poliestere ($65\pm 5\%$) metallizzato con rame ($20\pm 2\%$) e nichel ($15\pm 2\%$) (Pavoni et al.,2023). Per ogni elettrodo è stato utilizzato un pezzo di tessuto 30 x 30 cm riempito con 275-300 grammi di sabbia fine commerciale a base di silice. I sacchetti sono stati chiusi con delle fascette di plastica e nastro isolante. Per evitare una più veloce degradazione del sacchetto dovuta al contatto diretto con l'acqua salata, Buckel et al. (2023) hanno proposto di avvolgere la sabbia in un film di plastica.

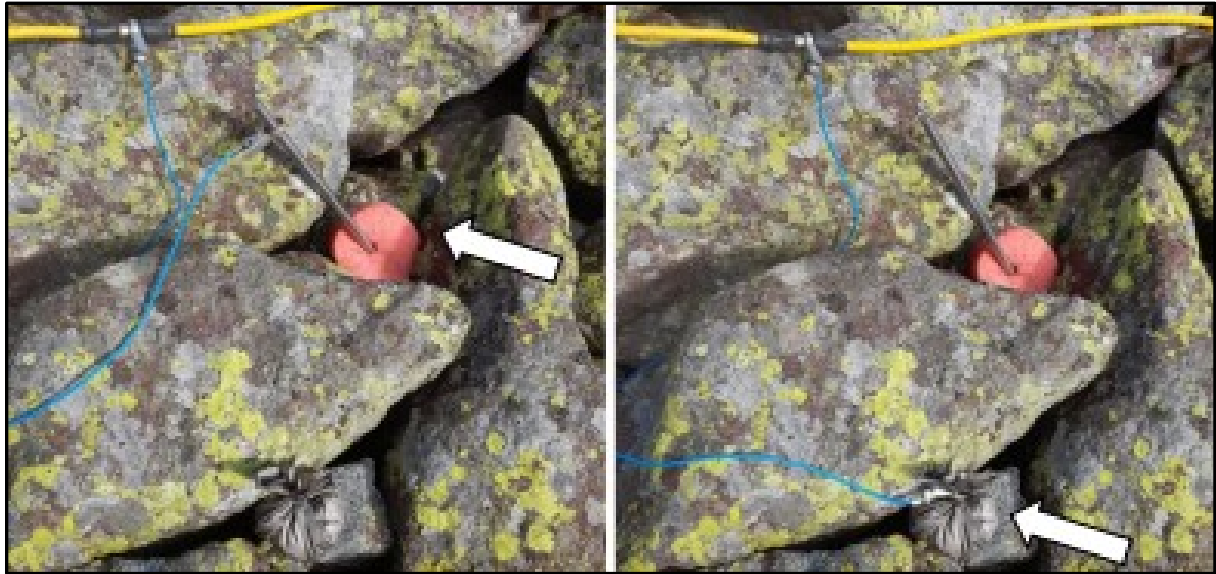


Figura 15. A sinistra, indicato dalla freccia, è il picchetto in acciaio, a destra il sacchetto tessile.

Immagine tratta da Pavoni et al. 2023.

4.2.3 Picchetto bagnato ed elettrodo in rete-metallica bagnato

In questo caso è stata confrontata l'efficienza dell'elettrodo tradizionale in acciaio inox rispetto al sacchetto costituito da una rete metallica all'interno della quale è inserita una spugna bagnata di acqua salata. Questo nuovo elettrodo è pensato per sostituire l'elettrodo tessile che è stato dimostrato avere molti limiti dal punto di vista del costo e della durata nel tempo. Ha una dimensione di 10 x 15 cm. Per testare questo elettrodo è stata predisposta una linea d'indagine lunga 102 metri dove ogni elettrodo distava 5 metri l'uno dall'altro. Come per gli altri confronti è stata utilizzata la configurazione Dipolo-Dipolo, multi-skip 0-8, ed è stato effettuato il controllo dei diretti e reciproci con lo stacking compreso tra 3 e 6 e soglia di errore del 5%.



Figura 16. A sinistra il picchetto con spugna bagnata e a destra sacchetto in rete metallica. Immagine tratta da Pavoni et al. 2023.

4.3 Elaborazione dati

Per l'elaborazione dati è stato utilizzato DATA tab, un calcolatore statistico online, utile per analizzare i valori di corrente iniettata, resistività apparente, errore reciproco e resistenza di contatto.

Queste variabili sono state rappresentate tramite “grafici a violino” e rette di regressione per vedere, nel miglior modo possibile, la distribuzione dei dati per ogni confronto tra diverse tipologie di elettrodi.

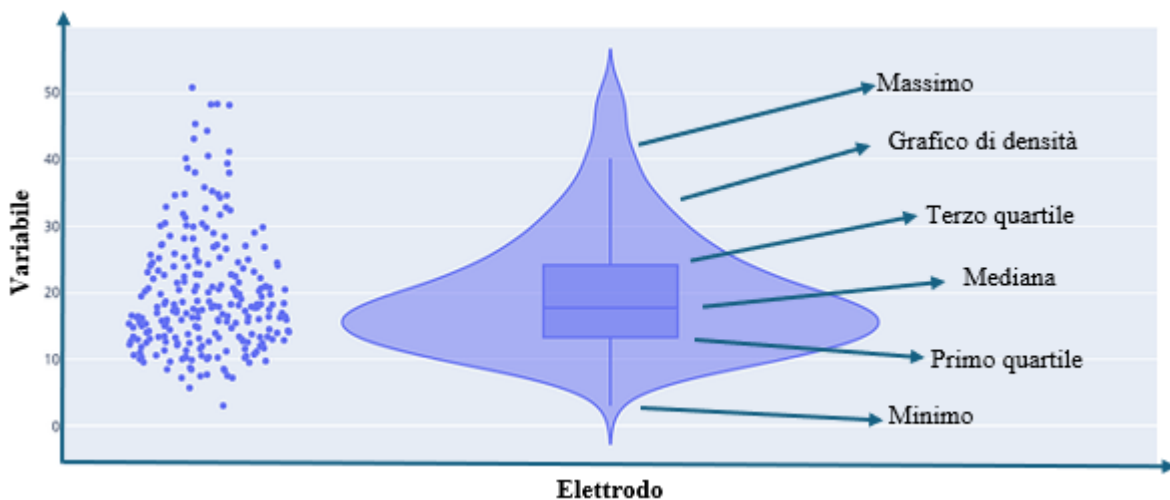


Figura 17. Schema descrittivo di un “Violin Plot”

I Violin Plot sono simili ai Box-plot ma sono più specifici in quanto rappresentano anche la densità di probabilità e la distribuzione completa dei dati.

Per ottenere la distribuzione 2D di resistività reale invece, è stato necessario utilizzare un software, Surfer v.27.2.282, un programma di mappatura, modellazione e analisi 2D e 3D creato dalla compagnia americana Golden Software, che a partire da dati distribuiti nello spazio XYZ in maniera irregolare è in grado di interpolarli in una griglia spaziale regolare.

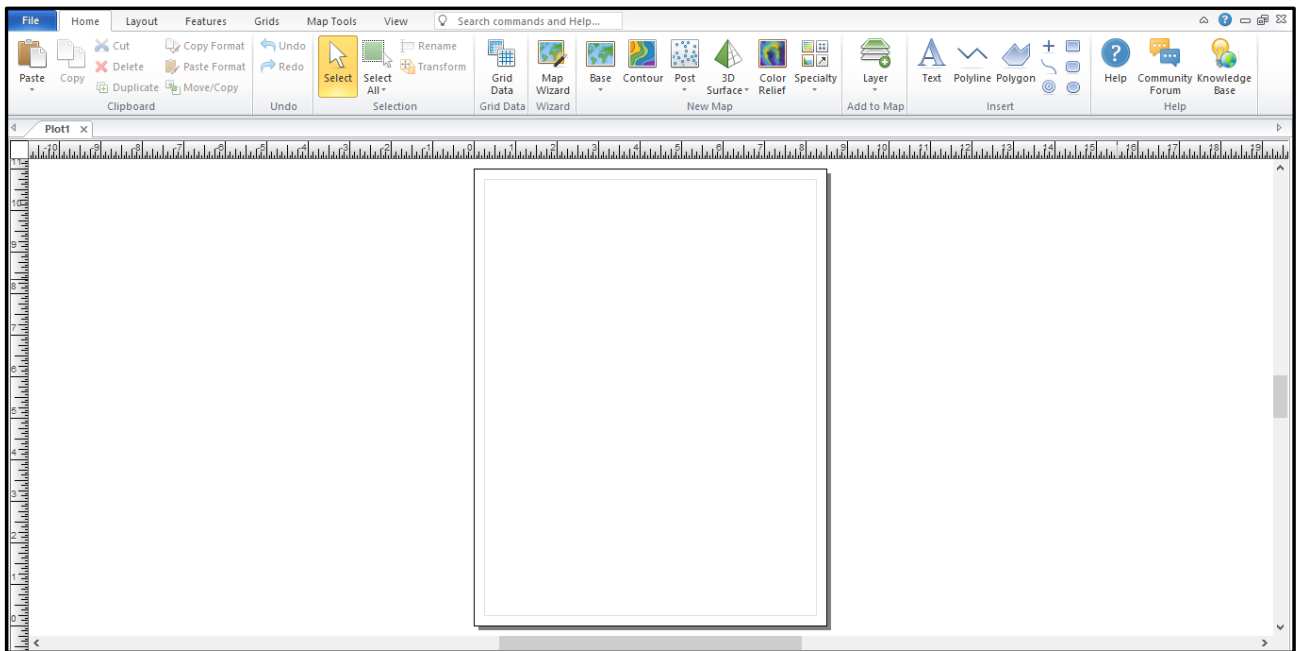


Figura 18. Interfaccia iniziale di Surfer.

Dall'interfaccia iniziale è sufficiente inserire i dati raccolti attraverso la funzione “grid data” ed il software fornisce una prima grezza sezione di sottosuolo che successivamente dovrà essere elaborata per ottenere l'immagine finale.

5. Risultati

Dall'elaborazione dei dati ottenuti nei diversi rilievi è stato possibile ricavare importanti informazioni che consentono di confrontare in modo ottimale i vari elettrodi utilizzati.

Tramite il procedimento spiegato nei capitoli precedenti è stato possibile analizzare i diversi parametri ricavati con l'applicazione della ERT, oltre che le varie sezioni di resistività ottenute dalle diverse linee di indagine.

5.1 Elettrodo in acciaio inox in condizioni asciutte e bagnate

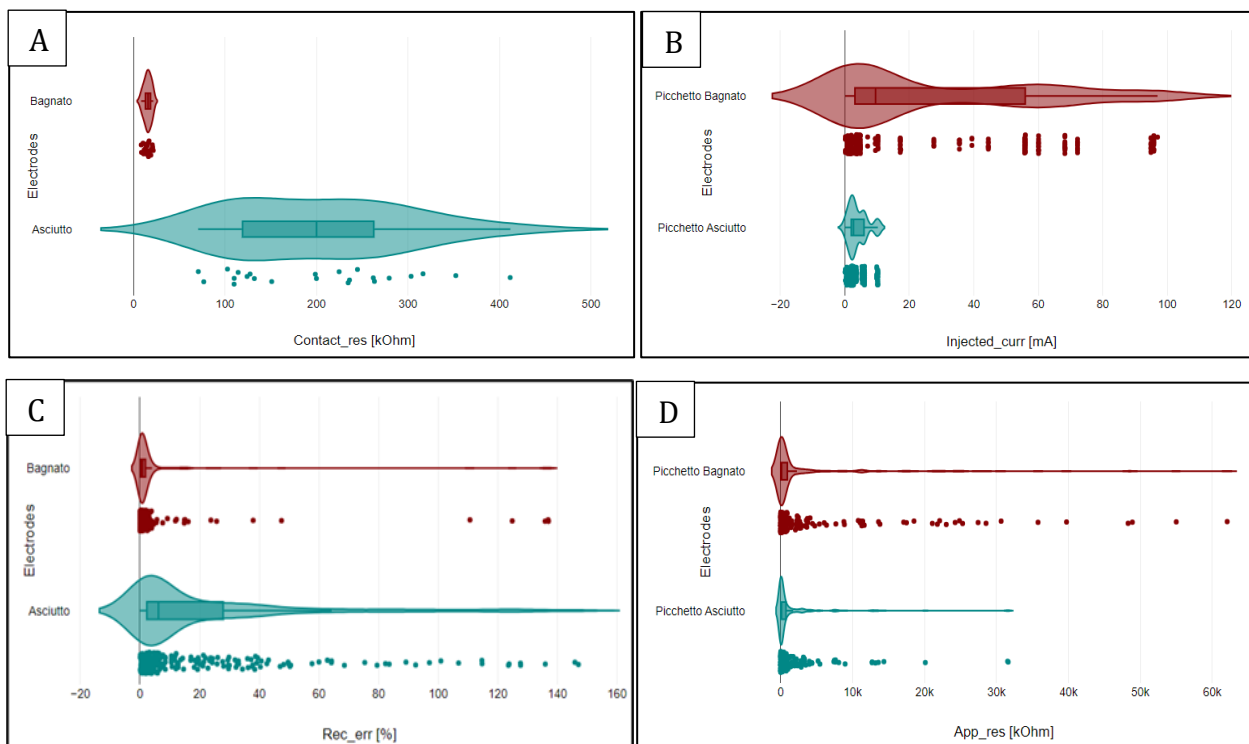


Figura 19. A: Confronto delle resistenze di contatto, B: Confronto della corrente iniettata, C: Confronto dell'errore reciproco. D: Confronto delle resistività apparenti

La Figura 19A illustra chiaramente che il grafico a violino dell'elettrodo bagnato è molto compatto, con valori concentrati verso il minimo di resistenza di contatto. Questo dimostra che l'utilizzo di acqua salata per bagnare l'elettrodo migliora il contatto galvanico con il suolo, garantendo un dataset di qualità superiore. Al contrario, l'elettrodo asciutto presenta resistenze di contatto significativamente più elevate, come evidenziato dalla distribuzione dei punti nel grafico.

Simili osservazioni valgono per la Figura 19B: la riduzione delle resistenze di contatto, ottenuta bagnando l'elettrodo, aumenta la corrente iniettata nel suolo, evidenziando chiaramente la differenza nella distribuzione dei punti rispetto all'elettrodo asciutto.

Per quanto riguarda l'errore reciproco (Figura 19C), l'elettrodo bagnato mostra la maggioranza dei punti vicini allo zero, come indicato dalla mediana, mentre l'elettrodo asciutto ha una distribuzione dei dati più ampia nello stesso intervallo, con una mediana più elevata, riflettendo un errore percentuale maggiore. La Figura 19D rappresenta le resistività apparenti: la maggior parte dei punti presenta una resistività apparente bassa, ma nel caso dell'elettrodo bagnato con acqua salata, alcuni punti mostrano valori elevati di resistività apparente.

Lo scopo principale della ERT però è di ottenere delle immagini rappresentative del sottosuolo e nella Figura 20 sono rappresentate due sezioni ottenute utilizzando il picchetto d'acciaio inox in condizioni asciutte e bagnate.

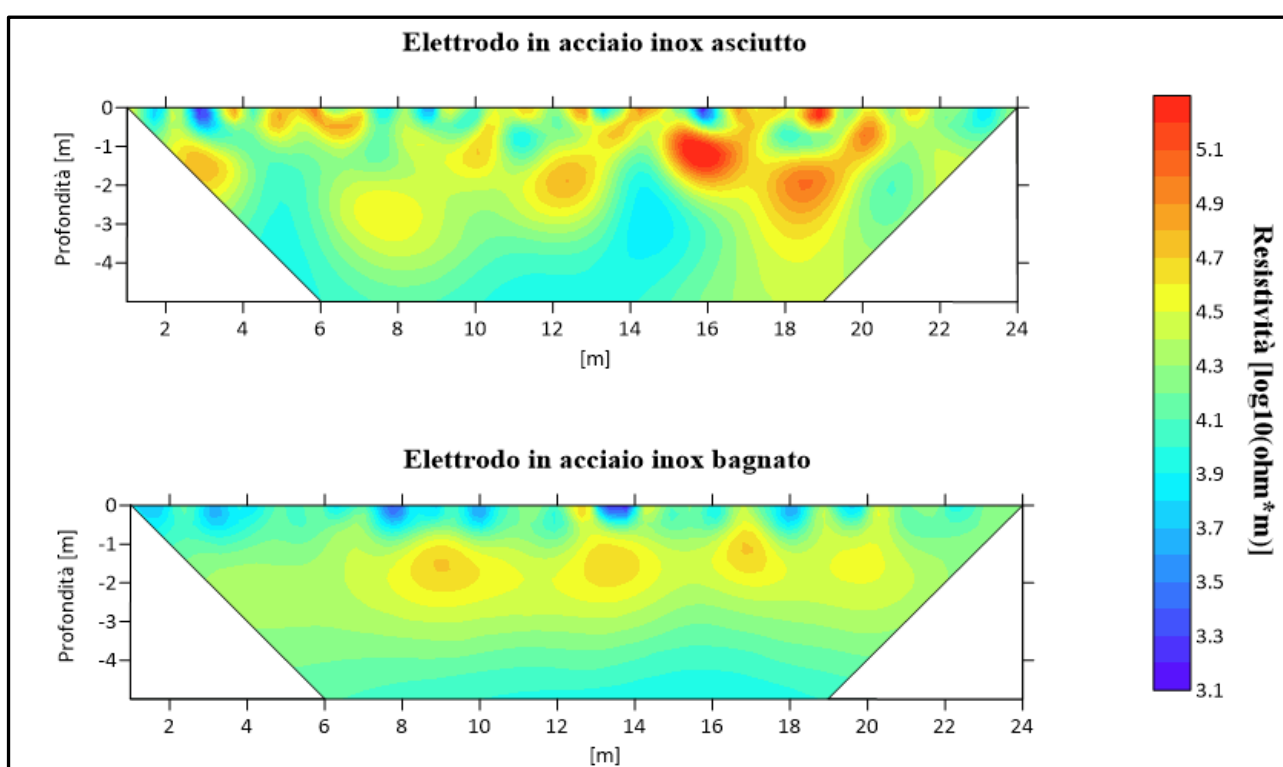


Figura 20. Sezioni di tomografia elettrica di resistività. In alto quella ottenuta con picchetto asciutto, in basso quella ottenuta con picchetto bagnato con acqua salata.

Come si può notare dalla prima sezione, ci sono molte zone del grafico con un alto valore di resistività che nella seconda non sono presenti. Quindi, vi è una marcata differenza di risultato che si ottiene con la prima configurazione rispetto alla seconda. Questo probabilmente è dovuto al fatto che bagnando l'elettrodo con acqua salata si crea un maggior contatto galvanico con il suolo e di conseguenza la resistività ottenuta risulta inferiore.

Queste affermazioni sono ulteriormente confermate dalla Figura 21 che rappresenta il confronto delle resistività invertite tra picchetto bagnato e asciutto.

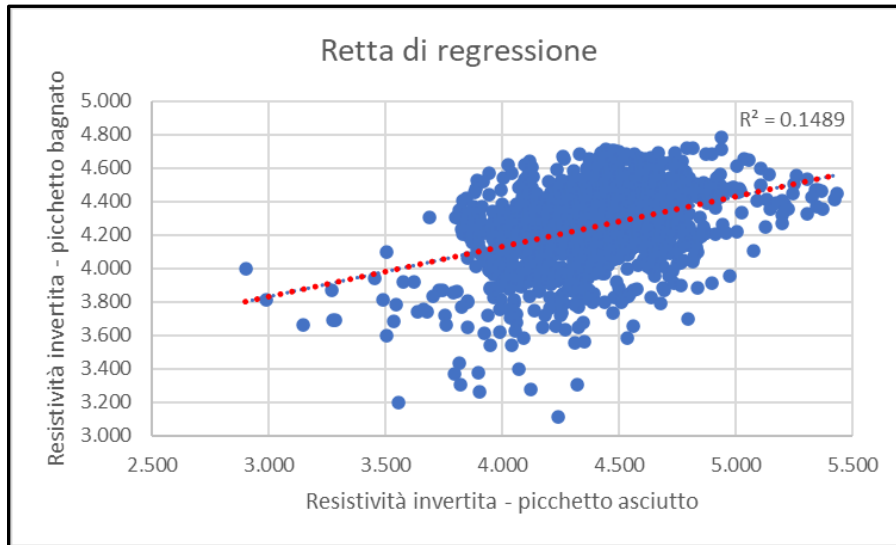


Figura 21. Retta di regressione ottenuta dal confronto tra le resistività invertite del picchetto bagnato e asciutto.

La distribuzione dei dati è molto ampia e la maggior parte di essi è lontana dalla retta di regressione. Ciò è confermato dal valore di R^2 ($R^2 = 0.1489$) che è molto basso e distante da 1 quindi vi è una bassa correlazione tra le due variabili in esame. Si deduce, infine, che i dati ottenuti con un metodo e con l'altro sono molto diversi tra loro e che il picchetto bagnato fornisce dei risultati migliori.

5.2 Elettrodo in acciaio inox bagnato ed Elettrodo tessile bagnato

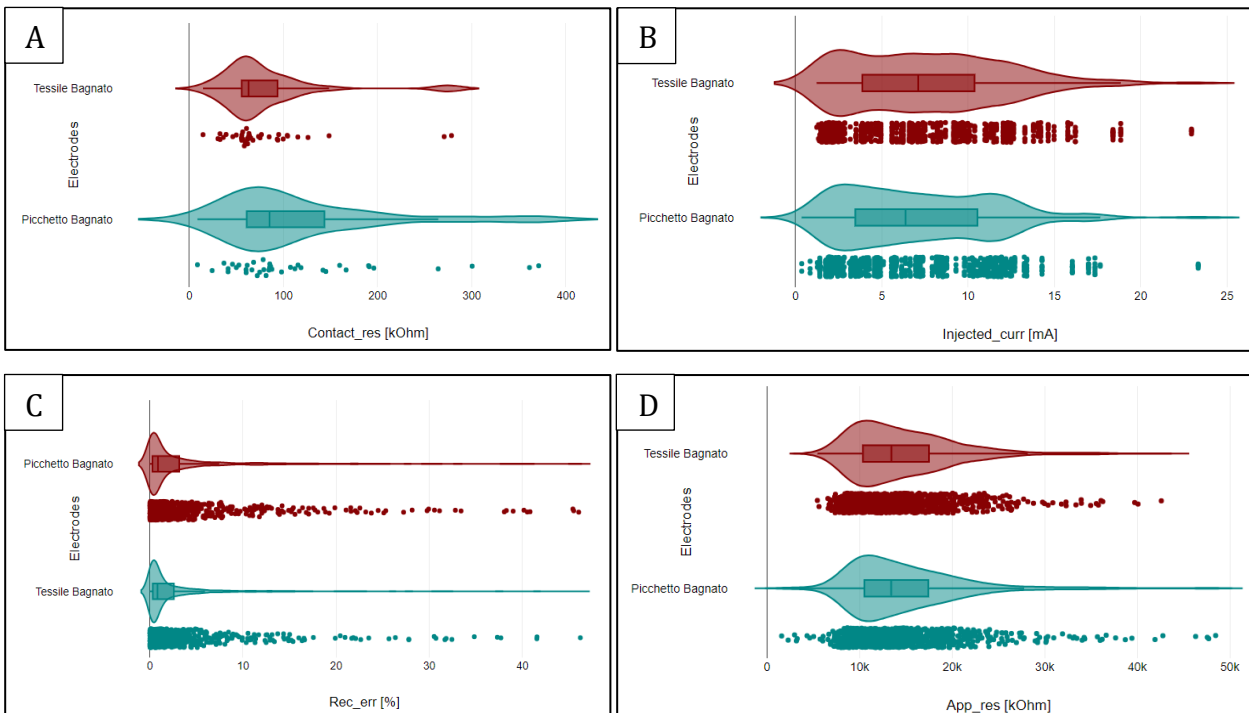


Figura 22. A: Confronto delle resistenze di contatto, B: Confronto della corrente iniettata, C: Confronto dell'errore reciproco. D: Confronto delle resistività apparenti

Rispetto alla Figura 19, in questo caso, i grafici a violino delle due tipologie di elettrodi sono molto simili in tutte e quattro le casistiche. Nella Figura 22A, si può notare come l'elettrodo tessile presenta una maggioranza dei punti a valori bassi di resistenza di contatto con solo due valori come outlier. D'altro canto, la distribuzione dei dati dell'elettrodo in acciaio inox bagnato è invece più ampia, con una mediana più elevata e dei valori più alti di resistenza di contatto. Questo potrebbe suggerire che l'elettrodo tessile garantisce un maggior contatto galvanico con il suolo. Nella Figura 22B però, la differenza di corrente iniettata è trascurabile, infatti i due grafici a violino sono molto simili. Si notano solamente delle lievi differenze nel grafico dell'elettrodo in acciaio inox dove ci sono più dati a bassi valori di corrente iniettata. In generale si può dire che, anche se c'è una differenza per quanto riguarda le resistenze di contatto, a livello di corrente iniettata i due elettrodi hanno la stessa efficienza. La Figura 22C invece, mostra come gli errori reciproci % siano molto simili, anche se per quanto riguarda l'elettrodo in acciaio, arrivano a valori più elevati. Infine, nella Figura 22A la mediana dei dati dell'elettrodo tessile e del picchetto sono quasi coincidenti ma nel secondo caso si ha una distribuzione dei dati più ampia con il massimo che arriva a circa 50 kOhm.

Le sezioni ottenute da questo confronto sono le seguenti:

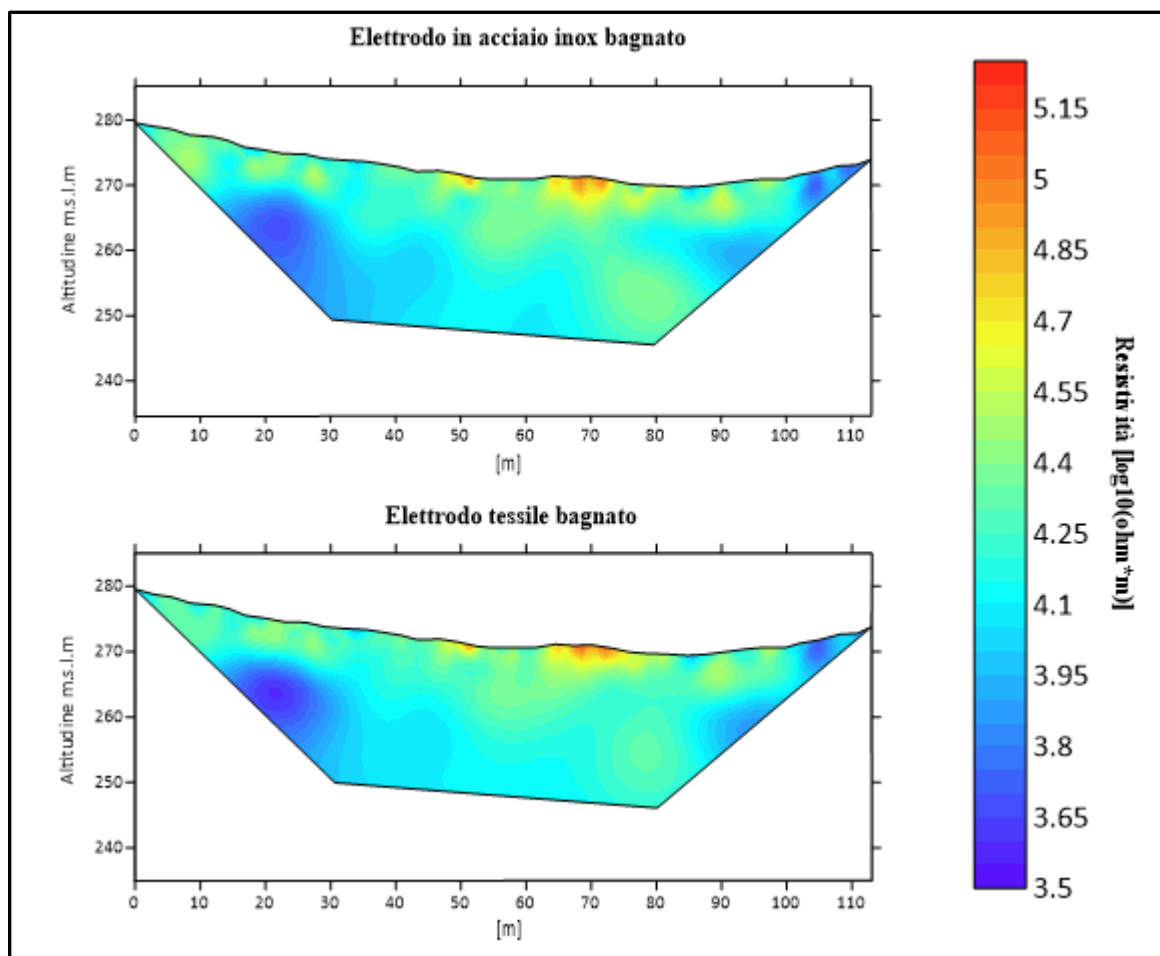


Figura 23. Sezioni di tomografia elettrica di resistività. In alto quella ottenuta con picchetto bagnato, in basso quella ottenuta con l'elettrodo tessile

Rispetto alle precedenti in questo caso le sezioni ottenute sono molto simili. Questo suggerisce che l'esecuzione di una ERT con picchetto bagnato o elettrodo tessile conduce a risultati finali quasi coincidenti e, quindi, l'elettrodo tessile potrebbe sostituire quello tradizionale.

La conferma ulteriore è data dalla retta di regressione risultante dal confronto delle resistività invertite ottenute con i due elettrodi.

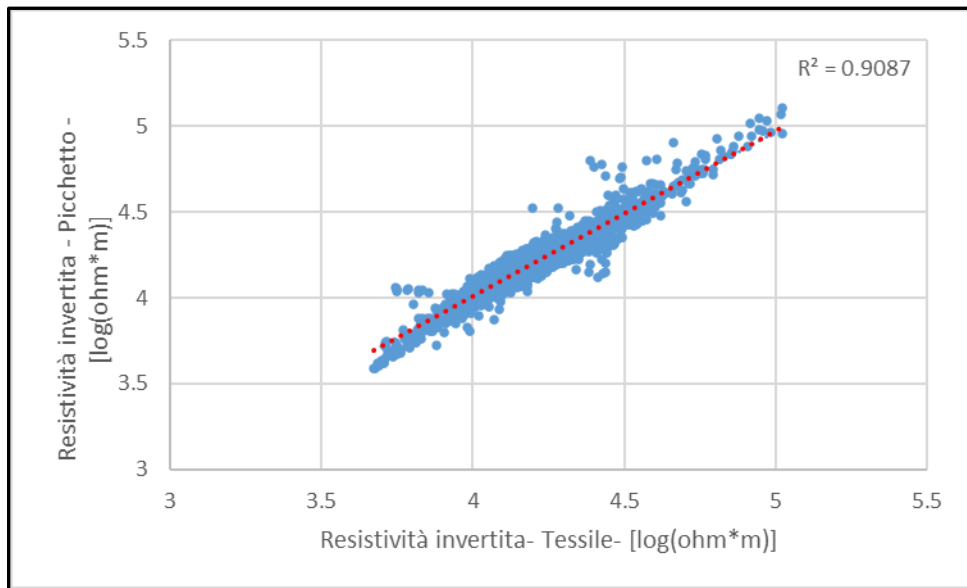


Figura 24. Retta di regressione ottenuta dal confronto delle resistività invertite tra elettrodo tessile e picchetto

I valori di resistività sono molto più vicini tra loro e talvolta sovrapposti, rispetto alla Figura 21. Di conseguenza la retta di regressione è migliore della precedente e dimostra una buona correlazione tra le variabili confrontate, come si vede anche dal valore di $R^2(0.9087)$. Da ciò si deduce che i dati ottenuti con il picchetto in acciaio inox e quelli ottenuti con l'elettrodo tessile sono molto simili tra loro.

5.3 Elettrodo in acciaio inox bagnato ed Elettrodo in rete metallica bagnato

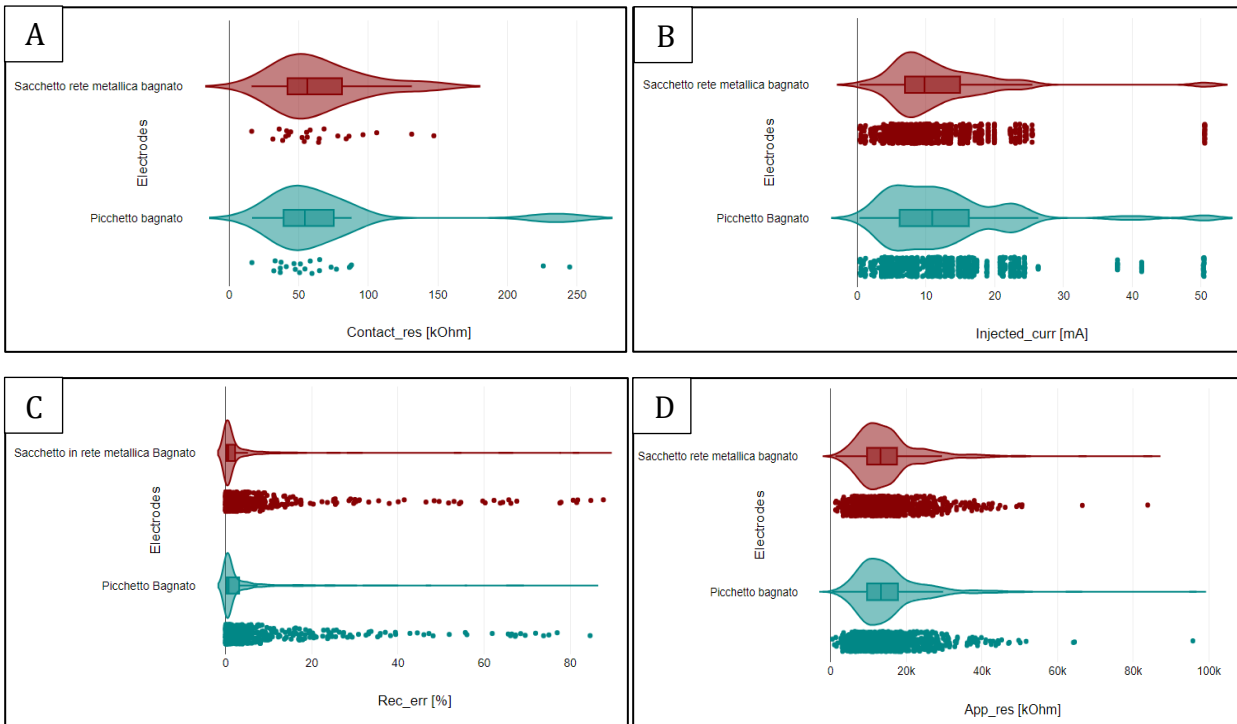


Figura 25. A: Confronto delle resistenze di contatto, B: Confronto della corrente iniettata, C: Confronto dell'errore reciproco. D: Confronto delle resistività apparenti

Anche in questo caso, per tutte e quattro le variabili, i grafici degli elettrodi sono molto simili. La Figura 25A mostra che le mediane dei dati sono quasi coincidenti. Tuttavia, la maggior parte dei punti del picchetto in acciaio bagnato si concentra a valori di resistenza di contatto tra 0 e 100 kOhm, mentre la distribuzione dei punti per l'elettrodo in rete metallica è più ampia, coprendo un range da 0 a 150 kOhm. In generale, le resistenze di contatto sono comparabili. La Figura 25B illustra due violin plot molto simili, ma nel grafico dell'elettrodo in acciaio inox bagnato si osserva una mediana più elevata dovuta probabilmente ad un più alto numero di dati superiori ai 30 mA rispetto all'elettrodo in rete metallica. Nella figura, 25C, si nota molto bene l'uguaglianza dei due grafici. La distribuzione dei valori è molto simile ma, nel caso dell'elettrodo in acciaio inox bagnato, c'è una distribuzione di punti maggiore a più alti valori di errore reciproco %. Infine, le resistività apparenti nella Figura 25D, ottenute sia con l'elettrodo di rete metallica che con il picchetto in acciaio inox bagnato sono molto simili. La maggior parte dei valori in entrambi i casi è concentrata dagli 0 ai 50 kOhm. Contestualmente ai confronti precedenti, qui di seguito sono rappresentate le due sezioni ottenute dall'elaborazione dei dati ottenuti.

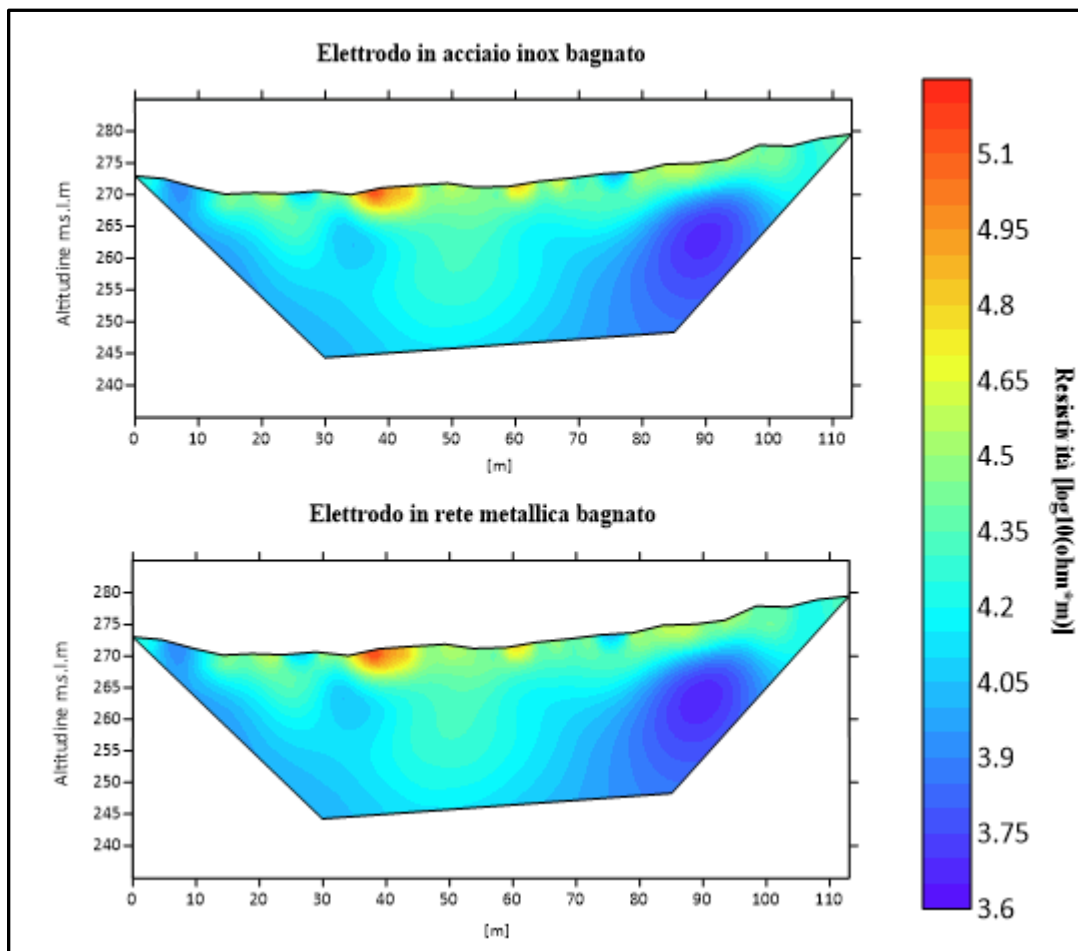


Figura 26. Sezioni di resistività. In alto quella ottenuta con picchetto bagnato, in basso quella ottenuta l'elettrodo in rete metallica bagnato di acqua salata.

Dalla Figura 26 si evince che le due sezioni sono quasi coincidenti, e nelle stesse zone i valori di resistività corrispondono. Questo dimostra come l'utilizzo del picchetto in acciaio inox o della rete metallica dia lo stesso risultato e, quindi, i due elettrodi hanno la stessa efficacia nell'ottenere un buon dataset e una buona rappresentazione del sottosuolo. Per poter avere una conferma ulteriore, è stato necessario, anche in questo caso, costruire una retta di regressione che mettesse a confronto le resistività invertite ottenute con i due elettrodi.

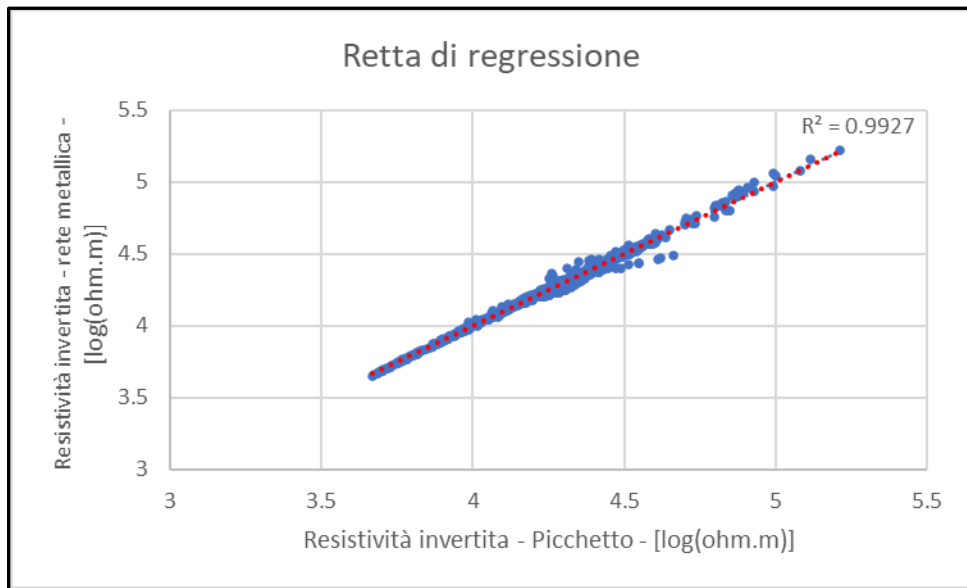


Figura 27. Retta di regressione ottenuta dal confronto delle resistività invertite tra picchetto ed elettrodo in rete metallica.

Questa retta di regressione è migliore delle due precedenti. La maggior parte dei punti tendono ad essere molto vicini tra loro, e il valore di $R^2(0.9927)$ molto vicino a 1 indica un'elevata correlazione tra le due variabili in esame. Di conseguenza, si può dire che la rete in acciaio bagnata di acqua salata fornisce le stesse prestazioni del tradizionale picchetto in acciaio inox bagnato e quindi, un dataset di elevata qualità e comparabile.

6. Conclusioni

Dall'analisi dei tre confronti eseguiti in precedenza si può facilmente dedurre che il metodo più efficiente dal punto di vista della qualità dei dati per eseguire un'indagine ERT è quello classico, ovvero utilizzando i picchetti in acciaio inox. Lo scopo di questo elaborato però, è quello di trovare delle alternative valide al metodo tradizionale che riescano a ridurre una serie di problemi che la ERT in ambienti complessi presenta. È importante, quindi, valutare diversi aspetti, per poter capire quale elettrodo è effettivamente il migliore dal punto di vista dei costi, della logistica e della facilità con la quale si stende la linea d'indagine.

Dal primo confronto eseguito, è stato dimostrato che l'utilizzo di acqua salata favorisce un maggior contatto galvanico con il suolo da parte dell'elettrodo, consentendo l'ottenimento di un miglior dataset finale. L'aspetto negativo però, è che l'acqua deve essere distribuita in ogni elettrodo e di conseguenza ne serve molta, e deve essere trasportata nel luogo d'indagine. Per limitare questi problemi logistici in questa tesi sono state proposte nuove alternative al fine di facilitare la raccolta dati e al contempo garantire una buona qualità degli stessi.

L'elettrodo tessile è la prima di queste alternative. È molto efficiente ma, d'altro canto, presenta alcune caratteristiche negative in comune con l'elettrodo tradizionale, quali il peso da trasportare elevato a causa della sabbia che contiene all'interno, e il costo, a causa del tessuto conduttivo.

In aggiunta, questo elettrodo presenta un'ulteriore problematica, cioè l'usura del tessuto stesso dovuta all'ossidazione dei composti metallici, che porta a doverlo sostituire frequentemente facendo lievitare ulteriormente i costi totali.

L'aspetto che viene migliorato utilizzando il sacchetto tessile conduttivo è che si necessita di un minor quantitativo di acqua salata e che consente di eseguire più stendimenti facilmente e velocemente, visto che non è necessario perforare il suolo, ma è sufficiente spostare gli elettrodi ed appoggiarli. Quindi, dal punto di vista della qualità dei dati che fornisce è un elettrodo molto valido, basti osservare la retta di regressione e il confronto grafico tra le sezioni di resistività, ma le limitazioni logistiche e di costo illustrate non lo indicano come un'opzione valida rispetto al tradizionale elettrodo in acciaio inox.

La migliore alternativa all'elettrodo tradizionale sembra essere l'elettrodo di rete metallica. I dati ricavati con questo tipo di elettrodo, come dimostrato dalla retta di regressione (Figura 27), sono coincidenti con quelli rilevati dal picchetto in acciaio inox. Questo aspetto è confermato ulteriormente dalle sezioni di resistività confrontate che sono identiche (Figura 26), di conseguenza, l'uso di un elettrodo piuttosto che dell'altro non incide sulla qualità dei dati e sul risultato finale. Inoltre, l'elettrodo di rete metallica ha molti più aspetti positivi rispetto al tradizionale e al sacchetto tessile conduttivo. Primo fra tutti il materiale di cui è costituito ha un peso irrisorio, molto inferiore rispetto

a quello utilizzato per le altre due tipologie di elettrodi, considerando che all'interno andrà inserita solo una spugna imbevuta di acqua salata. Inoltre, la rete metallica è anche molto economica, 15,00 €/m², e ciò comporta un elevato risparmio, rispetto soprattutto all'elettrodo tessile. Altra caratteristica positiva è che la rete non si ossida per cui non è necessario sostituirla frequentemente o adottare delle azioni di conservazione della stessa, di conseguenza, si avrà un risparmio non indifferente di tempo e denaro. Inoltre, non è necessaria un'elevata quantità di acqua per bagnare la spugna per cui si risolve parzialmente anche il problema del suo trasporto. Infine, la duttilità della rete metallica e la sua leggerezza consentono di inserire facilmente l'elettrodo fra i massi o appoggiarlo al suolo, senza dover perforare il terreno, consentendo l'esecuzione di più linee di indagine nello stesso sito in minor tempo rispetto al metodo tradizionale.

Concludendo, per i motivi elencati in precedenza, si pensa che l'elettrodo in rete metallica sia la più valida alternativa al picchetto tradizionale. È molto versatile, e utilizzabile sia in ambienti complessi come i rock glaciers o i depositi di frana, sia in contesti storici dove la perforazione è vietata, o in zone dove perforare il suolo potrebbe portare alla contaminazione delle falde acquifere.

7. Bibliografia

1. Appunti di lezione – Boaga J. A.A 2022-2023.
2. Arenson, L., Jakob, M., (2014). Periglacial geohazard risks and ground temperature increases. *Eng. Geol. Soc. Territory* 1, 233–237.
3. Binley, A. (2015) *Tools and Techniques: Electrical Methods, Treatise on Geophysics*, 2nd edition. Netherlands: Elsevier B.V.
4. Boaga J., 2016 – Il dato e l'interpretazione: il problema mal posto.
5. Buckel, J., Mudler, J., Gardeweg, R., Hauck, C., Hilbich, C., Frauenfelder, R., Kneisel, C., Buchelt, S., Blöthe, J. H., Hördt, A., and Bucker, M. (2023) Identifying mountain permafrost degradation by repeating historical electrical resistivity tomography (ERT) measurements. *The Cryosphere*, 17(7), 2919-2940.
6. Calkin, P.E., Haworth, L.A., Ellis, J.M., (1987). Rock glaciers of Central Brooks Range, Alaska, U.S.A. In: Giardino, J.R., Shroder, J.F., Vitek, J.D. (Eds.), *Rock Glaciers*
7. Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., Binley, A.M., 2006. A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics* 59, 244–259.
8. Chiarle, M., Geertsema, M., Mortara, G., and Clague, J. J.: Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps, *Glob. Planet. Change*, 202, 2021.
9. Crozier, MJ, 2010. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. *Geomorphology* 124, 260-267.
10. DATAtab – Software statistico - Mathias Jesussek, Hannah Volk-Jesussek, Austria, 2019.
11. Deline, P., Gruber, S., Delaloye, R., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A., Kirkbride, M., Krautblatter, M., Magnin, F., McColl, S., Ravel, L., and Schoeneich, P.: Ice Loss and Slope Stability in High-Mountain Regions, in: *Snow and Ice Related Hazards, Risks and Disasters*, edited by: Shroder, J. F., Haeberli, W., and Whiteman, C., Academic Press, Boston, 521– 561, ISBN 9780123948496, 2015
12. Dhakal, AS, Sidle, RC, 2004. Distributed landslide simulations for different rainfall conditions. *Idrol. Processi*. 18 (4), 757–776.
13. Duvillard, P.-A., Ravel, L., Marcer, M., and Schoeneich, P.: Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps, *Reg. Environ. Chang.*, 19, 1281–1293.
14. Foti S., Lai C.G., Rix G.J. & Strobbia C., 2015 - *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. CRC press ed.

15. Frauenfelder, R., Isaksen, K., Lato, M. J., and Noetzli, J.: Ground thermal and geomechanical conditions in a permafrost-affected high-latitude rock avalanche site (Polvartinden, northern Norway), 2018.
16. Giardino, J. R., Vitek, J. D., and Demorett, J. L.: A model of water movement in rock glaciers and associated water characteristics. In *Periglacial Geomorphology: Proceedings of the 22nd Annual Binghampton Symposium in Geomorphology*, pp. 159–184, 1992.
17. Guidoboni, E., Comastri, A., Boschi, E., 2005. The “exceptional” earthquake of 3 January 1117 in the Verona area (northern Italy): A critical time review and detection of two lost earthquakes (lower Germany and Tuscany). *Journal of Geophysical Research* 110, B12309.
18. Hadamard J., 1923 - *Lectures on Cauchy’s problem in linear partial differential equations*, Dover Phoenix editions, Dover Publications, New York.
19. Haeberli, W., Schaub, Y., and Huggel, C.: Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges, *Geomorphology*, 293, 405–417, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>, 2017.
20. Hauck, C., Kneisel, C., 2008. *Applied geophysics in periglacial environments*. Cambridge University Press.
21. Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2013. La classificazione di Varnes dei tipi di frana, un aggiornamento. *Frane* 11 (2), 167–194.
22. Ivy-Ochs, S., Martin, S., Campedel, P., Hippe, K., Alfimov, V., Vockenhuber, C., Andreotti, E., Carugati, G., Pasqual, D., Rigo, M., Viganò, A., 2017. Geomorphology and age of the Marocche di Dro rock avalanches (Trentino, Italy).
23. Kenner, R., Phillips, M., Beutel, J., Hiller, M., Limpach, P., Pointner, E., Volken, M., (2017). Factors controlling velocity variations at short-term, seasonal and multiyear time scales, Ritigraben rock glacier, western Swiss Alps. *Permafr. Periglac. Process.* 28, 675–684.
24. Keuschnig, M., Krautblatter, M., Hartmeyer, I., Fuss, C., and Schrott, L.: Automated Electrical Resistivity Tomography Testing for Early Warning in Unstable Permafrost Rock Walls Around Alpine Infrastructure, *Permafrost Periglac. Process.*, 171, 158–171.
25. Kofler, C., Mair, V., Gruber, S., (2021). When do rock glacier fronts fail? Insights from two case studies in South Tyrol (Italian Alps). *Earth Surf. Process. Landf.* 2021 (46), 1311–1327.
26. Luethi, R., Phillips, M., Lehning, M., (2017). Estimating non-conductive heat flow leading to intra-permafrost Talik formation at the Ritigraben Rock Glacier (Western Swiss Alps). *Permafr. Periglac. Process.* 28 (1), 183– 194.

27. Marcer, M., Ringsø Nielsen, S., Ribeyre, C., Kummert, M., Duvillard, P. A., Schoeneich, P., & Genuite, K. (2020). Investigating the slope failures at the Lou rock glacier front, French Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(1), 15-30.
28. Mourey, J., Lacroix, P., Duvillard, P.-A., Marsy, G., Marcer, M., Malet, E., and Ravanel, L.: Multi-method monitoring of rockfall activity along the classic route up Mont Blanc (4809 m a.s.l.) to encourage adaptation by mountaineers, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 445–460.
29. Osterkamp, T.E. and Burn, C.R. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*; North, G.R., Pyle, J.A., Zhan, F. Eds, 2003.
30. Patton, A. I., Rathburn, S. L., and Capps, D. M.: Landslide response to climate change in permafrost regions, *Geomorphology*, 340, 116–128.
31. Pavoni et al., 2024 - Application of conductive textile sachets as electrodes for electrical resistivity tomography (ERT) measurements collected on debris and coarse-blocky surfaces. 42nd GNGTS congress 13-16 February 2024 Ferrara (Italy).
32. Pavoni, M., Boaga, J., Carrera, A., Urbini, S., de Blasi, F., & Gabrieli, J., (2023a). Combining Ground Penetrating Radar and Frequency Domain Electromagnetic Surveys to Characterize the Structure of the Calderone Glacieret (Gran Sasso d'Italia, Italy). *Remote Sensing*, 15(10), 2615.
33. Pavoni, M., Boaga, J., J. Buckel, A. Bast, M. Lichtenegger, M. Phillips (2024). Verifying the reliability of conductive textile electrodes in ERT surveys performed on debris and coarse-blocky surfaces.
34. Pavoni, M., Boaga, J., Wagner, F. M., Bast, A., & Phillips, M. (2023b) Characterization of rock glaciers environments combining structurally-coupled and petrophysically-coupled joint inversions of electrical resistivity and seismic refraction datasets. *Journal of Applied Geophysics*, 105097.
35. Pavoni, M., Carrera, A., Boaga, J. (2022) Improving the galvanic contact resistance for geoelectrical measurements in debris areas: a case study. *Near Surf. Geophys.*
36. Sidle, RC, Ochiai, H., 2006. Frane: processi, previsione e uso del territorio. *Risorsa idrica. Monogr. Ser. 18.* AGU, Washington DC.
37. Surfer, User's guide. Contouring and 3D, surface mapping for scientists and Engineers. Golden Software, Inc, URL <http://www.goldensoftware.com>
38. Tarantola A., 2005 - *Inverse Problem Theory*, ed. SIAM
39. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff. R.E., 2010, *Applied geophysics*, Second Edition. Cambridge University Press.

40. Trener G.B., 1924 – Gli impianti idroelettrici della città di Trento, II. Geologia delle marocche. pp. 25-33. Fig. 3, tav, 1 carta geol., 1: 25.000. 1 carta isobatica 1: 25.000, Trento, Ripubblicato in: Scritti Geogr. E Geol. Studi Trent. Sci. Nat. XXXIV (2). pp. 319-340.
41. Tychonoff A.N. & Arsenin V.Y., 1977 - Solution of Ill-posed Problems, Washington, Winston & Sons ed.
42. Verifica della qualità dei dati di tomografia elettrica e relative influenze sui risultati d'inversione. Boriello A. 2016/2017.
43. Vitek, J.D., Giardino, J., (1987). Rock glaciers: a review of the knowledge base. In: Giardino, J.R., Shroder, J.F., Vitek, J.D. (Eds.), Rock Glaciers.